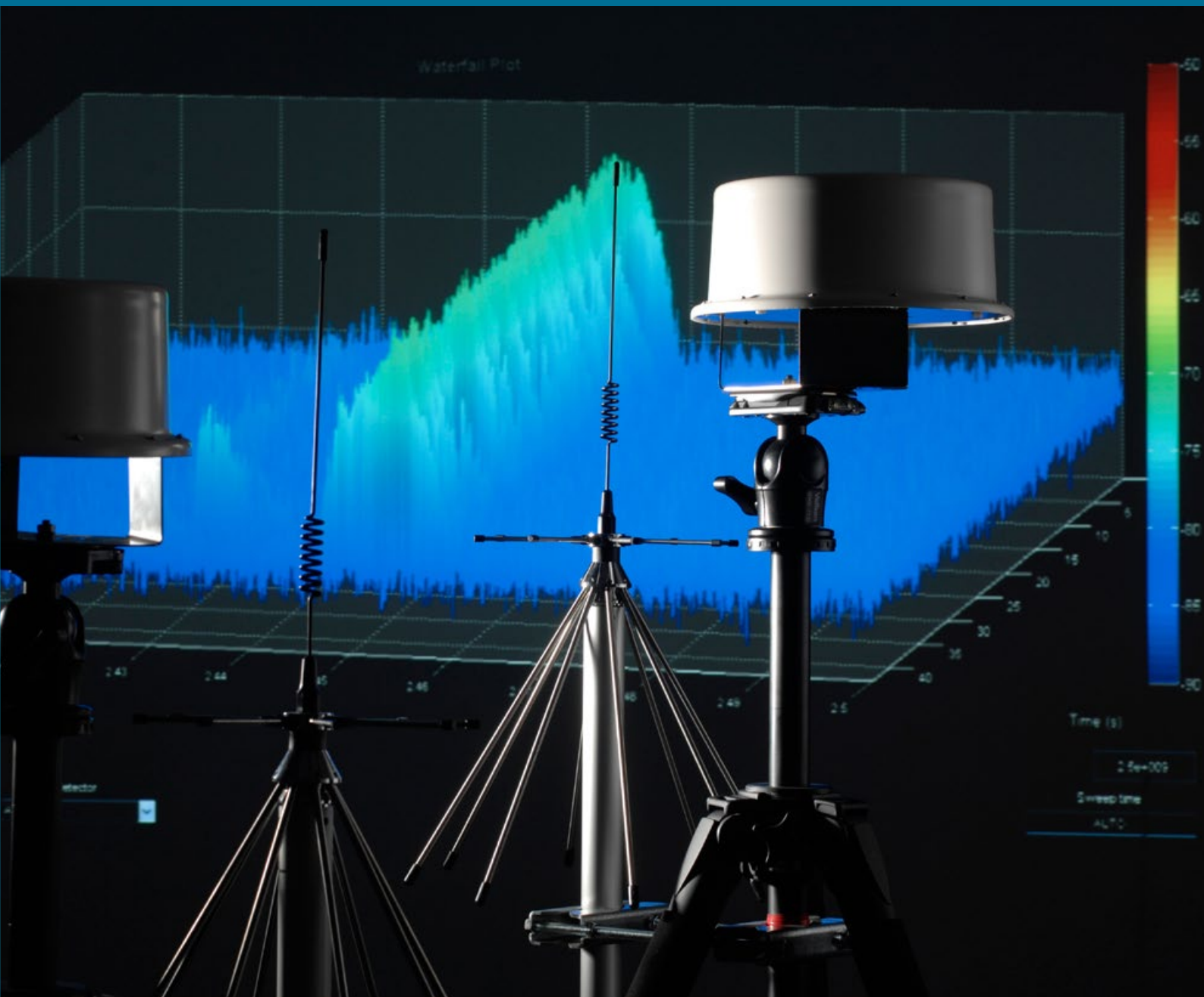


FUNKTECHNOLOGIEN FÜR DIE INDUSTRIE

Bessere Lösungen mit Cognitive Radio



ZUSAMMENFASSUNG

Der Bedarf an drahtlosen Technologien im industriellen Umfeld steigt stetig. Die Schlüsselfaktoren, die hinter den Anforderungen für drahtlose Technologien stehen, sind zum einen die Fernsteuerung, die Mobilität und Flexibilität gewährleistet, und zum anderen die kabellose und folglich verschleißfreie Übertragung von Daten. Beispielsweise können gerade drahtlose Sensoren und Aktuatoren auf beweglichen Teilen von Maschinen von drahtlosen Kommunikationssystemen profitieren. Da jede industrielle Anwendung unterschiedliche Anforderungen stellt, kann kein einzelnes drahtloses System alle Anforderungen gleichzeitig erfüllen. Deshalb ist es notwendig, verschiedene Systeme einzusetzen, die parallel arbeitend die unterschiedlichen Bedürfnisse erfüllen. Parallel arbeitende Systeme bringen jedoch in überlappenden industriellen Bereichen ein Koexistenzproblem mit sich. Gleichzeitig nutzen diese Systeme das verfügbare Funkspektrum momentan noch nicht vollständig aus. Diese unvollständige Nutzung des Funkspektrums ist Hauptthema dieser Studie. Die Wissenschaftler untersuchen den Einsatz von Cognitive Radio um zusätzliche Funkssysteme zuverlässig zu integrieren. Cognitive Radio kann sich selbst an die Veränderungen im Umfeld anpassen und somit die Bandbreite des Spektrums je nach Bedarf besser ausnutzen.

MOTIVATION

Drahtlose Technologien sind weltweit in allen Industriebetrieben unumgänglich geworden, da sie mehr Zuverlässigkeit, Mobilität und kontinuierliche, parallele Produktionsprozesse ermöglichen. Die künftigen, drahtlosen Technologien erfordern eine bessere Ausnutzung des Funkspektrums, in dem jede Frequenz einem industriellen Ablauf zugeteilt ist. Da das Funkspektrum keine unbegrenzte Ressource ist und diese ‚Knappheit‘ bereits heute ein grundlegendes Problem darstellt, sind neue Methoden für die drahtlose Kommunikation gefragt.

Die Fraunhofer ESK hat – basierend auf verfügbaren Technologien – eine Messkampagne durchgeführt, um die Anforderungen des neuen Industriezeitalters an das Funkspektrum zu erfüllen und die Ergebnisse in der vorliegenden Studie zusammengefasst. Im Zuge der Kampagne hat sich herausgestellt, dass das „Cognitive Radio“ Konzept die beste Lösung für eine effiziente Nutzung des Funkspektrums bietet. Cognitive Radio erlaubt es, dass jeder Industriezweig das ihm zur Verfügung stehende Funkspektrum mit modernen Technologien optimal nutzen kann, ohne dass Interferenzen zwischen den beteiligten Nutzern entstehen.



INHALTSVERZEICHNIS

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	5	COGNITIVE RADIO	22
TABELLENVERZEICHNIS	5	Klassifizierung von Cognitive Radio	22
DRAHTLOSE SYSTEME IN DER INDUSTRIE	6	Kernfunktionen von Cognitive Radio	23
Lizenzfreie Frequenzbänder	7	Überblick über die Systemarchitektur	27
433,05 - 434,79 MHz Band	8	Herausforderungen	28
868 - 870 MHz Band	8	Cognitive Radio unter realen Bedingungen	30
2400 - 2483,5 MHz Band	10	HÄUFIG GESTELLTE FRAGEN	31
5150 - 5875 MHz Band	15	LITERATURVERZEICHNIS	32
KOEXISTENZ	16	ABKÜRZUNGEN	33
Spektrum Management	16		
Gegenwärtige Frequenznutzung	17		
Lösungen für die Frequenzknappheit	19		



ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Position der geeigneten, für Europa lizenzfreien Bänder im elektromagnetischen Spektrum.	6
Abb. 2: WLAN kann in 13 Kanälen mit drei nicht-überlappenden Kanälen genutzt werden.	11
Abb. 3: Bluetooth-Signale nutzen über einen bestimmten Zeitraum verschiedene Bereiche des Funkspektrums, was den Einfluss von Fading verringert.	12
Abb. 4: Der IEEE 802.15.4-Standard definiert 16 Kanäle im 2,4 GHz Band mit einem Kanalabstand von 5 MHz und einer Signalbandbreite von 2 MHz.	13
Abb. 5: Aufgrund nicht idealer Abschirmung weisen viele Mikrowellenöfen geringe Leckstrahlungen auf.	14
Abb. 6: Verschiedene drahtlose Technologien, die im 2,4 GHz ISM-Band zum Einsatz kommen.	16
Abb. 7: Spektrum parallel arbeitender drahtloser Systeme, gemessen im Industrial Lab der Fraunhofer ESK.	17
Abb. 8: In der aktuellen Verteilung ist das Spektrum komplett belegt.	19
Abb. 9: Die Neubelegung des Frequenzbandes schafft Platz für eine weitere Übertragung im Spektrum.	20
Abb. 10: Beim Underlay-Ansatz werden die vorhandenen Systeme mit einem breitbandigen Signal mit geringer Leistungsdichte unterlegt, das für eine zusätzliche Übertragung verwendet werden kann.	21
Abb. 11: Die zugeordneten Frequenzen werden nicht ununterbrochen genutzt, die hinterlassenen Lücken können für weitere Übertragungen mit der Cognitive Radio-Technologie herangezogen werden.	21
Abb. 12: Cognitive Radio Cross-Layer-Ansatz.	27
Abb. 13: Hidden Terminal-Problem aufgrund eines schwachen Signals.	28
Abb. 14: Hidden Terminal-Problem aufgrund von Abschirmung.	29

TABELLENVERZEICHNIS

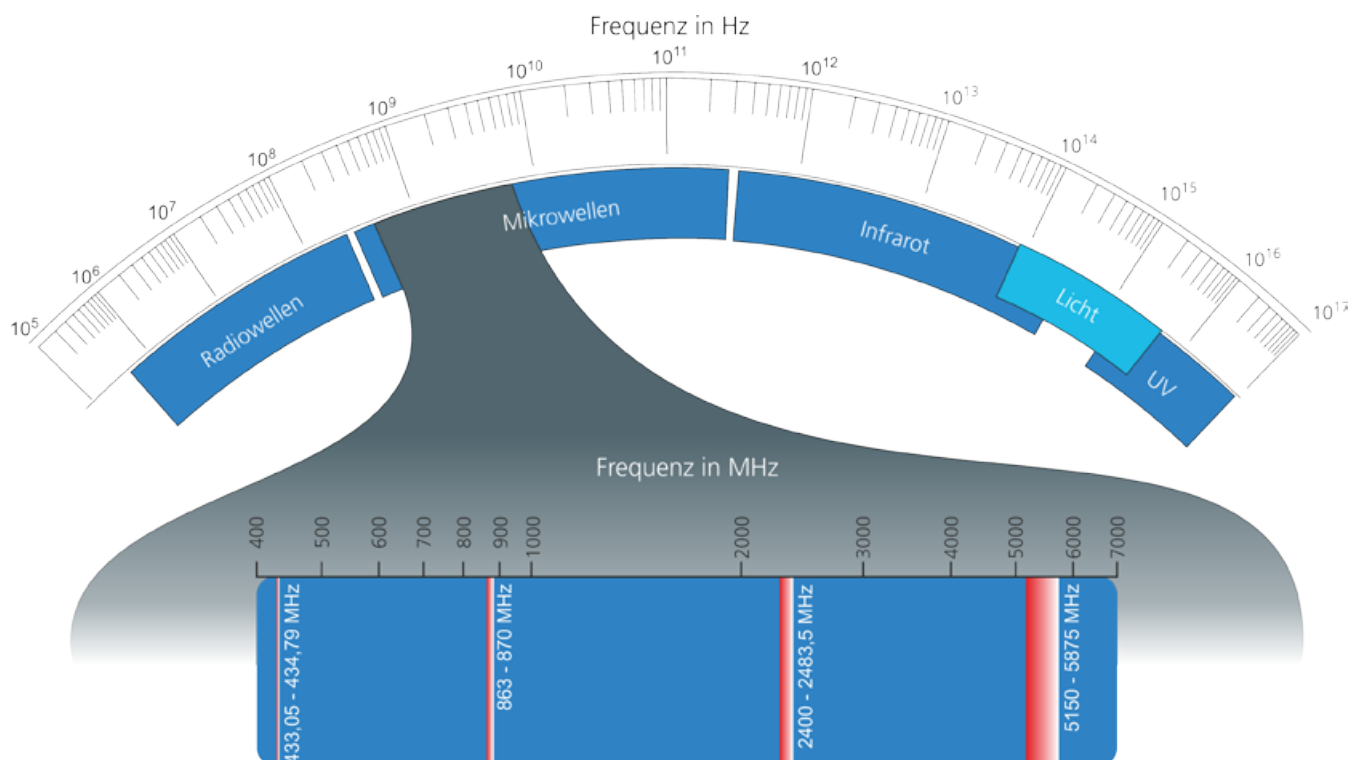
Tabelle 1: Eigenschaften und Richtlinien ausgewählter lizenzfreier Bänder in Europa.	7
Tabelle 2: Nutzungsbedingungen für den Frequenzbereich von 868 - 870 MHz.	9
Tabelle 3: Überblick der IEEE-Standards für WLAN.	11
Tabelle 5: Nutzungsbedingungen für das 5725 – 5875 MHz Band.	15
Tabelle 4: Gemessene Auslastung des Spektrums in einem Industriebetrieb.	18

DRAHTLOSE SYSTEME IN DER INDUSTRIE

Drahtlose Systeme sind im industriellen Umfeld bereits etabliert. Von RFID bis High-End-Datenübertragung – die Industrie ist abhängig von drahtlosen Technologien. Diese sind für die Industrie und die Automatisierung interessant, denn sie gewährleisten Flexibilität, reduzieren den Aufwand für Verkabelung und somit die Kosten und bieten neue Möglichkeiten kritische Informationen zu erfassen und zu verbreiten. Sie ermöglichen flexible Kommunikationsansätze mit entfernten Geräten, wenn drahtgebundene Verbindungen nicht realisierbar sind und erschließen ganz neue Anwendungsfelder z. B. Messungen und Kontrolle von bewegten Objekten sowie die Lokalisierung und Zuordnung von mobilen Geräten.

Das drahtlose Medium ist das für jedermann zugängliche elektromagnetische Spektrum. Der Radiocommunication Sector (ITU-R) der Internationalen Fernmeldeunion hat Regelungen für die Nutzung von Frequenzen und für die Übertragung von elektromagnetischer Strahlung verabschiedet. Die ITU-R hat das Spektrum im Wesentlichen in zwei Kategorien aufgeteilt: in lizenzierte und nicht lizenzierte Frequenzbereiche. Im industriellen Bereich – vor allem in der Automatisierung – werden im lizenzfreien Bereich nur einige wenige Frequenzen sehr häufig genutzt.

Abb. 1: Position der geeigneten, für Europa lizenzfreien Bänder im elektromagnetischen Spektrum.



LIZENZFREIE FREQUENZBÄNDER

Für Europa sind die geeignetsten lizenzfreien Bänder in Abbildung 1 dargestellt. Für industrielle Anwendungen sind WLAN, Bluetooth, ZigBee, WirelessHart und WISA die gängigen Standards. Diese benutzen das lizenzfreie 2,4 GHz Band. Das Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) hat diese drahtlosen Standards grundlegend mit Betriebsfrequenz, Anwendungsfeldern und Datenraten definiert. Teile des lizenzfreien Funkspektrums sind auch als der „Industrial, Scientific and Medical-Frequenzbereich (ISM)“ bekannt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die meist genutzten lizenzfreien Frequenzbänder in Europa.

Tabelle 1: Eigenschaften und Richtlinien ausgewählter lizenzfreier Bänder in Europa.

Frequenzband MHz	Max. Sendeleistung mW	Relative Frequenzbelegungsdauer	Eigenschaften
433,05 - 434,79	10	10 %	gute Durchdringung, reduzierte Datenrate, Störungen durch Amateurfunk möglich
868 - 870	5 - 500	< 0,1 % (teilweise)	hohe Reichweite, reduzierte Datenrate
2400 - 2483,5	10 - 100	Keine Einschränkung	Weltweit verfügbar, hohe Bandbreite, stark genutzt
5725 - 5875	25 - 1000	Keine Einschränkung	Hohe Bandbreite, schlechte Durchdringung da quasioptische Ausbreitung

Der größte Vorteil des lizenzfreien Spektrums ist – verglichen mit dem lizenzierten Bereich –, dass Geräte, die den Bereich nutzen, ohne weitere Einschränkung betrieben werden können, sofern die gesetzlich festgelegten Richtlinien eingehalten werden. Der Nachteil ist, dass diese Frequenzbereiche gerade aufgrund ihrer Lizenzfreiheit oft genutzt werden und deshalb Interferenzen sehr wahrscheinlich sind, weil viele Systeme auf derselben Frequenz arbeiten.

433,05 - 434,79 MHZ BAND

In Deutschland hat die Bundesnetzagentur den Bereich von 433,05 - 434,79 MHz für Geräte mit kurzer Reichweite (short range devices, SRD) geschützt. Funkanwendungen, die diesen Bereich zur Kommunikation nutzen, müssen Einschränkungen bei der Übertragung beachten. Ihre von der Antenne effektiv abgestrahlte Leistung (effective radiated power, ERP) darf nicht größer als 10 mW sein. Die Geräte sind deshalb auch unter der Bezeichnung „Geräte mit geringer Sendeleistung“ (low power device, LPD) bekannt. SRDs sind vielseitige Geräte für den professionellen und privaten Gebrauch. Sie arbeiten im Bereich von 433,05 bis 434,79 MHz auf insgesamt 69 Kanälen.

SDRs werden beispielsweise genutzt für:

- Automatisierte Zählerablesung
- Drahtlose Sensoranwendungen
- Funk-Alarmanlagen
- Funkanwendungen zur Identifikation

Man muss beachten, dass die Frequenzen von 430 - 440 MHz primär den Amateurfunkdienst zugewiesen sind, welcher Störungen verursachen kann. Zusätzlich dürfen SRDs Funkamateure nicht stören, da diese in diesem Bereich als Primärnutzer Vorrang haben.

868 - 870 MHZ BAND

In Europa ist der Frequenzbereich von 868 - 870 MHz ebenfalls lizenzfrei. Typische Anwendungen sind etwa Alarmanlagen und Feuermeldesysteme. Einige RFID-Systeme nutzen denselben Frequenzbereich zur Kommunikation. Der Bereich von 868 - 870 MHz ist in Unterbereiche unterteilt, um gegenseitige Interferenzen zu minimieren. Für jeden Unterbereich gelten spezifische Parameter. Tabelle 2 stellt die Details zu den einzelnen Unterbereichen dar.

Frequenz MHz	Anwendungsbereich	Max. Sendeleistung mW	Relative Frequenz- belegungsdauer %
868 - 868,600	Schmal- und Weitbandmodulation	25	≤ 1,0
868,700 - 869,200	Schmal- und Weitbandmodulation	25	≤ 0,1
869,300 - 869,400	25 kHz Kanalaraster	10	Keine Einschränkung
869,400 - 869,650	Schmal- und Weitbandmodulation, 25 kHz Kanalaraster	500	≤ 10
869,700 - 870	Schmal- und Weitbandmodulation	5	Keine Einschränkung

Tabelle 2: Nutzungsbedingungen für den Frequenzbereich von 868 - 870 MHz.

Das Frequenzband von 869,400 bis 869,650 MHz kann komplett oder teilweise als kohärenter Kanal für die schnelle Datenübertragung verwendet werden, wenn die Kapazität der einzelnen 25 kHz-Kanäle nicht ausreicht.

Die größten Vorteile dieses Frequenzbereichs sind eine gute Durchdringung, die hohe Reichweite – speziell mit den erlaubten 500 mW – sowie eine feste relative Frequenzbelegungsdauer (engl. duty cycle), die eine zuverlässigere Übertragung ermöglicht. Diese Vorteile zeigen sich ebenfalls in der Anzahl der standardisierten und proprietären Lösungen. Drahtlose Standards wie ZigBee, Wireless M-bus und KNX-RF und viele proprietäre Lösungen wie EnOcean, Z-Wave, etc. nutzen das lizenzfreie 868 MHz-Band.

2400 - 2483,5 MHz BAND

Der Trend zur Nutzung des 2,4 GHz Bands ist besonders durch dessen weltweite lizenzfreie Nutzung bedingt. Zusätzlich stellt es eine größere Bandbreite zur Verfügung als jedes andere lizenzfreie Sub-1 GHz Band. Da es gegenüber den typisch industriellen Interferenzquellen, wie z. B. Lichtbogenschweißen, Punktschweißen, Leistungsschaltanlagen Relais, Antriebe, Induktionsheizgeräten, etc. (2), sehr robust ist, wird das 2,4 GHz Band gern genutzt. Technologien, die das 2,4 GHz ISM-Band nutzen, sind:

- WLAN (IEEE 802.11)
- Bluetooth (IEEE 802.15.1)
- Wireless Personal Area Networks (IEEE 802.15.4)
- Mikrowellenöfen
- Überwachungskameras

Die ersten drei Technologien sind Teil der IEEE 802-Standardfamilie und haben sich hinsichtlich ihrer Robustheit und ihres Langzeitzugriffs bewehrt. Des Weiteren sind sie darauf ausgelegt, zuverlässig in der gleichen Umgebung zu koexistieren. Deshalb nutzt die Industrie diese Technologien weitgehend für die Datenübertragung in Automatisierungsprozessen. Besorgnis macht in diesem Zusammenhang aber die große Anzahl von Nutzern und die damit verbundene Überfüllung des Spektrums. In Folge dessen sollte vor der Installation eines neuen Funksystems zunächst über die gegenwärtige Belegung und Auslastung des 2,4 GHz Bands nachgedacht werden.

Dies bedingt auch die Analyse jeder einzelnen Technologie. Im Folgenden werden einige der Technologien analysiert und deren Belegung des Spektrums, wie sie an der Fraunhofer ESK in München gemessen wurden, betrachtet.

IEEE 802.11

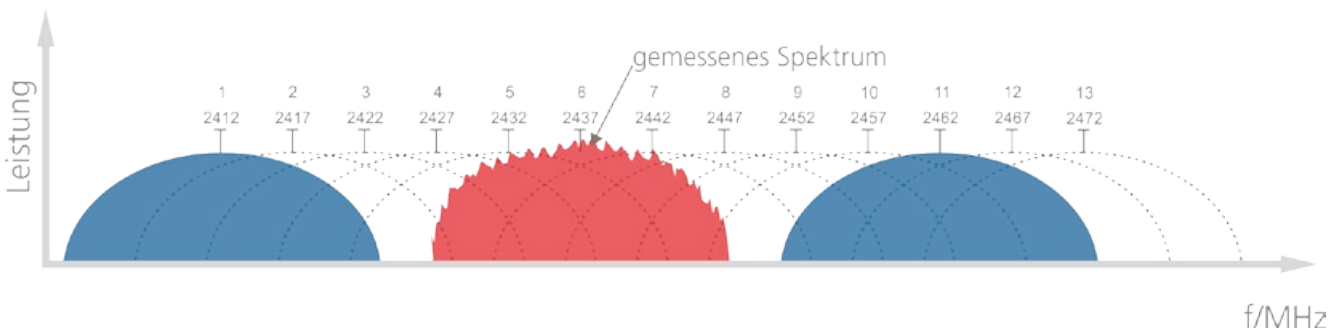
Wireless Local Area Network (WLAN) ist ein Funkstandard nach IEEE 802.11. WLAN ist hauptsächlich durch die Datenraten charakterisiert, mit vier unterschiedlichen Typen von IEEE-Standards: IEEE 802.11 a, b, g und n. Nur IEEE 802.11 b, g und n teilen sich das 2,4 GHz ISM-Band. Tabelle 3 gibt weitere Informationen zu den unterschiedlichen WLAN-Standards.

IEEE Standard	Frequenz GHz	Bandbreite	Modulation
IEEE 802.11 a	5	20	OFDM
IEEE 802.11 b	2,4	20	DSSS
IEEE 802.11 g	2,4	20	OFDM/DSSS
IEEE 802.11 n	2,4 / 5	20 / 40	OFDM

Tabelle 3: Überblick der IEEE-Standards für WLAN.

Abbildung 2 zeigt das Spektrum eines WLAN-Systems, das wir im Rahmen einer Messreihe im Bürogebäude der Fraunhofer ESK gemessen haben, sowie zwölf weitere mögliche WLAN-Kanäle. Zudem arbeiten IEEE 802.11 b und g in Europa mit 13 Kanälen und einer jeweiligen Bandbreite von 22 MHz. Als Konsequenz sind nur drei sich nicht-überlappende Kanäle verfügbar und in Abbildung 2 aufgeführt.

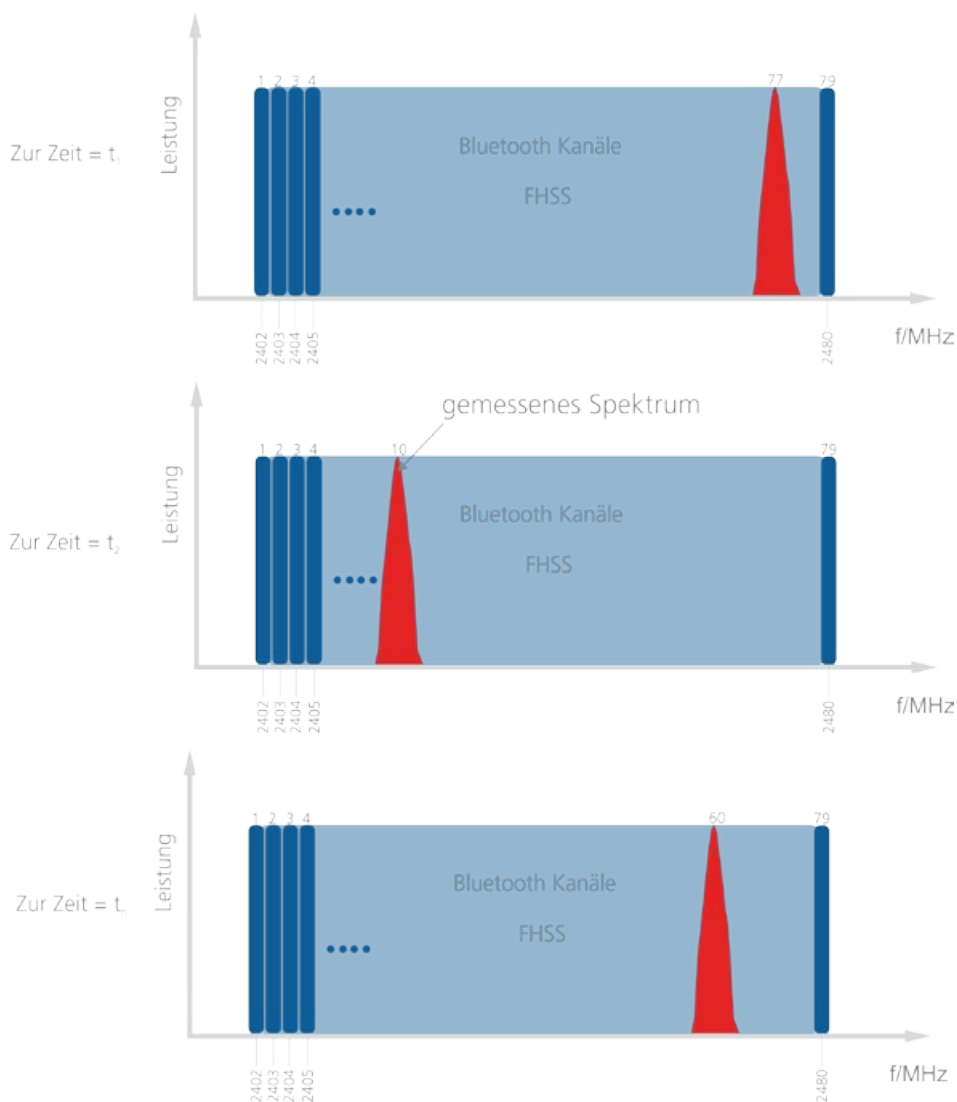
Abb. 2: WLAN kann in 13 Kanälen mit drei nicht-überlappenden Kanälen genutzt werden.



IEEE 802.15.1

IEEE 802.15.1 standardisiert die Bluetooth-Technologie. Auch der WISA Standard (Wireless Interface for Sensors and Actuators) basiert auf der physikalischen Schicht des IEEE 802.15.1. Für die Industrie sind bei Bluetooth Anwendungsprofile festgelegt, z. B. das Profil für serielle Datenübertragung (Serial Port Profile, SPP) und Personal Area Networks (PAN) für die transparente Ethernet-Übertragung. Bluetooth ist hauptsächlich für Kontroll- und Parametrierungsaufgaben ausgelegt, WISA hingegen für den Einsatz in Regelkreisen in der Automatisierungstechnik.

Abb. 3: Bluetooth-Signale nutzen über einen bestimmten Zeitraum verschiedene Bereiche des Funkspektrums, was den Einfluss von Fading verringert.

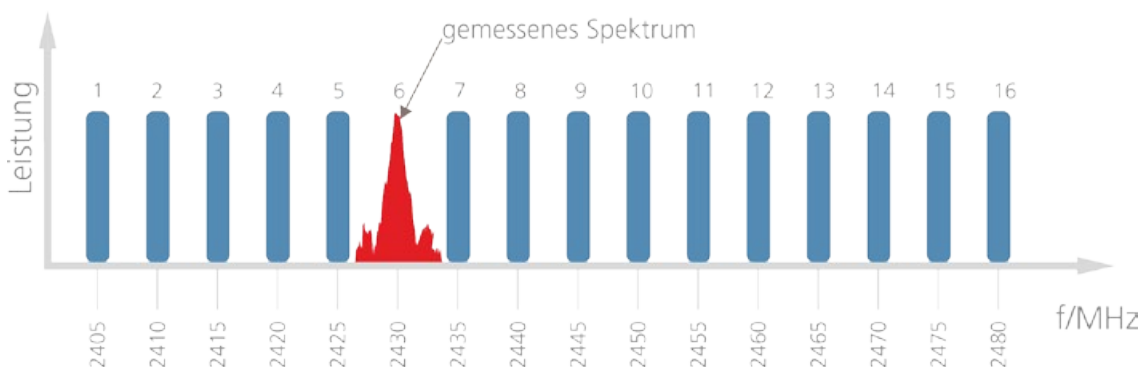


Bluetooth und WISA nutzen beide das Frequenzsprungverfahren (Frequency Hopping Spread Spectrum, FHSS). Dabei springt Bluetooth 1.600 Mal in der Sekunde, WISA 500 Mal. Sie haben jeweils 79 Frequenzsprungkanäle zwischen 2,402 GHz und 2,48 GHz mit einer Bandbreite von je einem MHz, wodurch viele Systeme parallel betrieben werden können. Bluetooth und WISA nutzen außerdem adaptives FHSS: Gestörte Kanäle werden für kurze Zeit ausgespart. Da FHSS Probleme wie Fading aufgrund von Mehrwegausbreitung umgehen kann, eignet sich die Technologie hervorragend für den Industrieinsatz. Die Belegung der Kanäle nach IEEE 802.15.1 ist dynamisch, d. h. es erfolgen schnelle Frequenzsprünge bei Bluetooth und WISA. Abbildung 3 zeigt potenzielle Bluetooth-Kanäle (in Blau) und einen jeweils zu verschiedenen Zeiten gemessenen Bluetooth-Kanal.

IEEE 802.15.4

Der IEEE 802.15.4-Standard legt die Schichten für Bitübertragung (physical layer, PHY) und den Kanalzugriff (medium access layer, MAC) für die Wireless Personal Area Networks (WPAN) fest. ZigBee und WirelessHART, die weitgehend in der Industrie verwendet werden, nutzen beide als Basis den IEEE 802.15.4-Standard. WirelessHART wurde speziell für Überwachung, Diagnose und langsame Steuerung in der Prozessautomatisierung entwickelt und nutzt Routing mit mehreren Zugangspunkten, um einen weiten Bereich abzudecken. Die Routingtopologie hilft bei einer Störung des aktuellen Pfades Alternativpfade zu finden. ZigBee unterstützt sowohl Maschen- als auch Sterntopologie, die auch robust sind. IEEE 802.15.4 kann in Europa mit 17 Kanäle betrieben werden. 16 davon befinden sich im 2,4 GHz Band und einer im 868 MHz-Band. Abbildung 4 zeigt die definierten Kanäle und ein gemessenes Frequenzspektrum von 802.15.4 im 2,4 GHz Band.

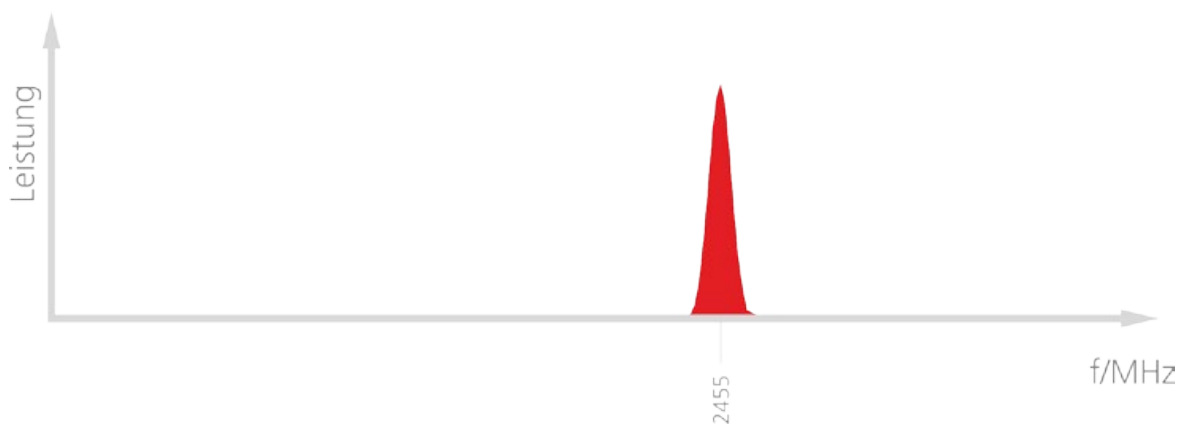
Abb. 4: Der IEEE 802.15.4-Standard definiert 16 Kanäle im 2,4 GHz Band mit einem Kanalabstand von 5 MHz und einer Signalbandbreite von 2 MHz.



Mikrowellen

Mikrowellenöfen arbeiten normalerweise bei ca. 2,45 GHz nach dem Prinzip der nicht-ionisierenden Strahlung. Die Partikel im bestrahlten Material absorbieren die Energie der Mikrowellen und erhitzen sich. Der Prozess ist bekannt als dielektrisches Erwärmung. Mikrowellenöfen haben eine Leistung von 700 W bis – insbesondere für industrielle Anwendungen – 100 KW. Aufgrund von nicht idealer Abschirmung kommt es bei den meisten Mikrowellenöfen zu geringen Leckstrahlungen im Bereich von einigen Milliwatt. Infolgedessen können Geräte der IEEE 802-Familie, die nur einige Milliwatt für die Übertragung nutzen, durch Mikrowellenöfen gestört werden. Abbildung 5 zeigt die gemessene Leckstrahlung eines 700 W-Mikrowellenofens.

Abb. 5: Aufgrund nicht idealer Abschirmung weisen viele Mikrowellenöfen geringe Leckstrahlungen auf.



Industrielle Anwendungen

Im industriellen Umfeld gibt es vielfältige Einsatzgebiete für Mikrowellen. Die bisher eingesetzten induktiv erwärmenden Systeme zum Trocknen von Lebensmitteln werden heute häufig durch Mikrowellen ersetzt. Große Mikrowellengeräte finden in der Industrie als Alternative für Autoklaven Verwendung – da so Energie gespart werden kann. Andere Anwendungen von Mikrowellenöfen sind: die Trocknung von keramischen Materialien, von Pharmazeutika, das Verschäumen und die Behandlung von Kunststoffen. Deshalb werden Mikrowellengeräte in fast allen Automatisierungsbranchen für verschiedene Zwecke eingesetzt. Eine simultane Verwendung von Mikrowellenöfen in Verbindung mit Sendern nach dem IEEE 802-Standard, die bei geringer Leistung arbeiten, kann starke Interferenzen verursachen. Eine kontinuierliche Emission von Mikrowellen kann das Funkspektrum um 2,45 GHz komplett füllen.

5150 - 5875 MHz Band

Das 5150 – 5875 MHz Band ist in mehrere Bereiche unterteilt, das Lower-, Medium-, Higher-, Upper- und ISM-Band. Dabei überlappen sich das Upper-Band und ISM-Band. Das Upper-Band ist in Europa für gewerbliche Zwecke reserviert, Meldepflichtig und somit nicht lizenzfrei.

Sub-Bänder	Bereich GHz	Max. Sendeleistung mW	Nutzungsbedingungen
L-Band	5,150 - 5,250	200	Nutzung ausschließlich innerhalb geschlossener Räume mit DFS und TPC
M-Band	5,250 - 5,350	200	Nutzung ausschließlich innerhalb geschlossener Räume mit DFS und TPC
H-Band	5,470 - 5,725	1000	Nutzung innerhalb und außerhalb geschlossener Räume mit DFS und TPC
U-Band	5,725 - 5,825	In Europa nicht lizenzfrei	In Europa nicht lizenzfrei
ISM	5,725 - 5,875	25	Keine Einschränkungen

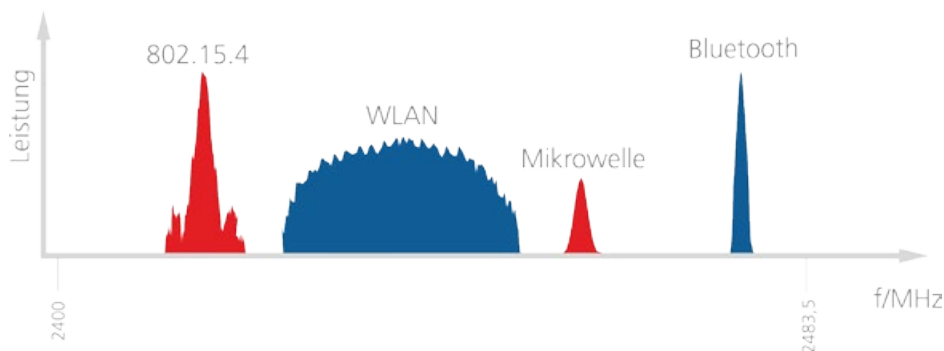
Für die Nutzung des L-, M- und H-Bands ist eine Leistungsregelung (Transmit Power Control, TPC) und eine dynamische Frequenzwahl (Dynamic Frequency Selection, DFS) erforderlich. Bei Systemen ohne diese Mechanismen reduziert sich die Sendeleistung auf 30 mW bzw. 60 mW. Die Kanalbandbreite beträgt im lizenzfreien 5 GHz Band 20 MHz. Das 5 GHz ISM-Band (5,725 – 5,875 GHz) ist eines der am wenigsten verwendeten lizenzfreien Bänder. Grund dafür ist die quasioptische Ausbreitung von EM-Wellen mit dieser Wellenlänge. Als Ergebnis sind Reichweite und die Durchdringung von Wänden bei niedriger Sendeleistung eingeschränkt.

Tabelle 5: Nutzungsbedingungen für das 5150 – 5875 MHz Band.

KOEXISTENZ

Für jeden Zweck gibt es ein spezielles drahtloses System. So wie beispielsweise „Bluetooth“ der Sprachübertragung dient oder WLAN für die Videoübertragung genutzt wird, müssen eben einige der Systeme robuster sein – für die Kommunikation über große Reichweiten -, andere hingegen müssen nur geringe Distanzen überbrücken, dafür aber höhere Datenraten bewältigen. Ein einzelnes System kann nicht allen Anforderungen gleichzeitig genügen, sondern es sind dafür mehrere drahtlose Systeme am selben Ort nötig. Unsere Messungen zeigen, dass dies in der Industrie aktuell bereits der Fall ist: Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für solch einen parallelen und darüber hinaus störungsfreien Einsatz drahtloser Technologien.

Abb. 6: Verschiedene drahtlose Technologien, die im 2,4 GHz ISM-Band zum Einsatz kommen.



SPEKTRUM MANAGEMENT

Wegen der unterschiedlichen Anforderungen industrieller Prozesse sind in der Regel mehrere drahtlose Technologien im gesamten Industriebereich installiert. Da das Funkspektrum hierdurch von verschiedenen drahtlosen Systemen parallel verwendet wird, muss die Zuordnung der vorhandenen Frequenzbänder für jedes einzelne System frühzeitig erfolgen. Nur so kann man den Anforderungen und Prioritäten der Nutzer innerhalb der Industriebereiche, die die drahtlosen Dienste nutzen wollen, gerecht werden. Das statische Spektrum-Management gewährleistet eine bessere Zuverlässigkeit und verringert Interferenzen zwischen den vorhandenen Systemen.

Der VDI/VDE hat einige Basisrichtlinien veröffentlicht, die vor jeglicher Installation drahtloser Systeme befolgt werden sollten (1):

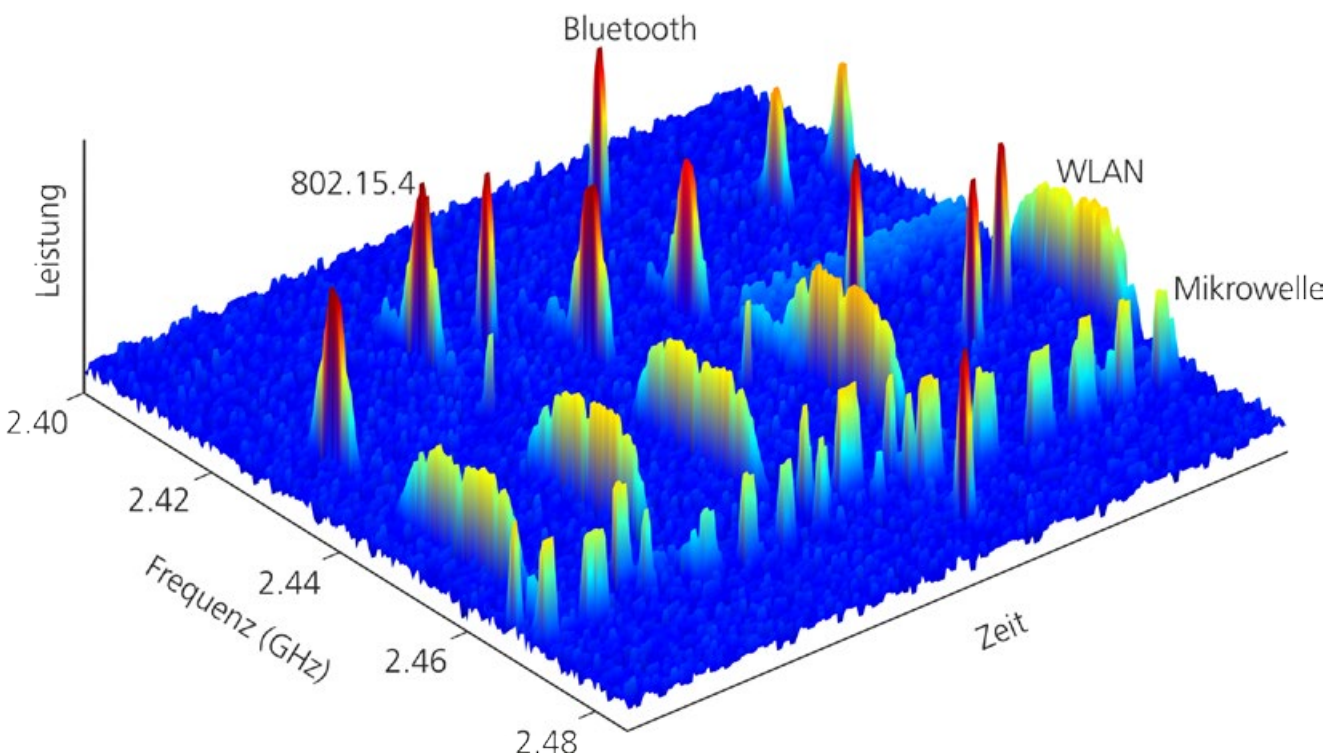
- Alle möglichen aktuellen und künftigen Funkdienste müssen in Betracht gezogen werden.
- Es muss definiert werden, welche Technologie welches Frequenzband benötigt.
- Die Wahrscheinlichkeit von koexistierenden Systemen muss eruiert werden.
- Funkinterferenzen müssen minimiert werden.

GEGENWÄRTIGE FREQUENZNUTZUNG

Derzeit herrscht ein großer Mangel an verfügbaren Frequenzen, bedingt durch eine regelrechte Explosion neuer drahtloser Anwendungen, die einen Zugang zum Funkpektrum benötigen. Für weitere drahtlose Technologien eigene Frequenzbereiche zur Verfügung zu stellen ist meist nicht mehr möglich. Vielmehr muss sichergestellt werden, dass das Frequenzband von verschiedenen Technologien parallel genutzt werden kann.

Abbildung 7 zeigt Koexistenz im 2,4 GHz ISM-Band: Verschiedene drahtlose Standards arbeiten hier parallel. Die Abbildung verdeutlicht, dass das Funkpektrum keineswegs optimal ausgenutzt wird, sondern große ungenutzte Lücken in der Nutzung bestehen. Tatsächlich greifen nämlich nicht alle Nutzer ununterbrochen, sondern jeweils nur zeitweise auf das Funkpektrum zu. Wegen des bisher üblichen statischen Spektrum-Managements blockieren sie den jeweiligen Frequenzbereich jedoch auch dann, wenn sich ihr System im Schlafmodus befindet und sie nicht kommunizieren.

Abb. 7: Spektrum parallel arbeitender drahtloser Systeme, gemessen im Industrial Lab der Fraunhofer ESK.



Verschiedene Wissenschaftler haben sich bereits mit der Nutzung des Funkspektrums durch drahtlose Technologien auseinandergesetzt. Auch ihre Ergebnisse zeigen, dass das Spektrum nicht optimal ausgenutzt wird (3) (4) (5). Unsere Messreihen in der Industrie kamen zu denselben Ergebnissen. In Tabelle 4 wurden einige davon zusammengestellt – sie repräsentieren eine typische Verwendung des Funkspektrums.

Tabelle 4: Gemessene Auslastung des Spektrums in einem Industriebetrieb.

Frequenzbereich MHz	Unterkanal MHz	Durchschnittliche Nutzungsdauer %
433,05 - 434,79	434,5	47,39
868 - 870		0
2400 - 2483,5	2412 (WLAN, Kanal 1)	12,52
	2437 (WLAN, Kanal 6)	3,31
	2472 (WLAN, Kanal 13)	3,38

Wie in Abbildung 2 gezeigt überlappen sich die hier genutzten WLAN-Kanäle nicht, weshalb in diesem Industriebetrieb die Koexistenz sicher gestellt wird. Als Resultat ist das verfügbare Spektrum fast vollständig belegt, nur zwischen Kanal 6 und 13 ist Raum für ein schmalbandiges System. Als Ergebnis kann aufgrund der Frequenzknappheit in diesem Betrieb kein weiteres koexistierendes breitbandiges System im 2,4 GHz Band genutzt werden.

LÖSUNGEN FÜR DIE FREQUENZKNAPPHEIT

Unsere Ergebnisse zeigen zwar nur die aktuelle Auslastung des Spektrums in einer Forschungsfabrik, spiegeln aber auch die Situation in den meisten Industriebetrieben wider. Die enorme Vergeudung innerhalb des nutzbaren Spektrums, die wir bei unseren Messungen aufzeigen konnten, ist alarmierend angesichts des bereits jetzt vorhandenen Mangels an verfügbaren Frequenzen. Will man aus dieser Fehlverwendung des Spektrums einen Vorteil ziehen, müsste man ein System entwickeln, das die dabei entstehenden Lücken für seine eigene Kommunikation nutzt. Damit wäre die Notwendigkeit eines weiteren Frequenzbands hinfällig.

Im Folgenden haben wir exemplarisch eine typische Spektrumbelegung im industriellen Bereich abgebildet (Abbildung 8): Wir nehmen dabei an, dass in diesem Bereich bereits drei drahtlose Systeme installiert sind, von denen jedes ein fest zugewiesenes Frequenzband benutzt, wie es beim statischen Spektrum-Management üblich ist. Die Installation eines neuen Systems in einem solchen Szenario scheint nur eingeschränkt möglich, da das verfügbare Spektrum bereits komplett von den vorhandenen Systemen belegt ist: Jedes weitere System würde auf den ersten Blick Interferenzen mit den bestehenden Systemen verursachen. Es gibt nun drei Lösungsansätze, mit denen doch noch ein weiteres drahtloses System integriert werden kann.

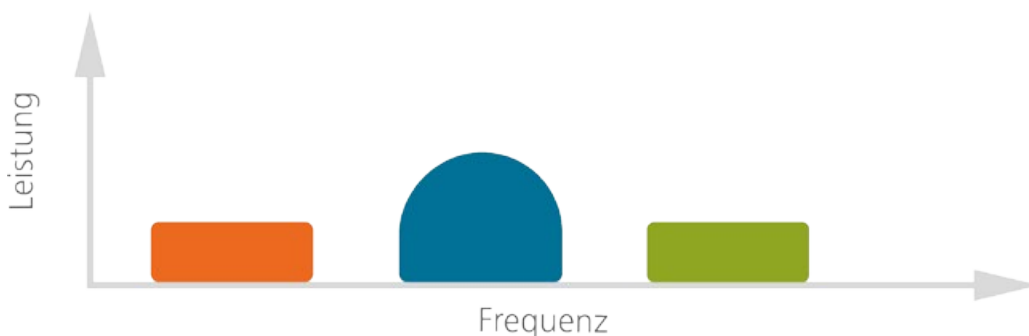


Abb 8: In der aktuellen Verteilung ist das Spektrum komplett belegt.

Neubelegung des Spektrums

Abbildung 9 zeigt eine mögliche Neubelegung der Frequenzen auf die vorhandenen drei Systeme. Das schafft zwar etwas Platz für ein neues System, bringt aber neue Probleme mit sich: Wird ein System innerhalb eines Frequenzbands neu platziert, hat das direkten Einfluss auf die Sende- und Empfangsmodule (Transceiver), die normalerweise so entwickelt sind, dass sie nur auf bestimmten Frequenzen arbeiten. Die Umverteilung der Systeme auf neue Frequenzen macht damit Veränderungen der Software und teilweise sogar der Hardware der Transceiver nötig.

Zudem sind zwei Systeme in der Regel durch ein Schutzband (engl. guard band) getrennt, ein ungenutzter, schmaler Frequenzbereich, der Interferenzen vorbeugt. Durch die Umverteilung ist es wahrscheinlich, dass die vorhandenen Nutzer durch den erzwungenen Extraplatz für das „Gastsystem“ Nachteile hinnehmen müssen. Diese Option stellt daher keine realistische Lösung dar.

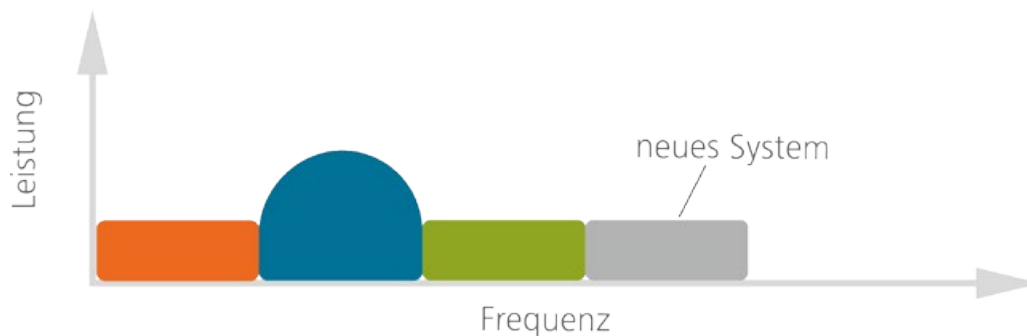


Abb. 9: Die Neubelegung des Frequenzbandes schafft Platz für eine weitere Übertragung im Spektrum.

Underlay

Bei der Underlay-Technik werden die vorhandenen Systeme nicht umplatziert, vielmehr kommuniziert das neue System hier mit einer sehr niedrigen Leistungsdichte unterhalb der bestehenden Systeme. Das wird mit der Ultrabreitbandtechnologie (Ultra Wide Band, UWB) bewerkstelligt, bei der das Grundsignal bei sehr niedriger Leistung über eine sehr große Bandbreite gespreizt wird. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, wird dabei der Primärnutzer nicht beeinflusst. Die geringe Leistungsdichte führt jedoch zu einer Einschränkung des Sendebereichs auf etwa zwei bis fünf Meter. Dies ist zwar ausreichend für die Kommunikation rund um eine Maschine, nicht aber, um einen kompletten Industriebetrieb abzudecken. Dieser Ansatz ist dementsprechend ebenfalls nicht sinnvoll, wenn die Kommunikation über große Entfernung erfolgen soll.

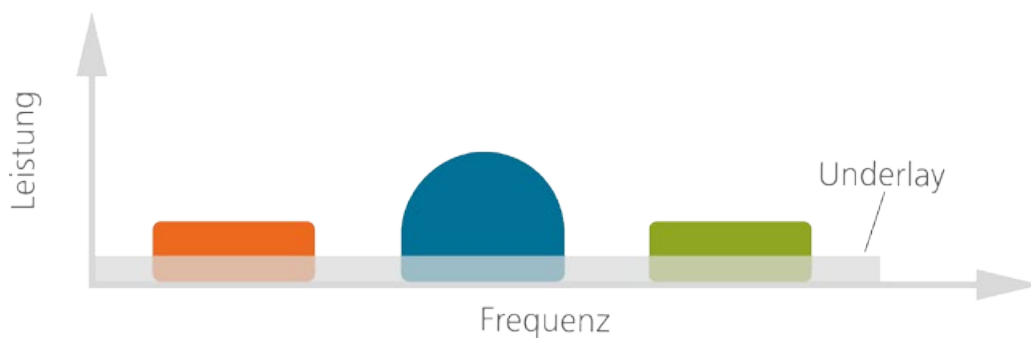


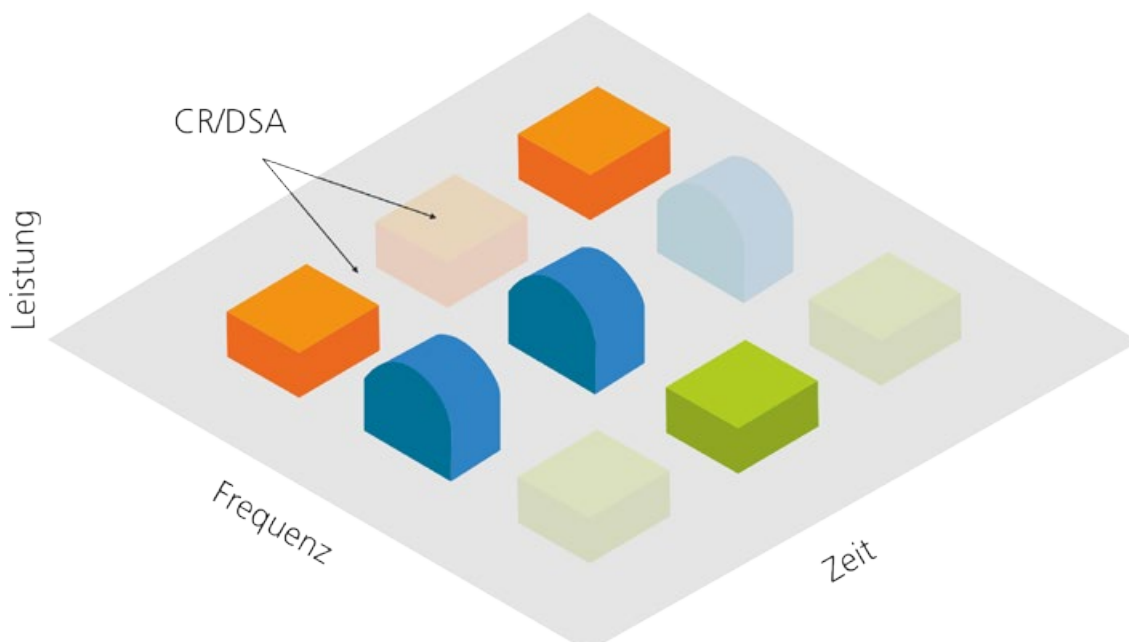
Abb. 10: Beim Underlay-Ansatz werden die vorhandenen Systeme mit einem breitbandigen Signal mit geringer Leistungsdichte unterlegt, das für eine zusätzliche Übertragung verwendet werden kann.

Cognitive Radio

Üblicherweise sind in Industrieanlagen bestimmte Systeme, wie bereits erwähnt, immer einem einzelnen Frequenzband zugeordnet. Entsprechend haben wir bisher auch nur Lösungen diskutiert, die auf diese statische Zuordnung abgestimmt sind. Abbildung 11 zeigt die Verteilung dieser Systeme im Funkspektrum abhängig von Leistung, Frequenz und Zeit.

Die Abbildung verdeutlicht dabei auch, was wir bei unseren Messungen beobachten konnten: Keines der primären Systeme bleibt über den kompletten Zeitraum aktiv. Es wäre also ein System denkbar, das die Auslastung des Funkspektrums kontinuierlich analysiert und auftretende Nutzungslücken für seine eigene Kommunikation heranzieht. Ein solches System, das dynamisch auf das Spektrum zugreift (Dynamic Spectrum Access, DSA), wird als Cognitive Radio (CR) bezeichnet.

Abb. 11: Die zugeordneten Frequenzen werden nicht ununterbrochen genutzt, die hinterlassenen Lücken können für weitere Übertragungen mit der Cognitive Radio-Technologie herangezogen werden.



COGNITIVE RADIO

Cognitive Radio ist eine Technik, die einen Vorteil aus dem nicht vollständig genutzten Funkspektrum zieht. Sie wurde als erstes von Joseph Mitola (6) vorgestellt: Ein drahtloser Knotenpunkt verändert seine Sende- oder Empfangsparameter, um effizient mit den bestehenden Nutzern zu kommunizieren, ohne Interferenzen zu verursachen. Man kann die Technik auch als „Smart Software Defined Radio“ bezeichnen, da sie intelligent genug ist, um Übertragung und Empfang abhängig von den Gegebenheiten im Funkspektrum zu verändern.

Wie im vergangenen Kapitel gezeigt, sind Frequenzbänder, denen spezielle drahtlose Dienste zugeordnet sind, nicht ausreichend ausgelastet. Cognitive Radio könnte also versuchen, das Funkspektrum besser zu nutzen, indem es die bei der primären Belegung entstandenen Frequenzlücken füllt.

KLASSIFIZIERUNG VON COGNITIVE RADIO

Die Klassifizierung von Cognitive Radio (CR) hängt von den Parametern ab, die über den Wechsel von Übertragung und Empfang entscheiden. Es gibt zwei CR-Haupttypen.

Full Cognitive Radio

Die Idee eines Full CR stammt von Joseph Mitola und wird daher auch als „Mitola Radio“ bezeichnet. Im Full CR werden Parameter wie Frequenz, Zeit, Leistung, Code (im Falle von CDMA) und Raum berücksichtigt.

Spectrum Sensing Cognitive Radio

Beim Spectrum Sensing CR ist die Funkfrequenz der einzige Parameter, der für Übertragung und Empfang verantwortlich ist.

CR-Nutzer können den lizenzierten und lizenzfreien Bereich des Frequenzbands in Anspruch nehmen. Daher wird CR im Folgenden in zwei Kategorien eingeteilt: in CR für lizenzierte Bänder und in das CR für lizenzfreie Bänder.

KERNFUNKTIONEN VON COGNITIVE RADIO

Unsere Forschungsarbeiten befassen sich hauptsächlich mit Spectrum Sensing Cognitive Radio, insbesondere innerhalb der lizenzfreien Bänder. Die Herausforderung hierbei ist die Entwicklung von höchst genauen Algorithmen, die vorhandene Frequenzlücken in einer ausgeklügelten, sehr feinen Weise aufspüren. CR greift auf das Funkspektrum dynamisch zu, um den besten verfügbaren Kanal zu nutzen. Im Allgemeinen ermittelt CR dabei zunächst den Teil des Spektrums, der verfügbar ist, und versucht dann, daraus den bestgeeignetsten Kanal auszuwählen. Währenddessen erstellt CR auch einen sinnvollen Ablaufplan für den Zugriff auf das Spektrum und die gemeinsame Nutzung mit anderen Systemen. Will beispielsweise der primäre Nutzer den Kanal wieder nutzen, so ist dieser vom CR für diesen Zweck frei zu geben. Zusätzlich kann die Informationen aus der Detektion ungenutzter Frequenzbereiche auch zwischen mehreren CR-Systemen ausgetauscht werden. Je größer die Zahl der detektierenden Systeme dabei ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit von Fehldetektionen.

Spectrum Sensing

Das Detektieren ungenutzter Frequenzbereiche (Spectrum Sensing) ist die Kernfunktionalität eines CRs, welche eine Anpassung an die wechselnden Umgebungsbedingungen erst möglich macht. Zudem stellt es sicher, dass keine Interferenzen mit den bisherigen Nutzern des Spektrums auftreten. Ungenutzte Frequenzbereiche (Spectrum Holes oder White Spaces genannt) treten dabei mit bis zu vier verschiedenen Freiheitsgraden auf: So gibt es neben Zeit- und Frequenzlücken durch Signaldämpfung / Abschattung hervorgerufene räumliche White Spaces und in CDMA-Systemen ungenutzte Codes. Eine Schwierigkeit stellen dabei falsch-positive White-Space-Entscheidungen dar, die zu dem so genannten Hidden-Terminal-Probleme (auch: Hidden-Node-Problem) führen.

Spectrum Sensing-Techniken

Das Spectrum Sensing ist in zwei Hauptklassen unterteilt:

- Transmitter Detection
- Cooperative Detection

Die Transmitter Detection erlaubt es einem einzelnen CR festzustellen, ob ein Frequenzband

frei oder belegt ist. Das Heranziehen der Sensing-Informationen mehrerer CRs erhöht die Zuverlässigkeit der Detektion ungenutzter Frequenzen wesentlich und wird als Cooperative Detection bezeichnet.

Um einen Sender zu ermitteln, muss man das Signal des Primärnutzers in einem bestimmten Frequenzband erkennen. Dazu gibt es mehrere Ansätze, die nachfolgend aufgeführt sind:

Energy Detection

Energy Detection (ED) ist die einfachste Form des Spectrum Sensing. Hierbei wird die Energie des Empfangssignals mit einem vordefinierten Schwellwert verglichen und daraufhin entschieden, ob der Kanal belegt oder frei ist.

Matched Filter Detection

Sollten die Eigenschaften des zu detektierenden Signals bekannt sein, so kann durch das Verwenden eines dem Signal angepassten Filters (Matched Filter) das Vorhandensein eines Signals optimal detektiert werden.

Cyclostationary Feature Detection

Die komplexeste und derzeit am häufigsten diskutierte Detektionsmethode ist die Cyclostationary Feature Detection (CFD), weil sie sehr präzise Frequenzlücken im Spektrum erfasst. Sie beruht auf der Ausnutzung statistischer Eigenschaften eines Signals, die sich in periodischen Abständen verändern. Diese heben das Signal von zufällig verteiltem Hintergrundrauschen ab. Solche zyklstationären Signale können auch im Fall spektraler Überlappung leicht von anderen Störsignalen getrennt werden. Dies liefert neue Möglichkeiten zur Erfassung, Identifizierung, Charakterisierung und Verarbeitung von Signalen, welche von starkem stationären Rauschen verdeckt sind.

Spektrum Management

Die mit der Spectrum Sensing-Technik entdeckten Frequenzlücken weisen unterschiedliche Charakteristika auf, sowohl bezüglich der über die Zeit variierenden Funkumgebung, wie auch hinsichtlich der Informationen zum Frequenzband – beispielsweise der genutzten Frequenz und Bandbreite. Folglich muss das CR-System über den besten Frequenzbereich entscheiden, um die Quality of Service (QoS) Anforderungen über das gesamte verfügbare Frequenzband einzuhalten. Beim Spektrum Management geht es also vor allem um zwei Aufgaben:

Analyse des Frequenzbereichs

Hauptaufgabe ist es, die Eigenschaften der Frequenzlücken, die im Laufe des Spectrum Sensing gefunden wurden, zu bewerten.

Auswahl des Frequenzbereichs

Ein CR legt die Datenrate, den Sendemodus und die Bandbreite der Übertragung fest. Danach wird das am besten geeignete Frequenzband ausgewählt.

Spectrum Mobility

Beim Wechsel zu einem besseren Frequenzbereich, muss eine nahtlose Kommunikation sichergestellt sein, da CR-Systeme das Spektrum auf dynamische Weise nutzen. Mobilität des Frequenzbereichs bedeutet also eine Änderung der Betriebsfrequenz im laufenden Betrieb. Wenn ein CR-System die Kanaleigenschaften nicht für den vorgesehenen Zweck geeignet hält oder der primäre Nutzer den Zugang zum Kanal benötigt, dann ist Frequenz-Mobilität erforderlich. Änderungen der Betriebsfrequenz ziehen auch Veränderungen in den Netzwerkschichten nach sich. Wenn nun ein CR-Knotenpunkt die Betriebsfrequenz ändert, müssen alle Netzwerkprotokolle von einem Betriebsmodus in einen anderen umgeschaltet werden. Das ist deshalb notwendig, weil die unterschiedlichen Netzwerkschichtprotokolle die neuen Kanalparameter der geänderten Betriebsfrequenz übernehmen müssen.

Spectrum Sharing

Bei einer gemeinsamen Nutzung des Spektrums (Spectrum Sharing) ist ein optimaler Ablauf zwischen den bestehenden Nutzern entscheidend. Spectrum Sharing kann wie die Medienzugriffsteuerung (medium access control MAC) in bestehenden Systemen betrachtet werden. Der Prozess des Spectrum Sharing erfolgt hauptsächlich in fünf Schritten:

Spectrum Sensing

Ein CR-Knotenpunkt kann immer nur auf den kleinen Teilbereich des Spektrums zugreifen, den die bestehenden Nutzer zurzeit nicht brauchen. Wie er solche Lücken detektieren kann, wurde bereits erläutert. Der CR-Knotenpunkt muss also erst die Auslastung des Spektrums analysieren, wenn er kommunizieren will.

Zuordnung des Frequenzbereichs

Sind nach der Detektion die zur Verfügung stehenden Frequenzbereiche bekannt, kann der CR-Knoten einen Kanal auswählen. Diese Zuordnung hängt in erster Linie von der Verfügbarkeit des Spektrums, teilweise aber auch von internen und externen Vorgaben und Richtlinien ab. Deshalb muss für die Zuordnung eine Strategie entwickelt werden, die das Ergebnis des gesamten Systems verbessert.

Frequenz-Zugriff

Im Falle von mehreren aktiven CR-Knoten kann ein gleichzeitiger Zugriff auf das Spektrum zu Kollisionen führen. Daher muss die Zugriffsstrategie auch koordiniert sein, um eine Kollision bei überlappenden Frequenzbändern zu verhindern.

Sender-Empfänger Handshake

CR benutzt das Funkspektrum und die Kommunikationstechniken dynamisch. Ist das Frequenzband einmal gefunden und einem System für die Kommunikation zugeordnet, muss auch der Empfänger über den ausgewählten Frequenzkanal und die Kommunikationstechnik informiert sein. Deshalb wird der Sender-Empfänger Handshake zu einem wesentlichen Bestandteil bei der Aufteilung des Frequenzbereichs.

Frequenz-Mobilität

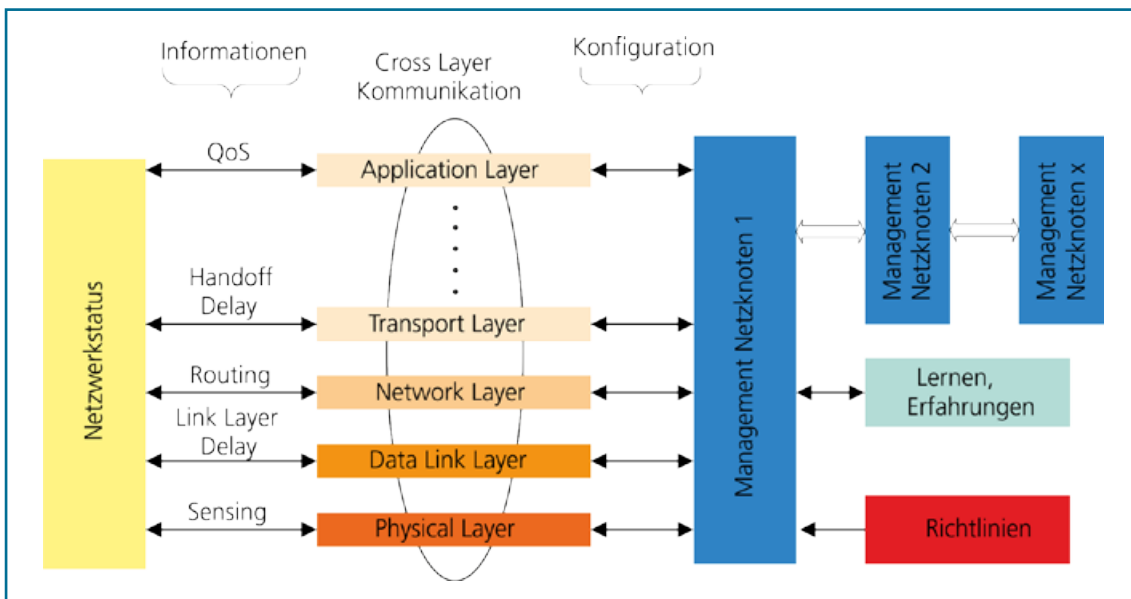
CR-Systeme greifen auf den zugeordneten Frequenzbereich als "Gast" zu. Wird das zugeordnete Spektrum von den Primärnutzern wieder zurückgefordert, muss das CR-System seinen eigenen Kommunikationskanal auf einen anderen Bereich des Spektrums verlegen. Daher ist die Frequenz-Mobilität für eine sichere Kommunikation der CR-Knoten wichtig.

ÜBERBLICK ÜBER DIE SYSTEMARCHITEKTUR

Im herkömmlichen OSI-Referenzmodell kann jede Schicht nur mit den ihr benachbarten Schichten interagieren. In der Praxis erweist sich dieses strikte Schichtenmodell als ungeeignet für das drahtlose Medium. Schuld daran sind vor allem die Vielfachzugriffssverfahren und die zeitvariante Charakteristik des drahtlosen Kanals, die sich aus Fading, Streuung und Mehrwegeausbreitung ergibt. Daher wurde das schichtübergreifende Prinzip für diese Systeme eingeführt, bei dem die Protokolle nicht benachbarter Schichten ihre inhärenten Parameter untereinander austauschen.

Ein möglicher Cross-Layer-Ansatz für Cognitive Radio ist in Abbildung 12 beschrieben. Gezeigt werden die relevanten OSI-Schichten 1-4 und 7. Der Parameterraustausch zwischen allen Schichten erfolgt über eine gemeinsame Wissensbasis der OSI-Schichten, die als Netzwerkstatus bezeichnet wird. Jedes CR-System rekonfiguriert seine Parameter entsprechend der erlernten Erfahrungen, Richtlinien, Ziele und des Netzwerkstatus. Des Weiteren können die CR-Systeme auch miteinander kooperieren.

Abb. 12: Cognitive Radio Cross-Layer-Ansatz.



HERAUSFORDERUNGEN

Hidden Terminal Problem

Wenn ein System in Reichweite eines Empfängers ist, aber nicht in Reichweite eines anderen Systems, der mit dem Empfänger kommuniziert, kommt es zum Hidden Terminal-Problem. Liegt der CR-Knotenpunkt beispielsweise an der Grenze zur Funkzelle eines primären Nutzers, ist das Empfangssignal viel schwächer und liegt kaum über der Empfindlichkeit des CR-Systems. Daher ist eine höhere Empfindlichkeit erforderlich, um das schwache Signal zu detektieren. Wenn es dem CR-Knotenpunkt nicht gelingt, das Signal des Primärnutzers zu erfassen, kommt es zu einer Fehldetektion, die eine angebliche Lücke im Spektrum zeigt. Bei diesem Szenario wird das CR-System mit dem Primärnutzersignal interferieren. Dieses Problem nennt man Hidden Terminal-Problem. Die Abbildungen 13 und 14 zeigen einige typische Szenarien, bei denen es zum Hidden Terminal-Problem kommen kann.

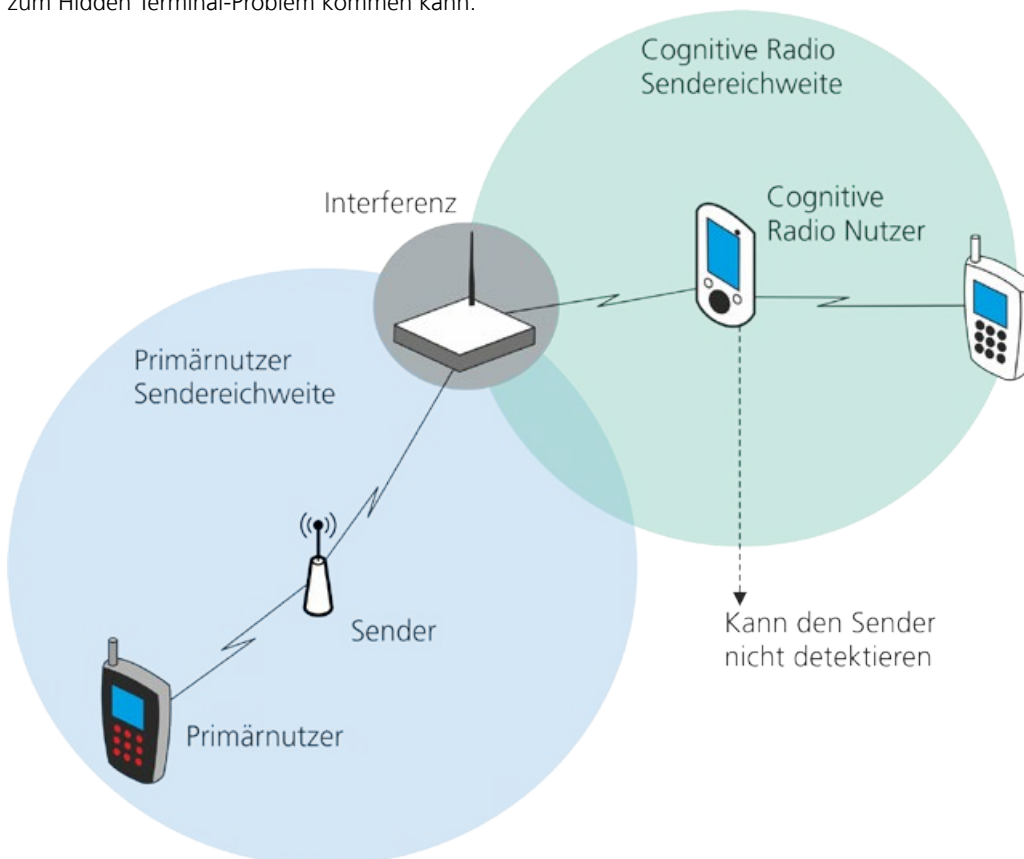


Abb. 13: Hidden Terminal-Problem aufgrund eines schwachen Signals.

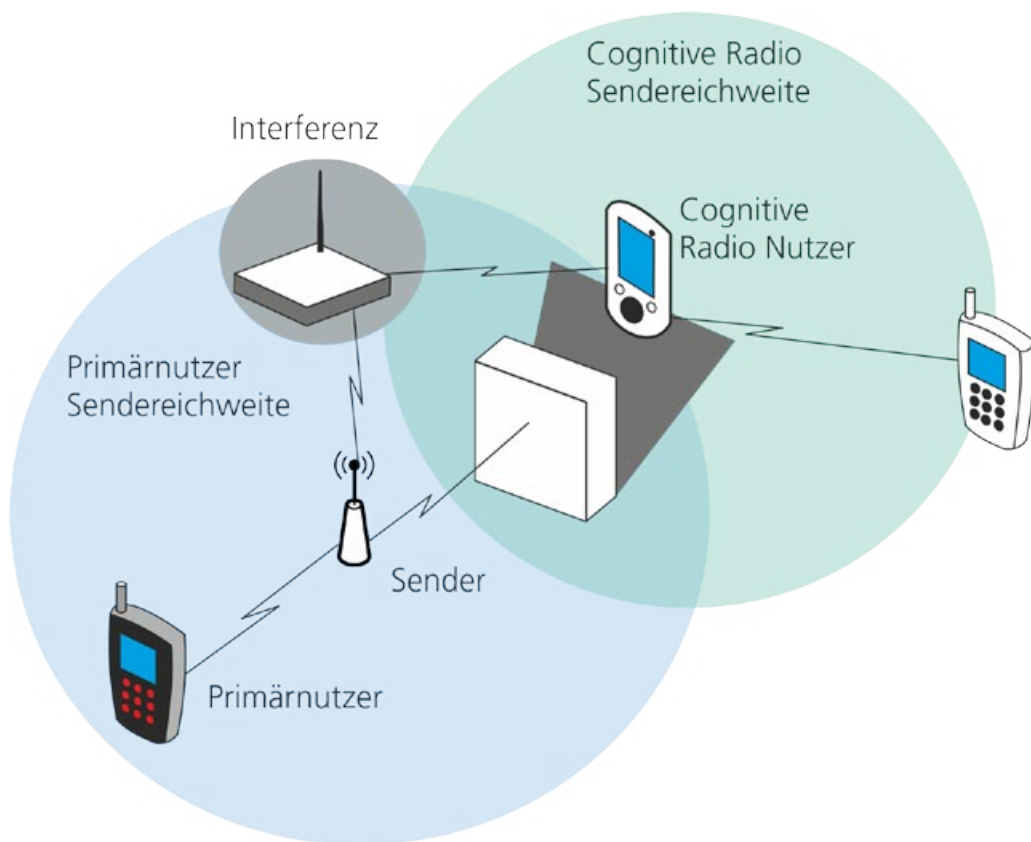


Abb. 14: Hidden Terminal-Problem aufgrund von Abschirmung.

Signalisierungskanal

Für CR-Abläufe ist ein zuverlässiger Kanal nötig, um Signalisierungsinformationen auszutauschen, z.B. Sender-Empfänger Handshake und Austausch der Sensing Informationen. Üblicherweise gibt es bei gängigen Kommunikationssystemen einen allgemeinen Signalisierungskanal (common control channel, CCC) zum Austausch von Informationen. Dieser Ansatz widerspricht jedoch der adaptiven und veränderbaren Beschaffenheit des Cognitive Radio. Zwar wurden hierfür bereits unterschiedliche Lösungsvorschläge gemacht, von denen aber keiner gänzlich zufriedenstellend ist.

Komplexität

Viele der theoretisch untersuchten Techniken (Detektion, Lernverfahren, etc.) sind sehr komplex und rechenintensiv. Das jedoch verursacht einen hohen Energieverbrauch und hohe Hardwarekosten und ist hinderlich für die Umsetzung. Deshalb ist es nötig, die Techniken zu vereinfachen oder Prozesse zu ermitteln, die eine Implementierung mit einem umsetzbaren Aufwand erlauben.

COGNITIVE RADIO UNTER REALEN BEDINGUNGEN

Die Fraunhofer ESK forscht an neuen Methoden des Cognitive Radio, um die Auslastung der verfügbaren Frequenzen bei industriellen Anwendungen zu optimieren, selbst wenn sich die Frequenzbereiche ständig verändern. Zu den industriellen Anwendungen zählen beispielsweise die Überwachung und Kontrolle von Produktionssystemen. Die Grundlagenforschung hat bislang bei ihren Ergebnissen ideale Netzbedingungen angenommen. Zudem wurde bisher kaum die Problematik untersucht, die entsteht, wenn die Methodik in bereits vollständige Kommunikationssysteme integriert werden soll. Die Fraunhofer ESK will zeigen, wie ausgewählte, kognitive Prozesse in ein komplettes Kommunikationssystem integriert und implementiert werden können.

Dazu wurden spezifische Protokolle definiert, diese zu einfach nutzbaren Methoden verwandelt und, wo es möglich war, vereinfacht. SDRs, anpassbare Hardware, in welchen die Signalverarbeitung in Software umgesetzt wird, dienen als Implementierungsplattform. Die Implementierung erfolgt so mit geringem Aufwand. Außerdem ist es mit SDRs – anders als mit einer simulierten Umgebung – möglich, CR-Ansätze unter realen Bedingungen zu verifizieren und evaluieren. Die Implementierung wird in verschiedenen Szenarien untersucht und hinsichtlich Robustheit, Verzögerungszeiten, Datendurchsatz, Energieverbrauch, konstanter Einhaltung von QoS-Bedingungen und effizienter Nutzung des Frequenzbandes evaluiert. Die Analyse beinhaltet auch den benötigten Aufwand, um die ausgewählten CR-Ansätze zu implementieren. Desweiteren untersucht die Fraunhofer ESK auch neue Methoden zur Vorhersage von Frequenzlücken (white spaces) und deren Anwendung in neuartigen Medienzugriffsverfahren.

HÄUFIG GESTELLTE FRAGEN

FRAGE	ANTWORT
Wer sind die Primärnutzer in Industrieanlagen?	Primärnutzer sind lizenzierte Nutzer oder – in lizenzfreien Bändern – Nutzer, die durch das Spektrum-Management einem bestimmten Frequenzkanal zugeordnet sind.
Was ist Cognitive Radio?	Cognitive Radio ist eine intelligente Technologie: Ein drahtloses System verändert seine Übertragungs- oder Empfangsparameter, um effizient zu kommunizieren, ohne Interferenzen mit dem Primärnutzer zu verursachen.
Gibt es Lösungen für das „Hidden Terminal Problem“?	Das Hidden Terminal Problem kann verhindert werden, indem die Empfindlichkeit des Sensing erhöht und die Sensing Informationen mit anderen CR-Systemen ausgetauscht werden.
Warum braucht die Industrie CR?	Gegenwärtig ist die Koexistenz drahtloser Systeme nur durch das statische Spektrum-Management koordiniert. Das führt in Zukunft zu einem Mangel an freien Frequenzbereichen. Nur CR kann helfen, dieses Problem zu lösen, indem das Funkpektrum dynamisch und interferenzfrei genutzt wird.
Ist die drahtlose Technologie für das industrielle Umfeld brauchbar?	Die große Anzahl verfügbarer drahtloser Technologien ist für den Einsatz im industriellen Umfeld geeignet, wenn Koexistenz zwischen den Systemen sichergestellt wird.
Welche Technologie ist auf alle Kommunikationsbedürfnisse zugeschnitten?	Es gibt keine einzelne, auf dem Markt erhältliche Technologie, die alle Kundenanforderungen auf einmal erfüllt.
Was sind Frequenzlücken?	Ist ein Frequenzbereich dauerhaft ungenutzt oder wird ein Bereich einen bestimmten Augenblick lang vom Primärnutzer nicht genutzt, spricht man von einer Frequenzlücke.

LITERATURVERZEICHNIS

1. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA):
Richtlinie VDI/VDE Guideline 2185 Blatt 2: Funkgestützte Kommunikation in der Automatisierungstechnik,
VDI/VDE, Düsseldorf, 2008.
2. „Wireless in Automation“ Arbeitskreis des ZVEI-Fachverband Automation:
Koexistenz von Funksystemen in der Automatisierungstechnik - Erläuterungen zum zuverlässigen Parallelbetrieb von Funklösungen,
ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. , Frankfurt am Main, 2008.
3. M.A. McHenry, P.A. Tenhula, D. McCloskey, D.A. Roberson and C.S. Hood:
Chicago spectrum occupancy measurements & analysis and a long-term studies proposal,
Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum, Boston, 2006.
4. M. Wellens, J. Wu and P. Mähönen:
Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of Cognitive Radio,
Proc. of IEEE Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom) 2007, Orlando, 2007.
5. M. López-Benítez, A. Umbert and F. Casadevall:
Evaluation of spectrum occupancy in Spain for Cognitive Radio applications,
IEEE Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009.
6. J. Mitola:
Cognitive Radio - An integrated agent architecture for software defined radio,
Ph.D. Dissertation. Royal Institute of Technology, Kista, 2000.

ABKÜRZUNGEN

Abkürzung	Definition
CCC	Common Control Channel
CDMA	Code Division Multiple Access
CR	Cognitive Radio
DFS	Dynamic Frequency Selection
DSA	Dynamic Spectrum Access
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
EM	electromagnetisch
ERP	Effective Radiating Power
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
GHz	Gigahertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU-R	International Telecommunication Union Radiocommunication Sector
kW	Kilowatt
LPD	Low Power Device
MAC	Medium Access Control
MHz	Megahertz
mW	Milliwatt
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
PAN	Personal Area Network
PHY	Physical Layer
QoS	Quality of Service
RFID	Radio Frequency Identification
SDR	Software Define Radio
SPP	Serial port profile
SRD	Short Range Devices
TPC	Transmitter Power Control
UWB	Ultra Wide Band
W	Watt
WISA	Wireless Interface for Sensors and Actuators
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

IMPRESSUM UND KONTAKT

Funktechnologien für die Industrie Bessere Lösungen mit Cognitive Radio

Herausgeber und Kontakt

Fraunhofer-Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik ESK
Hansastraße 32
80686 München
Tel +49 89 547088-0
Fax +49 89 547088-220
info@esk.fraunhofer.de
www.esk.fraunhofer.de

Autoren

Günter Hildebrandt
Tel +49 89 547088-354
Fax +49 89 547088-66354
guenter.hildebrandt@esk.fraunhofer.de

Amit Tumdi
Tel +49 89 547088-0
Fax +49 89 547088-220
amit.tumdi@esk.fraunhofer.de

Produktion und Redaktion

Susanne Baumer
Tel + 49 89 547088-353
Fax + 49 89 547088-66353
susanne.baumer@esk.fraunhofer.de

Christiane Weber
Tel + 49 89 547088-339
Fax + 49 89 547088-66339
christiane.weber@esk.fraunhofer.de

Bitte rufen Sie uns an, wenn Sie Fragen haben, weitere Informationen oder ein konkretes Angebot wünschen. Publikationen und Broschüren senden wir Ihnen gerne zu.

© Fraunhofer-Einrichtung für Systeme der Kommunikationstechnik ESK, München 2010.
Alle Rechte vorbehalten. Nachdruck sowie Übersetzung nur mit schriftlicher Genehmigung der Redaktion.

