

VDE POSITIONSPAPIER



# FUNKTECHNOLOGIEN FÜR INDUSTRIE 4.0

ITG AG FUNKTECHNOLOGIE 4.0

**ITG**

**VDE**

Dieses Positionspapier ist eine Initiative des „Fachausschuss Funkssysteme“ in der Informationstechnischen Gesellschaft im VDE (ITG).

#### Autoren

Ismet Aktas, Ericsson GmbH

Alexander Bentkus, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik

Florian Bonanati, R3 - Reliable Realtime Radio Communications GmbH

Armin Dekorsy, Universität Bremen

Christian Dombrowski, R3 - Reliable Realtime Radio Communications GmbH

Michael Doubrava, Nash Technologies GmbH

Ali Golestani, Fraunhofer-Institut für Eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik ESK

Frank Hofmann, Robert Bosch GmbH

Mike Heidrich, Berufsakademie Sachsen – Staatliche Studienakademie Bautzen

Stefan Hiensch, Bundesnetzagentur

Rüdiger Kays, Technische Universität Dortmund

Michael Meyer, Ericsson GmbH

Andreas Müller, Robert Bosch GmbH

Stephan ten Brink, Universität Stuttgart

Neda Petreska, Fraunhofer-Institut für Eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik ESK

Milan Popovic, PMR Research & Development GmbH

Lutz Rauchhaupt, ifak, Institut für Automation und Kommunikation e.V.

Ahmad Saad, Fraunhofer-Institut für Eingebettete Systeme und Kommunikationstechnik ESK

Hans Schotten, DFKI und Technische Universität Kaiserslautern

Christoph Wöste, Bundesnetzagentur

Ingo Wolff, IMST GmbH

Und unter Mithilfe namentlich nicht genannter Personen aus unterschiedlichen Bereichen sowie Mitgliedern des „Fachausschuss Funkssysteme“ in der Informationstechnischen Gesellschaft im VDE (ITG).

## Impressum

**VDE** VERBAND DER ELEKTROTECHNIK  
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Informationstechnische Gesellschaft im VDE (ITG)

Stresemannallee 15 · 60596 Frankfurt am Main · <http://www.vde.com/itg>

Bildnachweise ©: VDE e.V., <https://openclipart.org/search/?query=robot+arm>, <https://openclipart.org/search/?query=tractor>,  
Schaper Kommunikation

Design: [www.schaper-kommunikation.de](http://www.schaper-kommunikation.de)

Juni 2017

# Inhalt

Kurzfassung (Executive Summary)

Präambel

## I. Einleitung

- I.1 Was ist Industrie 4.0?
- I.2 Herausforderungen für die Funkkommunikation durch Industrie 4.0?
- I.3 Warum Funkkommunikation in Industrie 4.0?

## II. Funkkommunikation in Industrie 4.0 – Anwendungen und Anforderungen

### II.1 Einsatzbereiche von Funkkommunikation in der Industrie

- Wartung und Diagnose
- Diskrete Fertigung
- Prozessautomatisierung
- Augmented Reality
- Lager und Logistiksysteme
- Funktionale Sicherheit

### II.2 Industrie 4.0-Anwendungen, die nur mit Funk möglich sind

- Mobile Werkzeuge
- Mobile Roboter
- Mobile Assistenzsysteme (Mensch-Maschine-Interaktion, SCADA)
- Einsatz von Flugdrohnen
- Retrofit-Lösung zur Unterstützung der RAMI 4.0 – Verwaltungsschale

### II.3 Technische Herausforderungen für die Funkkommunikation in Industrie 4.0

- Unterschiedliche Funkausbreitungseigenschaften
- Hohe und divergente Anforderungen an die Kommunikation
- Begrenzte Reichweiten im lizenzfrei nutzbaren Spektrum
- Limitierte Fehlertoleranz von industriellen Anwendungen
- Unzureichende funkbasierte Lokalisierungsunterstützung

### II.4 Standardisierungsaspekte

## III. Funktechnologien für die Anwendungen in Industrie 4.0

- III.1 Frequenzbänder für die industrielle Funkkommunikation
- III.2 Kanalmodellierung und Kanaleigenschaften
- III.3 Heute verbreitete Technologien
  - III.3.1 Mobilfunk
  - III.3.2 Professioneller Mobilfunk (wie Tetra/DMR)
  - III.3.3 Low Power WAN Technologien
  - III.3.4 Wireless Local Area Networks auf Basis von IEEE 802.11
  - III.3.5 Funkvernetzung auf Basis von IEEE 802.15.1 (Bluetooth, WISA)

- III.3.6 Funkvernetzung auf Basis von IEEE 802.15.4 (Zigbee, ISA100.11a, WirelessHART)
- III.3.7 Nahfeldkommunikation RFID, Smart Tags
- III.4 Zusammenfassende Bewertung verfügbarer Technologien
- III.5 Technologische Weiterentwicklungen
  - III.5.1 Physikalische Schicht
  - III.5.2 Medienzugriff und Ressourcenverwaltung
  - III.5.3 Höhere Schichten
- III.6 Einbindung in existierende Infrastrukturen
- III.7 Der zukünftige Mobilfunkstandard – 5G
- IV. Konsequenzen und Handlungsempfehlungen
  - These 1: Funktechnologien müssen weiterentwickelt werden
  - These 2: Markteinführungsstrategien müssen unterstützt werden
  - These 3: Die domänenübergreifende Zusammenarbeit muss in allen Schritten des Innovationszyklus gefördert werden
  - These 4: Internationale Standardisierung ist wichtig
- V. Anhang
  - Literatur zu I
  - Literatur zu II
  - Literatur zu III
  - Abkürzungsverzeichnis

## Kurzfassung (Executive Summary)

Die Digitalisierung der Industrie schreitet unaufhörlich voran. Das Thema „Industrie 4.0“ soll neue automatisierte Fertigungsverfahren ermöglichen. Der Wandel der Automatisierungsindustrie in der „vierten industriellen Revolution“ ist ohne den kombinierten Einsatz moderner Technologien und deren Vernetzung nicht umsetzbar, denn die Verknüpfung aller Komponenten ist Voraussetzung für eine hochdynamische und flexible Industrie 4.0-Produktion.

Bei der Digitalisierung und Integration der Prozesse auf verschiedenen Ebenen müssen unterschiedliche Systeme zuverlässig und effizient zusammenwirken. Durch den Einsatz von Funklösungen wird der Aufwand für Verkabelung reduziert, flexible Kommunikationsansätze werden ermöglicht, und es können neue Anwendungsfelder erschlossen werden, die durch leitungsgebundene Systeme nicht oder nur unzureichend bedient werden können. Derzeit sind die Rollen häufig klar geregelt: Mobilfunknetze werden durch Netzbetreiber zur Verfügung gestellt, lokale Netze vom Anwender selbst betrieben. Aus der Sicht des Anwenders sollte ein schlüssiges Gesamtkonzept verschiedene Technologien und Netze koordinieren, so dass Komplexität, Installationskosten und Betriebskosten minimiert werden können.

Industrie 4.0 umfasst ein sehr breites Spektrum an Szenarien und Anwendungen, deren Anforderungen sich signifikant von denen privater Endanwender oder professioneller Einsatzgebieten im Verwaltungs- und Organisationsbereich unterscheiden können. Zu den typischen Anwendungen gehören Ferndiagnose und Wartung, Fertigung und Logistik, Prozessautomatisierung und Fernsteuerung. Diese klassischen Anwendungen werden um neue Szenarien erweitert, wie den Einsatz von Flugdrohnen, digitalen Zwillingen, mobilen Assistenzsystemen mit Mensch-Maschine Interaktionen oder mobilen Werkzeugen und Robotern.

Funkkommunikation wird im industriellen Umfeld mit steigender Tendenz eingesetzt. Je nach Anwendung können die Anforderungen an die einzusetzende Technik sehr unterschiedlich ausgeprägt sein und sich hinsichtlich Forderungen an Latenz, Zuverlässigkeit, Reichweite, Fehlertoleranz, Sicherheit und Möglichkeiten zur Lokalisierung deutlich unterscheiden. In vielen industriellen Szenarien sind die Anforderungen sehr hoch und können mit derzeit verfügbaren Funktechnologien nicht erfüllt werden.

Derzeit laufende oder geplante Vorhaben in aktuellen Programmen wie im laufenden BMBF Schwerpunkt „Zuverlässige Drahtlose Kommunikation in der Industrie“ (ZDKI) oder Horizon 2020 sowie Projekten in der Grundlagenforschung haben technologische Weiterentwicklungen zum Inhalt. Ansatzpunkte zum Erreichen des Ziels liegen zum Beispiel in der Erschließung neuer Frequenzbereiche oder in neuartigen Verfahren zur Kooperation, Kognition, Koexistenz, netzbasierter Codierung und Multi-Hop Kommunikation. Zu den Zielsetzungen gehört die Steigerung der Datenraten, Verringerung der Latenz, Erhöhung der Effizienz, Robustheit und Zuverlässigkeit funkbasierter Kommunikation.

Derzeit laufende oder geplante Vorhaben in aktuellen Programmen wie ZDKI oder Horizon 2020 sowie Projekten in der Grundlagenforschung haben technologische Weiterentwicklungen zum Inhalt. Ansatzpunkte zum Erreichen des Ziels liegen zum Beispiel in der Erschließung neuer Frequenzbereiche oder in neuartigen Verfahren zur Kooperation, Kognition, Koexistenz, netzbasierter Codierung und Multi-Hop Kommunikation. Zu den Zielsetzungen gehört die Steigerung der Datenraten, Verringerung der Latenz, Erhöhung der Effizienz, Robustheit und Zuverlässigkeit funkbasierter Kommunikation.

Der Einbindung neuer Funksysteme in bestehende Infrastrukturen kommt eine besondere Bedeutung zu. Der typische Migrationspfad besteht aus der schrittweisen Komplementierung existierender, drahtgebundener Kommunikationssysteme mit drahtlosen Systemen. Selbst in neu entworfenen Anlagen werden drahtgebundene und drahtlose Netze koexistieren, da drahtgebundene Netze aus Kapazitäts- und Kostenaspekten für viele Anwendungsfälle vorteilhaft sind. Zu den wesentlichen Herausforderungen im Migrationskontext gehören die technologische Konnektivität, insbesondere beim Wechsel von Kabel auf Funk, sowie die Planung der Topologie und der Latenzanforderungen. Daneben stellen eine Reihe von Applikationen besondere Ansprüche sowohl die Sicherheit der Systeme, als auch an einen unterbrechungsfreien, mobilen Betrieb. Weiterhin müssen Datenströme beim Übergang auf das Funkmedium abgesichert werden, um sowohl den Betrieb des Netzes selbst, als auch die eigentlichen Nutzdaten gegen den Zugriff Unbefugter zu schützen. Dazu müssen existierende Mechanismen sinnvoll erweitert und in die jeweilige Technologie integriert werden.

Eine wichtige Herausforderung besteht in der Akzeptanz der Funktechnologien beim industriellen Anwender. Gefordert wird eine sichere und zuverlässige Kommunikation in allen Bereichen. Oftmals sind Kommunikationssysteme Bestandteil einer kritischen Infrastruktur, die gegen Angriffe und Fehlverhalten besonders zu schützen ist. Damit Funktechnologien sukzessive eingeführt werden können, benötigen neue Funksysteme Schnittstellen zu vorhandenen Kommunikationslösungen. Wichtige Aspekte sind auch die einfache Installation, Handhabung und Wartung der Kommunikationssysteme. Für die Nutzer muss Investitionssicherheit garantiert werden, da Kommunikationssysteme und die dabei verwendete Hardware in vielen Fällen deutlich kürzere Innovationszyklen als Fertigungsanlagen haben. International akzeptierte, standardisierte Lösungen mit Unterstützung durch verschiedene Hersteller haben gute Chancen auf Akzeptanz.

Mit der Entwicklung neuer Funktechnologien werden digitale drahtlose Kommunikationsnetze zukünftig eine Vielzahl neuer industrieller Anwendungen erschließen und technische Anforderungen erfüllen, die bisher nur durch kabelgebundene Netze erfüllt werden konnten. Mit der zu erwartenden Verbreitung der Funktechnik wird der Ressourcenbedarf steigen, insbesondere wenn intelligente und effiziente Nutzungskonzepte eingeführt werden. Das wird nur mit ausreichenden Frequenzbändern oder neuen Spektrumnutzungskonzepten möglich sein.

Dieses Positionspapier zeigt die Notwendigkeit weiterer Maßnahmen im politischen, regulatorischen und industriellen Umfeld auf. Der Blick auf technische Entwicklungsmöglichkeiten und aktuelle Projekte zeigt, dass noch erheblicher Handlungsbedarf besteht, um die Vision einer zukünftigen, allgegenwärtigen Funkvernetzung im Industrieumfeld zur Realität werden zu lassen:

1. Für neue und für kritische Anwendungen im Fertigungsbereich mit bisher nicht adressierten Anforderungen sind völlig neue Ansätze und Verfahren erforderlich. Funktechnologien müssen daher weiter entwickelt werden.
2. Eine erfolgreiche Umsetzung von Forschungsergebnissen in Produkte ist durch systematische Markteinführungsstrategien zu unterstützen.
3. Die Digitalisierung der Industrie erfordert domänenübergreifende Zusammenarbeit in allen Phasen des Innovationszyklus und auf unterschiedlichen Hierarchieebenen. Die Zusammenarbeit sollte durch weitere Verbundprojekte und Intensivierung des Dialogs gefördert werden.
4. International harmonisierte Standardisierung ist von entscheidender Bedeutung, um Marktfragmentierungen entgegen zu wirken und um Märkte global adressieren zu können.

Wegen der Bedeutung des Themas für die digitale Transformation im industriellen Umfeld ist es von größter Wichtigkeit, die bestehenden Herausforderungen zügig und systematisch anzugehen. Anderenfalls bleibt Industrie 4.0 eine Vision.

Aufbauend auf einer Einleitung in die Thematik werden in Kapitel II typische Einsatzszenarien im Kontext von Industrie 4.0 beschrieben und damit verbundene Herausforderungen an industrielle Kommunikationslösungen identifiziert. In Kapitel III

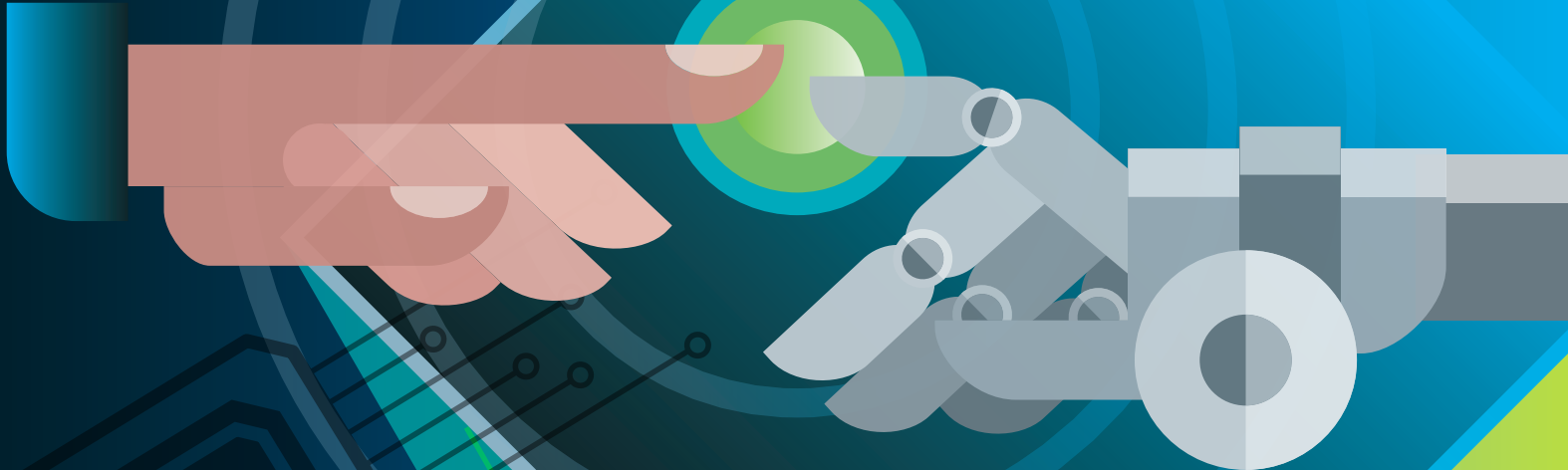
werden heute verfügbare Funktechnologien dargestellt und bewertet, in wie weit sie für typische Einsatzszenarien geeignet sind. Aktuelle Forschungsaktivitäten und in der Entwicklung befindliche Technologien werden ebenfalls beschrieben, und es werden Einschätzungen vorgenommen, wie diese die Anforderungen unterschiedlicher Szenarien im Bereich von Industrie 4.0 erfüllen. In Kapitel IV werden die daraus ableitbaren Empfehlungen dargestellt.

## Präambel

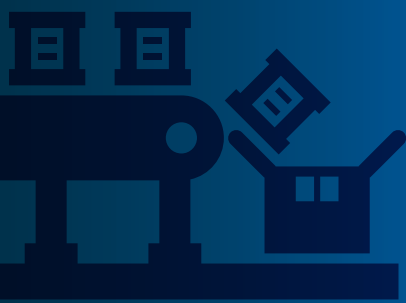
Im Mai 2015 wurde von der ITG (Informationstechnischen Gesellschaft) im VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.) im Bundeswirtschaftsministerium die öffentliche Diskussionssitzung „Funk für Industrie 4.0“ veranstaltet. Dabei wurde bestätigt, dass die heute zur Verfügung stehenden Funktechnologien aufgrund besonderer Anforderungen an Zuverlässigkeit, Sicherheit und Echtzeitfähigkeit für zukünftige Industrie 4.0 Anwendungsszenarien nicht ausreichen und dass trotz einer Reihe von Projektinitiativen weiterhin ein erheblicher Bedarf zur Erforschung und Entwicklung geeigneter Funktechnologien und Konzepte besteht.

Aus diesem Grunde hat der VDE das vorliegende Positionspapier ausgearbeitet. In diesem Papier werden denkbare Einsatzszenarien im Kontext von Industrie 4.0 untersucht und damit verbundene Anforderungen für industrielle Kommunikationslösungen identifiziert. Es wird dargestellt und bewertet, in wie weit heute verfügbare Funktechnologien für diese Szenarien geeignet sind. Anschließend wird dargelegt, welche Verbesserungen von in Entwicklung befindlichen Funktechnologien erwartet werden können. Der dabei erkennbare Handlungsbedarf wird in Empfehlungen formuliert.





# INDUSTRIE - 4,0



# I. Einleitung

## I.1 Was ist Industrie 4.0?

Industrie 4.0 ist ein deutsches Zukunftsprojekt, das neue automatisierte Fertigungsverfahren für die Industrie in der „vierten industriellen Revolution“ ermöglichen soll. Die vierte industrielle Revolution basiert auf den technischen Möglichkeiten des 21. Jahrhunderts durch den kombinierten Einsatz von moderner Elektronik, Informationstechnologien wie künstlicher Intelligenz und Technologien zur Vernetzung.

Der anhaltende Fortschritt der Informationstechnik mit seiner exponentiellen Zunahme an Rechen- und Speicherkapazität ermöglicht in Kombination mit der Mikrosystemtechnik und Kommunikationstechnik immer leistungsfähigere Systeme zur Kommunikation und Steuerung, die zudem immer stärker miteinander vernetzt werden. Ein grundlegendes Ziel von Industrie 4.0 Projekten ist die Nutzbarmachung der in den Informations- und Kommunikationstechnologien erreichten und in der nahen Zukunft zu erwartenden Fortschritte für industrielle Unternehmen.

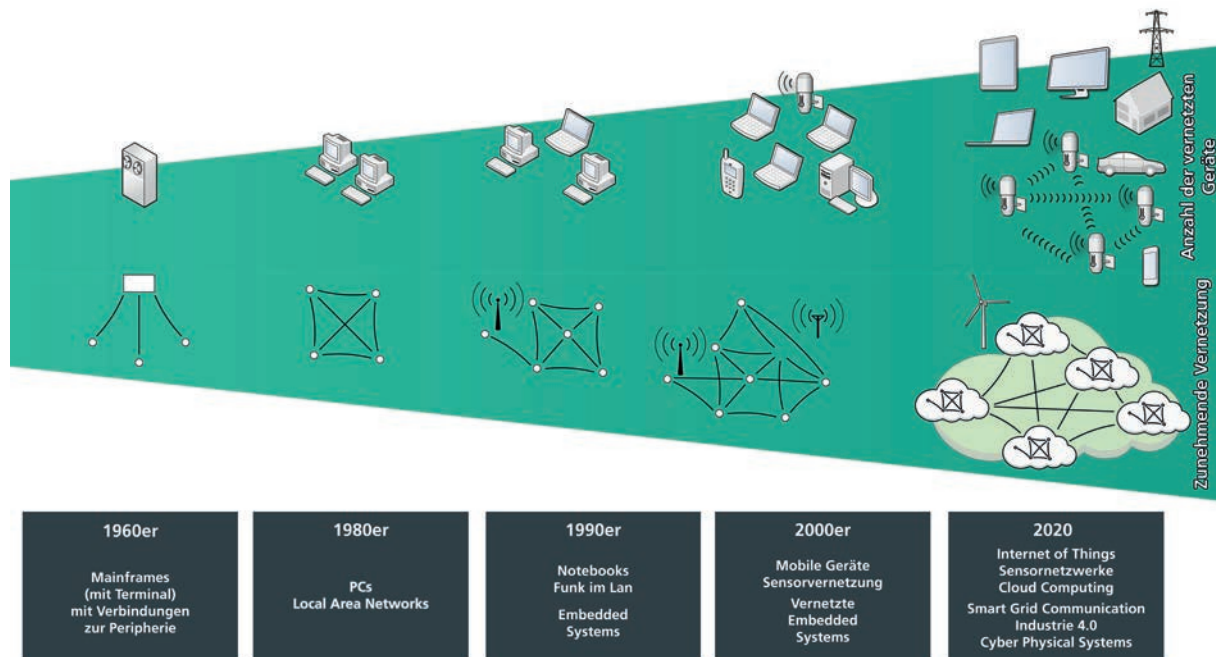


Bild I-1: Entwicklung der Informationstechnologie (Quelle: Fraunhofer ESK)

## I.2 Herausforderungen für die Funkkommunikation durch Industrie 4.0

Bei der Digitalisierung und Integration der Prozesse auf verschiedenen Ebenen müssen unterschiedliche Systeme zuverlässig und effizient zusammenwirken. Durch Integration und Vernetzung von physikalischen Systemen mit Informationstechnologien entstehen Cyber-Physische Systeme (CPS), die auf modernen Kommunikationstechnologien wie Sensornetzen und dem Internet basieren. Dabei werden reale (physische) Objekte und Prozesse mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen über Informationsnetze verknüpft [I-1].

Mit Industrie 4.0 werden neue Strukturen bezeichnet, in der Produktions- und Logistiksysteme als CPPS (Cyber-Physische Produktionssysteme) verfügbare Informations- und Kommunikationsnetze weltweit nutzen und ausbauen. Damit kann ein weitgehend automatisierter Informationsaustausch stattfinden, in dem Produktions- und Geschäftsprozesse optimal aufeinander abgestimmt werden. In einem so weit gespannten Umfeld spielt für diese Struktur eine Vielzahl von Modellen, Systemen und Konzepten aus den unterschiedlichsten Domänen eine wichtige Rolle. Durch die zunehmende Vernetzung bisher weitgehend autarker Systeme aus unterschiedlichen Unternehmensbereichen (wie Entwicklung, Produktion, Logistik, Kundenmanagement usw.) entsteht ein „System von Systemen“ wie das IIoT (Industrial Internet of Things), auf dessen Grundlage Industrie 4.0 als eine zusätzliche Integrationsebene angesehen werden kann [I-2].

Diese Veränderungen erfordern weitere Standardisierung und Normierung sowohl der leitungsgebundenen als auch der funkgestützten industriellen Kommunikation. Die unter Federführung von DIN/DKE ausgearbeitete „Normungs-Roadmap Industrie 4.0“ liegt mittlerweile in der Version 2 vor. Zu den zentralen Themen und Empfehlungen der Roadmap in Bezug auf industrielle Funkkommunikation gehören [I-2]:

- **Topologie:** Es wird empfohlen zu untersuchen, wie eine ideale Netzstruktur für Industrie 4.0 aussieht, wobei auch die funkgestützte Kommunikation mit betrachtet wird.
- **Verfügbarkeit von Spektrum:** Die Nutzung von Funktechnologien für betriebs- und sicherheitskritische Anwendungen setzt Frequenzspektren oder Spektrumsnutzungskonzepte voraus, die einen den Anforderungserfordernissen entsprechenden, ungestörten Einsatz von Funkübertragung erlauben.
- **Koexistenz:** Durch die stark wachsende Anzahl von Funkanwendungen werden zunehmend Maßnahmen zum übergreifenden Koexistenz-Management erforderlich.
- **Funktechnologien:** Die für Heim- und Bürokommunikation entwickelten Technologien decken die Anforderungen industrieller Automatisierungsanwendungen nur teilweise ab. Daher werden im Zuge der Umsetzung von Industrie 4.0 spezielle Funkstandards erforderlich. Hierzu finden bereits Standardisierungsarbeiten statt.
- **Integration und Interoperabilität:** Bürokommunikation und Kommunikation zur industriellen Automatisierung und Steuerung sollen zukünftig weltweit zusammenwirken. Daher sind Maßnahmen zur Integration der Funkkommunikations- und Managementsysteme vorzunehmen.

Die Entwicklung konsensbasierter Normen ist erforderlich und wird von den zuständigen Gremien weltweit unterstützt [I-3]. Ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zur Umsetzung von Industrie 4.0 war die Entwicklung des „Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) im Rahmen der „Plattform Industrie 4.0“ (siehe hierzu [I-3] und [I-4]), das mittlerweile in DIN SPEC 91345 formal standardisiert worden ist. Dieses Referenzarchitekturmodell ist in [Bild I-2](#) dargestellt und gibt einen kompakten Überblick, welche Aspekte bei Industrie 4.0 eine wichtige Rolle spielen. Das Modell umfasst einerseits den kompletten Produktlebenszyklus („Life Cycle Value Stream“) von der Entwicklung über die eigentliche Fertigung bis zur nachgeschalteten Wartung und Verwendung der produzierten Güter. Andererseits erstreckt es sich über alle Hierarchieebenen („Hierarchy Levels“) in der industriellen Fertigung hinweg – vom Feldgerät über komplexere Verarbeitungsstationen bis hin zur global vernetzten Welt. Diese dreidimensionale Dar-

stellung unter Berücksichtigung aller wesentlichen Aspekte erlaubt es unter anderem, konkrete Technologien auf einheitliche Art und Weise in den Gesamtkontext zu Industrie 4.0 einzuordnen.

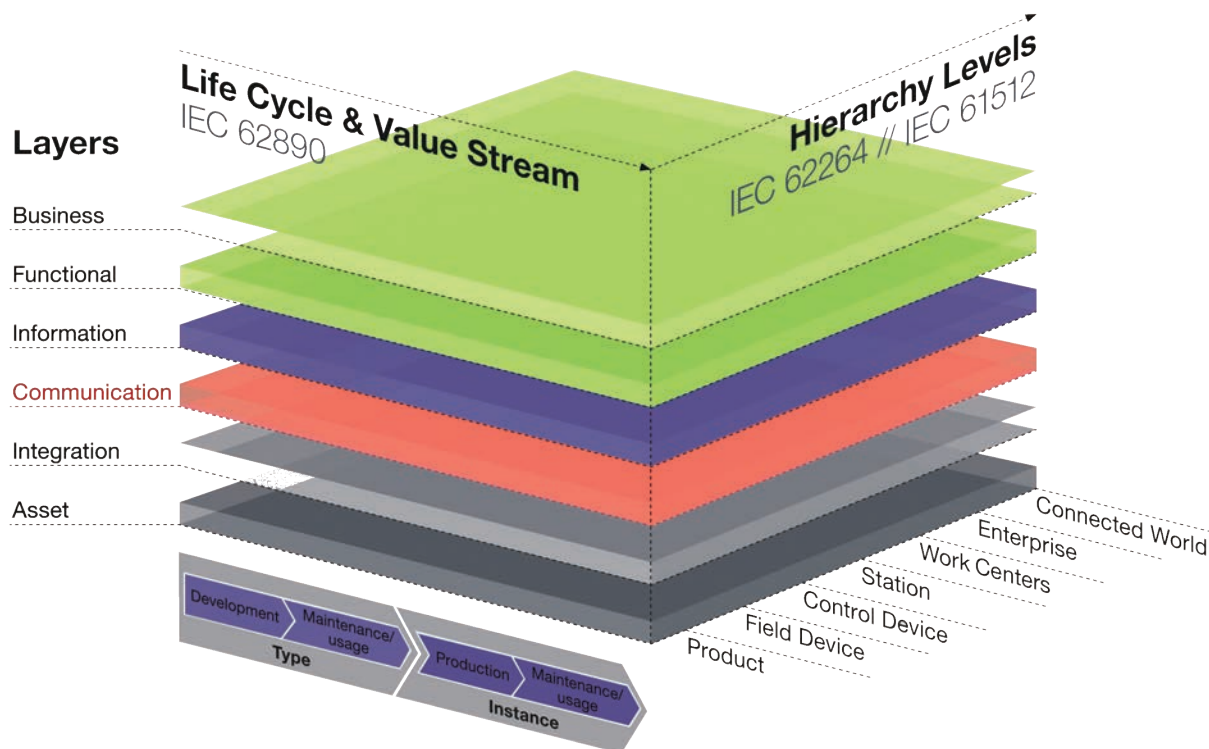


Bild I-2: Abbildung des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (Quelle: ZVEI)

Eine funkbasierte Kommunikation adressiert natürlich primär den „Communication“-Layer im RAMI 4.0 Modell, wobei sich die Kommunikation über alle Hierarchieebenen hinweg erstrecken kann. Dies fängt an bei drahtlos vernetzten Werkstücken oder Werkstückträgern, die entsprechenden Anlagen und Maschinen selbstständig mitteilen können, wie sie bearbeitet werden sollen, geht dann über die Feld- und Steuerungsebene (z. B. zur drahtlosen Anbindung von sich bewegenden Sensoren und Aktuatoren) sowie die weiteren Ebenen bis zur „Connected World“. Funktechnologien können hier eine wichtige Rolle spielen bei der Internetanbindung von kompletten Fabriken ohne existierende drahtgebundene oder optische Infrastruktur (z. B. in geographisch entlegenen Gegenden). Genauso erstrecken sich die potenziellen Einsatzmöglichkeiten von funkbasierter Kommunikation über den kompletten Produktlebenszyklus. So können im Entwicklungsstadium beispielsweise sehr effizient und flexibel drahtlose Sensoren zur Evaluierung und zum Testen von frühen Prototypen eingesetzt werden, wohingegen bei der eigentlichen Fertigung drahtlos vernetzte Produktionsanlagen zum Einsatz kommen können. Aber auch nachdem fertige Produkte im Einsatz beim Kunden sind, kann eine drahtlose Kommunikation sinnvoll zur Anwendung kommen, um beispielsweise auf effiziente Art und Weise und ohne große Anforderungen an eine drahtgebundene Vernetzungsinfrastruktur Felddaten zurück an den Hersteller zu schicken, der diese dann z. B. zur Qualitätssicherung und für eine zukünftige Produktoptimierung auswerten kann.

### I.3 Warum Funkkommunikation in Industrie 4.0?

Derzeit wird die Vernetzung im industriellen Bereich durch drahtgebundene Systeme dominiert. Funksysteme werden hauptsächlich zur Anbindung unkritischer mobiler oder beweglicher Systeme für Aufgaben

wie Monitoring oder Telemetrie eingesetzt. Diese Anwendungen stellen vergleichsweise geringe Anforderungen an Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit der eingesetzten Funksysteme [I-5].

Für die Herstellung der im Industrie 4.0 Kontext zunehmend vorgesehenen „individualisierten Produkte“ wird in den Geschäftsprozessen erhöhte Flexibilität gefordert [I-6]. Die Kommunikationsfähigkeit aller Komponenten in der industriellen Fertigung ist Voraussetzung für eine hoch dynamische und flexible Industrie 4.0-Produktion [I-7]. Die Verknüpfung aller Komponenten ist bei der Informationsverarbeitung mit verteilter Intelligenz über Funk sinnvoll realisierbar. Das führt zur Steigerung der Mobilität in der Produktion, der Flexibilität von Werkzeugen und der Dynamik in der Logistik. Somit können Ziele bezüglich Zuverlässigkeit und Flexibilität kosteneffizienter erreicht werden. Leitungsgebundene Systeme stoßen dabei schnell an ihre Grenzen, insbesondere mit der prognostizierten großen Anzahl zukünftiger Sensoren und Aktuatoren in der industriellen Fertigung [I-8]. In Fertigungsprozessen reduziert Funk den Aufwand für Verkabelung und bietet neue Möglichkeiten, kritische Informationen auch mobil zu erfassen und zu verbreiten. Funk ermöglicht flexible Kommunikationsansätze insbesondere in schwer zugänglichen oder gefährlichen Bereichen (explosionsgefährdete Umgebungen, Anlagen mit aggressiven Chemikalien) und bei dichten Maschinenanlagen. Funk wird oft eingesetzt, wenn drahtgebundene Verbindungen nicht oder nur mit hohem wirtschaftlichen Aufwand realisierbar sind. Funk erlaubt neue Anwendungsfelder zu erschließen, wie die Messung und Kontrolle von bewegten Objekten sowie deren gleichzeitige Lokalisierung und Zuordnung.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass funkbasierte Kommunikation in verschiedenen Einsatzszenarien auf vielfältige Art und Weise zur Umsetzung von Industrie 4.0 beitragen kann und aufgrund der zu erwartenden mobilen Anwendungsszenarien notwendig sein wird. Im Zusammenhang mit Industrie 4.0 wird die Kommunikation mit „Smart Products“ über den gesamten Lebenszyklus von Bedeutung sein. Hinzu kommt, dass Szenarien, die für die Zukunft als relevant betrachtet werden - z. B. Mobile Assistenzsysteme mit Wearables oder industrielle Drohnen - ohne den Einsatz von Funktechnik nicht möglich sind.



# EINSATZ- BEREICHE

## II. Funkkommunikation in Industrie 4.0 – Anwendungen und Anforderungen

Industrie 4.0 umfasst ein sehr breites Spektrum an Szenarien und Anwendungen, wobei sich die Anforderungen der industriellen Anwendungen signifikant von denen privater Endanwender oder professioneller Einsatzgebiete im Verwaltungs- und Organisationsbereich unterscheiden können. Diese industriellen Anwendungen und ihre Anforderungen werden im folgenden Abschnitt näher beschrieben. Im Anschluss daran werden weitere ausgewählte neuartige industrielle Anwendungen skizziert, die im Wesentlichen erst mit Funk realisiert werden können. Abschließend werden verschiedene Faktoren aufgezeigt, die eine Etablierung bereits existierender Funkssysteme in der Industrie bislang verhindert haben.

### II.1 Einsatzbereiche von Funkkommunikation in der Industrie

#### Wartung und Diagnose

Während der Inbetriebnahme, aber auch bei der Fehleranalyse im Betrieb ist es sinnvoll, zusätzliche Sensoren zur Erfassung weiterer Parameter einzusetzen. Hier bieten parallel zur Anlagen- und Maschinensteuerung eingesetzte drahtlose Sensornetze die Möglichkeit, detaillierte Informationen über den Zustand der Maschine zu bekommen. Drahtlose Lösungen bieten sich hierfür an, da sie einerseits sehr einfach und flexibel eingesetzt werden können (insb. auch als Retrofit-Lösung) und sie andererseits selbst sehr wartungsarm sind. Die **Diagnose und Wartung** (Diagnostics and Maintenance) von Industrieanlagen hat dabei generell keine allzu hohen Anforderungen an die Kommunikation, und dem entsprechend werden Funksysteme auch heute schon erfolgreich eingesetzt. Wie in **Tabelle II-1** zusammengefasst ist, sind die Anforderungen an die Latenz typischerweise größer als 20 ms, und eine Restfehlerwahrscheinlichkeit (im Sinne einer Paketfehlerrate) in der Größenordnung von  $10^{-4}$  ist oftmals noch problemlos tolerierbar. Die **Zustandsüberwachung** (Condition Monitoring) kann als ein Spezialfall der Wartung und Diagnose betrachtet werden, bei der ein Maschinenzustand oder ein Prozess regelmäßig beispielsweise auf Überschreiten (bzw. Unterschreiten) einer physikalischen Kenngröße überwacht wird. Beispiele für physikalische Kenngrößen sind Schwingungen, Temperaturen, Luftfeuchtigkeit und die Lage von Objekten, die mit Hilfe von Sensoren kontinuierlich gemessen und analysiert werden. Eine Weiterführung der Zustandsüberwachung ist die **Prädiktive Instandhaltung** (Predictive Maintenance), bei der basierend auf der Überwachung zusätzlich Prognosen getroffen werden. Diese Prognosen können dazu verwendet werden, proaktive Maßnahmen, wie einen rechtzeitigen Austausch oder eine Wartung von Komponenten, einzuleiten.

#### Diskrete Fertigung

Bei der **diskreten Fertigung** (Discrete Manufacturing) werden – typischerweise unter Einsatz moderner Automatisierungstechnik – diskret zählbare Ergebnisse produziert, also z. B. Autos, Bohrmaschinen, Schrauben, usw. Häufig ist dafür eine Vielzahl von Fertigungs- und Montageprozessen erforderlich, um das finale Produkt zu erhalten. Bei einer modernen und hochautomatisierten diskreten Fertigung kommen üblicherweise speicherprogrammierbare Steuerungen zum Einsatz, mit deren Hilfe zusammen mit geeigneten Sensoren und Aktuatoren geschlossene Regelkreise (Closed-loop Control) aufgebaut werden. Solche Regelkreise weisen oftmals immens hohe Anforderungen an die Latenz (typische Zykluszei-

ten zwischen 1 ms – 12 ms) und die Zuverlässigkeit (Fehlerwahrscheinlichkeit  $10^{-9}$ ) der Kommunikation auf [II-1]. Ein besonders anspruchsvoller Teilbereich der diskreten Fertigung ist die **Bewegungsregelung** (Motion Control), die sich auf die Regelung der Beschleunigung, Pose, Geschwindigkeit oder einer Kombination aus diesen beschränkt. Für die Regelung werden Aktuatoren verwendet, wie beispielsweise Elektromotoren bei einem Fließband oder Hydraulikzylinder bei Pressen. Die Latenzanforderungen an die Kommunikation sind bei der Bewegungsregelung oftmals sogar noch etwas höher. Je nach Anwendung muss bei der oben genannten Zuverlässigkeit eine Latenz (bzw. Zykluszeit) in der Größenordnung von 250  $\mu$ s bis 1 ms sichergestellt werden können. Gerade bei der Bewegungsregelung bietet sich der Einsatz einer funkbasierten Kommunikation an, da bei sich bewegenden oder rotierenden Teilen ansonsten mit Schleppketten und/oder Schleifringen gearbeitet werden muss, die die Freiheitsgrade bei der Konstruktion einer Anlage einschränken, fehleranfällig sind und einen hohen Verschleiß aufweisen. Typische Parameter für Anwendungen innerhalb der diskreten Fertigung sind ebenfalls in **Tabelle II-1** dargestellt. Dabei ist insbesondere zu beachten, dass oftmals vergleichsweise kleine Pakete mit relativ geringen Zwischenankunftszeiten übertragen werden, was durch die Vielzahl von Sensoren und Aktuatoren innerhalb einer Produktionsanlage schnell zu hohen Datenraten führen kann.

### Prozessautomatisierung

Die **Prozessautomatisierung** (Process Automation) bezieht sich auf chemische und verfahrenstechnische Vorgänge, wie zum Beispiel das Erhitzen, Mischen, Trennen oder Synthetisieren von Stoffen. Anwendungen der Prozessautomatisierung findet man z. B. in der Öl- und Gasproduktion, bei der elektrischen Energieerzeugung oder in Schmelzbetrieben wie Eisen-, Stahl- und Tempergießereien. Die Vorgänge in der Prozessautomatisierung sind kontinuierliche, sequentielle und objektbezogene Vorgänge und nicht ohne weiteres umkehrbar. Hierbei kommen häufig verschiedenste Sensoren (z. B. zur Überwachung der Temperatur oder der Durchflussgeschwindigkeit) sowie entsprechende Aktuatoren (z. B. Ventile) zum Einsatz. Eine Funkkommunikation bietet sich dabei an, da teilweise harsche Umgebungsbedingungen vorherrschen (z. B. in der chemischen Industrie) und große Distanzen in der Größenordnung bis zu mehreren Kilometern überbrückt werden müssen. Je nach Ablaufgeschwindigkeit der zu steuernden Prozesse hat man dabei typischerweise moderate Anforderungen an die Latenz (50 ms bis einige wenige Sekunden) und die Zuverlässigkeit (Fehlerrate kleiner  $10^{-5}$ ).

### Augmented Reality

Unter **Augmented Reality** ist eine computergestützte Erweiterung der Realität zu verstehen. Diese kann in der Theorie alle Sinne ansprechen, jedoch werden gegenwärtig primär visuelle Reize mittels einer Brille, eines Tablet-PCs oder eines vergleichbaren Gerätes eingesetzt. Dazu wird beispielsweise eine wahrgenommene Umgebung mittels einer Augmented-Reality-Brille mit zusätzlichen Informationen und virtuellen Objekten angereichert. Dieses Verfahren kann zum Beispiel im Industriekontext dazu verwendet werden, Mitarbeiter zu schulen, Wartungsarbeiten durchzuführen oder auf intuitive und ergonomische Art und Weise den aktuellen Zustand von Anlagen oder Maschinen zu überwachen. Im ersten Fall können Anweisungen mittels der Brille projiziert werden, die das Einweisen in die Maschinensteuerung unterstützen (Assisted Worker) – sei es lokal oder über eine entfernte Zentrale. Im Zusammenhang mit Wartungsarbeiten können beispielsweise Fehlermeldungen und Korrekturanweisungen auf die Brille projiziert werden. Videos oder Bilder weisen relativ große Datenmengen auf und erfordern daher hohe Datenraten (im Bereich von Mbit/s). Außerdem müssen diese zusätzlich noch mit der Realität synchroni-



siert werden, denn wird der Versatz zwischen der physikalischen Realität und den überlagerten virtuellen Augmentierungen zu groß (z. B. bei der Durchführung einer Kopfbewegung), so schränkt dies die sinnvolle Nutzbarkeit entsprechender Anwendungen stark ein, und der menschliche Körper reagiert mit Übelkeit (Cyber Sickness). Daher muss die Übertragung der ggf. extern augmentierten Bilder mit einer niedrigen Latenz (10 ms) bei einer gleichzeitig hohen Zuverlässigkeit erfolgen.

### Lager und Logistiksysteme

Innerhalb von **Lager und Logistiksystemen** kann zwischen mobilen Vehikeln, wie fahrerlosen Transportsystemen (FTS bzw. Automated Guided Vehicles - **AGV**), und statischen Systemen wie Kran- und Hebezeugen (Cranes and Hoists), unterschieden werden. Beispiele für FTS sind Roboter oder kleine Transportfahrzeuge, welche schwere Produkte oder Materialien zwischen Fertigungsanlagen und Lagerhallen befördern. Diese größtenteils noch liniengeführten Systeme erhalten aufgrund zusätzlicher Sensorik immer mehr Autonomie und können auf diese Weise zunehmend flexibel eingesetzt werden. Eine funkbasierte Vernetzung der FTS zur Zustandsüberwachung und Ortsbestimmung ist dann jedoch zwingend erforderlich. Außerdem ist nur dann eine flexible Auftragsvergabe möglich, wie sie in Industrie 4.0 vorgesehen ist. Da diese Fahrzeuge mobil sind und sich über die gesamte Fabrikanlage bewegen, muss die Funkkommunikation eine Mobilität mit Geschwindigkeiten von etwa 10 m/s unterstützen. Die hohe Zuverlässigkeit mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von höchstens  $10^{-9}$  bei einer Latenz von etwa 15 ms – 20 ms muss auch bei der Bewegung der FTS innerhalb der gesamten Fabrikhalle erfüllt werden.

Bezüglich statischer Systeme sind gerade **Kräne und Hebezeuge** ein wesentlicher Bestandteil der Produktion, Lagerhaltung und Kommissionierung. Aufgrund der dabei auftretenden Drehbewegungen und des insgesamt hohen Verschleißes ist der Einsatz von Kabeln in diesem Anwendungsfall besonders problematisch. Die Anforderungen an die Kommunikation sind vergleichbar mit FTS, wobei eine relativ hohe Reichweite (bis zu 100 m) bei einer geringeren Bewegungsgeschwindigkeit ( $< 5$  m/s) erreicht werden muss.

### Funktionale Sicherheit

In vielen der oben erwähnten Anwendungen ist gewöhnlich die Sicherstellung der funktionalen Sicherheit erforderlich, wie sie in IEC 61508 [II-3] definiert ist. Die funktionale Sicherheit hat das Ziel, sowohl den Menschen vor Verletzungen zu schützen als auch die Umgebung im Zusammenhang mit einer Maschine, einem Ablauf bzw. Produktionsprozess abzusichern. Hierzu werden oftmals Sensoren verwendet, wie zum Beispiel Laserscanner, die einen abgesteckten Bereich absichern oder eine schützende taktile Haut aus kapazitiven Sensoren besitzen, die die Annäherung einer Person detektieren können. Die Sicherstellung der funktionalen Sicherheit an sich ist bei Verwendung geeigneter Safety-Protokolle und Safety-IOs prinzipiell nicht das Problem, sondern die gleichzeitige Gewährleistung einer hohen Maschinen- und Anlagenverfügbarkeit. Die damit einhergehenden Anforderungen an die Latenz sind abhängig vom jeweiligen Prozess, da je nach konkreter Anordnung und Prozessgeschwindigkeit immer individuell eine entsprechende Sicherheitsbeurteilung durchgeführt werden muss. Als grober Richtwert kann aber eine Latenz von etwa 10 ms und eine maximale Fehlerwahrscheinlichkeit von  $10^{-9}$  dienen.

**Tabelle II-1** gibt einen Überblick über die verschiedenen Anwendungen und deren Anforderungen, die aus einer Reihe von Publikationen als auch BMBF Projekten zusammengestellt wurden [II-1, II-2, II-4, II-5,

II-6, II-7, II-9, III-18]. Dabei wird ersichtlich, dass es eine sehr große Bandbreite an Anwendungen mit teilweise recht unterschiedlich ausgeprägten Anforderungen gibt, von denen einige hinsichtlich Latenz und Zuverlässigkeit sehr kritisch sind. So unterscheiden sich die Anforderungen aus der diskreten Fertigung von denen der Condition Monitoring-Anwendungen oder einer Augmented-Reality-Brille doch beträchtlich. Aus der Sicht des Anwenders sollte ein schlüssiges Gesamtkonzept je nach Anwendungsanforderung verschiedene Technologien koordinieren, so dass Komplexität, Installationskosten und Betriebskosten minimiert werden können.

	Diagnose & Wartung		Diskrete Fertigung		Lager und Logistik			Prozess-automatisierung	Augmented Reality	Funktionale Sicherheit
	Generell	Condition Monitoring	Generell	Motion Control	Generell	AGV	Kran-szenario			
Latenz (Sensor zu Controller zu Aktor)	> 20ms	100ms	1 ms – 12 ms	250 µs – 1 ms	> 50 ms	15 ms – 20 ms	15 ms – 20 ms	50 ms – Xs	10 ms	10 ms
Zuverlässigkeit (i.S. „erfolgreich“ innerh. der Latenzanf. )	$1 - 10^{-4}$	$1 - 10^{-5}$	$1 - 10^{-9}$	$1 - 10^{-9}$	$> 1 - 10^{-2}$	$> 1 - 10^{-6}$	$> 1 - 10^{-6}$	$1 - 10^{-5}$	$1 - 10^{-5}$	$1 - 10^{-9}$
Datenrate	kbit/s – Mbit/s	kbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s – Mbit/s	kbit/s	Mbit/s – Gbit/s	kbit/s
Paketgrößen	> 200 Byte	1 – 50 Byte	20 – 50 Byte	20 – 50 Byte	< 300 Byte	< 300 Byte	< 300 Byte	< 80 Byte	> 200 Byte	< 20 Byte
Reichweiten (zw. komm. Geräten)	< 100 m	100 m – 1 km	< 100 m	< 50 m	< 200 m	~ 2 m	< 100 m	100 m – 1 km	< 100 m	< 30 m
Bewegungsgeschwindigkeit	0 m/s	< 10 m/s	< 10 m/s	< 10 m/s	< 40 m/s	< 10 m/s	< 5 m/s	Generell keine, sonst < 10 m/s	< 3 m/s	< 10 m/s
Zeitkritische Mobilitätsunterstützung	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	ja
Gerätedichte	$0,33 - 3 \text{ m}^{-2}$	$10 - 20 \text{ m}^{-2}$	$0,33 - 3 \text{ m}^{-2}$	$< 5 \text{ m}^{-2}$	$\sim 0,1 \text{ m}^{-2}$	$\sim 0,1 \text{ m}^{-2}$	$\sim 0,1 \text{ m}^{-2}$	10.000 / Fabrik	$> 0,03 - 0,02 \text{ m}^{-2}$	$> 0,03 - 0,02 \text{ m}^{-2}$
Energieeffizienz	n/a	10 Jahre	n/a	n/a	n/a	< 8h	n/a	10 Jahre	1 Tag	n/a
Lokalisierungs-genauigkeit	< 50 cm	< 50 cm	n/a	n/a	< 1 cm	< 5 cm	< 10 cm	< 50 cm	n/a	< 50 cm

*Tabelle II-1: Selektierte industrielle Anwendungen und ihre Anforderungen. Diese Tabelle ist das Ergebnis aus einer Reihe von Publikationen [II-1, II-2, II-4, II-5, II-6, II-7, II-9] und den BMBF geförderten ZDKI Projekten [III-18].*

## II.2 Industrie 4.0-Anwendungen, die nur mit Funk möglich sind

Im vorherigen Abschnitt wurden gegenwärtige industrielle Anwendungen und ihre Anforderungen beschrieben. Die Funkkommunikation kann hierbei typischerweise als eine Kabelersatzlösung gesehen werden. In diesem Abschnitt werden Anwendungsszenarien beschrieben, die erst mit Hilfe von Funk überhaupt realisierbar sind.

### Mobile Werkzeuge

Das bekannte Beispiel des Akkuschraubers, der z. B. in der Automobil- oder der Flugzeugfertigung eingesetzt wird, um das Drehmoment jeder an einem Produkt angezogenen Schraube per Funkkommunikation in einer Datenbank festzuhalten, wird sich künftig auf weitere intelligente Werkzeuge mit integrierter Qualitätssicherung ausweiten. Diese besitzen entweder eine Anbindung an lokale Server oder an cloudbasierte Dienste. Eine drahtlose Kommunikation erlaubt hierbei eine maximale Bewegungsfreiheit und somit ein maximales Maß an Ergonomie. Während die Anforderungen an die Kommunikation von

solchen Anwendungen meistens eher unkritisch sind, kommt der präzisen Lokalisierung dieser Werkzeuge hierbei eine besondere Bedeutung zu. Bei dem erwähnten Beispiel des Akkuschraubers kann mit Hilfe einer ausreichend genauen Lokalisierung bspw. sichergestellt werden, dass bestimmte Schrauben nur in einer fest vorgegebenen Reihenfolge angezogen werden können. Wird der Schrauber an einer falschen Stelle angesetzt, kann er einfach nicht freigegeben werden, so dass sich Fehler vermeiden lassen.

### Mobile Roboter

Mobile, über Funktechnologien vernetzte Roboter werden in der Produktion zukünftig eine immer wichtigere Rolle spielen. Mit der Einführung der siebten Achse wurde dabei bereits damit begonnen, den Freiheitsgrad eines Roboters durch lineare Bewegungen des Fußes innerhalb einer Zelle deutlich zu erhöhen. Im Bereich der Greifer gibt es bereits drahtlose Lösungen, um die Sensorik kabellos mit der Infrastruktur zu verbinden. Auch bei ständigem Werkzeugwechsel ist der Einsatz von Funktechnologien sinnvoll. Mit der Einführung neuer Handhabungskonzepte erscheint künftig der Einsatz vollständig mobiler vernetzter Roboter, z. B. temporär für Wartungsarbeiten, denkbar.

### Mobile Assistenzsysteme (Mensch-Maschine-Interaktion, SCADA)

Aufgrund neuer Konzepte der Mensch-Maschine-Kooperation wächst die Bedeutung von mobilen Geräten wie industrietauglichen Tablets, Augmented Reality Brillen und anderen Wearables, die den Mitarbeiter in die Lage versetzen, an jedem Ort im Unternehmen die notwendigen Informationen zu erhalten. In Kombination mit einer zuverlässigen Lokalisierung des Mitarbeiters bzw. dessen Zuordenbarkeit zu bedienenden Maschinen sind auch steuernde Funktionen denkbar. Vor allem für Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten bieten mobile Geräte mit integriertem Assistenzsystem z. B. zur Darstellung von Dokumentationen und den gleichzeitigen Zugriff auf Automatisierungskomponenten eine deutliche Effizienzsteigerung.

### Einsatz von Flugdrohnen

In der Prozessindustrie bzw. überall da, wo sich Produktionsanlagen über eine große Fläche erstrecken, gibt es bereits erste Ansätze zum Einsatz von Drohnen, die drahtlos gesteuert werden oder sogar autonom fliegen und bspw. Bildinformationen oder andere Sensorwerte übertragen. Auch hier spielt eine schnelle und zuverlässige Datenübertragung eine wichtige Rolle, um Drohnen sicher betreiben zu können. Gerade durch Bild- oder Videoübertragungen können gleichzeitig aber auch vergleichsweise hohe Datenraten auftreten.

### Retrofit-Lösung zur Unterstützung der RAMI 4.0 - Verwaltungsschale

Das Modell der Verwaltungsschale geht davon aus, dass sämtliche Automatisierungskomponenten über einen sog. „digitalen Zwilling“ verfügen, der den aktuellen Zustand der Komponente, die aktuellen Prozessdaten und weitere statische und dynamische Informationen bereithält. Dies bedingt jedoch eine ständige direkte Kommunikation zwischen dem digitalen Zwilling und der Automatisierungskomponen-

te. Funktechnologien könnten hier zum Beispiel für die nachträgliche Ausrüstung bestehender Anlagen, aber auch bei hoher Skalierung der zu vernetzenden Komponenten zum Einsatz kommen.

## II.3 Technische Herausforderungen für die Funkkommunikation in Industrie 4.0

In den vorherigen Abschnitten wurden typische Anforderungen industrieller Anwendungen erläutert und die Bedeutung der Funkkommunikation für die Industrie dargestellt. Jedoch gibt es eine ganze Reihe von Gründen, warum sich bisher keine Funktechnologie für industrielle Anwendungen in der Breite etabliert hat. Dies umfasst insbesondere die im Folgenden etwas näher ausgeführten Aspekte.

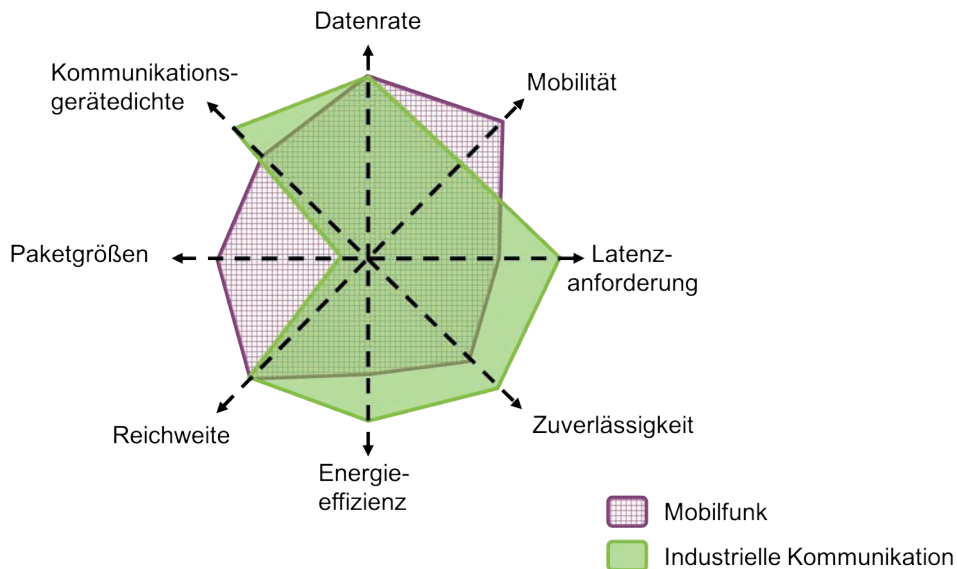
### Unterschiedliche Funkausbreitungseigenschaften

Die Funkumgebung unterscheidet sich drastisch für die verschiedenen Anwendungen im Industriekontext. Während in einigen Szenarien, wie beispielsweise bei der Prozessautomatisierung, die Kommunikation im Freien erfolgen kann, findet die Kommunikation in der diskreten Fertigung typischerweise innerhalb der Fabrik statt. Die Signalausbreitung im Freien weist dabei prinzipiell unterschiedliche Charakteristika im Vergleich zur Ausbreitung innerhalb einer Fabrik auf, da zum Beispiel metallische Dächer, Wände, Gegenstände, Träger und insbesondere Maschinen direkte Auswirkungen auf den Funkkanal haben. Hierbei kann es insbesondere im Vergleich zu gewöhnlichen Bürogebäuden zu wesentlich unterschiedlicher Streuung, Beugung und Reflexion des Funksignals kommen, wodurch der erfolgreiche Empfang eines Signals beeinträchtigt werden kann. Schwierige Funkkanalbedingungen durch schlechte Ausbreitungseigenschaften in den konkreten Übertragungsszenarien, gepaart mit hoher Signalinterferenz verursacht durch Systemeigeninterferenz oder durch örtliche Koexistenz mit anderen Funksystemen erschweren den Einsatz heute verfügbarer Systeme. Zudem kann es ggf. je nach genutztem Frequenzband erhebliche Störungen durch industrielle Anlagen und Maschinen geben, wie beispielsweise beim Lichtbogenschweißen, bei leistungsfähigen Elektromotoren, o.ä.

### Hohe und divergente Anforderungen an die Kommunikation

Wie bereits in Abschnitt II.1 präsentiert, haben industrielle Anwendungen vergleichsweise hohe Anforderungen an ein Kommunikationssystem. In [Tabelle II-1](#) sind die Anforderungen aus den verschiedenen industriellen Anwendungen zusammengefasst dargestellt und typischen Anforderungen aus dem Mobilfunk gegenübergestellt. Es ist ersichtlich, dass die industrielle Kommunikation aus Anwendungssicht besonders hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit. Dies wird aus der Perspektive der Kommunikationsanforderungen durch eine Kombination der Parameter Latenz und der Zuverlässigkeit definiert. Zusätzlich zu den Latenz- und Zuverlässigkeitsanforderungen kommen noch unterschiedliche Kombinationen von weiteren Metriken, wie beispielsweise eine dichte Anordnung von Kommunikationseinheiten, relativ kleine Pakete, die oftmals nur wenige Byte groß sind, sowie sehr hohe Datenraten aufgrund niedriger Zwischenankunftszeiten von Paketen. Für bestimmte Anwendungsfälle, wie z. B. in der Prozessautomatisierung, sind zudem auch hohe Reichweiten erforderlich. Aufgrund der erwarteten Flexibilität von Produktionsanlagen, in denen auch mobile Roboter an verschiedenen Prozessen arbeiten sollen, als auch im Fall von Intra- und Inter-Logistik (z. B. fahrerlose Transportsysteme) sind auch Mobilitätsanfor-

derungen zu erfüllen, die üblicherweise aber deutlich unter denen des klassischen Mobilfunks (z. B. zur Unterstützung der Kommunikation in Autos oder Zügen) liegen.



*Bild II-1: Vergleich der Kommunikationsanforderungen zwischen Mobilfunkanwendungen und industriellen Anwendungen.*

Gerade die hohen Anforderungen an Latenz, Zuverlässigkeit und Echtzeitfähigkeit sind zudem bei Verwendung von unlicenziertem Spektrum (z. B. im 2,4- oder 5 GHz-Band) derzeit nicht oder nur sehr eingeschränkt realisierbar. Dies liegt an speziellen regulatorischen Vorgaben (z. B. die Notwendigkeit, ein „listen-before-talk“ durchzuführen), sowie daran, dass das Spektrum mit anderen Nutzern geteilt werden muss, die unter Umständen sogar ein grundsätzlich anderes Übertragungsverfahren einsetzen können. Dies kann zu Koexistenzproblemen führen, welche von jeder Technologie anders bewältigt werden. Durch die Verwendung von Koexistenzmechanismen kann es zu Verzögerungen kommen, da diese typischerweise eine Beobachtungsphase des Mediums vor dem Kanalzugriff voraussetzen [II-8]. Des Weiteren kann es trotz der Verwendung von Koexistenzmechanismen zu Verlusten der Datenübertragung kommen, da Geräte (auch wenn sie zur selben oder einer anderen Technologie angehören) unabhängige Entscheidungen treffen und somit nicht optimal aufeinander abgestimmt sind. Daraus resultiert, dass Technologien für das unlicenzierte Spektrum keine Garantien für den Medienzugriff versprechen können und sich somit nur bedingt für industrielle Anwendungen eignen.

### Begrenzte Reichweiten im lizenzfrei nutzbaren Spektrum

Im Bereich der lokalen Vernetzung wurden über die letzten Jahre hinweg verschiedene Funktechnologien entwickelt und sehr erfolgreich im Markt eingeführt. Diese Technologien arbeiten in lizenzfrei nutzbaren Frequenzbändern, in denen die Sendeleistung und somit die Reichweite eingeschränkt ist. Beispiele sind hierbei Bluetooth (Reichweiten abhängig von der Sendeleistungskategorie bis ca. 100 m) und insbesondere IEEE 802.11-basierte WLAN-Netze (Freiraumreichweiten bis ca. 200 m), die sich als dominierende Systeme für lokale Netzwerke bei Privatanwendern sowie im Office-Bereich etabliert haben. Sie dienen in vielen Fällen auch dazu, die für mobile Multimediaanwendungen in Smart Phones erforderlichen Datenraten zu liefern und Mobilfunknetze damit zu entlasten. Zelluläre Systeme dagegen operieren

im lizenzierten Spektrum und erlauben die Anbindung über mittlere bis weite Distanzen (> 250 m). Sollen Technologien der lokalen Netzwerke ebenfalls für höhere Reichweiten eingesetzt werden, so ist der Aufbau von Mesh-Netzen möglich (wie zum Beispiel bei ZigBee® und WirelessHART®). Jedoch muss dann für die größere Reichweite eine Erhöhung der Latenz aufgrund der zusätzlichen Hops in Kauf genommen werden, wodurch dieses Konzept für eine Reihe industrieller Anwendungen ausscheidet.

#### Limitierte Fehlertoleranz von industriellen Anwendungen

Während Menschen und Anwendungen für den privaten Bereich bis zu einem gewissen Grad mit fehlenden Informationen umgehen und sich anpassen können, ist diese Fähigkeit in industriellen Anwendungen sehr stark eingeschränkt. Fehlende Informationen können nur in seltenen Fällen approximiert werden. In vielen Fällen werden jedoch keine fehlenden Daten toleriert, was in Folge dessen zu einem Abbruch des Steuerungsprozesses führt. Gegenwärtige Funksysteme bieten in vielen Fällen nicht die erforderliche Zuverlässigkeit. Somit müssen zukünftige Funksysteme entweder eine extreme Zuverlässigkeit bieten oder zukünftige industrielle Anwendungen müssen so entworfen werden, dass sie eine gewisse Fehlerrate ohne Sicherheitsrisiken tolerieren.

#### Unzureichende funkbasierte Lokalisierungsunterstützung

Die kontinuierliche Ortung von Objekten zur Realisierung vielfältiger innovativer Anwendungsszenarien nimmt eine immer wichtigere Rolle ein. Insbesondere wird die Ortung in Industrieräumlichkeiten, die nicht durch GPS und ähnlich bekannte Verfahren abgedeckt werden können, immer bedeutender. Bei den heutigen Entwicklungen im Rahmen von Industrie 4.0 spielen die Aufenthaltsorte mobiler Geräte und Personen sowie die Verfahren zur Lokalisierung eine immer wichtigere Rolle. Künftige Produktionsanlagen müssen aufgrund der Forderung nach hochgradig individualisierten Produkten („Losgröße 1“) entsprechend flexibel organisierbar sein. Das bedeutet aber, dass fest installierte Fertigungslinien aufgebrochen und durch mobile Komponenten ersetzt bzw. ergänzt werden. Dies wird zu einem massiven Einsatz mobiler Systeme führen, sowohl hochflexiblen fahrerlosen Transportsystemen (FTS) aber auch zu mobilen Robotern mit entsprechenden Handhabungsfunktionen, um mit fest installierten Maschinen zu kollaborieren. Daher wäre es ideal, wenn das ausgewählte Funksystem nicht nur die oben erwähnten Anforderungen erfüllt, sondern zusätzlich eine genaue Lokalisierung unterstützt. Gegenwärtige Systeme sind nicht in der Lage, beide Anforderungen zu erfüllen.

## II.4 Standardisierungsaspekte

Neben den industriellen Anwendungen und Ihren technischen Anforderungen an die Funkkommunikation, gibt es noch Anforderungen an die Standardisierung und deren Abläufe. Die Zusammenführung von Anforderungen und Rahmenbedingungen für Funkkommunikation außerhalb der Telekommunikation erfolgt in Deutschland typischerweise in industrieorganisierten Gremien der Fachverbände mit den nationalen Spiegelgremien der Normungsorganisation DKE. Auf staatlicher Seite ist die regulatorische Arbeit über die Arbeitskreise der BNetzA organisiert, beispielsweise für die Einbringung der deutschen Positionen bei der ITU-R. Darüber hinaus sind Arbeitsgruppen in den politischen Plattformen „Industrie 4.0“ und dem „Digitalgipfel“ gegründet worden. Diese dienen dem orchestrierten Zusammenführen von domänenübergreifenden Technologien und dem Thematisieren von daraus abzuleitenden Querschnittsbetrachtungen.

gen unterschiedlichster Art. Das domänenübergreifende Zusammenwachsen der Technologien erfordert neue Wege der Zusammenarbeit und muss dabei die branchentypischen Ausprägungen wie Internationalisierungsgrad der Prozesse und Standardisierungskulturen berücksichtigen. Aus diesem Grund wurde für die Umsetzung von Industrie 4.0 und somit für die umfassende Erschließung der Standardisierung von den Verbänden Bitkom, VDMA, ZVEI und den Normungsorganisationen DIN und DKE aus der Plattform Industrie 4.0 heraus, das Standardisierungscouncil Industrie 4.0 (SCI 4.0) gegründet. Die abgestimmte Zusammenführung von domänenübergreifenden Lösungen aus der Digitalindustrie mit der Industrieausrüstung ist essentiell für Industrie 4.0. Angewendet auf die funkbasierte Industriekommunikation für Industrie 4.0 hat sich im Zentralverband der Elektroindustrie (ZVEI) die „Taskforce 5G“ gegründet, um eine abgestimmte Koordination aller 5G-Aktivitäten für die Industriekommunikation sicherzustellen. Die **Tabelle II-2** fasst alle wesentlichen Gremien in Deutschland zur industriellen Funkkommunikation zusammen.

Nationale Gremien	Schwerpunkte
Bitkom  Projektgruppe Kommunikationsprotokolle I4.0	Analyse von Protokollen für RAMI 4.0 Layer zur horizontalen und vertikalen Integration sowie Entwicklungen und angrenzende Themen in der Kommunikationstechnologie
Bitkom  AK Frequenzen	Arbeitsgremium für die Vor- und Nachbereitung der Weltradio-konferenz (WRC)
Bitkom  AK Mobilkommunikation	Mobile Kommunikation und Netzkonzepte für Internet der Dinge, Industrie 4.0
BMVI  NVG -AK1 und AK2 (beide geleitet durch die BNetzA)	Nationale Arbeitskreise der „Nationalen Vorbereitungsgruppe“ zur Weltfunkkonferenz 2019 (WRC-19)
BMBF/BMWi/BMVI Förderprojekte	Zeitlich begrenzte Fachgruppen der Förderprojekte, beispielsweise ZDKI, 5G: Industrielles Internet; 5G: Taktiler Internet; IC4F, PMSE
Digitalgipfel   Fokusgruppe 5G	Die Fokusgruppe 5G setzt sich aus zahlreichen Akteuren aus den Anwendungsbranchen und der Mobilfunkbranche zusammen um im Dialog die Anforderungen der Branchen mit 5G abzustimmen
DKE  K731 Funktechnik	Nationales Spiegelgremium zu ETSI-Gremien
DKE  AK 956.02 Wireless Industrial Networks	Nationales Spiegelgremium zu IEC-Gremien
DKE  AK 1941.02 Kommunikation I4.0	Arbeitskreis für die Normungsroadmap Industrie 4.0 im Bereich Kommunikation
DIN-NIA	Der DIN-Normenausschuss Informationstechnik und Anwendungen (NIA) erarbeitet Normen auf dem Gebiet der Informationstechnik und ausgewählter Anwendungsbereiche der Informationstechnik
DIN   Focus.ICT	Das Aufgabengebiet von FOCUS.ICT umfasst die projektbezogene Umsetzung der Deutschen Normungsstrategie im ICT-Bereich. FOCUS.ICT konzentriert sich dabei auf komplexe Projekte mit gremienübergreifendem Charakter
NAMUR   AK 4.15 Mobile Automation	Der Arbeitskreis „Mobile Automation“ der „Interessengemeinschaft Automatisierungstechnik der Prozessindustrie e.V.“ behandelt u.a. Einsatzfelder von drahtlosen Technologien in der Automatisierungstechnik und mobilen Anwendungen im Produktions- und Technikumfeld der Prozessindustrie
Plattform Industrie 4.0   UAG Netzkommunikation	Unterarbeitsgruppe der Plattform Industrie 4.0 AG1 Standardisierung zur Netzkommunikation
VDI/VDE GMA Fachausschuss 5.21 Funkgestützte Kommunikation	Gremium der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik für die Weiterentwicklung der Richtlinienblätter der VDI/VDE 2185
VDE ITG-Fachbereich Kommunikationstechnik	Gremien mit wissenschaftlichen Fokus auf die Kommunikationstechnik
VDMA   Fachverband elektrische Automation	Anwenderplattform zu Themen: Ethernet Sicherheit für Mensch und Maschine Kabellose Kommunikation
ZVEI LK Kommunikation   TaskForce 5G	Taskforce für die Erstellung, Koordination und Vertretung der Arbeiten bei der 3GPP und ITU-R zur industriellen Kommunikation

**Tabelle II-2:** Überblick über die **nationalen** Gremien zur industriellen Funkkommunikation in Deutschland.

Die hohe Anzahl an Gremien deckt einerseits eine Vielzahl an Themen zur Funkkommunikation ab. Es führt aber auch zu einer Zersplitterung des Expertenwissens und reduziert somit eine erfolgreiche Durchsetzung in der internationalen Standardisierung und Regulierung. Es sollte daher eine inhaltliche Abstimmung zwischen den nationalen Gremien erzielt werden, um eine effektive Arbeitsteilung für die Internationalisierung zu erreichen.

Die internationale Standardisierung zur industriellen Funkkommunikation erfolgt bisher in mehreren Organisationen getrennt je nach Technologie und Anwendungsbereich. Hervorzuheben sind dabei:

- **3GPP** (3rd Generation Partnership Project), einst gegründet für die weltweite Harmonisierung von UMTS setzt die 3GPP kontinuierlich die Spezifikationen der nächsten Generationen fort. Aktuelle Arbeiten umfassen unter anderem HSPA, LTE und den neuen Standard NR (5G).
- **ETSI** als Gründungsmitglied der 3GPP überführt die 3GPP-Spezifikationen in europäische Normen und führt eine Vielzahl an fachspezifischen Gremien zur Industrie 4.0 Kommunikation.
- **ITU-R** erarbeitet mit ihren Studiengruppen weltweite Empfehlungen für die Spektrumsnutzung und -Zuteilung und ist unter anderem auch verantwortlich für die Beschreibung der IMT-2020 Rahmenbedingungen.
- **IEEE** umfasst die bisher am umfangreichsten genutzten Standards für die Industriekommunikation, basierend auf den IEEE 802.xx Standards.
- **IEC** standardisiert elektrotechnische Komponenten, Systeme und Software zur Industrieausrüstung und nutzt unter anderem IEEE-Standards für die industrielle Härtung von Funksystemen im industriellen Einsatz.

Die **Tabelle II-3** fasst alle wesentlichen internationalen Gremien zur industriellen Funkkommunikation zusammen.

Internationale Gremien	Schwerpunkte
3GPP   TSG-SA1	Entwicklung des neuen Standards New Radio (NR) und die Weiterentwicklung von LTE, HSPA und GSM. Erfassung von Anforderungen für Anwendungen, z. B. industrielle Automation, zu mobilen und leitungsgebundenen Kommunikationstechnologien
Bluetooth® SIG	Bluetooth® Special Interest Group für die Entwicklung und Verbreitung der Bluetooth®-Technologie
CEN   ITC310	Advanced Automation Technologies und Anwendungsaspekte
CEPT/ECC   PT1	Das Projektteam 1 (ECC PT1) ist verantwortlich für IMT-Themen, einschließlich Kompatibilitätsstudien, Entwicklung von Bandplänen, Entwicklung und Überprüfung von ECC-Ergebnissen und zur Vorbereitung von CEPT-Positionen auf WRC-19 Tagesordnungspunkte 1.13, 9.1.1, 9.1.2 & 9.1.8.
ETSI   oneM2M®	Entwicklung von technischen Spezifikationen für machine-to-machine Kommunikation, welche Hardware und Software adressieren und über verschiedene Normungsorganisationen in eine Norm überführt wird
ETSI   ERM	Elektromagnetische Verträglichkeit und eine effektive und effiziente Nutzung des Funkspektrums; Harmonisierte Normen für die Europäische Funkgeräterichtlinie für alle Anwendungsgebiete für drahtlose Kommunikation und EMV-Fragen
Fieldcom Group	Feldbuskommunikation und Geräteintegration (HART®, FOUNDATION® Fieldbus, PROFIBUS Field Device Integration)
IEC   TC 65 Industrial-process measurement, control and automation	Erarbeitung von internationalen Standards für Systeme und Elemente, angewendet in der Prozess- und diskreten Industrie

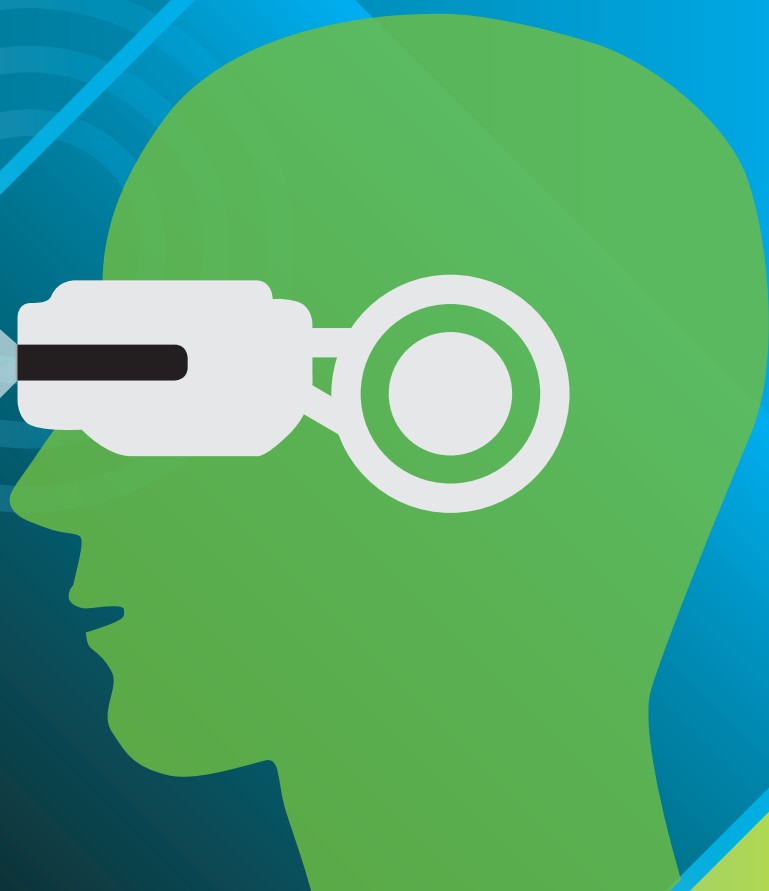
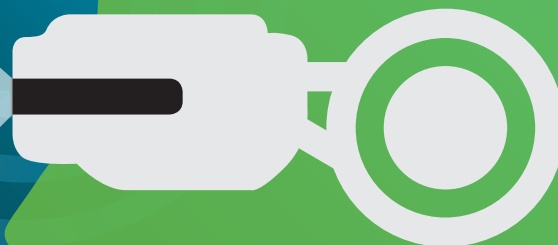
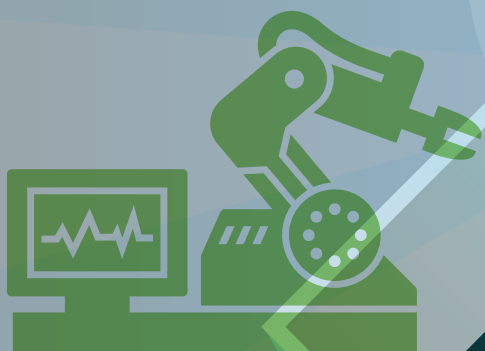


Internationale Gremien	Schwerpunkte
IEC   SEG8 Communication Technologies	Priorisierung der technischen Entwicklung und Standardisierung im Bereich der Kommunikationstechnologien und Architekturen und übertragen in einen nachhaltigen Prozess zur Einbindung von Kommunikationstechnologien in einschlägige IEC-Gremien
IEC   SEG7 Smart Manufacturing	Zentrale Gruppe für die Koordination der Zusammenarbeit von ISO, JTC1 / WG10, IEEE, Konsortien und anderen Organisationen zu Industrie 4.0
IEEE   802 LAN/MAN Standards Committee	Wireless-Standards für WLAN, Bluetooth®, WirelessHART® und TSN
IIC (Industrial Internet Consortium)   Connectivity Group	Die IIC Industrial Connectivity (IC) Task Group ist eine Arbeitsgruppe der Technology Working Group (TWG), die sich mit Connectivity Aspekte im Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) Modell beschäftigt
ISO   TC 184 Automation systems and integration	Zu den Standardisierungsbereichen gehören Informationssysteme, Automatisierungs- und Steuerungssysteme und Integrationstechnologien
IO-Link	Konsortium für feldbusunabhängige Kommunikationslösungen mit Sensoren und Akteuren
ITU-R   WP5A	WP5A ist verantwortlich für Studien für den nichtöffentlichen mobilen Landfunkdienst und dem Wireless-Zugang in den festen Dienst
ITU-R   WP5D	WP5D ist verantwortlich für die gesamten Funksystemaspekte von IMT-Systemen, IMT-2000 (3G), IMT-Advanced (4G) und IMT-2020 (5G)
ISA (International Society of Automation)	Normungsorganisation für Kommunikation, Sicherheit und Geräteverwaltung in der Industrieautomation

*Tabelle II-3: Überblick über die internationalen Standardisierungsgremien zur industriellen Funkkommunikation.*

Die in der ZVEI „Taskforce 5G“ organisierte Industrieausrüstung arbeitet aktuell in der 3GPP | TSG-SA1 und bringt die Anforderungen der Industrie in den Standardisierungsprozess ein. Der zweite Handlungsstrang umfasst die Arbeiten bei der ITU-R | WP5A zur weltweiten Harmonisierung der WIA-Zuteilung im 5.8 GHz Band und die Arbeiten in der ITU-R | WP5D zur Einbindung von Industriefunkanforderungen in die IMT-2020 Technologie, entsprechend dem WRC-19-Agendapunkt 9.1.8. Dazu vorgeschaltet werden die Arbeiten im nationalen AK1 der BNetzA und auf europäischer Ebene in der CEPT/ECC | PT1 abgestimmt.

Mit Industrie 4.0 verzahnen sich die Arbeiten in der internationalen Standardisierung und erfordern enge Kooperationen über Domänengrenzen hinweg. Die bereits in nationalen Gremien gefestigte branchenübergreifende Zusammenarbeit sollte daher auch in der internationalen Arbeitsteilung genutzt und wechselseitig ausgebaut werden. Neben der erhöhten Durchschlagskraft in der Internationalisierung von Industrie 4.0 Funksystemkonzepten, erhöht sich auch das Potenzial für Skaleneffekte zur Verhinderung von Marktfragmentierung wichtiger Zulieferkomponenten. Daher ist eine noch stärkere Beteiligung der Industrieausrüstung in den internationalen Gremien der 3GPP und ITU-R notwendig.



TECHNO-

LOGGEMEN-



## III. Funktechnologien für die Anwendungen in Industrie 4.0

Die vielfältigen Anwendungen, die im vorherigen Kapitel beschrieben wurden, stellen sehr unterschiedliche Anforderungen an die zu verwendende Funktechnologie. Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal zwischen den potenziellen Lösungsansätzen ist die Wahl des Frequenzbandes für die Übertragung. Parameter wie erreichbare Datenraten, Zuverlässigkeit und Reichweite werden durch die Wahl der Übertragungsfrequenz stark beeinflusst. Ein weiterer wichtiger Aspekt für die Wahl der Vernetzungstechnologie ist aber auch die Entscheidung, ob das Funknetzwerk im Besitz des Nutzers ist oder ob ein Netzbetreiber Dienste zur Verfügung stellt. Hier haben sich bislang die Ansätze der Mobilfunkbetreiber parallel und unabhängig von den Konzepten privater, von den Nutzern betriebener lokaler Netzwerke entwickelt, die primär auf Standards aus der Computerwelt basieren. Diese Grenze muss im Sinne optimaler Lösungsansätze in den kommenden Jahren aufgelöst werden, wobei neue Geschäftsmodelle entstehen werden, die den Übergang zwischen den heutigen Positionen bedienen können. Es ist darüber hinaus klar erkennbar, dass es nicht eine einzige, allgemein verwendbare Lösung für alle Applikationen geben kann.

Nachfolgend werden zunächst die grundsätzlich einsetzbaren Frequenzbänder betrachtet. Anschließend werden heute verfügbare Lösungsansätze – sowohl mit Betreibermodell als auch in Eigenregie betrieben – skizziert und bewertet. Es zeigt sich, dass für viele industrielle Anwendungsbereiche bisher keine zufriedenstellenden Lösungen verfügbar sind. Daher erfolgt anschließend ein Blick auf Entwicklungsmöglichkeiten und aktuelle Projekte, in denen neue Ansätze erarbeitet werden. Auf der Basis dieser Überlegungen wird erkennbar, dass noch erheblicher Handlungsbedarf besteht, um die Vision einer zukünftigen, allgegenwärtigen Funkvernetzung im Industrieumfeld zur Realität werden zu lassen.

### III.1 Frequenzbänder für die industrielle Funkkommunikation

Das Frequenzspektrum ist in verschiedene Bereiche eingeteilt, die als Funkbänder bezeichnet werden. Drahtlose Industriekommunikation kann in lizenzfreien oder in lizenzpflichtigen Funkbändern bzw. unter Verwendung verfügbarer (Mobil-)Funknetze aufgebaut werden. Lizenzfreie Funkbänder ermöglichen im Allgemeinen eine schnelle Markteinführung oder Projektrealisierung zu relativ geringen Kosten. Dabei müssen nationale gesetzliche Bestimmungen eingehalten werden, die teilweise Bezug auf internationale Standards nehmen. Von wesentlicher Bedeutung ist die „ERC Recommendation 70-03 Relating to the use of Short Range Devices“ [III-1]. Die nutzbaren ISM (Industrial, Scientific and Medical) und SRD (Short Range Devices) Frequenzbänder sind in [Tabelle III-1](#) zusammengestellt.

Lizenzpflichtige Funkbänder werden an Nutzergruppen fest zugeteilt und ermöglichen eine bessere Übertragungsqualität durch Aufbau eigener Funknetze. In einigen Regionen können von Betreibern eingerichtete Betriebsfunknetze mit genutzt werden. Hierbei ist die geographische Lage und Größe variabel. Nicht öffentliche, private und professionelle Mobilfunknetze können in unterschiedlichen Frequenzbereichen auf Basis von Einzelzuteilungen zur Verfügung gestellt werden und sind an Bedingungen geknüpft [III-3].

Für industrielle Funkanwendungen können öffentliche Mobilfunknetze wie GSM, GPRS, UMTS oder LTE auf Basis von privatrechtlichen Verträgen mit den Mobilfunknetzbetreibern in dafür reservierten Frequenzbändern genutzt werden.

Frequenzband	Anwendungen	Anmerkung
13,56 MHz	Nahfeldkommunikation; im Wesentlichen für RFID, Smart Tags genutzt	Sehr geringe Datenrate
433 MHz	Für „Low Power Devices“ mit geringer Sendeleistung	nur Region 1 (Europa, Afrika, Nachfolgestaaten der UdSSR)
860 MHz	LPWAN: eingeschränkte Sendeleistung, unterschiedliche Bandbreiten, „Duty Cycle“	nur Region 1; dafür 900 MHz in Region 2 (Nord- und Südamerika)
2,4 GHz	Leistungsbegrenzung. WLAN, Bluetooth®, ZigBee®, WirelessHART® u.a.m.	Weltweit verfügbar, aber sehr stark ausgelastet.
5 GHz	Anwendungstechnologien WLAN und IWLAN. Datenraten bis etwa 450 Mbit/s.	Bisher weniger stark ausgelastet als das 2,4 GHz Band.
24 GHz	Radar	Bisher kaum Anwendungen für die Industriekommunikation.
60 GHz	Hochratige Line-of-Sight Kommunikation	Bisher kaum Anwendungen für die Industriekommunikation.

*Tabelle III-1: Lizenzfrei nutzbare Frequenzbänder (Darstellung gemäß [III-2])*

## III.2 Kanalmodellierung und Kanaleigenschaften

Eine besondere Herausforderung für die Funkkommunikation im industriellen Bereich besteht in der Anpassung des Übertragungsverfahrens an die Eigenschaften des Kanals. Daher ist eine präzise Modellierung des Funkkanals sehr wichtig. Industrielle Funkkommunikation soll in sehr unterschiedlichen Szenarien eingesetzt werden - von der Fertigungszelle mit schnell agierenden Robotern über Hochregallager mit Flurförderfahrzeugen bis zur räumlich ausgedehnten Produktionsanlage, in der chemische Prozesse ablaufen. Allen Bereichen ist gemeinsam, dass eine Vielzahl metallischer Komponenten für starke Reflexionen und damit für eine sehr ausgeprägte Mehrwegeausbreitung sorgt. Die dichte Anordnung unterschiedlicher Objekte führt in vielen Fällen zu Abschattungen, so dass keine direkte Verbindung (Line of Sight) zwischen Sender und Empfänger besteht. Zusätzlich ist mit Störstrahlung durch Fertigungseinrichtungen zu rechnen.

Diese Aspekte müssen beim Systementwurf berücksichtigt werden, wobei die Vielzahl möglicher Konstellationen die Modellierung anspruchsvoll gestaltet. Benötigt werden stochastische Kanalmodelle, mittels derer durch geeignete Parameterwahl eine ausreichend gute Vorhersage der Kanaleigenschaften erreicht werden kann.

In der Vergangenheit hat es in diesem Umfeld eine Reihe von Mess- und Modellierungsaktivitäten gegeben. Gerade im Bereich der Entwicklung von Standards für lokale Netze wurden hierzu international anerkannte Modelle für die Übertragungsfunktion des Kanals geschaffen:

- IEEE 802.11n [III-4]: Hier werden für die WLAN-Frequenzbereiche 2,4 GHz sowie 5 GHz Modellvarianten für unterschiedliche Umgebungen definiert. Allerdings beschränken sich diese auf typische Bürogebäude und offene Bereiche. Industrielle Umgebungen werden nicht explizit betrachtet.
- IEEE 802.11ax [III-5]: Aktuelle Diskussionen für Kanalmodelle zur Weiterentwicklung von WLAN konzentrieren sich wiederum auf die zuvor genannten Anwendungsbereiche. Eine gewisse Relevanz für

spezielle Industrieumgebungen haben allenfalls die Modelle E und F (Indoor Large Office/Warehouse bzw. Large Space Indoor).

- IEEE 802.15.4a [III-6]: Hier wird explizit ein Modell für UWB-Kanäle in industriellen Umgebungen im Frequenzbereich von 2 - 10 GHz definiert, dessen Gültigkeit allerdings nur für geringe Abstände (<8 m) zwischen Sender und Empfänger gegeben ist. Für die Betrachtung schmalbandiger Kanäle kann dieses Modell im Frequenzbereich skaliert werden.

Ebenso weist 3GPP eine lange Historie von Arbeiten zur Kanalmodellierung auf. Bereits im Umfeld von LTE sind 3D-Kanalmodelle entstanden, die Untersuchungen zur Ausrichtung von Antennenrichtkeulen sowohl in Elevation und Azimut zulassen. Diese Arbeiten sind im Kontext von 5G weiterentwickelt worden, indem auch höhere Frequenzen bis hin zu 100 GHz betrachtet worden sind.

- 3GPP TR 36.873 [III-7]: 3D Kanalmodelle für Frequenzen unterhalb von 6 GHz
- 3GPP TR 36.901 [III-8]: 3D Kanalmodelle für Frequenzen von 0,5 GHz bis zu 100 GHz: Hier werden Kanalmodelle für unterschiedliche Szenarien definiert. Dabei sind auch Indoor-Kanalmodelle betrachtet, jedoch keine speziellen Modelle für Industrieumgebungen.

Darüber hinaus existiert eine Reihe von Veröffentlichungen zu Messungen und Modellierungsansätzen in unterschiedlichen spezifischen Szenarien. Allerdings gibt es derzeit keinen allgemein anerkannten, gemeinsamen Ansatz für eine Modellierung in verschiedenen industriellen Umgebungen, der als Basis für die vergleichende Analyse von Systemalternativen herangezogen werden könnte. Deshalb wurde im Rahmen des ZDKI-Programms, das vom BMBF gefördert wird, eine Fachgruppe ins Leben gerufen, in der das Thema bearbeitet wird [III-9]. Dabei werden Aktivitäten verschiedener Projekte des Programms gebündelt und abgestimmt. Die Experten des Gremiums sind sich darin einig, dass eine fundierte Vermessung und Modellierung entscheidend für den Erfolg ist. Die verfügbaren Ressourcen für die Durchführung dieser Arbeiten sind allerdings sehr begrenzt.

Auch die Analyse der Interferenzproblematik muss ausgebaut werden. Aktuelle Ansätze für lokale Funknetze im Industriebereich basieren auf lizenzfrei nutzbaren Frequenzbändern. Daher müssen Störungen durch Interferenzen wegen der Vielfachbelegung dieser Bänder durch organisatorische Maßnahmen gelöst werden. Diese Aufgabe würde erheblich vereinfacht, wenn für die industrielle Funkkommunikation spezifische Frequenzbänder - ähnlich der Regulierung für intelligente Transportsysteme (ITS) - zugewiesen würden. Gegen eine spezifische Zuteilung spricht das Argument, dass dadurch eine Fragmentierung des Spektrums entsteht. Unabhängig davon ist die Frage nach der Störung durch unerwünschte Emission elektromagnetischer Wellen insbesondere für die unteren Frequenzbänder (bis 2,5 GHz) noch zu klären. Störquellen können hier unterschiedliche Fertigungseinrichtungen wie Motoren oder Schweißanlagen sein. Hier ist insbesondere der Einfluss von Impulsstörungen im Umfeld latenzarmer Kommunikationsslinks sorgfältig zu prüfen.

### III.3 Heute verbreitete Technologien

Nachfolgend werden heute verfügbare Technologien für die Funkvernetzung in industriellen Anwendungen aus technischer Sicht beschrieben. Für den einzelnen Anwendungsfall sind neben den technischen Aspekten weitere Kriterien zu berücksichtigen. So stellt sich die Frage, wer das Funknetz betreibt bzw.

die Komponenten besitzt. Derzeit sind die Verhältnisse noch relativ klar geregelt: Ein Mobilfunknetz wird durch einen Netzbetreiber zur Verfügung gestellt. Ein lokales Netz z. B. auf der Basis von WirelessHART® wird vom Anwender betrieben. In Zukunft konvergieren die verschiedenen Ansätze, z. B. unter dem Dach der 5G Entwicklung. Dann ist es wichtig, Technologie und Geschäftsmodell voneinander getrennt zu betrachten. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Migrationsstrategie. In den meisten Fällen werden Funktechnologien sukzessive im Feld eingeführt. Daher muss durch geeignete Schnittstellen und Kompatibilität zu etablierten Kommunikationssystemen dafür gesorgt werden, dass die Hürden für den Umstieg auf Funkvernetzung möglichst geringgehalten werden.

### III.3.1 Mobilfunk

Seit den Anfängen des Mobilfunks wurde etwa alle zehn Jahre eine neue Generation eines Mobilfunksystems entwickelt. Der Fokus der ersten Generation (1G) und zweiten Generation (2G) lag auf der mobilen Telefonie. Während 1G auf analoger Übertragungstechnik basierte, war 2G ein digitales Übertragungssystem. Erst mit der Einführung der 2G Technologie GSM, welches global eingesetzt werden konnte, erfolgte eine erfolgreiche und weltweite Verbreitung und Nutzung von Mobiltelefonen. GSM unterstützt Datenraten von 40 kbit/s bei einer Latenz von 400 ms. Internetdienste wurden erstmalig etwa um die Jahrtausendwende mit der Einführung des Mobilfunkstandard 3G bzw. UMTS unterstützt. Dies schaffte auch die Basis für sogenannte Smartphones und Tablets, wodurch seither die Anforderungen an den Mobilfunk stetig gestiegen sind. UMTS erlaubte Datenraten von 384 kbit/s (max. 2 Mbit/s) bei einer Latenz von 300 ms. Mit dem 4G-Standard LTE wurde die mobile Breitbandübertragung signifikant weiterentwickelt, so dass Datenraten von über 100 Mbit/s (max. 375 Mbit/s mit verschiedenen Techniken) und Latenz von etwa 50 ms (min. 15 ms für spezifischen Datenverkehr) unter günstigen Bedingungen möglich sind. Als Folge davon hat der mobile Datenverkehr massiv zugenommen, weil unter anderem auch Videodienste (z. B. YouTube®) heutzutage auch unterwegs genutzt werden können. Bei der Nennung der Datenraten ist zu berücksichtigen, dass die tatsächlich erreichte Performanz stark von der Auslastung der jeweiligen Funkzelle und dem Abstand zwischen mobilem Terminal und der Basisstation abhängt.

Während Mobilfunknetze eine entscheidende Rolle für den Internetzugang von Konsumer-Endgeräten spielen, ist der Einsatz im professionellen Bereich noch sehr ausbaufähig.

Die nächste Generation 5G soll in den kommenden Jahren standardisiert werden, sodass nicht nur die mobile Breitbandnutzung möglich ist (s. Kapitel III.7). In Zusammenhang mit 5G Entwicklungen wird parallel auch die LTE Technologie weiterentwickelt, sodass beispielsweise Datenraten von 600 Mbit/s oder eine Latenz von einigen wenigen Millisekunden mit LTE möglich werden sollen.

### III.3.2 Professioneller Mobilfunk (wie TETRA/DMR)

Der Professionelle Mobilfunk (engl. Professional Mobile Radio, PMR) ist im deutschsprachigen Raum unter der Bezeichnung „Bündelfunk“ (Trunked Radio System) verbreitet. Nichtöffentliche, private und professionelle Mobilfunknetze sind lizenzpflichtig und können in unterschiedlichen Frequenzbereichen gemäß [Tabelle III-2](#) aufgebaut werden.

Frequenzbereiche	Wellenlänge
VHF 34,75 – 34,95 MHz	8-m Band
VHF 68 – 87,5 MHz	4-m Band
VHF 136 – 174 MHz	2-m Band
UHF 410 – 430, 440 – 442 und 445 – 448 MHz	70-cm Band

*Tabelle III-2: Frequenzbereiche für professionellen Mobilfunk*

Das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) hat TETRA (ETSI EN 300 392) und DMR (ETSI TS 102 361) als internationale Standards für den nichtöffentlichen Mobilfunk verabschiedet.

Zu den besonderen **Merkmale**n gehören dynamische Gruppenbildungen und Gruppenrufe, schneller Rufaufbau (Push-to-Talk), gesicherte Kommunikation durch Methoden zur Authentifizierung, zum Aufbau von geschlossenen Benutzergruppen sowie durch strikte Regeln zur Kommunikation (wer mit wem kommunizieren darf). Dabei können Endgeräte entweder direkt miteinander oder über eine Basisstation kommunizieren.

Als Sicherheitstechnologie dient sie insbesondere in Notfall- und Krisensituationen, da bei diesem Szenario öffentliche Funknetze nicht mehr zuverlässig zur Verfügung stehen oder schnell überlastet sind. Moderne PMR Systeme entsprechen den Forderungen der deutschen Gesetzgeber nach Verfügbarkeit und Datensicherheit und werden zur sicheren und drahtlosen Steuerung kritischer Infrastruktur eingesetzt.

**Anwendergruppen** finden sich in den Bereichen Polizei, Feuerwehr und Zivilschutz (in Deutschland das BOS Funknetz) sowie in den Bereichen Energie, Verkehr (Öffentlicher Nahverkehr) und verarbeitende Industrie.

Zu den Nachteilen des PMR-Funks gehört die begrenzte Bandbreite. Ein weiterer Nachteil ist die relativ ineffiziente räumliche Wiederverwendung von Frequenzen. Daher wird an kombinierten Nutzungsmöglichkeiten mit breitbandigeren Funkstandards wie LTE gearbeitet.

### III.3.3 Low Power WAN Technologien

Low Power Wide Area Networks (**LPWAN**) wie z. B. LoRa<sup>®</sup> oder SIGFOX<sup>®</sup> sind Funknetze, die speziell für geringen Energieverbrauch, kleine Datenmengen und die Übertragung über größere Entfernungen (mehrere Kilometer) oder innerhalb von Gebäuden vorgesehen sind. Damit können sie eine Lücke zwischen Mobilfunknetzen und Nahfeld/Wi-Fi-Technologien schließen. Mit LPWAN Technologien lassen sich sowohl nationale oder internationale Netze als auch geographisch begrenzte Netze für regional beschränkte Aufgaben errichten. Typische Anwendungen für LPWAN Technologien sind Aufgaben im Internet der Dinge (IoT) wie Telemetrie, Überwachung und Steuerung über mittlere oder größere Entfernungen. Dazu gehören die industrielle Kommunikation mit Maschinen oder Sensoren, Anwendungen in den Bereichen Energie, Smart Home oder Smart City und die Steuerung von Straßenbeleuchtungen [III-10].

Zu den LPWAN Standards gehören die 3GPP Technologie NB IoT (Narrow Band Internet of Things), UNB (Ultra Narrow Band Standards von SIGFOX<sup>®</sup>) und LoRa<sup>®</sup> (Long Range). In LPWAN Netzen vermitteln Basisstationen (Gateways) Daten zwischen den Endgeräten und dem Server. Die physikalische Verbindung zwischen Endgeräten und Basisstationen kann entweder über lizenzfreie Frequenzen (bei LoRaWAN

oder Sigfox) oder über Mobilfunkfrequenzen erfolgen (bei NB IoT). Gateways und Server können über IP Verbindungen kommunizieren (mittels Mobilfunk, Ethernet, Wi-Fi oder Satellitenkommunikation).

Das „3rd Generation Partnership Project“ (3GPP) hat in seiner Release-Version 13 eine Reihe neuer Technologien für das IoT veröffentlicht, darunter LTE Cat-NB1 (**NB-IoT**). Im Vergleich zu Technologien im unlizenzieren Spektrum kann NB-IoT durch die Nutzung eines lizenzierten Spektrums Interferenzen reduzieren. Anbieter können bestimmte Frequenzen für die Übertragung ihrer Dienste freihalten und in Kombination mit einer Datenpriorisierung eine höhere Dienstgüte (QoS) zusagen. Bei der Spezifizierung von Narrowband IoT wurde auf Synergiemöglichkeiten mit LTE geachtet [III-11].

**LPWAN Funknetze** in lizenzfreien Funkbändern werden in Europa vorwiegend in den Frequenzbereichen 433 oder 868 MHz aufgebaut. Beispielsweise basiert die physikalische Schicht der **LoRa® Technologie** auf der Modulationsart „Chirp Spread Spectrum“, die relativ robust gegenüber Störungen ist und seit vielen Jahren in der Luft- und Raumfahrt eingesetzt wird. Damit hat das System eine hohe Sensibilität (etwa -137 dBm) und erlaubt Übertragungen über größere Entfernungen. Das erste Release für das Übertragungsprotokoll LoRaWAN wurde 2015 von der LoRa Alliance® verabschiedet [III-12]. Durch die sternförmige Systemarchitektur lässt sich der Protokollüberhang klein halten, wodurch sich einfache und kostengünstige Endgeräte realisieren lassen [III-13].

### III.3.4 Wireless Local Area Networks auf Basis von IEEE 802.11

Mit dem Überbegriff „WLAN“ (Wireless Local Area Network) bezeichnet man den Funkstandard für lokale Rechnernetze nach dem IEEE802.11 Standard, dessen erste Version 1997 verabschiedet wurde. Ausgehend von einem 5 MHz-Kanalraster bei einer Trägerfrequenz von 2,4 GHz und Datenraten von max. 2 Mbit/s in 1997 werden heute über Weiterentwicklungen des Standards Datenraten von mehr als 5 Gbit/s erreicht. Dabei werden Bandbreiten von 20 bis 160 MHz im 2,4 GHz bzw. 5 GHz-Band verwendet (802.11n, 802.11ac), im Bereich von 60 GHz gar Kanalbandbreiten von mehr als 2 GHz (802.11ad, 802.11ay).

Als „Wi-Fi“ (Wireless Fidelity) bezeichnet man das „zugehörige“ Industrie-Konsortium aus Herstellern und Netzbetreibern, welches zur Zertifizierung von Hardware eingesetzt wird; dabei wird meist nur eine Teilmenge des aktuellen Standards abgebildet. Kennzeichnend für WLAN bzw. Wi-Fi sind vergleichsweise kurze Innovationszyklen von nur 2-3 Jahren.

Durch die hohe Dynamik der Standardisierung konnte sich WLAN gegen andere, teilweise konkurrierende Systeme durchsetzen und ist kommerziell außerordentlich erfolgreich. Anwendungen gehen heute weit über klassische Rechnernetze hinaus und umfassen die Anbindung von mobilen Datenträgern, IP-Telefonie, Druckern, Displays etc.; WLAN bzw. Wi-Fi wurde zum Inbegriff für lizenzfreien, günstigen, drahtlosen Internetzugang.

Durch den Einsatz von WLAN im ISM-Band haben sich schon früh Techniken herausgebildet, die auf Zuverlässigkeit im autonomen dezentralen Betrieb hinwirken. So führen WLAN-Zugangspunkte periodisch ein „Clear Channel Assessment“ durch, d.h. das Frequenzspektrum wird nach guten und schlechten Kanälen hin untersucht. Neben der Erhöhung der Zuverlässigkeit, der Datenrate und der Aufnahme zellulärer Konzepte hat die 802.11-Standardisierung auch Themen wie hochgenaue Lokalisierung im



Zentimeterbereich (802.11ay) und verbesserte QoS (Echtzeitfähigkeit) auf dem Fahrplan, was im Hinblick Industrie 4.0-Anwendungen besonders interessant sein könnte.

Aktuell wird WLAN im industriellen Umfeld an vielen Stellen eingesetzt, wenn Echtzeitfähigkeit und Verfügbarkeit unkritisch sind. Um weitere Einsatzbereiche zu erschließen, erfolgte unter dem Oberbegriff „Industrial WLAN“ eine proprietäre Weiterentwicklung. WLAN gemäß Standard IEEE 802.11 wurde dabei in mehreren Aspekten für industrielle Umgebungen angepasst. Die Geräte erfüllen im Vergleich zu klassischen Computerprodukten strengere Spezifikationen im Hinblick auf die Umgebungseigenschaften. Weiterhin wurden proprietäre Erweiterungen wie die „Industrial Point Coordination Function“ für einen modifizierten Kanalzugriff definiert.

### III.3.5 Funkvernetzung auf Basis von IEEE 802.15.1 (Bluetooth®, WISA®)

1994 begann die Entwicklung eines Standards für Wireless Personal Area Networks, der zunächst für die Verbindung zwischen Mobilfunkgeräten und deren Peripherie vorgesehen war. Die Ansätze wurden durch die Bluetooth Special Interest Group (Bluetooth SIG®) weiterentwickelt. Die unteren beiden Schichten des Protokollstapels wurden als Standard IEEE 802.15.1 spezifiziert. Bluetooth® wurde kontinuierlich weiterentwickelt, aktuell existiert die Version 5 des Standards. Der Standard IEEE 802.15.1 spezifiziert nur die Übertragungsfunktionen bis zur Bluetooth® Version 1.1. Die Übertragung erfolgt ausschließlich im 2,4 GHz ISM-Band, in dem 79 Kanäle mit jeweils 1 MHz Bandbreite definiert werden. Diese werden von den Funkknoten im Frequenzsprungverfahren (Frequency Hopping Spread Spectrum FHSS) genutzt, wobei eine Frequenz für die Dauer eines Pakets (625 µs) belegt wird. Damit erfolgen 1600 Frequenzwechsel je Sekunde. Die Rohdatenrate beträgt 1 Mbit/s, wobei die Nettodatenrate je nach Paketgröße deutlich geringer ist. FHSS ermöglicht dabei einen einfachen Medienzugriff: Es wird ohne vorherige Prüfung des Kanals gesendet. Wenn die momentan gewählte Frequenz durch andere Nutzer belegt ist, geht das Paket verloren und muss erneut gesendet werden. Damit ist keine Garantie bzgl. der Latenz möglich. Insbesondere bei stark genutztem ISM-Band, sei es durch andere Bluetooth®-Netze, durch WLAN oder weitere Nutzer, kann der Durchsatz einbrechen und die Latenz erheblich steigen. Bluetooth® basiert auf einer einfachen Sterntopologie mit einem Master und bis zu sieben Slaves (Piconet). Mehrere Piconets können zu einem sogenannten Scatternet verbunden werden. Eine relativ latenzarme Kommunikation ist allerdings nur in der einfachen Sterntopologie möglich. Aus Sicht der industriellen Anwendung ist Bluetooth wegen geringer Reichweite, undefinierter Latenz und insgesamt geringer Datenrate wenig geeignet. Allerdings gibt es eine Weiterentwicklung auf der Basis der physikalischen Übertragung von IEEE 802.15.1, die speziell für industrielle Anwendungen ausgelegt ist.

WISA® (Wireless Interface to Sensors and Actuators) ist ein Konzept für die drahtlose Vernetzung in der Fertigungsautomatisierung, das von ABB vorgeschlagen wurde und seitens der PROFIBUS PROFINET Organisation als Standard akzeptiert wurde. Es ist gewissermaßen das Pendant zu WirelessHART® (siehe unten). Beide Standards werden in manchen Darstellungen unter dem Begriff WSA (Wireless Sensor Actuator Network) als Problemlösung für die drahtlose industrielle Vernetzung zusammengefasst. Der Standard WSA-AIS (Air Interface Specification) der PROFIBUS Organisation wiederum beschreibt ausschließlich das WISA Konzept ([III-14, III-15]). Dessen physikalische Schicht basiert auf IEEE 802.15.1, ist also mit dem Standard für die Basisvarianten von Bluetooth® verwandt. Das verfügbare Frequenzband wird nunmehr in 82 Kanäle der Breite 1 MHz aufgeteilt. Es wird eine GFSK verwendet, die Bruttodatenrate eines Kanals beträgt 1 Mbit/s. Die Kanäle werden durch ein spezielles (von Bluetooth® abweichendes) Frequency Hopping Schema genutzt. Durch die Verwendung des 2,4 GHz Bandes besteht auch hier

grundsätzlich ein Koexistenzproblem. Mit der Definition von Subbändern für das Frequency Hopping wird eine Option geboten, anderen Nutzungen des Frequenzbereichs auszuweichen. Weitere Änderungen gegenüber Bluetooth® betreffen die Art der Adressierung von Knoten. Während in der Bluetooth®-Grundversion nur sieben Slaves mit einem Masterknoten in einer Sterntopologie kommunizieren können, sind hier bis zu 120 Knoten in einer Zelle möglich. Damit wird eine drahtlose Kommunikation für eine Reihe von Anwendungen angeboten, die allerdings eine individuelle Frequenzkoordination im ISM-Band erfordert und relativ bescheidene Parameter hinsichtlich Datenrate und Latenz bietet.

### III.3.6 Funkvernetzung auf Basis von IEEE 802.15.4 (ZigBee®, ISA100.11a, WirelessHART®)

Eine weitere wichtige Familie von Funkstandards für die lokale Vernetzung ist im Standard IEEE 802.15.4 definiert. Dieser Standard bietet inzwischen eine große Zahl von Varianten. Die verbreitetste davon ist die Übertragung im 2,4 GHz-Bereich mit einer Brutto-Datenrate von 250 kbit/s. Der Standard erlaubt komplexe Maschennetze mit einem Koordinator und verschiedenen Routern. Es wird auch bei Ausfall von Verbindungen über die im Funknetz vorhandene Redundanz ein Kommunikationspfad aufgebaut. Weiterhin ist eine Reihe von Mechanismen zur Energieersparnis spezifiziert. Das Konzept ist nicht für eine latenzarme Kommunikation ausgelegt, und die Datenrate ist relativ gering.

Auf der im Standard definierten Übertragungsschicht bauen verschiedene Gesamtsysteme auf, insbesondere ZigBee und Thread. Damit werden auf der Basis des Standards Komplettlösungen für Smart Home oder Ambient Assisted Living ermöglicht. Mögliche Störungen durch Interferenzen im ISM-Band, relativ große und unsichere Latenzen sowie die geringe Datenrate führen dazu, dass der Standard nur für wenige spezielle Industrieanwendungen geeignet sein kann.

Auch hier gibt es eine Weiterentwicklung, in der ein Kommunikationsstandard der Computerwelt für industrielle Anwendungen angepasst wurde. HART® (Highway Addressable Remote Transducer Protocol) ist ein weit verbreiteter Standard für die Vernetzung von Sensoren und Aktuatoren im industriellen Umfeld. WirelessHART wurde als funkbasierte Erweiterung entwickelt und 2010 im internationalen Standard IEC 62591 festgelegt ([III-16]). Datenraten und Latenz erlauben den Einsatz in der Prozessautomatisierung und dem Condition Monitoring, genügen aber nicht den Anforderungen der Fertigungsautomatisierung. Die physikalische Übertragung basiert auf dem Standard IEEE 802.15.4, der auch die Basis von ZigBee® bildet, wobei ausschließlich 15 Kanäle (11 - 25) im 2,4 GHz Band genutzt werden. Die Bruttodatenrate des verwendeten DSSS-Verfahrens mit O-QPSK beträgt 250 kbit/s. Da Koexistenzprobleme mit anderen Nutzungen des Frequenzbandes, insbesondere durch WLAN, auftreten können, wird zusätzlich ein Frequenzhopping ermöglicht. Belegte Kanäle können dabei durch eine Blacklist ausgeschlossen werden. Es wird eine Maschentopologie verwendet, die Redundanz bietet und die Energieeffizienz steigern kann. Die höheren Schichten des Protokollstacks sind dem (leitungsgebundenen) HART Standard gleich. Dadurch wird eine durchgängige Lösung im industriellen Umfeld ermöglicht, bei dem funkbasierte und leitungsgebundene Übertragung einfach verbunden werden können.

### III.3.7 Nahfeldkommunikation RFID, Smart Tags

Unter diesem Oberbegriff (RFID = Radio Frequency Identification) findet sich eine große Zahl von Lösungen einer speziellen funkbasierten Kommunikation, die insbesondere zur Identifikation von Objekten

dient. Besondere Bedeutung haben diese Konzepte in der Logistik und Warenwirtschaft. Die dabei verwendeten Frequenzbänder reichen von Langwelle (9-135 kHz) bis zu Lösungen im 2,4 GHz ISM Band. Die Kommunikation findet statt zwischen einem Lesegerät und Objekten, die mit einem RFID-Tag ausgestattet sind. Dabei wird nach Art der Stromversorgung für die - üblicherweise möglichst preiswerten und kompakten - RFID-Tags unterschieden zwischen passiven und aktiven Tags. Passive Tags nutzen die Funkwellen des Lesegeräts zur Stromversorgung. Die Reichweite ist dadurch stark begrenzt. Aktive Tags verfügen über eine eigene Energieversorgung mittels Batterien. Wegen der relativ großen Latenz und der spezifischen Aufgabenstellung, für die diese weit verbreitete Form der Kommunikation optimiert wurde, werden die verwendeten Technologien in diesem Positionspapier zur industriellen Kommunikation nicht vertieft betrachtet. Es ist jedoch die potenzielle Funkinterferenz zwischen RFID-Systemen und anderen industriellen Funksystemen zu berücksichtigen.

### III.4 Zusammenfassende Bewertung verfügbarer Technologien

Es existiert eine Vielzahl von Funktechnologien für Anwendungen aus dem Bereich der Kommunikationstechnik und der Computernetze. Prinzipiell lassen sich diese auch im industriellen Umfeld einsetzen. Allerdings werden die Anforderungen an Datenrate, Reichweite, Latenz und Zuverlässigkeit in vielen industriellen Szenarien nicht erfüllt. Basierend auf den vorhandenen Standards wurde bereits Weiterentwicklungen für das industrielle Umfeld getätigt, die allerdings durch die Ausgangsstandards und teilweise die Nutzung des oftmals überlasteten 2,4 GHz Bandes nach wie vor nicht für kritische Anwendungen ausreichen. Die Tauglichkeit der einzelnen Standards für verschiedene Anwendungen und Szenarien muss im Einzelfall geprüft werden. Die nachfolgende **Tabelle III-3**, in der die Eignung für die in Kapitel II beschriebenen Anwendungsfälle bewertet wird, kann mittels der Ampelfarbendarstellung daher nur eine stark vereinfachte Einschätzung bieten.

Gegenwärtig										
	Diagnose & Wartung		Diskrete Fertigung		Lager und Logistik			Prozess-automatisierung	Augment-Reality	Funktionale Sicherheit
	Generell	Condition Monitoring	Generell	Motion Control	Generell	AGV	Kran-szenario			
802.11 (WLAN, IWLAN)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
802.15.1 (Bluetooth, WISA)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
802.15.4 (Zigbee, ISA100.11a, Wireless-HART)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
LPWAN (LoRa, Sigfox, NB-IoT)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2G (GSM)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
3G (UMTS)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
4G (LTE R.13)	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

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

*Tabelle III-3: Eignung verfügbarer Standards für den Einsatz in verschiedenen Szenarien*

## III.5 Technologische Weiterentwicklungen

Die Anforderungen an Funkkommunikationssysteme im industriellen Bereich werden von den heute verfügbaren Technologien nur teilweise erfüllt. Außerdem ist klar erkennbar, dass für die sehr unterschiedlichen Anwendungsszenarien angepasste Funkverfahren zum Einsatz kommen müssen.

Im Folgenden werden einige technologische Weiterentwicklungen aufgezeigt, denen momentan oder zukünftig eine besondere Bedeutung in der Grundlagenforschung in Bezug auf die Realisierung einer höchst robusten, latenzarmen Kommunikation zukommt. Diese werden anhand des Schichtenmodells eines Kommunikationssystems gruppiert, auch wenn die meisten Technologien Informationen von mehreren Schichten benötigen. Im Rahmen dieses Dokuments kann naturgemäß nur ein Teil der Optionen dargestellt werden. Mit dem Ziel der Erforschung innovativer und leistungsfähiger Funkzugangssysteme für Industrie 4.0 hat die deutsche Bundesregierung zwischenzeitlich mehrere Fördermaßnahmen auf den Weg gebracht. Exemplarisch sei hier die Forschungsinitiative des BMBF „Zuverlässige drahtlose Kommunikation in der Industrie (ZDKI)“ [III-18] genannt. Unter dem Dach von acht Projekten werden neuartige Funkzugangstechnologien und deren Integration zu einem neuen industriellen Funkzugangssystem mit dem Fokus auf die beiden unterschiedlichen Schwerpunkte drahtlose Übertragungen im Regelungsumfeld (closed-loop control) und haptische Mensch-Maschine-Schnittstellen zur Fernsteuerung oder „Augmented Reality“-Anwendungen erforscht. Beispiele neuer nachrichtentechnischer Verfahren und Konzepte sind neuartige Kodierungsverfahren, Modulations- und Zugangsverfahren wie z. B. nicht-orthogonale Wellenformen, Sende- und Empfängerkonzepte für eine hohe Anzahl an Sensoren/Aktuatoren, Multi-Band-/Multi-Antennentechnologien auch für 60 GHz, Koexistenzmanagementverfahren und eine integrierte end-to-end (E2E) Sicherheit z. B. in Form neuer Plug&Trust-Verfahren.

Weitere relevante Grundlagenarbeiten erfolgen in Forschungsprojekten in Horizon2020 sowie in der DFG im Schwerpunktprogramm SPP 1914 „Cyber Physical Networking“ statt.

### III.5.1 Physikalische Schicht

#### Technologische Erschließung neuer Frequenzbereiche

Um den stetig anwachsenden Bedarf an Übertragungskapazität in Zukunft bedienen zu können, werden sukzessive höhere Frequenzbereiche technologisch erschlossen. Der Bereich bis 300 GHz würde für Übertragungen über größere Distanzen mehr als 250 GHz Bandbreite zur Verfügung stellen. Für Kommunikation über kürzere Distanzen stünden zusätzlich etwa 40 GHz an Kanalkapazität zur Verfügung, die durch besondere Absorptionseigenschaften der Luft und der Luftfeuchtigkeit charakterisiert werden. Sollte bei konservativer Betrachtung nur die Hälfte davon nutzbar gemacht werden, würde das dem über 250-fachen der momentan zur Verfügung stehenden Funkkapazität im Bereich unter 3GHz entsprechen [III-19].

Diese Frequenzbereiche besitzen jedoch andersartige Ausbreitungseigenschaften, die den Einsatz im Außenbereich auf Sichtverbindungen und im Innenbereich auf Strecken mit Sichtverbindung und wenigen Reflexionspfaden begrenzen. Daher bietet sich deren Anwendung insbesondere für statische Szenarien an, in denen hohe Datenvolumina ausgetauscht werden müssen. Neben den Ausbreitungseigenschaften werden momentan technische Realisierungen vorangetrieben, die komplexe Empfänger-

strukturen entwickeln, die die hohen Bandbreiten gleichzeitig bedienen können. Dies erfordert besonders im analogen Bereich geeignete Entzerrer- und Verstärkerstrukturen [III-20].

Ergänzende Ansätze untersuchen die Nutzung des frei verfügbaren optischen Spektrums für die Industriekommunikation. Das ist auch interessant, weil man optische Signale nicht ohne weiteres von außen stören kann. Dabei werden die Datensignale auf leistungsstarke LEDs moduliert und mit Photodioden empfangen. Weit geöffnete Sende- und Empfangscharakteristika, verteilte Zugangspunkten und adaptive, verteilt vernetzte MIMO Ansätze ermöglichen dabei die gewünschte Mobilität bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit der Verbindung.

### Höhere Übertragungseffizienz und Datenrate durch Mehrantennenverfahren

Mehrantennensysteme ermöglichen es, Signale mit einer oder mehreren Antennen zu senden und zu empfangen, so genannte Multiple-In Multiple-Out Systeme (MIMO). Das generell zugrundeliegende Prinzip ist das der Ausnutzung von räumlicher Diversität [III-21], d.h. der Kompensation von Signalschwankungen durch Kombination mehrerer räumlicher Übertragungspfade. Sobald Übertragungspfade einen gewissen räumlichen Abstand zueinander haben, reduziert sich die Korrelation zwischen diesen, was das Signal robuster gegenüber Schwankungen in der Übertragungsqualität macht. Unterschiedliche Pfade entstehen, wenn mehrere Sende- und/oder Empfangsantennen verwendet werden. Die folgenden Antennenkonfigurationen existieren: (1) SISO: Eine Sende- und eine Empfangsantenne, (2) MISO: Mehrere Sende- und eine Empfangsantenne, (3) SIMO: Eine Sende- und mehrere Empfangsantennen, und (4) MIMO: Mehrere Sende- und mehrere Empfangsantennen.

Antennenkonfigurationen können in verschiedenen Modi betrieben werden. Diese reichen von der Ausnutzung reiner Empfangsantennendiversität, d.h. die Antenne mit dem instantan stärkeren Signalpegel wird zur Verarbeitung im PHY verwendet, hin zu einer komplexen Kodierung (Space-Time Block Codes). Dabei werden Signale derart kodiert, dass die zusätzlich eingefügte Redundanz über die verschiedenen Übertragungspfade und über die Zeit hinweg verteilt wird, um im Falle des zeitlich schwankenden Ausfalls bestimmter Pfade das Signal korrekt rekonstruieren zu können. Im Vergleich zu SISO-Systemen können MIMO-Systeme dazu genutzt werden, die Übertragungskapazität des Kanals zu erhöhen und die Zuverlässigkeit der existierenden Kapazität zu erhöhen. Beide Ansätze können auch kombiniert werden. Einen Spezialfall stellt die massive Erhöhung der Anzahl von Sendeantennen dar, durch den es möglich wird, Informationen derart zu übertragen, dass sie sich trotz omnidirektionaler Aussendung nur an bestimmten Stellen im Raum zu einem dekodierbaren Signal überlagern, was der Koexistenz und der Datensicherheit zugutekommt. Mehrantennensysteme erfordern generell einen größeren Formfaktor der Geräte, deutlich komplexere Sende- und Empfangsstrukturen im PHY, sowie einen erhöhten Energieverbrauch, was insgesamt die Anschaffungs- und Betriebskosten erhöht.

### Neuartige Übertragungsverfahren, Signalformen und größenoptimierte Kanalcodierung

Obwohl OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) als Übertragungsart hervorragende Eigenschaften für Breitbandübertragungssysteme hat, die unter Mehrwegeausbreitung leiden, besitzt es auch in vielen Anwendungsszenarien auch deutliche Nachteile. Hierzu gehören der relativ große Hardware-Aufwand, hohe Anforderungen an die Frequenzsynchronität und je nach Parameterwahl ein deutliches Übersprechen in benachbarte Frequenzbereiche. Während dieses Übersprechen mittels

Vorfilterung zulasten der Kapazität weitgehend behoben werden kann, stellt die geforderte Frequenzsynchronität ein prinzipielles Problem dar. Diese schränkt die Möglichkeiten zur flexiblen Ressourcenzuteilung deutlich ein. Daher wird beispielsweise bei LTE nur der Downlink von der Basisstation zu den mobilen Stationen durch einen flexiblen Frequenzmultiplex innerhalb der OFDM-Symbole realisiert. Die Rückrichtung wird über andere, statische Frequenzzuweisungen umgesetzt. Neuartige Verfahren, wie z. B. Filter-Bank Mehrträgerverfahren (FBMC) oder Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM) adressieren genau diesen Nachteil [III-22], indem sie geeignete Signalformen durch eine komplexe Vorverarbeitung und angepasste Modulation in ein robustes Signal umwandeln. Auch andere Ansätze wie das PSSS (Parallel Sequence Spread Spectrum), FHSS, CDMA oder Impulsradio-Ultraweitbandübertragung sind mögliche Optionen für die Vernetzung von Sensoren und Aktuatoren. Seit kurzem rückt auch die Kanalkodierung für kurze Nachrichten [III-23, III-33, III-34] stärker in den Fokus der Forschung. Es stellt sich heraus, dass bisherige Approximationen über die Zeitvariabilität während der Übertragung bei kurzen Nachrichten anders berücksichtigt werden müssen, was zu neuen Ansätzen für eine optimale Codierung führt.

## III.5.2 Medienzugriff und Ressourcenverwaltung

### Neuartige Medienzugriffskonzepte und Redundanzverfahren

Wie in Kapitel II ausgeführt, wurden Funkssysteme bisher nicht auf die kritischen Anforderungen ausgelegt, die industrielle Anwendungen im Hinblick auf Latenz und Zuverlässigkeit stellen [III-24, III-34]. So basieren z. B. IEEE802.11-Systeme auf Listen-Before-Talk, die ohne zusätzliche Mechanismen eine deterministische Kommunikation deutlich erschweren. Weiterhin verlassen sich fast alle Technologien zur Erhöhung der Zuverlässigkeit entweder auf Zeitdiversität (Kodierverfahren) oder Frequenzdiversität (adaptive Frequenzsprungverfahren oder statische Frequenzredundanz). Seit mehr als 10 Jahren finden Mehrantennensysteme Einzug in kommerziell verfügbare Systeme. Generell haben diese Verfahren jedoch Einschränkungen: Bei Zeitdiversität hinsichtlich der erreichbaren Latenzen, bei Frequenzdiversität hinsichtlich der insgesamt unterstützbaren Anzahl an Stationen (spektrale Effizienz), oder bei räumlicher Diversität hinsichtlich des Formfaktors und des Energieverbrauchs.

In diesem Spannungsfeld wird untersucht, wie Medienzugriffs- (MAC) und Redundanzverfahren geeignet zusammengeführt werden können. Dies bezieht sich insbesondere auf die Entwicklung dynamischer, hybrider Ansätze des Medienzugriffs, bei dem neben deterministischen Phasen für den kritischen Datenverkehr stochastische Phasen den Bedarf an nicht-kritischem Verkehr bedienen.

### Kooperative Verfahren

Kooperative Ansätze erlauben es, mehrere räumlich verteilte Einantennensysteme derart miteinander zu vernetzen, dass sie ein virtuelles Mehrantennensystem formen. Durch Kooperation können preiswertere Stationen eingesetzt werden, um räumliche Diversität für die Verbesserung der Übertragungsqualität zu nutzen. In diesem Falle spricht man anstatt von räumlicher von kooperativer Diversität [III-25, III-34]. Eine typische Art der Kooperation auf MAC-Ebene stellen kooperative Wiederholungen dar (Cooperative ARQ). Obwohl Kooperation unmittelbar die Zuverlässigkeit erhöht und mittelbar die Interferenz innerhalb eines und über mehrere Funknetze hinweg reduziert (auch von heterogenen Technologien), erhöht sie

die Protokollkomplexität und reduziert typischerweise auch die zur Verfügung stehende Kanalkapazität durch den Koordinierungsaufwand. Der Aufwand ist nötig, um die für Kooperation notwendige Datenbasis an räumlich verteilten Stationen zu etablieren und um Steuerungsinformationen an die verschiedenen Protokollschichten zu verteilen. Daher ist die effiziente Integration von kooperativen Ansätzen in bestehende oder neue Funkprotokolle ein kritischer Aspekt [III-26].

### Kognitive Verfahren

Mit Industrie 4.0 entsteht aufgrund der zunehmenden Menge an Kommunikationsvolumen zusätzlicher Bedarf für adaptive Funktechnologien. Die feste, durch Lizenzvergabe geregelte Zuweisung von Frequenzbereichen hat im Allgemeinen und damit auch in Industrieumgebungen eine recht ineffiziente Nutzung der verfügbaren Funkressourcen zur Folge. Cognitive Radio (CR) bietet eine effizientere, selbstkonfigurierende und interferenzfreie Möglichkeit, auf das Spektrum zuzugreifen. Ziel ist die Koexistenz mit anderen, bereits existierenden Funksystemen in deren Bändern. Dazu muss sich jede Station entsprechend der Vorgaben des Funkspektrums, seiner eigenen Nutzungsanforderungen, als auch der Umgebung intelligent verhalten.

Um eine störungsfreie Koexistenz realisieren zu können, muss das System über kognitive Fähigkeiten verfügen. Verschiedene Ansätze für kognitive Nutzung des Funkspektrums in unterschiedlichen Einsatzbereichen wurden im Rahmen der BMBF-Initiative „Kognitive drahtlose Kommunikationssysteme“ gefördert. Dies kann als Basis für neue Systeme der industriellen Kommunikation dienen, wobei auch der regulative Aspekt sorgfältig zu berücksichtigen ist.

### Koexistenzverfahren

Sofern keine kognitiven Verfahren oder speziell lizenzierte Frequenzbereiche genutzt werden, müssen die Funksysteme in den ISM Bändern koexistieren (vgl. Kapitel III.1). Koexistenz beschreibt dabei den Zielzustand, in dem mehrere benachbarte Funksysteme störungsfrei parallel betrieben werden können. Koexistenz könnte durch die Entkopplung der Kommunikationssysteme in den Dimensionen Zeit-, Frequenz-, Raum- und Polarisierung erzielt werden. Dies erfordert jedoch eine vorherige Funkplanung, indem bestimmte Systeme anhand ihrer Charakteristika derart konfiguriert werden, sodass sie störungsfrei koexistieren können [III-35].

Sollte eine dedizierte Funkplanung nicht möglich sein, z. B. da die Berücksichtigung von Datenverkehrsmustern oder Mobilität zu Ineffizienzen in einer statischen Planung führt, muss zumindest ein störreduzierter Betrieb gewährleistet sein. Dazu müssen sich alle eingesetzten Funksysteme an spezielle regulatorische Vorgaben halten. Legt man die (zur Drucklegung gültige Version der) Norm EN-300328 zugrunde, muss beispielsweise ein Breitband-Funksystem entweder (1) Listen-Before-Talk umsetzen, oder ansonsten (2) darf es höchstens 10% der verfügbaren Funkressourcen nutzen, oder (3) darf es nur mit deutlich reduzierter Sendeleistung betrieben werden. Insbesondere der erste Punkt steht Anforderungen der Applikation an Determinismus und Latenz im Wege, während der zweite Punkt zu Frequenzsprungverfahren führt, deren Frequenzsprungmuster koordiniert werden müssen, um die Funkressourcen effizient zu nutzen. Der dritte Punkt hingegen schränkt die Reichweite und ggf. die Zuverlässigkeit ein und erfordert damit eine vorherige Topologieplanung.

### III.5.3 Höhere Schichten

#### Größere Reichweite durch latenzoptimierte Multi-Hop Kommunikation

In industriellen Szenarien ist Multi-Hop Kommunikation eine Option, um größere räumliche Entfernungen zwischen Geräten überbrücken zu können, ohne die Sendeleistung signifikant erhöhen zu müssen oder kabelgebundene Infrastruktur zu verbauen. Multi-Hop Kommunikation und Mesh-Topologien ermöglichen darüber hinaus die Nutzung redundanter Pfade zwischen zwei Stationen, was im Falle von Störungen zu einer erhöhten Zuverlässigkeit führt. Damit die Anforderungen an eine zuverlässige Übertragung der Prozess- und Steuerungsdaten erfüllt werden, wird in der Regel die maximal mögliche Sendeleistung verwendet. Das führt zu hohem Energieverbrauch sowie zu erhöhten Interferenzen bzw. Koexistenzproblemen zwischen benachbarten Netzen. Diese Probleme können durch intelligentes, dynamisches Sendeleistungsmanagement vermieden werden, wodurch die Anforderungen der Anwendung bei gleichzeitiger Maximierung der Batterielebenszeit erfüllt werden.

Dies zeigt die Notwendigkeit für den Entwurf von Methoden für eine Netz-basierte Leistungsanalyse unter Sendeleistungs- und Latenzbeschränkungen [III-27]. Aktuelle Lösungen bestimmen die minimal notwendige Sendeleistung entlang eines Multi-Hop Pfades und liefern gleichzeitig eine Garantie, dass eine Ende-zu-Ende Ausfallwahrscheinlichkeit zu einer gegebenen Latenz nicht verletzt wird [III-28]. Solche Optimierungsalgorithmen können unter Einhaltung von Latenzanforderungen auch in der Planungs- und Designphase von drahtlosen, industriellen Netzen in der Praxis eingesetzt werden [III-29].

#### Netz-basierte Kodierverfahren

Ein Trend in der Forschung bezieht sich auf Netz-basierte Kodierverfahren [III-30]. Dabei werden Datenströme (auf redundanten Pfaden) zwischen verschiedenen Stationen im Netz direkt miteinander derart verwoben, dass Stationen mit einem vorherigen Wissen über einen Teil der Daten den Rest rekonstruieren können. Dadurch kann die Datenrate für Wiederholungen deutlich reduziert werden. Besonderes Augenmerk für die Anwendbarkeit liegt im kombinierten Betrieb im drahtlosen und drahtgebundenen Bereich, sowie in Kombination mit bereits eingesetzten Protokollen, wie dem Parallel Redundancy Protocol (PRP).

#### Redundante Übertragungen auf verschiedenen Schichten, über mehrere Basisstationen und über unterschiedliche Technologien

Um die Zuverlässigkeit zu steigern können Pakete nicht nur redundant über die Zeit oder Frequenz verschickt werden, sondern auch über verschiedene Basisstationen bzw. Zugangspunkte (Multi-Connectivity). Gegenwärtig wird dies im Rahmen der 3GPP-Standardisierung untersucht. Im Speziellen wird ein Paket im Layer 2 (PDCP) dupliziert, und somit redundant auf verschiedenen Schichten innerhalb des Layer 2 (RLC und MAC) verschickt, welches entweder über die Zeit redundant oder unter der Verwendung mehrerer Träger (Carrier Aggregation) in verschiedenen Frequenzen empfangen wird [III-28]. Das Ganze ist auch kombinierbar mit Multi-Connectivity. Des Weiteren bestehen auch erste Konzepte für redundante Übertragungen über verschiedene Funktechnologien [III-32].



## Gesonderte Mechanismen für Control- und User Plane

Ähnlich wie beim Software-defined Networking kann eine Unterscheidung zwischen den Kontrollnachrichten (Control Plane) und den eigentlichen Anwendungsdaten (Data Plane) die Effizienz der Kommunikation steigern. Hierbei können unterschiedliche Mechanismen auf das eine oder andere angewendet werden. Um beispielsweise die Latenz einer Datenübertragung zu minimieren, können über einen Link zwischen Basisstation und den Kommunikationsgeräten Funkressourcen zur Verfügung gestellt werden (Control Plane), welche dann zwischen dem Link der Kommunikationsgeräte für die eigentliche Datenübertragung genutzt werden kann (User Plane). Somit können Daten direkt verschickt werden, während Ressourcen von der Basisstation koordiniert werden [III-32, III-33]. Des Weiteren ist die Verwendung von unterschiedlichen Zuverlässigkeitsmechanismen für Control und User-Plane möglich.

## III.6 Einbindung in existierende Infrastrukturen

Neben der eigentlichen Realisierung einer höchst-zuverlässigen Funkschnittstelle kommt der Einbindung in bestehende Infrastrukturen eine besondere Bedeutung zu. Der typische Migrationspfad besteht aus der schrittweisen Komplementierung existierender, drahtgebundener Kommunikationssysteme um drahtlose Systeme. Selbst in komplett neu entworfenen Anlagen werden drahtgebundene und drahtlose Netze koexistieren, da drahtgebundene Netze aus Kapazitäts- und Kostenaspekten für viele Anwendungsfälle zu bevorzugen sind. Für die Anwendungsfälle, in denen Kabel hinderlich oder zu teuer sind, da sie z. B. aufgrund mechanischer Beanspruchung häufig gewechselt werden müssen, wartet eine Reihe von technologischen und organisatorischen Herausforderungen.

Dies betrifft zu allererst die technologische Konnektivität. Protokolle beider Domänen müssen aufeinander in Bezug auf Datenformate, Protokollverhalten und insbesondere Zeitverhalten abgestimmt werden. Während eine reine Protokollübersetzung bereits zwischen drahtgebundenen Systemen erfolgreich realisiert wird, stellt dies beim Wechsel von Kabel auf Funk eine größere Hürde dar, da zum einen die Übertragungskapazität nicht beliebig skaliert werden kann, aber auch weil die Funkübertragung andere physikalische Grenzen hat. Beispielsweise stellt die minimale Zeitauflösung eines Funksignals (in vergleichsweise breitbandigem WLAN z. B. 4µs) eine technologische Herausforderung dar, um eine isochrone Echtzeit-PROFINET Verbindung zu unterstützen, deren Anforderung an Jitter bei maximal 1µs liegt.

Eine eher organisatorische Herausforderung stellt die Topologieplanung, insbesondere mit „echter“ Mobilität, dar, d.h. mit Geräten, die nicht nur stationär betrieben werden, sondern mit Geräten, die sich autonom über größere Distanzen bewegen. Während hergebrachte Feldbussysteme und kürzlich eingeführte, geschwichtete Ethernet-Netze für kritische Anwendungsfälle meist dezentral und mehrfach redundant ausgelegt sind, besitzen die meisten heutigen Funknetze aufgrund ihrer zentralisierten Struktur einen Single-Point-of-Failure: Obwohl direkte Kommunikationspartner ausgezeichnete Verbindungscharakteristika haben, verursacht eine temporäre Abschattung der zentralen Station einen kompletten Kommunikationsverlust. Echte Mobilität der Kommunikationspartner erfordert weiterhin eine flexible Kommunikationsstruktur. Datenströme müssen im drahtgebundenen Netz flexibel und latenzarm umgeleitet werden, damit die Verbindung zur mobilen Station nicht abbricht. Ebenso muss Kommunikationskapazität dynamisch verteilt werden können, was ansonsten Rückwirkung auf die Applikation hätte. Das bedeutet insbesondere im Falle von zentralisierten Funksystemen, dass Kapazität durch eine vorherige Planung sowohl flächendeckend vorgehalten werden muss, als auch, dass diese Kapazität für bestimmte Mobilitätsszenarien umverteilt werden muss, da sich beispielsweise alle autonomen Roboter zu einem

Zeitpunkt in einer bestimmten Umgebung befinden können. Dezentrale Kommunikationsansätze bieten diesbezüglich eine größere Flexibilität, erfordern aber sich selbst-koordinierende Algorithmen. Ein Ansatz stellt die Auswertung der Daten durch Berechnung z. B. auf den Sensorknoten im Netzwerk selbst dar, also durch Informationsaustausch zwischen den Sensoren. Man spricht hierbei von „In-Network Processing“. Die Vorteile dieses Ansatzes liegen im infrastrukturlosen Betrieb und der damit einhergehenden Robustheit gegen Ausfälle von Kommunikationsverbindungen.

Darüber hinaus stellen die Latenzanforderungen einer Reihe von Applikationen besondere Ansprüche an Aspekte der Sicherheit (Authentifizierung, Verschlüsselung), als auch an die des unterbrechungsfreien, mobilen Betriebs. Zusätzlich zur funktionalen Sicherheit müssen Datenströme beim Übergang auf das Funkmedium abgesichert werden, um den Betrieb des Netzes selbst, als auch die eigentlichen Nutzdaten gegen den Zugriff Unbefugter zu schützen. Parallel dazu müssen mobile Stationen in der Lage sein, unterbrechungsfrei von einem Funknetz in ein räumlich benachbartes Funknetz zu wechseln (ein so genannter Hand-Over), ohne dass deren Betrieb der Applikation unterbrochen wird. Dazu müssen existierende Mechanismen sinnvoll unter Berücksichtigung der Latenzanforderung erweitert und in die jeweilige Technologie integriert werden. Dies bedeutet insbesondere im Rahmen der Sicherheit ein Überdenken der grundsätzlichen Architektur, z. B. ein dynamisches Schlüsselmanagement, die Anwendung von Verschlüsselung nicht nur auf Nutz- sondern auch auf Kontrolldaten, als auch einen latenzarmen Authentifizierungsprozess.

### III.7 Der zukünftige Mobilfunkstandard – 5G

Derzeit finden weltweit erhebliche Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu „5G“ statt. Die Bezeichnung 5G bringt zum Ausdruck, dass man darunter einerseits die nächste, global standardisierte Mobilfunkgeneration versteht, die nach der inzwischen global sehr erfolgreich eingeführten 4. Generation auf Basis des LTE-Standards mit den ersten Basisdiensten ab ca. 2020 am Markt verfügbar sein soll. Andererseits ist 5G ein deutlich breiterer Ansatz, der nicht nur die Möglichkeiten der allgegenwärtigen Kommunikation für Menschen weiter verbessern wird, sondern auch den vielfältigen Kommunikations- und Vernetzungsanforderungen, die im Zusammenhang mit der schnell fortschreitenden Digitalisierung aller Industrien entstehen, Rechnung tragen will. Somit ist 5G ein Paradigmenwechsel: weg von einem System, das für eine oder sehr wenige Anwendungen optimiert ist (z. B. nur für Sprache oder schnelle Datendienste) – hin zu einem holistischen Ende-zu-Ende Ansatz für ein hochflexibles Kommunikationssystem, das eine große Vielfalt verschiedener Anwendungsszenarien unterstützen wird. Dies eröffnet die Chance, die bisher getrennten Welten von Mobilfunk und lokalen Netzwerken auf der Basis von Computerstandards zu verbinden.

Ein wichtiges Prinzip, um mit 5G die verschiedenen, teilweise widersprüchlichen Anforderungen erfüllen zu können, ist das sogenannte „Network Slicing“. Dies bedeutet, dass auf der Basis einer gemeinsamen physikalischen Infrastruktur verschiedene logische Netze mit unterschiedlichen Eigenschaften realisiert werden können, die z. B. spezifisch auf Anforderungen eines Anwendungsbereichs zugeschnitten sind. Die vorgesehenen Basisdienste, die durch 5G ermöglicht werden, lassen sich in 3 Kategorien einteilen:

- **xMBB (Extreme Mobile Broadband):** Bereitstellung sehr hoher Datenraten pro Nutzer; Nutzung sehr unterschiedlicher Netzstrukturen (von großen Makrozellen bis hin zu vielen Kleinzellennetzen)
- **mMTC (Massive Machine-Type Communication):** (Energie)optimierte Konnektivität zu einer sehr großen Anzahl von Endgeräten (Sensoren, Aktuatoren, Maschinen, etc.)

- **uMTC (Ultra Reliable / Mission-Critical MTC) bzw. URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communication):** System mit hoher Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringer Latenz

Grundsätzlich wären für Industrie 4.0 alle drei Ausprägungen relevant, da verschiedenste Anwendungen angebunden werden müssen, bei denen eine zeitkritische, massiv verteilte, lokale, flächendeckende oder globale Vernetzungslösung benötigt wird.

Für den weiteren Ausbau von **xMBB** Breitbanddiensten ist eine höhere Systemkapazität erforderlich. Dies geht einher mit der Anforderung nach höheren Spitzendatenraten von bis zu 20 Gbit/s und einer gesteigerten spektralen Effizienz. Es wird insbesondere angestrebt, Datenraten von etwa 100 Mbit/s überall anbieten zu können. Die **mMTC** Anwendungsfälle sind vor allem dadurch charakterisiert, dass die Endgeräte bei niedrigen Anforderungen an Datenrate und Latenz kostengünstig hergestellt und mit einer Laufzeit bis zu 10 Jahren extrem energieeffizient betrieben werden müssen. Aufgrund einer langen Batterielaufzeit kann in Anwendungen, in denen Geräte beispielsweise schwer zugänglich sind, der Wartungsaufwand minimiert werden. Aus Netzwerksicht muss es hierbei möglich sein, eine sehr hohe Anzahl von Endgeräten pro Basisstation zu unterstützen. Hierdurch können dann auch neue Anwendungsfelder im Rahmen des Internets der Dinge adressiert werden, z. B. im Agrarsektor, in der Überwachung von Gebäuden und öffentlicher oder industrieller Infrastruktur. Der **uMTC** Bereich zeichnet sich durch hohe Anforderungen an Latenz und Zuverlässigkeit der Übertragungen aus. Hierbei soll 5G beispielsweise die Anforderungen von industriellen Anwendungen, das vernetzte autonome Fahren und die Steuerung von Energienetzen erfüllen.

Während die Forschung sich nun seit einigen Jahren mit 5G-Technologiekomponenten beschäftigt und Systemansätze für die verschiedenen Basisdienste entwickelt, hat im September 2015 die Standardisierung von 5G begonnen. Der durch die ITU bestimmte Standardisierungsprozess sieht vor, dass bis zum Juni 2019 initiale Technologievorschläge bei der ITU-R eingereicht werden, welche bis Oktober 2020 vervollständigt werden sollen. Der letzte Termin für eine Übermittlung der Spezifikationen liegt im Februar 2020. Um dieses Ziel zu erreichen, ist der weitere Standardisierungsfahrplan festgelegt worden. Dieser sieht vor, dass zunächst in einer Studie (Rel. 14) die Anforderungen festgelegt werden. Somit können die Anforderungen von industriellen Anwendungen oder vernetztem autonomem Fahren noch etwa bis Mitte 2017 eingereicht werden. Im Anschluss fließen in den darauffolgenden Phasen (Rel. 15 und Rel. 16) die Anforderungen dann in die konkrete Spezifizierung der Technologie. Dazu wird man zwei Ansätze parallel verfolgen. Einerseits wird LTE weiterentwickelt (LTE Evolution), um die 5G-Anforderungen zu erfüllen. Damit wird das Ziel verfolgt, 5G-Dienste und -Mechanismen schon früh in Frequenzbändern einzuführen, in denen bereits LTE betrieben wird und 5G-Endgeräte und -dienste mit bereits vorhandenen 4G-Endgeräten koexistieren müssen. Andererseits wird insbesondere für neue Frequenzbänder ein neues 5G-Funksystem entwickelt (auch als New Radio, NR, bezeichnet), das nicht an Kompatibilität mit LTE gebunden ist. In diesem Zusammenhang sind auch Aussagen zu sehen, die Beiträge der Standardisierung von 5G seitens IEEE 802 beschreiben.

Technisch soll 5G die Anforderungen der industriellen Szenarien weitestgehend erfüllen, aber es wird sich zeigen, ob im Hinblick auf Aspekte wie zum Beispiel Sicherheit, Haftung, Vertrauen, Frequenznutzungsoptionen und die Entwicklung innovativer Geschäftsmodelle eine breite Akzeptanz der 5G Technologie erreicht werden kann (siehe auch Abschnitt IV). Parallel dazu werden in Eigenregie betreibbare, lokale Funktechnologien für industrielle Anwendungsfälle genutzt und weiterentwickelt.



1

2

3

4

# 4 THESEN

## IV. Konsequenzen und Handlungsempfehlungen

Die Ausführungen der vorherigen Kapitel verdeutlichen, dass industrielle und allgemein professionelle Funkkommunikation ein sehr breites und sich zurzeit dynamisch entwickelndes Thema ist. Es gibt eine Vielzahl von Anwendungsszenarien, die sehr unterschiedliche Anforderungen an die Kommunikation stellen. Es ist daher nicht zu erwarten, dass eine einzelne Funktechnologie als universelle Lösung eingesetzt werden kann.

Bereits heute wird Funkkommunikation in der Industrie in vielen Bereichen erfolgreich eingesetzt. Die steigende Bedeutung der Flexibilisierung der Produktion sowie zahlreiche neue mobile Anwendungen führen aber zu einem erheblichen weiteren Nachfragewachstum. Die vorliegende Analyse belegt hierbei, dass die Anforderungen vieler industrieller Anwendungsfälle an die Funkkommunikation mit den derzeit im Markt verfügbaren Technologien weder in Bezug auf Performanz noch in Bezug auf den Funktionsumfang vollständig erfüllt werden können. In den letzten Jahren wurden erfolversprechende Lösungsansätze zum Beispiel im Rahmen der 5G Forschung und insbesondere des BMBF Programms „Zuverlässige drahtlose Kommunikation in der Industrie (ZDKI)“ adressiert. Dadurch konnte Deutschland in diesem Bereich eine internationale Führungsrolle in Forschung und Entwicklung übernehmen, und es entstand eine effiziente akademisch-industrielle Forschungskooperation. Die hier entwickelten Lösungen werden aber bei weitem noch nicht alle Anforderungen des schnell und kontinuierlich wachsenden Feldes professioneller Anwendungen in Industrie, Robotik, Medizintechnik, Logistik und für autonome Systeme abdecken können. Auch fehlt für eine erfolgreiche Markteinführung in verschiedenen Anwendungsfeldern noch eine Reihe wichtiger technischer Funktionalitäten, um anwendungsspezifische Anforderungen zum Beispiel in Bezug auf funktionale Sicherheit, Datenschutz, regulatorische Rahmenbedingungen und Spektrumsnutzung erfüllen zu können.

Wegen der Bedeutung des Themas für die digitale Transformation im industriellen Umfeld und für wichtige professionelle Dienste ist es von größter Wichtigkeit, diese Herausforderungen zügig und systematisch anzugehen. Hierbei müssen Besonderheiten der Funktechnik wie die Abhängigkeit von Spektrumsverfügbarkeit genauso Berücksichtigung finden wie besondere Anforderungen der Anwender wie Kompatibilität der Innovationszyklen, sinnvolle Markteinführungs- und Migrationsstrategien, Vermeidung von Marktfragmentierung und transparente Standardisierungsverfahren.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich eine Reihe von Handlungsempfehlungen, um den Prozess der Einführung industrieller Funkkommunikationssysteme voranzutreiben und Deutschland zum Leitmarkt für entsprechende Anwendungen zu machen.

### These 1: Funktechnologien müssen weiterentwickelt werden

Bereits heute liegt durch die Standardisierung in IEEE 802 sowie in 3GPP eine Vielzahl von Ansätzen zur Funkvernetzung vor. Ein Teil der Anwendungen, die bisher nicht ausreichend unterstützt wurde, kann durch Modifikation von Parametern abgedeckt werden, wie z. B. die Definition der IoT Modi in LTE zeigt. Allerdings sind für viele spezielle Anwendungen im Bereich der diskreten Fertigung auch völlig neue Ansätze sinnvoll. Richtungsweisend werden mehrere dieser Ansätze im Rahmen des ZDKI Programms des BMBFs vorangetrieben. Hierbei werden auch bereits vereinzelt Optionen zur Spektrumsnutzung adres-

siert. Weiterhin werden Ansätze zur optischen Freiraumausbreitung verfolgt und bereits standardisiert. Neben neuen physikalischen Übertragungsverfahren sind für eine latenzarme zuverlässige Kommunikation auch neue Verfahren des Medienzugriffs und der intelligenten Netzorganisation erforderlich. Auch diese Aspekte werden bei ZDKI erforscht und mit Industriepartnern erprobt. Durch das ZDKI Programm hat sich Deutschland im Bereich der industriellen Funktechnologien eine führende Stellung in der Forschung erarbeitet, die es erlaubt, effizient auch andere professionelle Anwendungsbereiche für Funktechnologien (wie Medizintechnik, Logistik, Robotik und Autonomik,) zu adressieren. Die Einbettung des ZDKI Programms in eine Trilogie aus BMBF Fördermaßnahmen (mit „5G: Industrielles Internet“ und „5G: Taktiles Internet“) stellt zudem sicher, dass Konzepte für eine Integration der ZDKI Ergebnisse in industrielle Gesamtvernetzungslösungen entwickelt werden. Auch das BMWi Förderprogramms „Digitale Technologien für die Wirtschaft (PAiCE)“ kann auf diesen Ergebnissen aufbauen. Es ist aber offensichtlich,

- dass diese Programme bei weitem nicht alle relevanten Märkte für Funktechnologie abdecken,
- dass die zurzeit stürmische Entwicklung neuer mobiler Anwendungen in der Industrie zu neuen, bisher nicht adressierten Anforderungen führen wird,
- dass in einigen Bereichen die technisch-wissenschaftlichen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Markteinführung noch nicht verstanden sind (Spektrumsnutzung, funktionale Sicherheit, Datenschutz, Netzwerksicherheit, etc.), und
- dass sich aus der Einbettung der neuen Funkkonzepte in 5G und alternative Netzkonzepte (infrastrukturlose Netze, kapillare Netze, hierarchische Konzepte) sowie in „resiliente Netze“ (siehe hierzu auch VDE Positionspapier „Resiliente Netze mit Funkzugang“) weitere neue Herausforderungen ergeben, die bisher nicht bearbeitet werden konnten.

**Handlungsempfehlung:** Durch einschlägige Forschungsprogramme des Bundes hat sich Deutschland im Bereich Funktechnologien für industrielle Anwendungen eine international führende Position erarbeiten können, und es ist eine fruchtbare akademisch-industrielle Forschungskooperation gewachsen. Es wird empfohlen, hierauf aufzubauen und

- einerseits die Entwicklung der für eine erfolgreiche Markteinführung fehlenden technisch-wissenschaftlichen Konzepte (Spektrum, funktionale Sicherheit, Datenschutz, Netzwerksicherheit, Resilienz (siehe hierzu auch VDE Positionspapier „Resiliente Netze mit Funkzugang“), etc.) voranzutreiben,
- andererseits die Chance zu nutzen und aus einer starken Position heraus auch für andere professionelle Anwendungsbereiche (Logistik, Medizintechnik, Robotik, etc.) Funklösungen zu entwickeln und letztlich
- eine kontinuierliche Weiterentwicklung von Funktechnologien für neue industrielle und andere Anwendungen sicherzustellen (Nachhaltigkeit).

Für eine zügige Markteinführung ist es erforderlich, bei allen Entwicklungsaktivitäten die Interoperabilität zu bestehenden Systemen wie z. B. heute verbreiteten Feldbussen konzeptionell zu berücksichtigen.

## These 2: Markteinführungsstrategien müssen unterstützt werden

Eine erfolgreiche Umsetzung von Forschungsergebnissen in Produkte setzt neben technischen Arbeiten die Adressierung nicht-technischer Herausforderungen voraus. Hierzu gehört die Förderung der Akzeptanz der Funklösungen bei Anwendern, die frühzeitige Adressierung regulatorischer Probleme wie der Verfügbarkeit von Spektrum, die Entwicklung und Darstellung von Markteinführungsstrategien aus technischer aber auch kaufmännischer Perspektive, die Unterstützung der Entwicklung von Roadmaps, die Entscheidungsträgern Planungssicherheit geben und eine Unterstützung von Standardisierungs- und Internationalisierungsstrategien.

**Handlungsempfehlung: Empfohlen wird, systematisch und in Abstimmung mit den zuständigen Ministerien die mit der Überführung erfolgreicher Forschungsergebnisse in Produkte verbundenen Herausforderungen zu adressieren. Insbesondere wird empfohlen**

- die Entwicklung und Einführung von Spektrumsnutzungskonzepten, die den spezifischen Interessen aller Marktteilnehmer gerecht werden, zu fördern,
- mögliche nicht-technische Markthemmnisse wie Fragen der funktionalen Sicherheit, der Regulierung, der elektromagnetischen Exposition und Verträglichkeit oder der Standardisierung durch geeignete Maßnahmen zu adressieren,
- die Akzeptanz neuer Funktechnologien bei den Anwendern zum Beispiel durch Demonstratoraktivitäten, Roadshows, die Entwicklung von Technologie-Roadmaps oder Workshops zu Best Practice Markteinführungsstrategien zu fördern,
- spezielle Instrumente für KMUs einzuführen, die diesen eine niedrighschwellige Erprobung neuer Technologien oder Mitarbeit an der Entwicklung erlauben, und
- zu untersuchen inwiefern die bereits ausgearbeiteten Konzepte und Ergebnisse auf andere Märkte wie zum Beispiel den IoT Anwendungsfeldern Medizin und Autonomes Fahren transferierbar sind.

Zusätzlich sollten Standardisierungsstrategien, denen in der Funktechnologie eine besondere Bedeutung zukommt, unterstützt werden (siehe These 4).

Weiterhin ist für eine breite Marktakzeptanz auch die Adressierung von Exportmärkten notwendig. Dies erfordert für alle hier diskutierten Maßnahmen auch die Unterstützung einer Internationalisierungsstrategie.

## These 3: Die domänenübergreifende Zusammenarbeit muss in allen Schritten des Innovationszyklus gefördert werden

Im Rahmen der Digitalisierung der Industrie, aber auch vieler Bereiche des gesellschaftlichen Lebens, werden Technologien aus unterschiedlichen Domänen kombiniert. Wegen der großen Bedeutung der Mobilität und der Notwendigkeit einer universellen Vernetzung kommt der Funkkommunikation hierbei eine wichtige Rolle zu. Derzeit laufen viele 5G und Industrie 4.0 Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten

parallel zueinander. Meist erfolgt lediglich ein Austausch von Vorstellungen, Konzepten und Ergebnissen auf einer sehr hohen Ebene. Erfahrungen haben jedoch gezeigt, dass die Industrieausrüster und die Mobilfunkindustrie oft eine unterschiedliche Sprache sprechen. Hierbei werden einfache Begriffe wie zum Beispiel Latenz und Zuverlässigkeit unterschiedlich definiert. Der begrenzte Einblick in das jeweils andere Fachgebiet (Maschinenbau, Automation, Telekommunikation) führt dadurch zu Fehlinterpretationen und Missverständnissen. Dies kann zu falschen Annahmen und Erwartungshaltungen des jeweils anderen Bereichs führen, was wiederum in nicht passenden Lösungsentwürfen enden kann. Des Weiteren sind oft Projekte und Gremien so zusammengesetzt, dass eine der Branchen stark überwiegt. Daher sollte nicht nur eine Intensivierung des Dialoges zwischen den Branchen Mobilfunkindustrie und Industrieausrüstung stattfinden, sondern auch eine intensive Zusammenarbeit angestrebt werden, um die bislang getrennten Welten 5G und Industrie 4.0 näher zusammenzubringen.

#### Handlungsempfehlungen:

- **Verbundprojekte mit Partnern aus den Bereichen Industrie 4.0 und 5G sollten übergreifende Lösungen und konvergente Architekturen entwickeln.**
- **Zusätzlich sollte der Dialog der politischen Plattformen wie z. B. der 5G-Fokusgruppe des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) mit der Plattform Industrie 4.0 ausgebaut werden.**

## These 4: Internationale Standardisierung ist wichtig

Für die erfolgreiche Etablierung von Funktechnologien für die Industrie 4.0 besitzt die internationale Standardisierung eine entscheidende Bedeutung, um einerseits eine Marktfragmentierung zu vermeiden und andererseits globale Märkte adressieren zu können. Dies ist von großer Wichtigkeit, um die Skaleneffekte erzielen zu können, die letztendlich erforderlich sind, um eine weite Verbreitung der Technologie erreichen zu können.

Unterschiedliche Funktechnologien werden entwickelt bzw. weiterentwickelt sowie standardisiert (3GPP, IEEE, IEC, ETSI, sowie in Industrieallianzen und Organisationen). Für Funkssysteme für Industrie 4.0 ist es von großer Wichtigkeit, die Arbeiten der Standardisierung in unterschiedlichen Organisationen aufeinander abzustimmen. Nur so können für das jeweils individuelle/spezifische Anwendungsszenario unterschiedliche Technologien entwickelt werden.

Aus der Historie heraus sind für verschiedene Industriesektoren unterschiedliche Standardisierungsgremien und -prozesse gewachsen; beispielsweise IEC für die Industrieausrüstung und 3GPP für die Telekommunikationsindustrie. Die Standardisierung erfolgt also typischerweise nach Sektoren getrennt. Dabei besitzt jeder Sektor das notwendige Spezialwissen zu den Arbeitszyklen und Prozessen der jeweiligen Standardisierungsgremien (zum Beispiel ETSI/3GPP für die Telekommunikation in Europa bzw. weltweit, CEN/CENELEC für die Industrie in Europa und die IEC, ISO und ITU auf globaler Ebene). Um relevante Gesamtlösungen zu erreichen, ist es wichtig, die branchentypischen Anforderungen aus den beteiligten Bereichen widerspruchsfrei und fristgerecht einbringen zu können. Die Standardisierungsgremien sollten daher enger zusammenarbeiten und interdisziplinär, systemübergreifend und wechselseitig genutzt werden. Nur so können Gesamtlösungen erzielt werden, die den Anforderungen der Industrie 4.0 gerecht werden.



#### Handlungsempfehlungen:

- Zur Sicherstellung eines Economy of Scale sind folgende Punkte zur Verhinderung einer Marktfragmentierung bedeutend:
  - Internationalisierung der Standardisierungskooperationen
  - Förderung der Kommunikation unterschiedlicher Standardisierungsorganisationen
  - Transparenz der jeweiligen Standardisierungsprozesse
  - Effiziente Zusammenarbeit auf abgestimmte Standardisierungsprozesse
- Für eine erfolgreiche Umsetzung einer Industrie 4.0 Funkkommunikation auf der Basis der 5G-Technologie ist eine enge Zusammenarbeit zwischen der Mobilfunkausrüstung und der Industrieausrüstung notwendig. Es wird empfohlen, jeweils passende Gremien miteinander inhaltlich abzustimmen.
- Für die Standardisierung einer domänenübergreifenden 5G-Technologie ist eine umfangreiche Erprobung im industriellen Kontext notwendig. Daher sollten Möglichkeiten der Zusammenarbeit frühzeitig in der Entwicklung berücksichtigt werden.
- Erfolgversprechende Lösungen aus den Forschungsprogrammen sollten für eine anschließende Verwertung in die Standardisierung überführt werden.

## V. Anhang

### Literatur zu I

- [I-1] Acatech: „Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems“, 2012.
- [I-2] DIN/DKE: „Deutsche Normungs-Roadmap Industrie 4.0“, 10/2015.
- [I-3] Plattform Industrie 4.0: „Umsetzungsstrategie Industrie 4.0“, Ergebnisbericht 04/2015.
- [I-4] BMWi: „Network-based Communication for Industrie 4.0-Proposal for an Administration Shell“, 11/2016.
- [I-5] ITG im VDE: Positionspapier „Resiliente Netze mit Funkzugang“, 03/2017.
- [I-6] S. Russwurm: „Industrie 4.0 – die Zukunft der Produktion“, Vortrag auf dem Wirtschaftstag der Botschafterkonferenz in Berlin, 08/2014.
- [I-7] ZVEI – Zentralverband Elektrotechnik und Elektronikindustrie e. V., Fachverband Automation: „Industrie 4.0: Auf dem Weg zur smarten Fabrik – die Elektroindustrie geht voran“, 2015.
- [I-8] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): Plattform Industrie 4.0. Netzkommunikation für Industrie 4.0, 2016.

### Literatur zu II

- [II-1] S. A. Ashraf, I. Aktas, E. Eriksson, K. W. Helmersson, and J. Ansari: “Ultra-Reliable and Low-Latency Communication for Wireless Factory Automation: From LTE to 5G”, Proc. of IEEE conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Berlin, Germany, September, 2016.
- [II-2] Bernd Holfeld, Dennis Wieruch, Thomas Wirth, Lars Thiele, Shehzad Ali Ashraf, Jörg Huschke, Ismet Aktas, and Junaid Ansari: “Wireless Communication for Factory Automation: An Opportunity for LTE and 5G Systems”, IEEE Communication Magazine, June, 2016.
- [II-3] Functional Safety and IEC 61508, <http://www.iec.ch/functionalsafety/>, last visited January 2017.
- [II-4] Andreas Müller, Robert Bosch GmbH: „Chancen & Herausforderungen von Industrial Radio aus Sicht der Industrie“, VDE Kongress, Oktober, 2016.
- [II-5] ZDKI, Industrial Radio, <http://industrialradio.de/Menu/Home/ZDKI>.
- [II-6] P. Schulz et al.: “Concepts for the Radio and Network Architecture to Meet the Challenges of Low Latency 5G Applications”, Published in IEEE Communications Magazine, 2017.
- [II-7] L. Rauchhaupt, U. Meier: “Performance Classes for Industrial Wireless Application Profiles and its Determination.”, 18th IEEE International Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA), September 10-13, 2013, Cagliari, Italy, In: Proceedings on USB-Stick.
- [II-8] IEC: “Industrial communication networks – Wireless communication networks – Part 2: Coexistence management”, IEC 62657-2:2013.
- [II-9] ETSI TR 102 889-2 V1.1.1: “Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference Document; Short Range Devices (SRD); Part 2: Technical characteristics for SRD equipment for wireless industrial applications using technologies different from Ultra-Wide Band (UWB)”, 2011.
- [II-10] PROFIBUS Nutzerorganisation e. V. (PNO): “Drives and Motion with PROFINET”, Germany, 2012.

### Literatur zu III

- [III-1] CEPT ECC: “ERC Recommendation 70-03 Relating to the use of Short Range Devices (SRD)”, Tromsø 1997; Subsequent amendments, 21 October 2016.
- [III-2] Ingo Wolff: „Funktechnologien im industriellen Umfeld“, Vortrag auf dem ITG/VDE Workshop am 28.05.2015 in Berlin
- [III-3] Bundesnetzagentur: „Verwaltungsvorschriften für Frequenzuteilungen im nichtöffentlichen mobilen Landfunk (VnömL)“, November 2016
- [III-4] IEEE 802.11 Task Group n: “TG n Channel Models”, Doc. Nr. IEEE 802.11-03/940r4, May 2004.
- [III-5] IEEE 802.11 Task Group ax: “IEEE 802.11ax Channel Model Document”, Doc. Nr. IEEE 802.11-14/882r4, September 2014.
- [III-6] Molisch et. al.: “IEEE 802.15.4a channel model – final report”, IEEE 2004.

- [III-7] 3GPP TR 36.873: "Study on 3D channel model for LTE", V12.4.0, March 2017.
- [III-8] 3GPP TR 38.901: "Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz", V14.0.0, March 2017.
- [III-9] Information über <http://www.industrialradio.de/Projects/Home/BZKI>.
- [III-10] LoRa Alliance: "LPWA Technologies, Unlock New IoT Market Potential", Machina Research, 11/2015.
- [III-11] LoRa Alliance: "A technical overview of LoRa® and LoRaWAN™", 11/2015.
- [III-12] Deutsche Telekom AG: „Narrowband IOT: Bahnbrechend für das Internet der Dinge“, [m2m.telekom.com](http://m2m.telekom.com).
- [III-13] Heinz Syrzisko: „Low-Power-Wide-Area-Netzwerke: LoRa eignet sich für LPWAN“, 07/2016.
- [III-14] Profibus Nutzer Organisation: „WSAN System Specification“, Spezifikation 2.642, Version 1.0, Juni 2012.
- [III-15] Profibus Nutzer Organisation: „WSAN Air Interface Specification“, Spezifikation 2.632, Version 1.0, Juni 2012.
- [III-16] DIN EN 62591: „Industrielle Kommunikationsnetze – Kommunikationsnetze und Kommunikationsprofile – WirelessHART™“, DIN, November 2011.
- [III-17] NGNM Alliance: „NGNM 5G White Paper“, Februar 2015.
- [III-18] ZDKI, [www.industrialradio.de](http://www.industrialradio.de).
- [III-19] Z. Pi and F. Khan: "An Introduction to Millimeter-Wave Mobile Broadband Systems", IEEE Communications Magazine, vol. 49, no. 6, 2011.
- [III-20] R. C. Daniels and R. W. Heath Jr.: "60 GHz Wireless Communications: Emerging Requirements and Design Recommendations", IEEE Vehicular Technology Magazine, vol. 2, no. 3, 2007.
- [III-21] S. N. Diggavi, N. Al-Dhahir, A. Stamoulis and A. R. Calderbank: "Great Expectations: The Value of Spatial Diversity in Wireless Networks", in Proceedings of the IEEE, vol. 92, no. 2, pp. 219-270, Feb 2004.
- [III-22] P. Banelli, et al.: "Modulation Formats and Waveforms for 5G networks: Who will be the heir of OFDM?: An Overview of Alternative Modulation Schemes for Improved Spectral Efficiency", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 31, no. 6, pp. 80-93, 2014.
- [III-23] O. Iscan, D. Lentner, and W. Xu: "A Comparison of Channel Coding Schemes for 5G Short Message Transmission", Proceeding of IEEE Globecom Workshops, 2016.
- [III-24] P. Suriyachai, U. Roedig and A. Scott: "A Survey of MAC Protocols for Mission-Critical Applications in Wireless Sensor Networks", in IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 14, no. 2, pp. 240-264, 2012.
- [III-25] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell: "Cooperative Diversity in Wireless Networks: Efficient Protocols and Outage Behavior", IEEE Trans. on Information Theory 50, no. 12, 3062–3080, 2004.
- [III-26] C. Dombrowski and J. Gross: "EchoRing: A Low-Latency, Reliable Token-Passing MAC Protocol for Wireless Industrial Networks", Proceedings of 21th European Wireless Conference, May 2015.
- [III-27] N. Petreska, H. Al-Zubaidy, R. Knorr and J. Gross: "On the Recursive Nature of End-to-End Delay Bound for Heterogeneous Wireless Networks", IEEE ICC 2015 – Communications QoS, Reliability and Modelling Symposium, 2015.
- [III-28] N. Petreska, H. Al-Zubaidy, R. Knorr and J. Gross: "Power-Minimization under Statistical Delay Constraints for Multi-Hop Wireless Industrial Networks", arXiv:1608.02191.
- [III-29] N. Petreska, H. Al-Zubaidy, B. Staehle, R. Knorr and J. Gross: "Statistical Delay Bound for WirelessHART Networks", Proceedings of the 13th ACM Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor & Ubiquitous Networks, 2016.
- [III-30] M. Medard, F. H. P. Fitzek, M. J. Montpetit and C. Rosenberg: "Network Coding Mythbusting: Why it is not About Butterflies Anymore", in IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 7, pp. 177-183, July 2014.
- [III-31] 3GPP TR 38.912: [http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38\\_series/38.912/38912-e00.zip](http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.912/38912-e00.zip).
- [III-32] Koordinierte Industriekommunikation (Koi), [www.koi-projekt.de](http://www.koi-projekt.de), zuletzt besucht 31.03.2017.
- [III-33] I. Aktas, J. Ansari, S. Aurox, D. Parruca, M. D. P. Guirao, and B. Holfeld: "A Coordination Architecture for Wireless Industrial Automation", European Wireless, Dresden, Germany, May 2017.
- [III-34] I. Aktas and S. A. Ashraf: "Radio Design and Coordination for Wireless Industrial Automation", ITG Fachtagung Mobilkommunikation, Osnabrück, Germany, May 2017.
- [III-35] Koordinierte Industriekommunikation (Koi), [www.koi-projekt.de](http://www.koi-projekt.de), zuletzt besucht am 31.03.17.

## 8.2 Abkürzungsverzeichnis

2G	Zweite (Mobilfunk) Generation
3G	Dritte (Mobilfunk) Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Vierte (Mobilfunk) Generation
5G	Fünfte (Mobilfunk) Generation
Acatech	Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
AGV	Automated Guided Vehicles
ARQ	Automatic Repeat Request
Bitkom	Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e.V.
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BNetzA	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
CDMA	Code Division Multiple Access
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Électrotechnique (deutsch: Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)
CEPT	Conférence Européenne des Administrations des Postes et des Télécommunications (deutsch: Europäische Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation)
CR	Cognitive Radio
ECC	Electronic Communications Committee
ERM	EMC and Radio Spectrum Matters
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
CPS	Cyber-Physische Systeme
CPPS	Cyber-Physische Produktionssysteme
DFKI	Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz
DIN	Deutsches Institut für Normung
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DMR	Digital Mobile Radio
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum
FBMC	Filter-Bank Mehrträgerverfahren
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum
FTS	Fahrerlose Transportsysteme
GFDM	Generalized Frequency Division Multiplexing
GFSK	Gaussian Frequency Shift Keying
GHz	Gigahertz
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	NAVSTAR Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HART	Highway Addressable Remote Transducer Protocol
HSPA	High Speed Packet Access
IIoT	Industrial Internet of Things
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IP	Internet Protocol
ISM	„Industrial, Scientific and Medical“ Funkfrequenzbänder
ISO	International Organization for Standardization

ITG	Informationstechnischen Gesellschaft im VDE
ITS	Intelligente Transportsysteme
ITU-R	International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector
IWLAN	Industrial Wireless Local Area Network
kHz	Kilohertz
LDPC	Low Density Parity Check (Code)
LoRaWAN	Long Range Wide Area Networks
LPWAN	Low Power Wide Area Networks
LTE	Long Term Evolution
PRP	Parallel Redundancy Protocol
MAC	Medium Access Control
MHz	Megahertz
mMTC	Massive Machine-Type Communication
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output Systeme
MISO	Multiple-Input Single-Output Systeme
NB IoT	Narrow Band Internet of Things
NR	New Radio
OFDM	Orthogonal Frequency Multiplexing
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
PDCP	Packet Data Convergence Protocol
PHY	Physikalische Übertragungsebene
PMR	Professional Mobile Radio
PRP	Parallel Redundancy Protocol
PSSS	Parallel Sequence Spread Spectrum
QoS	Quality of Service
RAMI	Referenzarchitekturmodell Industrie
RFID	Radio Frequency Identification
RLC	Radio Link Control
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SIMO	Single-Input Multiple-Output Systeme
SISO	Single-Input Single-Single Output Systeme
SRD	„Short Range Devices“ Funkfrequenzbänder
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TSN	Time-Sensitive Networking
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VHF	Very High Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UHF	Ultra High Frequency
uMTC	Ultra Reliable / Mission-Critical MTC
URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communication
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra-wideband
UNB	Ultra-narrowband
Wi-Fi	Marke der Wi-Fi Alliance, Austin, Tex., US
WirelessHART®	Wireless „Highway Addressable Remote Transducer Protocol“
WIA	Wireless Industrial Automation
WISA	Wireless Interface to Sensors and Actuators
WLAN	Wireless Local Area Network
WPAN	Wireless Personal Area Network

WSAN	Wireless Sensor Actuator Network
WRC-15	World Radio Conference (Weltfunkkonferenz) 2015
xMBB	Extreme Mobile Broadband
ZDKI	Zuverlässige drahtlose Kommunikation in der Industrie
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.





# VDE

VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK  
ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK e.V.

Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt am Main  
Telefon: 069 6308-0  
[service@vde.com](mailto:service@vde.com)  
[www.vde.com](http://www.vde.com)