



# Joint Communications & Sensing

Gemeinsame Funk-Kommunikation und -Sensorik  
VDE ITG

## Joint Communications & Sensing Gemeinsame Funk-Kommunikation und -Sensorik

### Autoren:

**Prof. Gerhard Fettweis**, Technische Universität Dresden/Barkhausen Institut Dresden  
**Martin Schlüter**, Technische Universität Dresden  
**Prof. Reiner Thomä**, Technische Universität Ilmenau  
**Prof. Holger Boche**, Technische Universität München  
**Prof. Hans Schotten**, DFKI  
**Dr. André Barreto**, Barkhausen Institut  
**Dr. Andreas Mueller**, Bosch  
**Dr. Attila Bilgic**, Krohne  
**Christoph Hildebrand**, Bundesnetzagentur  
**Dr. Dominic Schupke**, Airbus  
**Prof. Eckhard Grass**, IHP (Leibniz)  
**Dr. Frank Hofmann**, Bosch  
**Prof. Gerhard Kahmen**, IHP (Leibniz)  
**Stephan Blicher**, Deutsche Telekom  
**Isabelle Korthals**, Deutsche Telekom  
**Hans J. Einsiedler**, Deutsche Telekom  
**Ingo Rechenberger**, T-Systems  
**Dr. Gerd Zimmermann**, Deutsche Telekom  
**Dr. Heinrich Heiss**, Infineon  
**Uli Klepser**, Infineon  
**Dr. Martin Claus**, Infineon  
**Dr. Hendrik Seidel**, NXP

**Dr. Jan Goerlich**, Saab  
**Lars Lemke**, Krohne  
**Meik Kottkamp**, Rohde & Schwarz  
**Dr. Michael Meyer**, Ericsson  
**Dr. Padmanava Sen**, Barkhausen Institut  
**Dr. Patrick Scheele**, Hensoldt  
**Paul Bender**, Bundesnetzagentur  
**Alexander Deder**, Bundesnetzagentur  
**Prof. Rüdiger Quay**, IAF (Fraunhofer)  
**Prof. Slawomir Stanczak**, HHI (Fraunhofer)  
**Dr. Snezhana Jovanoska**, FKIE (Fraunhofer)  
**Dr. Stefan Köpsell**, Barkhausen Institut  
**Dr. Thomas Dallmann**, FHR (Fraunhofer)  
**Dr. Thomas Multerer**, Airbus  
**Thomas Neugebauer**, Götting KG  
**Dr. Thorsten Wild**, Nokia  
**Uli Barth**, C5UAV GmbH  
**Prof. Wolfgang Heinrich**, FBH (Leibniz)  
**Prof. Milos Krstic**, IHP (Leibniz)  
**Prof. Giovanni Del Galdo**, IIS (Fraunhofer)  
**Dr. Rahmi Salman**, Westnetz  
**Dr. Stefan Brüggewirth**, FHR (Fraunhofer)  
**Dr. Ralf Irmer**, Vodafone

### Herausgeber

#### VDE ITG – Informationstechnische Gesellschaft im VDE e.V.

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.  
Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt am Main  
[www.vde.com/itg](http://www.vde.com/itg)

#### Bildnachweis:

Titelseite: AndSus/stock.adobe.com, S.6: NXP Semiconductors,  
S.7: VDE e.V., S.8: macrovector/Freepik und Fußnote 11,  
S.13: macrovector/stock.adobe.com

#### Design:

Schaper Kommunikation, Bad Nauheim

Juli 2021

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Motivation</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Anforderungen</b>	<b>5</b>
2.1	Grundidee und Stand der Technik	5
2.2	Sensordatenfusion durch Kommunikation	6
2.3	Technische Anforderungen	8
2.4	Datenanalyse- und Verarbeitung	10
2.5	Gemeinsame KPIs	11
<b>3</b>	<b>Die Chance</b>	<b>12</b>
3.1	Gemeinsam genutztes Spektrum	12
3.2	Gemeinsame Hardware	12
3.3	Neue Dienste und Anwendungen	13
<b>4</b>	<b>Herausforderungen</b>	<b>15</b>
4.1	Kanalmodelle und Informationstheorie	15
4.2	Standardisierung der Sensorik	15
4.3	Herausforderungen an den Medienzugriff	16
4.4	Integriertes Front-End	16
4.5	Regulatorische Herausforderungen	17
4.6	Datenschutz	17
4.7	Nachhaltigkeit	17
4.8	Geschäftsmodelle	18
<b>5</b>	<b>Handlungsempfehlungen</b>	<b>19</b>

# 1 Motivation

Die ersten beiden Mobilfunkgenerationen, 1G und 2G, ermöglichten eine überall verfügbare Sprachkommunikation. Bei 1G war dies meist ein geschäftlich genutztes Telefon, der breite Durchbruch für Endverbraucher wurde erst mit 2G ermöglicht. Die nächsten beiden Mobilfunkgenerationen, 3G und 4G, ermöglichten eine überall verfügbare Datenkommunikation. Bei 3G lag der Nutzungsschwerpunkt zu Beginn bei Geschäfts-Smartphones (z.B. Blackberry und Nokia Communicator) und erst mit 4G fand das Smartphone den breiten Durchbruch beim Endverbraucher.

Mit dem Mobilfunkstandard 5G können zum ersten Mal reale und virtuelle Objekte über das Netz einzeln, in interaktiven Verbänden, oder im Schwarm ferngesteuert werden – das Taktile Internet.<sup>1</sup> Diese neue Anwendung für den Mobilfunk – die Fernsteuerung – wird zur Zeit hauptsächlich in Campusnetzen realisiert, überwiegend im industriellen und betrieblichen Kontext. Mit 6G soll diese Anwendung der Fernsteuerung auch in der Breite für den Endverbraucher einsetzbar werden. Zu den Anwendungsszenarien gehört das Steuern von mobilen Robotern, die den Alltag erleichtern, die Koordination von Drohnen, das koordinierte autonome Fahren, sowie eine erschwingliche, überall verfügbare, augmentierte bzw. virtuelle Realität (AR/VR). Es stellt sich nun die Frage, was an 5G fehlt, so dass diese Vision nur mit einer neuen Mobilfunkgeneration ermöglicht werden kann? Und wie können auch industrielle Anwendungen hiervon profitieren?

Eine 6G-Kernfähigkeit ist die Symbiose von Funk-Kommunikation und Funk-Sensorik.<sup>2</sup> Mobile Roboter und AR/VR müssen über Sensorik (z. B. Radar, Spektroskopie, und Ortung) ihre Umgebung in 3D erfassen und über Funk miteinander kommunizieren. Das heutige Radarspektrum reicht bei der zukünftigen Dichte an mobilen Robotern (inclusive Drohnen, autonome Autos, usw.) dafür allerdings nicht aus, insbesondere unter Berücksichtigung von 3D-Radar und Spektroskopie. Die spektrale Effizienz von Radar und allgemein von Funksensorik ließe sich allerdings wesentlich über den Stand der Technik hinaus verbessern, wenn bestimmte Radaranwendungen auch im Funkzugriff koordiniert würden. Das Mobilfunkspektrum wiederum reicht nicht für die avisierten Datenübertragungsraten der Zukunft von 100Gb/s aus. Allerdings sind große Funkressourcen für Breitband-Kommunikation selten gleichzeitig für Funksensorik vonnöten. Das legt die Idee nahe, in einem System und Frequenzspektrum sowohl Kommunikation als auch Sensing gemeinsam zu betreiben, genannt Joint Communication and Sensing (JC&S).

Die Entwicklung von JC&S bedarf der Kompetenz in Funksensorik und Kommunikationstechnik. Der Einsatz von JC&S in 6G und anderen Funknetzen, gepaart mit Kompetenz in der Robotik, wird ganze Industriezweige revolutionieren und ermöglicht völlig neuartige Endverbraucheranwendungen. Deutschland und Europa sind stark aufgestellt in (Endverbraucher)-Märkten, die vor einer Revolution durch JC&S und 6G stehen, wie z.B. Hobby, Sport und Fitness, Küchengeräte und Weiße Ware, Mobilitätsträger, Logistik, Garten-Geräte und Werkzeuge aller Art. Deutschland und Europa haben für die Forschung und Entwicklung an JC&S eine hervorragende Ausgangsposition. Dies, gepaart mit der vorhandenen Kompetenz in der Robotik und der Automatisierungstechnik sowie dem ressourcenzufizienten Life-Cycle-Management, ist eine Poleposition für die anstehende Produkt-Revolution in den vorher erwähnten Märkten. Ergreifen wir heute die Chance zu JC&S, kann aus dieser deutsch/europäischen Poleposition heraus ein neues Gründerzeitalter eingeläutet werden.

In diesem Positionspapier wollen wir das Konzept JC&S und sein enormes Zukunftspotential vorstellen. Wir erläutern verschiedene Anwendungsszenarien wie mobile Robotik und koordiniertes autonomes Fahren, und gehen auf die Vorteile von gemeinsam genutztem Spektrum und gemeinsamer Hardware ein. Weiterhin beschreiben wir wissenschaftliche, technische, regulatorische, gesellschaftliche, ressourcen-bedingte und wirtschaftliche Herausforderungen, zeigen Chancen auf, und geben konkrete Handlungsempfehlungen, um diese Herausforderungen zu meistern.

<sup>1</sup> G. Fettweis et al., „Taktiles Internet“, VDE-Positionspapier, 2014, [Online] <https://shop.vde.com/de/vde-positionspapier-taktil-es-internet-8>

<sup>2</sup> T. Wild, V. Braun und H. Viswanathan, „Joint Design of Communication and Sensing for Beyond 5G and 6G Systems,“ in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 30845-30857, 2021

# 2 Anforderungen

## 2.1 Grundidee und Stand der Technik

Mobile Roboter (dies beinhaltet auch autonome Fahrzeuge, Drohnen, usw.) müssen über eine präzise Ortung (Geolokalisation), sowie eine genaue Situationserkennung, verfügen. Jedoch können Kameras zum Schutz der Privatsphäre in den meisten Fällen nicht eingesetzt werden und LiDAR weist Einschränkungen im Erfassen großer Umgebungen vor allem auch bei schlechtem Wetter wie Regen, Schnee und Nebel auf. Deshalb wird die Radartechnik dringend benötigt. Um eine Materialerkennung realisieren zu können, sollte darüber hinaus die Spektroskopie ermöglicht werden. Das heutige Radarspektrum reicht allerdings weder für die zukünftige Dichte an mobilen Robotern, noch für Spektroskopie aus, genauso wie das Funkspektrum für die Datenübertragungsraten der Zukunft nicht ausreicht. Wie bereits erwähnt, ist eine effiziente Lösung des Problems, in einem System und Spektrum sowohl Kommunikation als auch Sensing gemeinsam zu betreiben, damit es zum Abtausch des Spektrums zwischen Sensorik und Kommunikation kommen kann. Davon profitieren vor allem Anwendung mit größeren Reichweiten z.B. aus den Bereichen autonomes Fahren, Verkehrsüberwachung, Robotik und Drohnensteuerung.

Erste Realisierungen zu JC&S gibt es bereits. Jenseits reiner Kommunikationsdienste bieten LTE und 5G bereits Möglichkeiten des Lokalisierens. Einschränkungen von 4G und 5G sind jedoch bisher, dass nur aktive Lokalisierung unterstützt wird, d.h. ein Endgerät muss mit dem Netz verbunden sein und Pilotensignale senden oder empfangen können, die der Lokalisierung dienen. Vorteile sind insbesondere an Orten gegeben, an denen globale Satellitennavigationssysteme (GNSS) nur schwach oder gar nicht empfangen werden können, wie z.B. in Gebäuden. 5G-Ortung ist insbesondere für Indoor/Outdoor-Übergänge interessant, wobei zum Beispiel Gabelstapler oder Paletten unterbrechungsfrei auf einem Industriegelände getrackt werden können.

Ein Anwendungsfall von aktiver Lokalisierung, der mit 5G bereits erfolgreich demonstriert wurde, ist der Schutz von gefährdeten Verkehrsteilnehmern.<sup>3</sup> Fußgänger und Fahrzeuge mit 5G-Endgeräten können über die 5G-Luftschnittstelle mit bis zu einem Meter Genauigkeit lokalisiert werden. Es können Trajektorien vorausberechnet und potentielle Kollisionen erkannt werden, so dass Autofahrer gewarnt werden können, dass z.B. hinter einem Sichthindernis ein Kind über die Straße rennen wird.

Die Vision von JC&S jenseits des aktuellen Stands der Technik (mit aktiver Lokalisierung) sollte jedoch sein, mit Hilfe von zukünftigen Kommunikationsnetzen auch Objekte erkennen und lokalisieren zu können, die nicht mit dem Funknetzwerk verbunden sind.

Eine bereits bestehende JC&S Realisierung ist das Ultra-Wideband (UWB) Impuls-Funksystem (IEEE802.15.4z), siehe Abbildung 1. Mobiltelefon-, Automobil-, und Halbleiterhersteller haben sich im Car Connectivity Consortium<sup>4</sup> zusammengetan, um dieses UWB-Impuls-Funksystem zur Entfernungsmessung im Rahmen der Spezifikation Digital Key 3.0<sup>5</sup> als Fahrzeugzugangssystem zu standardisieren. Erste Produkte mit 802.15.4z Funktechnik sind seit 2019 von Apple und Samsung verfügbar. Die Mobiltelefonhersteller nutzen die UWB-Impulse Radio Technologie momentan zur Lokalisierung anderer Mobiltelefone und Gegenstände über aufgebrachte Beacons / Tags in deren aktuellen Geräte-Generation. Eine Reihe von weiteren Applikationsfeldern werden im FiRa™ Consortium<sup>6</sup> untersucht. Diese sind z.B. „Hands-free“ Zugangssysteme, Ticketing für den öffentlichen Verkehr, Social Distancing, Point und Trigger-Applikationen, Indoor-Navigation und Smartphone Payment<sup>7</sup>. Eine weitere Anwendung von UWB ist die präzise Lokalisierung von Sensorknoten in schwierigen Non-Line-Of-Sight (NLOS) Umgebungen wie z. B. einer Flugzeug-Kabine.<sup>8</sup>

<sup>3</sup> S. Saur et al., „5GCAR Demonstration: Vulnerable Road User Protection through Positioning with Synchronized Antenna Signal Processing.“ International ITG Workshop on Smart Antennas, Hamburg, Deutschland, Februar, 2020

<sup>4</sup> <https://carconnectivity.org/>

<sup>5</sup> [https://global-carconnectivity.org/wp-content/uploads/2020/04/CCC\\_Digital\\_Key\\_2.0.pdf](https://global-carconnectivity.org/wp-content/uploads/2020/04/CCC_Digital_Key_2.0.pdf) - Chapter 4-Outlook

<sup>6</sup> <https://www.firaconsortium.org/>

<sup>7</sup> <https://www.firaconsortium.org/discover/use-cases>

<sup>8</sup> G. Karadeniz, F. Geyer, T. Multerer, D. Schupke „Precise UWB-Based Localization for Aircraft Sensor Nodes.“ AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference, Virtual Conference, Oktober, 2020



Abbildung 1: NXP Trimension™ - Nutzung der UWB Funktechnologie als Entfernungs- und Richtungssensor im Smartphone, Fahrzeug und Internet der Dinge

Der IEEE 802.15.4z Standard nutzt eine Sequenz von Impulsen zur Datenübertragung. Der MAC-Layer hat verschiedene Konfigurationsmöglichkeiten, die sowohl eine wiederkehrende Messung der Entfernung zu einer Vielzahl von anderen Geräten mit fester Wiederholungsfrequenz ermöglichen, als auch eine konventionelle Datenübertragung erlauben. Während der Entfernungsmessung werden Kontroll- und Steuerungssignale in Datenpaketen übertragen oder in die Entfernungsmessungspakete integriert. UWB ermöglicht daher heute schon die Konvergenz von Datenübertragung, sicherer Entfernungsmessung, 3D-Einfallswinkelbestimmung (mit zwei oder mehr parallelen Empfängern) und Radar (z.B. Präsenzdetektion) über kurze Distanzen. Das Ziel soll es nun sein, diese bei UWB bereits eingesetzte Konvergenz von Kommunikation und Sensing als fundamentalen Bestandteil im neuen 6G Standard zu integrieren. Weitere erwähnenswerte JC&S-Initiativen sind der omlox<sup>9</sup> Standard zur Herstellung der Interoperabilität verschiedener Funkortungstechnologien, das IEEE 802.11bf Projekt für WLAN Sensing und die Integrated Sensing and Communication Emerging Technology Initiative<sup>10</sup> der IEEE Communications Society zur Unterstützung von Forschungs- und Standardisierungsvorhaben.

## 2.2 Sensordatenfusion durch Kommunikation

Durch JC&S wird das kooperative Erfassen, Übertragen und Verarbeiten von Sensordaten ermöglicht. Dabei erlaubt es die Vernetzung der Sensoren, dass Daten von räumlich verteilten Plattformen zusammengefasst werden. Dieser Vorgang wird Sensordatenfusion genannt, was allgemein bedeutet, dass unvollständige und ungenaue Informationen von mehreren Sensoren kombiniert werden, um die Umgebungswahrnehmung zu verbessern. Die Wahrnehmungsinformationen können Informationen über die aktuelle Position und Dynamik von aktiven (mit Sensoren ausgestatteten) wie auch passiven Teilnehmern enthalten. Je nach Anzahl und Art der Sensoren können auch zusätzliche Informationen wie Zielklassifizierung und Bewegungsvorhersage gewonnen werden. JC&S ermöglicht es weiterhin, dass die Sensorinformationen unter den Netzwerknutzern geteilt werden, einschließlich der Nutzer, die nicht mit eigenen Sensorbeobachtungen zum Gesamtergebnis beitragen.

Ein Beispiel für die Anwendung der Sensordatenfusion durch JC&S ist das vernetzte und automatisierte Fahren und Fliegen (siehe Abbildung 2). Dies bringt eine Revolution für den Individualverkehr und erfordert viele neue Technologien. Die Echtzeit-Daten-Kommunikation zwischen Fahrzeugen sowie zwischen Fahrzeugen und Straßen-Infrastrukturkomponenten hat mit 5G begonnen, reicht aber für viele neue Anforderungen wie die präzise und zuverlässige Lokalisierung von Fahrzeugen innerhalb der Straßeninfrastruktur, sowie die Lokalisierung von anderen Verkehrsteilnehmern wie Fußgängern oder Radfahrern nicht aus. Zusätzlich könnten über den reinen Straßenverkehr hinaus auch Drohnen in das JC&S-Netz mit eingebunden werden.

<sup>9</sup> <https://omlox.com/home>

<sup>10</sup> <https://isac.committees.comsoc.org/>

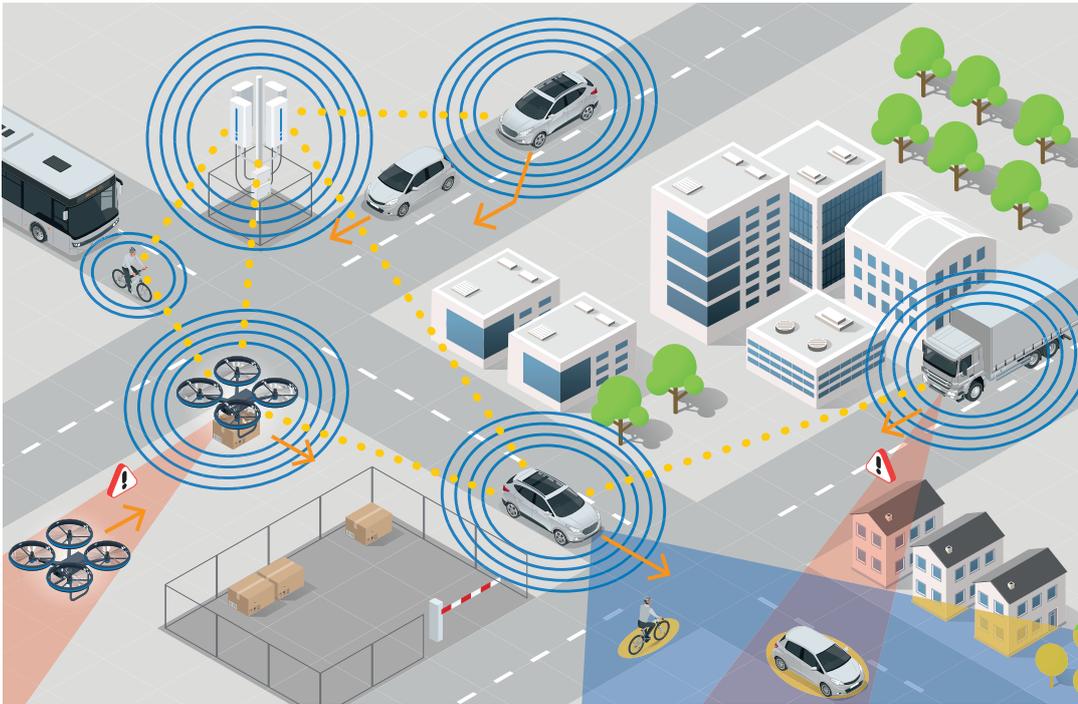


Abbildung 2: Sensordatenfusion durch JC&S im Straßen- und Luftverkehr.

Eine Übersicht über mögliche Architekturen für JC&S-Systeme ist in Abbildung 3 gegeben. Die Abbildung benutzt das gerade besprochene Beispiel des Straßenverkehrs, die Konzepte sind aber auch auf andere Anwendungsfälle (z.B. Fabrikhallen) übertragbar, welche in späteren Abschnitten dieser Publikation diskutiert werden.

In Abbildung 3-A) ist der Fall abgebildet, in dem orthogonale Wellenformen für Radar und Kommunikation benutzt werden. Die beiden Wellenformen nutzen dieselbe physikalische Funkschnittstelle und sind im Frequenz-, Zeit- oder Codebereich gemultiplext. Da die Basisstation das Radarsignal am gleichen Ort sendet und empfängt, wird ein Voll duplex-Betrieb (monostatische Anordnung in der Radarterminologie) benötigt. Die Basisstation operiert in diesem Fall als sogenanntes „stand-alone“-Radar und benötigt dafür ein Antennenarray.

Ein alternativer Aufbau ist in Abbildung 3-B) dargestellt, bei dem die gleiche Wellenform für Radar und Kommunikation verwendet wird. In diesem Fall sendet die Basisstation Kommunikationsdaten an das mobile Endgerät, welches gleichzeitig als mobiler Sensor agiert. Somit wird ein einzelnes Signal doppelt verwendet, für die Datenkommunikation und für das Radar Sensing. In diesem System können Basisstation und Endgerät im Halbduplex-Modus arbeiten. Die Basisstation benötigt in diesem Fall kein Antennenarray, da die räumlich verteilten Endgeräte und gegebenenfalls auch andere Basisstationen als Radarsensoren benutzt werden. Dieses System wird auch verteiltes bzw. multistatisches Multiple Input Multiple Output (MIMO) Radar genannt. Die Genauigkeit und räumliche Abdeckung sind in diesem System von der räumlichen Verteilung der mobilen Endgeräte abhängig. Im Vergleich zum monostatischen Radar in Abbildung 3-A) kann eine starke Zunahme der Zieldiversität beobachtet werden, was die Zielerfassungswahrscheinlichkeit deutlich erhöht, wenn mehrere bistatische (also multistatische) Messungen verfügbar sind. Dies ist ein bekannter Vorteil des verteilten MIMO-Radars.

Eine dritte Möglichkeit ist ein Ad-hoc-Netzwerk, zu sehen in Abbildung 3-C). Das gleiche Signal, welches von Knoten 1 zu Knoten 2 übertragen wird, wird vom Ziel (dem Radfahrer) zurückgestreut. Wenn eine Voll duplex-Fähigkeit gegeben ist, wird dadurch ein monostatisches Radar ermöglicht. Gleichzeitig empfängt auch Knoten 2 das Signal von Knoten 1, wodurch ein zusätzliches bistatisches Echo erzielt werden kann. Abhängig von der jeweiligen Anwendung, werden sich in der Praxis wahrscheinlich hybride Ansätze durchsetzen, die die Ideen der hier besprochenen Systemarchitekturen kombinieren.

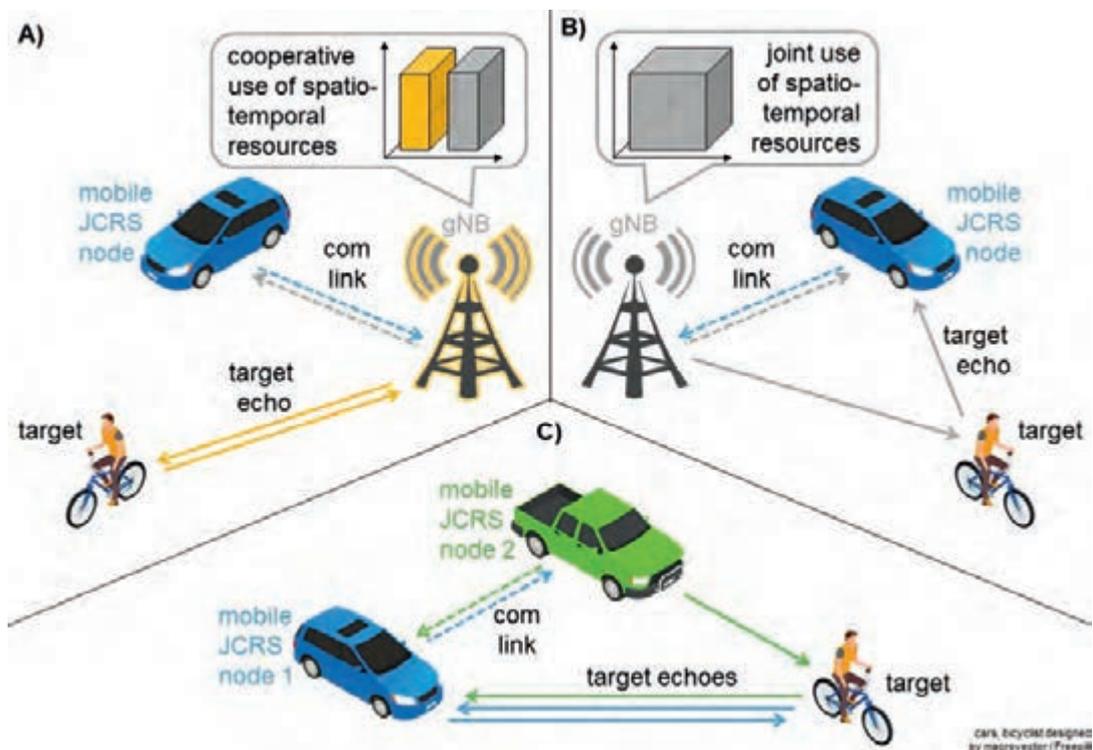


Abbildung 3: JC&S Systemarchitekturen. A) Monostatisches Sensing einer Basisstation und mobiler Knoten mit orthogonalen Wellenformen. B) Bistatisches Sensing von mobilen Knoten mit von einer Basisstation ausgestrahlten JC&S Wellenformen. C) V2V-basiertes monostatisches und bistatisches Sensing von mobilen Knoten ohne Unterstützung einer Basisstation.<sup>11</sup>

## 2.3 Technische Anforderungen

Für die in Abschnitt 2.2 diskutierten Anwendungsszenarien der Sensordatenfusion ist es nötig, sogenannte Lagebilder über Sensordatenfusion zu erschaffen, um entsprechende Verkehrsräume in Fläche und Tiefe kontinuierlich zu erfassen und somit in Echtzeit 3D-Lagebilder darstellen zu können. Zur Erstellung solcher Lagebilder durchlaufen die mittels Sensoren gewonnenen Informationen mehrere Verarbeitungsebenen, beginnend bei der Akquise von Rohdaten bis hin zur Positionsbeschreibung der erfassten Verkehrsteilnehmer durch Koordinatenangaben. Hierzu können sowohl Radare genutzt werden, die zur Detektion von Objekten aktiv ein Signal aussenden, als auch Passivradare zum Einsatz kommen, die dazu von anderen Sendesystemen ausgestrahlte Signale für die 3D-Ortsbestimmung verwenden. Die von den Radaren erfassten Rohdaten müssen zunächst entlang Entfernung, Azimut- und Elevationswinkel aufgelöst werden. Zusätzlich lässt sich die radiale Geschwindigkeit, d.h. die Geschwindigkeit in Blickrichtung des Radars (in radialer Richtung), mittels Dopplerverschiebung bestimmen. Anschließend werden Signalanteile, die eindeutig von Reflexionen verursacht werden, identifiziert. In weiteren Verarbeitungsschritten können nah beieinanderliegende Reflexionen zu Objekten zusammengefasst, klassifiziert und deren Bewegung verfolgt bzw. die Trajektorien bewegter Objekte vorausgerechnet werden. Zur Erstellung des Lagebilds stehen somit Informationen über Ort, Typ, Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit der Objekte (bzw. Verkehrsteilnehmer) zur Verfügung.

Gerade in Szenarien mit hoher Verkehrsteilnehmerdichte, wie z.B. in Innenstädten, ist es erforderlich, dass die Verkehrsteilnehmer voneinander unterschieden und deren Bewegungsrichtung vorausgesagt werden können. Ansonsten würden in einem Lagebild mehrere nah beieinanderstehende Objekte (z.B. ein Fahrradfahrer neben einem KFZ) zu einem Teilnehmer verschmelzen – eine Fehlinterpretation, die ein hohes Unfallrisiko birgt. Eine möglichst hohe Auflösung entlang Doppler, Entfernung, Azimut und Elevation eines Objekts durch den Sensor ist daher wünschenswert. In diesem Zusammenhang wird häufig von Imaging-Radaren bzw. bildgebenden Radaren gesprochen, die in der Lage sind, sehr detaillierte Lagebilder zu erstellen. So können durch lange Messzeiten diese Radare hohe Dopplerauflösungen erzielen, wodurch kleinste und unterschiedliche Bewegungen einzelner Teile der Verkehrsteilnehmer (z.B. der Gliedmaßen von Personen) erfasst werden können. Diese sogenannten Mikrodopplersignaturen erlauben eine zuverlässigere Separierung und Klassifizierung der Teilnehmer aufgrund unterschiedlicher Geschwindigkeitsprofile.

<sup>11</sup> R. Thomä, T. Dallmann, S. Jovanovska, P. Knott, A. Schmeink, „Joint Communication and Radar Sensing: An Overview“, in *Proc. European Conference on Antennas and Propagation*, Düsseldorf, Deutschland, März 2021

Damit diese Radare jedoch Objekte auch räumlich voneinander trennen können, ist eine hohe Entfernungsauflösung notwendig, die ein Signal mit möglichst großer Frequenzbandbreite erfordert. Dies ist aufgrund des bereits stark beanspruchten elektromagnetischen Spektrums eine besondere Herausforderung.

Zur zusätzlichen räumlichen Unterscheidung von Objekten senkrecht zur Entfernung können Imaging-Radare allerdings auf zwei verschiedenen Funktionsprinzipien beruhen. Entweder werden große Antennenarrays zur Erzeugung vieler virtueller Antennen eingesetzt, um eine möglichst hohe Winkelauflösung zu erreichen. Je nach Winkelauflösung ergibt sich eine Umgebungsbeschreibung mit hohem Detaillierungsgrad, vergleichbar mit einem optischen Abbild der Umgebung. Oder die Sensoren werden entlang einer Trajektorie durch den Raum bewegt, zeichnen an jeder Position Messdaten auf und fügen diese Messdaten zu einem quasioptischen Bild zusammen (Radar mit synthetischer Apertur - SAR). Das Ergebnis ist in diesem Fall ebenfalls eine hoch detaillierte Umgebungsbeschreibung.

Die in dieser Veröffentlichung beschriebene JC&S-Technologie verspricht die ressourcenschonende Realisierung von bildgebenden Radarnetzwerken, auch erweiterbar z.B. auf Spektroskopie. Die zuvor beschriebenen Technologien können hierzu folgendermaßen integriert werden:

- Die Entfernungsauflösung lässt sich durch gleichzeitige Nutzung (Aggregation) mehrerer Frequenzbänder erhöhen. Es lassen sich dabei auch Mobilfunkbänder integrieren, da die JC&S-Technologie gleichzeitig eine Kommunikation über diese Bänder zulässt.
- Mehrere Sensorknoten können mittels Datenaustausch synchronisiert und so zu einem Sensornetzwerk zusammengeschaltet werden (kooperatives Radar). Gemeinsam agieren die Knoten wie ein weit verteiltes und dementsprechend großes Antennensystem (entsprechend der in Abschnitt 2.2 beschriebenen verteilten MIMO-Systeme, abgebildet in Abbildung 3-B), mit dem bisher unerreichte Winkelauflösungen erreicht werden können.
- Zusätzlich lassen sich auch Sendesysteme integrieren, die eine Synchronisation nicht zulassen. Die Integration wird durch Passivradarfunktionen an jedem Sensorknoten ermöglicht. Die zusätzlichen Informationen, die dadurch über die Umgebung zur Verfügung stehen, erhöhen die Wahrscheinlichkeit, dass alle relevanten Verkehrsteilnehmer detektiert und Verkehrssituationen realistischer eingeschätzt werden.
- Weiterhin ermöglicht die Zusammenführung der radialen Geschwindigkeitsprofile und Dopplersignaturen über das Sensornetzwerk die präzise Rekonstruktion von Bewegungsvektoren entlang aller Richtungen und die Klassifikation der Verkehrsteilnehmer unabhängig von deren Bewegungsrichtung.
- Zuletzt erlaubt die Bewegung von an Verkehrsteilnehmern installierten Sensoren entlang einer Trajektorie die Generierung quasioptischer Bilder, welche über die Kommunikationsschnittstelle im Sensornetzwerk übermittelt und durch geeignete Fusionsansätze zusammengeführt werden können.

Somit sind JC&S-basierte Sensornetzwerke das ideale Rüstzeug, um ein 3D-Lagebild der Umgebung detailgetreu erfassen zu können und damit allen Verkehrsteilnehmern mehr Sicherheit in einem teil- oder vollautomatisierten Verkehrsgeschehen zu bieten.

Die zunehmende Automatisierung erfordert ebenfalls geeignete Kommunikationssysteme, die die besonderen Eigenschaften des industriellen Umfelds im Gegensatz zum urbanen oder ländlichen Raum berücksichtigen. Kleinteilige und in der Regel metallische Strukturen durch Maschinen, Fertigungszeilen und Regale erzeugen Reflexionen und Abschattungen. Des Weiteren ist der Schutz gegen böswillige Angriffe und Störungen von zentraler Bedeutung. Eine überall zuverlässige und vorhersagbare Kommunikation zu mobilen Robotern, Sensoren oder anderen Flurförderzeugen muss gegeben sein. Die gleichzeitige Nutzung der Funkgeräte als Spektrum-Sensing-Knoten zur Spektrumanalyse für ein automatisiertes Koexistenz- und Störungsmanagement kann zum zuverlässigen Betrieb beitragen<sup>12</sup>. Die entsprechenden Funkknoten an den mobilen Robotern können durch eine geeignete Radarfunktionalität zur Erkennung von Hindernissen dienen, wozu auch Personen zählen. Diese Funktion kann einen wesentlichen Beitrag zur Erhöhung der funktionalen Sicherheit leisten. Hier gibt es gerade im Außenbereich von Fabrikanlagen oder in Häfen bisher noch keine zufriedenstellende Lösung, da die unterschiedlichen Witterungsbedingungen den Einsatz der im Innenbereich vorherrschenden opti-

<sup>12</sup> VDIVDE Richtlinie 2185, Blatt 2: Koexistenzmanagement von Funklösungen

schen Lösungen, z.B. LiDAR, erschweren. Auch hier ist JC&S hilfreich, um Funktionalität und Kosten sowie Ressourceneffizienz sicher zu stellen.

Die Anforderungen an Kommunikation und Sensorik bezüglich der Zuverlässigkeit sind sehr stark abhängig von den konkreten Anwendungsfällen bzw. den jeweiligen Anwendungsdomänen. Dies reicht im Bereich der Radar-Sensorik bei der Entfernungsmessung beispielsweise von sub-cm-genauer Auflösung für die Erkennung von bestimmten feinen Gesten in geringen Entfernungen vom Sensor bis hin zum Kilometerbereich bei Flugradaren. Entsprechend sieht es bei der Datenübertragung aus. Geschlossene Regelschleifen in der Industrie benötigen oftmals Latenzzeiten in der Größenordnung von 1 ms in Verbindung mit einer Verfügbarkeit des Kommunikationsdienstes von 99,9999% und mehr, wohingegen sich viele andere Anwendungen, wie z.B. die Konfiguration einer Maschine mittels eines mobilen Bedienpanels, nicht wesentlich von klassischen Consumer-Anwendungen unterscheiden. Für die Spezifikation und Konfiguration eines JC&S-Systems ist es daher unerlässlich, den jeweiligen Anwendungsbereich klar zu definieren und im Detail zu analysieren sowie Lösungen bei Bedarf flexibel auf eine JC&S-Anwendung und die örtlichen Gegebenheiten sowie von vornherein auf applikationsspezifische Grenz- und Ausnahmefälle anzupassen. Die hohe Zuverlässigkeit und Sicherheit der Netzinfrastruktur muss in jedem Fall auch anspruchsvolle Anwendungsszenarien zulassen. Dies ist entscheidend für den industriellen Einsatz.

## 2.4 Datenanalyse- und Verarbeitung

Ein wichtiger Aspekt von JC&S ist, wo und wie die gesammelten Sensordaten verarbeitet werden. Aufgrund der Echtzeitfähigkeit sollten die Daten möglichst nahe beim Nutzer oder bei den ausführenden Prozessen (z.B. selbstfahrendes Fahrzeug, Drohne, Geräte zur Erkennung der Umgebung, etc.) verarbeitet werden (Edge Computing). Sofern die Endgeräte genügend Rechenressourcen zur Verfügung haben, kann dies dort geschehen. Ist das nicht der Fall, sind – auch unter Berücksichtigung des Energieverbrauchs – Basisstationen oder Multi-Access Edge Computing-Standorte (MEC) zu empfehlen. Dies erhöht auch die Datensicherheit bei physikalischen Datendiebstahlattaken (Einbruch). Eine Berechnung im zentralen Netz ist aufgrund der höheren Latenzzeit für viele Anwendungen nicht ratsam. Prinzipiell können Zusatzdaten, die weniger echtzeitrelevante Aktionen unterstützen, natürlich ins zentrale Netz ausgelagert werden, um übergeordnete Bewertungen von Situationen zwischen verschiedenen bzw. angrenzenden MEC Standorten über einen größeren Aktionsradius durchführen zu können und zu einer Gesamtbewertung einer übergreifenden Situation zu kommen.

Eine weitere Frage in Bezug auf die Verarbeitung der Sensordaten ist deren Nutzbarmachung für maschinelles Lernen (ML). Mit ML können z.B. sehr nützliche Informationen aus Funksignalen extrahiert werden, die zahlreiche Sensing-Anwendungen wie Objekterkennung, Lokalisierung und Verfolgung unterstützen können. Daher muss ML ein integraler Bestandteil eines JC&S-Gesamtsystems sein. Die Frage ist nun, wie ML in das Gesamtsystem integriert wird, da es oft nicht möglich ist, die gesamten Rohdaten an einem zentralen Punkt zu sammeln, an dem auch ML Algorithmen angewendet werden können, um nützliche Informationen zu extrahieren, oder wo Deep-Learning-Modelle trainiert und anschließend verteilt werden können. Ein vielversprechender Ansatz für ressourceneffizientes maschinelles Lernen mit im Netzwerk verteilten Daten ist föderiertes Lernen, eine kollaborative Form des maschinellen Lernens, die ein vorliegendes ML-Problem löst, ohne alle Informationen an einen zentralen Punkt zu übertragen. Der Trainingsprozess wird auf mehrere Lernpartner verteilt und von einem zentralen Controller koordiniert. Die Herausforderung besteht darin, überwachte und halbüberwachte Lernalgorithmen zu entwickeln, die verschiedene Herausforderungen in Funknetzen überwinden können, wie z. B. unzuverlässige Verbindungen oder korrelierte Stichproben.

Ein Problem in Bezug auf die Anwendung von ML besteht in "Adversarial Attacks", deren Vermeidung ein offenes Forschungsthema ist. Solche Angriffe versuchen ML Netzwerke mit falschen Daten zu überlasten oder zu trainieren, um das Netzwerk zu stören und die Effizienz zu reduzieren. Die sichere Anwendung von ML in JC&S-Systemen erfordert daher eine Resilienz gegen diese Art von Angriffen.

Neben dem Lernen ist die in Abschnitt 2.2 diskutierte Fusion der verarbeiteten Sensorinformation ein offenes Forschungsgebiet. Hier wird ein „Consensus“ zu suchen sein, um durch das Zusammenführen die Auflösung bzw. die Abdeckung der Sensorik-Zielauswertung zu erhöhen.

## 2.5 Gemeinsame KPIs

Die Leistungsfähigkeit von Kommunikations- und Sensing-Systemen wird auf der Applikationsebene durch unterschiedliche Leistungsindikatoren (Key Performance Indicators, KPIs) bestimmt. Für Kommunikationssysteme stehen KPIs wie erzielbare Datenrate und kurze Latenzzeit bei hoher spektraler Effizienz im Vordergrund. Die Güte einer Sensing-Applikation wird in erster Linie durch Positionsgenauigkeit, Auflösung sowie bei Klassifikationen von detektierten Objekten über Anzahl richtiger Vorhersagen bestimmt. Weitere für Kommunikation und Sensing gemeinsam relevante KPIs sind Kosten, Baugröße und Energieeffizienz. Im Allgemeinen stehen verschiedene KPIs oft im Widerspruch zueinander. Zum Beispiel können die Minimierung der Latenz oder die Maximierung der Energieeffizienz in der Regel nur auf Kosten der spektralen Effizienz erreicht werden. Dies führt zu komplexen Pareto-Optimierungsproblemen, durch deren Lösung ein adäquater Arbeitspunkt in Bezug auf die zugrundeliegende Anwendung in einer bestimmten Umgebung zu einem gewissen Zeitpunkt erreicht wird.

Auch wenn quantitativ schwer bestimmbar, ist die Resilienz (Robustheit) ein weiterer wichtiger KPI heutiger Sensor- und Kommunikationssysteme und geht über die üblichen Ansätze von Zuverlässigkeit und Sicherheit hinaus. Zu den zusätzlichen Funktionen, die gefordert werden, gehört die Rekonfigurierbarkeit, um den Kompromiss zwischen Zuverlässigkeit, Leistung, Energieeffizienz und Latenz in kritischen Anwendungen optimal zu steuern<sup>13</sup>.

<sup>13</sup> G. Fettweis et al., „Resiliente Netze mit Funkzugang“ VDE-Positionspapier, 2017, [Online] <https://shop.vde.com/en/vde-positionspapier-resiliente-netze-mit-funkzugang>

# 3 Die Chance

Im Folgenden wollen wir die Chancen erläutern, die sich in der Zukunft durch die technischen Möglichkeiten von JC&S ergeben.

## 3.1 Gemeinsam genutztes Spektrum

Traditionell wird Radar im militärischen Bereich, in der Fernerkundung, in der Luftfahrt und Schifffahrt sowie im Automobilbereich genutzt. All diesen Anwendungen sind bestimmte Frequenzbänder exklusiv zugewiesen. Während die erstgenannten Anwendungen die Bänder mitunter nur selten und örtlich begrenzt nutzen, sind Fahrzeugradare in zunehmendem Maße Massenanwendungen, die zudem hohe Sicherheitsanforderungen und Qualitätsstandards erfüllen müssen. Die Dichte der Radaranwendungen wird allerdings mit dem automatisierten Fahren extrem zunehmen. Das folgt aus der stark steigenden Anzahl der mit Radaren ausgestatteten Fahrzeuge, aber auch daraus, dass am Ende in allen Fahrzeugen mehrere Radarsensoren bzw. -systeme bei Nutzung verschiedener Frequenzbänder verbaut sein werden. Andererseits sind Radare bisher nicht auf Bandbreiteneffizienz optimiert. Auch ein koordinierter Mehrnutzer- (Mehrsensor-) Zugriff ist bisher nicht vorgesehen. Da die einzelnen Radare eine sehr große Bandbreite erfordern, um die benötigte Ortsauflösung zu gewährleisten, ist hier Handlungsbedarf gegeben. Es kommt hinzu, dass zunehmend Radaranwendungen entstehen, die nicht den extremen Sicherheitsanforderungen der Kollisionsvermeidung unterliegen.

Wenn sich Frequenzbänder für Radar und Kommunikation überlappen, wären eine flexible Nutzung und ein koordinierter Zugriff sinnvoll. Die Mobile Network Operator (MNO) könnten also einen gemeinsamen Kommunikations- und Radar-Service anbieten und eine faire Allokation der Frequenzbänder finden. Am effizientesten wird die Ressource Frequenzspektrum genutzt, wenn das gleiche Signal sowohl für Kommunikation als auch Sensorik genutzt werden kann. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass für die Erreichung einer hohen Entfernungsauflösung nicht unbedingt große zusammenhängende Frequenzblöcke erforderlich sind. Oft genügen auch kleinere, weiter auseinanderliegende Frequenzblöcke, die kombiniert werden, wie z.B. bei Carrier Aggregation in 4G und 5G. Dafür ist ein flexibler Frequenzbandzugriff erforderlich. Die verteilten Mobilfunkbänder sollte man daher als Chance sehen, denn dies erlaubt bei einer variablen Nutzung sehr unterschiedliche Anwendungen.

## 3.2 Gemeinsame Hardware

Die Fusion von Kommunikation- und Sensing-Anwendungen in einer gemeinsamen Hardware-Plattform ermöglicht es, auf ressourcenschonende Weise vorhandene Infrastrukturen zu nutzen und insbesondere bestehende Antennen- und Basisstations-Flächen für zusätzliche Dienste einzusetzen, die den Bürgern einen funktionalen Mehrwert bieten. Die Ressourcenschonung ist von hoher Bedeutung für die resultierenden Investitionsbedarfe, da dadurch die sonst aus einer parallelen Installation unterschiedlicher Dienste resultierenden Mehrfachkosten vermieden werden. Des Weiteren könnte die Zusammenführung von Radar- und Mobilfunksystemen in einer Hardware die Interferenzprobleme zwischen vielen Radarsystemen auf engstem Raum durch einen Kommunikationslink zwischen den Sensoren lösen und kooperative Sensornetzwerke mit verbesserter Leistungsfähigkeit ermöglichen.

Um die aus den unterschiedlichen Diensten und Anwendungen resultierenden Bedarfe an die Hardware technisch performant und kosteneffizient umsetzen zu können, spielt die mikrotechnologische Integration mit modernen, integrierten Halbleiterkomponenten eine wichtige Rolle. Sie ermöglicht es, durch eine geeignete Technologiewahl im näherungsweise gleichen Bauvolumen mehrfache Funktionalitäten mit unterschiedlichen technischen Anforderungen zu realisieren.

### 3.3 Neue Dienste und Anwendungen

Neben der in Abschnitt 2.2 besprochenen Koordination des Straßenverkehrs ist die Absicherung des unteren Luftraumes eine weitere mögliche Anwendung von JC&S. Das wird notwendig, sobald der kommerzielle Verkehr von Drohnen startet. Die herkömmlichen Systeme der Flugüberwachung sind dafür nicht ausgelegt. Sie wären viel zu teuer und können nicht auf dieses Problem skaliert werden, da die zu überwachenden Objekte immer kleiner werden, neue Bewegungsmuster aufzeigen und in der Anzahl immer mehr werden. Das hier vorgeschlagene Konzept von JC&S bietet für dieses Problem einen effizienten Lösungsansatz.

Abgesehen von Drohnen und autonomen Fahrzeugen kann es in der Zukunft auch eine Vielzahl weiterer mobiler persönlicher Roboter geben, deren Einsatz durch JC&S ermöglicht und koordiniert wird. Beispiele dafür sind Roboter zum Reinigen der Wohnung und andere Unterstützer im Alltag wie Küchenroboter, Pflegeroboter für den privaten Einsatz oder im Krankenhaus, Assistenten für Fitness oder Sportspiele, Exoskelette zur Unterstützung von bewegungseingeschränkten Personen und viele andere, die wir uns heute noch gar nicht vorstellen können. Ein weiterer bereits erwähnter und durch JC&S ermöglichter Anwendungsfall der vernetzten Robotik ist die selbstorganisierte Produktion in der Industrie, auch unter Industrie 4.0 bekannt. Hier kommunizieren und kooperieren Menschen, Maschinen, Anlagen, mobile Roboter, Logistik und Produkte direkt miteinander. Im Bereich der Landwirtschaft wird dies Smart Farming oder auch Landwirtschaft 4.0 genannt, zu sehen in Abbildung 4.



Abbildung 4: Smart Farming ermöglicht durch JC&S. Menschen, mobile Roboter, Drohnen und Anlagen kommunizieren und kooperieren miteinander.<sup>14</sup>

<sup>14</sup> AndSus / stock.adobe.com

Mit der umfassenden Netzverfügbarkeit und guten Lokalisierbarkeit der vernetzten Geräte werden sich in Zukunft noch viele weitere Anwendungsszenarien ergeben. Nehmen wir zum Beispiel das Anfahrts-, Parkplatz-, Sitzplatz-, und Abfahrtsmanagement von Großveranstaltungen. Hier entsteht viel Ineffizienz, weil das Verhalten durch die Besucher individuell koordiniert wird und die in Summe zur Verfügung stehenden oder erhebenden Informationen nicht genutzt werden. Wege könnten hier auch nach Preiskategorien optimiert werden, Wartezeiten durch die smarte Zusammenführung mit zufällig anwesenden Freunden oder Bekannten überbrückt werden. Und wenn der Aufenthaltsort und die Verkehrsmittelwahl eines Besuchers bei der Anreise darauf hindeuten, dass die Veranstaltung nicht mehr rechtzeitig erreicht werden kann, kann der Ticketverkauf ebenso automatisiert veranlasst werden, wie die automatische Vorheizung der Wohnung auf dem winterlichen Heimweg 15 Minuten vor Erreichen des Ziels.

Allgemein wird es von immer größerem gesellschaftlichem Interesse sein, Menschen und Güter vor allem möglichst ressourcenschonend, und damit besser koordiniert, zu bewegen. Das Konzept JC&S bietet dafür die notwendige technologische Grundlage. Weitere Anwendungsfelder, die von einer effizienten Kombination aus Kommunikation und Sensorik profitieren würden, sind das intelligente Management weiterer Ressourcen, wie z.B. des zunehmend knapper werdenden Trinkwassers, der Nahrungsmittelerzeugung (Smart Farming, zu sehen in Abbildung 4), der Energieverteilung und des allgemeinen Flächenverbrauchs. Diese könnten stärker nachfrageorientiert und zudem klima- bzw. wetteroptimiert erfolgen, was im Anblick eines fortlaufenden Klimawandels und einer steigenden Weltbevölkerung von fundamentalem gesellschaftlichem Interesse ist.

# 4 Herausforderungen

In diesem Abschnitt wollen wir einige Herausforderungen diskutieren, die gemeistert werden müssen, damit JC&S mit der Einführung von 6G Realität wird. Diese Herausforderungen sind sowohl technischer als auch politischer und gesellschaftlicher Natur.

## 4.1 Kanalmodelle und Informationstheorie

Für den erfolgreichen Entwurf von JC&S-Systemen benötigt es geeignete Kanalmodelle. Die im Mobilfunk bisher üblichen geometrisch basierten stochastischen Kanalmodelle (Geometry based Stochastic Channel Model, GBSCM) sind für Lokalisierung wenig und für Radar gar nicht geeignet. Der Grund dafür ist, dass die Kanalmodelle „drop-basiert“ sind, d.h. sie werden zwar als statische Szenarien ausgewürfelt, erlauben aber keine räumlich und zeitlich konsistente Veränderung der Parameter, wie sie sich durch die Bewegung der Radarsensoren oder der Ziele entlang bestimmter Trajektorien ergeben würde. Außerdem sind GBSCMs bezüglich der Umgebung geometrisch nicht korrekt abgebildet. Ray Tracing (RT) spiegelt dagegen eher die geometrisch korrekte Struktur der Umgebung wider, erlaubt aber in der Regel auch keine konsistente Modellierung der Zielparameter entlang definierter Trajektorien. Deshalb benötigen wir räumlich-zeitlich konsistente GBSCM und RT für die statistische und deterministische Modellierung von örtlich und zeitlich schnell veränderlichen Mehrzielszenarien. Dazu gehört auch die adäquate Nachbildung der Mehrwegeinteraktion mit der Umgebung.

Ein weiteres offenes Forschungsthema ist die Informationstheorie. In der Kommunikationstechnik ist die Informationstheorie inzwischen sehr gut entwickelt. Sie schließt ausdrücklich Mehrnutzer- und Netzwerkszenarien ein. Die Sensorik (Radar/Spektroskopie/Ortung)- Informationstheorie steht demgegenüber noch am Anfang. Auch hier wird eine auf Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik beruhende mathematische Theorie benötigt, um Leistungsgrenzen von Sensorsystemen zu ermitteln, geeignete Qualitätsparameter zu definieren und die Wege zu ihrem Erreichen aufzuzeigen. Eine adaptive und effiziente Allokation der Ressourcen von Sensorsystemen ist nur auf diesem Weg zu erreichen.

Insbesondere die Informationstheorie für Radarnetzwerke mit mehreren Sensoren als Äquivalent zur Mehrnutzer- oder Netzwerkinformationstheorie der Kommunikationstechnik steht erst ganz am Anfang. Das Konzept JC&S ist in der Informationstheorie bis jetzt noch völlig unbearbeitet. Die gemeinsame Optimierung derartiger Systeme erfordert eine übergeordnete Theorieebene, die die möglicherweise konkurrierenden Einflussfaktoren von Radar und Kommunikation zusammenbringt. Die Erkenntnisse dieser Theorie werden sich in den Konzepten für Schätzverfahren und der Ressourcenallokation in JC&S-Netzen wiederfinden.

## 4.2 Standardisierung der Sensorik

Für den Erfolg von Mobilfunksystemen war die Standardisierung in 3GPP der maßgebliche Grundstein, um globale Ökosysteme entstehen zu lassen. Dieser hohe Standardisierungsgrad ist in Sensorsystemen heute noch nicht erreicht. Der Markt ist fragmentiert und von proprietären Lösungen beherrscht. Bei einer Zunahme von proprietären Sensoranwendungen ist zu erwarten, dass starke Interferenzen dazu führen, dass das zur Verfügung stehende Spektrum bei weitem nicht effizient genutzt werden kann.

Um die Vision von JC&S umsetzen zu können, gilt es zukünftige Kommunikationssysteme um Merkmale zu erweitern, die dann auch den koordinierten und damit effizienten Einsatz für sensorische Aufgaben erlauben. Deshalb ist es erforderlich, die Anforderungen in die 3GPP sowie IEEE 802.11 und IEEE 802.15-Standardisierung einzubringen und das Design der physikalischen Schicht und der Medienzugriffsprotokolle zu erweitern, um die neuen Anforderungen zu erfüllen. Ebenso ist es sinnvoll, geeignete Managementprotokolle und -funktionalität zu standardisieren. Durch Standards wird erreicht, dass harmonisierte Verfahren global eingesetzt werden können, die letztendlich zu einer effizienteren Nutzung des Spektrums führen.

### 4.3 Herausforderungen an den Medienzugriff

Die effiziente Vergabe von Funkressourcen ist seit jeher eine der wichtigsten Aufgaben in zellularen Kommunikationssystemen, da die Frequenzspektren ein knappes Gut darstellen. Zusätzlich zu den bisherigen Anforderungen an eine Ressourcenvergabe in Mobilfunksystemen wie Ausnutzung günstiger Kanalzustände, an die Situation angepasste Modulations- und Codierverfahren, Auswahl von Antennenkonfigurationen, Berücksichtigung von Prioritäten und Anforderungen einzelner Dienste sowie der Vermeidung von Interferenz treten durch die hier diskutierten Anwendungsfälle neue Anforderungen auf, die es entsprechend zu berücksichtigen gilt. Eine erste Herausforderung besteht darin, dass neben den althergebrachten Einflussgrößen für Entscheidungen des Schedulers nun die räumliche Korrelation von zu detektierenden Objekten bzw. zu erfassenden Richtungen sowie potenziellen Empfängern von Daten berücksichtigt werden muss, um gegenseitige Störungen zu verhindern oder zu minimieren. Ebenso gilt es, Ressourcenstrukturen in den Dimensionen Zeit, Ort und Frequenz zu entwickeln, die ein effizientes Nebeneinander von Pilotsignalen zur Kanalschätzung, geeigneten Sensing-Signalen und der eigentlichen Datenübertragung erlauben. Eine weitere Herausforderung besteht darin, dass die effiziente Ressourcenvergabe auch für benachbarte Basisstationen koordiniert werden muss, um Interferenzen zu minimieren. Eine Koordination von benachbarten Basisstationen ermöglicht auch ein Netzwerk-Sensing, wobei Sender und Empfänger von Sensing-Signalen unterschiedliche Basisstationen sein können, was zu einer erhöhten Genauigkeit führen kann. Es gilt entsprechende Medienzugriffsprotokolle zu entwickeln, die diesen Anforderungen genügen.

### 4.4 Integriertes Front-End

Auf Seiten des Hochfrequenz-Front-Ends entstehen durch JC&S eine Reihe von Herausforderungen, die die Herstellungstechnologie der integrierten Schaltkreise, die Hochfrequenz-Schaltungstechnik, die Basisbandverarbeitung und den Medienzugriffsprozessor betreffen.

Die übergreifende Thematik dabei ist, dass derzeit die Transceiver in Basisstationen und User-Terminals auf die für die Kommunikation benötigten Funktionalitäten und Signalformen maßgeschneidert sind, um die Anforderungen, z.B. bezüglich Energieeffizienz und Linearität im Transmitter sowie Rauschzahl im Receiver, kostengünstig zu erfüllen. Dies läuft z.T. den für die Lokalisierung benötigten Spezifikationen zuwider. Deshalb gewinnen rekonfigurierbare Schaltungskonzepte an Bedeutung und an kritischen Stellen wie den Transmitter-Endstufen könnten Halbleitertechnologien mit verbesserter technischer Performanz nötig werden. Um eine hohe räumliche Auflösung zu ermöglichen, sind zudem Phased-Array-Antennen mit vielen Einzelelementen bei möglichst hohen Bandbreiten und damit hohen Trägerfrequenzen zu realisieren.

Die sich daraus ergebenden Herausforderungen bei der Realisierung eines integrierten Front-Ends im Gegensatz zu separaten Transceivern für Kommunikation und Lokalisierung lassen sich wie folgt zusammenfassen: (1) Ausreichende Linearität und Leistung des Senders, um den unterschiedlichen Anforderungen beider Anwendungen gerecht zu werden, (2) hohe Bandbreite und genügend hoher Signal-Rausch-Abstand (SNR) für Kommunikation und Radarerkennung, (3) die Integration von Antennen/Antennen-Arrays in kleinen Formfaktoren, insbesondere für den Einsatz auf mobilen Endgeräten, (4) die Realisierung des Duplexbetriebs, was spezielle Techniken zur Unterdrückung des Sendesignals im Radar- und Kommunikationsempfänger erfordert; (5) hohe Abstraten in der Basisbandverarbeitung sowie für die AD-Wandler, um die hohen Kanalbandbreiten zu unterstützen, die für eine hohe Entfernungsschätzgenauigkeit und hohe Datenraten erforderlich sind und (6) die Kombination der unterschiedlichen Anforderungen an die digitale Verarbeitung für Radar- und Kommunikationssysteme auf der physikalischen Schicht.

Zur Realisierung dieser Funktionalitäten werden über die einzelnen Halbleitertechnologien hinaus zukünftig auch hochperformante und kostengünstige Heterointegrations- und Aufbautechnologien eine wichtige Rolle spielen.

## 4.5 Regulatorische Herausforderungen

Wie bereits erläutert kann JC&S sehr vielfältige Anwendungen haben, z.B. für den Einsatz im Verkehr (Automobil, Bahn, Luftverkehr), in Krankenhäusern oder in der Industrie. All diese Bereiche haben ihre eigenen Regularien und Zulassungsbehörden (z.B. BfARM, Eisenbahnbundesamt etc.). Diese sind frühzeitig einzubinden, um Wege für deren Regularien zu finden. Beispielsweise wurde für die 5G-Frequenzbänder der Betrieb in Krankenhäusern und die potentielle Koexistenz mit Medizingeräten regulatorisch nicht gut vorbereitet. Es zeigt sich weiterhin bei der Einführung von 5G-Campusnetzen, dass ein intensiver Kennenlernprozess der Kommunikationsindustrie und der Industrie 4.0 notwendig ist. Da in Deutschland die maßgebende Industrie in den Bereichen Automobil, Bahn und Medizintechnik ansässig ist, sollte die Chance genutzt werden, diese über die Möglichkeiten und Randbedingungen zu informieren und in die Definition von JC&S mit einzubeziehen.

Aus frequenzregulatorischer Sicht besteht Handlungsbedarf, sobald Dienste und Anwendungen in Frequenzbändern genutzt werden sollen, für die es keine passenden Zuweisungen, Widmungen im Frequenzplan und Frequenzuteilungen gibt (z.B. Radaranwendungen in Mobilfunkbändern). Diese Problematik muss dann auf europäischer oder internationaler Ebene adressiert werden. Insbesondere Zuweisungen von Frequenzbereichen an neue Funkdienste auf Ebene der International Telecommunication Union (ITU) benötigen eine mehrjährige Vorlaufzeit mit Verträglichkeitsuntersuchungen, wobei das Ergebnis nicht gesichert ist.

## 4.6 Datenschutz

Neue sensorische Fähigkeiten, integriert als Basisdienst in zukünftige Mobilfunknetze, haben ohne Zweifel vielfältiges Potential. Gleichzeitig ermöglichen sie aber auch eine weitreichende Überwachung des öffentlichen Raumes. Mit Hilfe der erfassten Sensordaten lassen sich in Kombination mit maschinellem Lernen Eigenschaften präzisieren, die weit über eine simple Objekterkennung hinausgehen. Dies betrifft neben den Nutzern der neuen Möglichkeiten insbesondere auch unbeteiligte Dritte, die von den Sensoren erfasst werden. Da die MNOs sich Ihrer Verantwortung für den Datenschutz bewusst sind sowie Bedarfsträger oder (Cyber-) Kriminelle vielfältiges Interesse an den Sensordaten haben, müssen JC&S-Systeme so gestaltet werden, dass ein Missbrauch der Sensordaten technisch ausgeschlossen ist. Hierfür müssen weit über den Stand der Technik neue Lösungen entwickelt werden, die eine vertrauenswürdige Erfassung und Vorverarbeitung der Sensordaten direkt am Sensor derart ermöglichen, dass Missbrauch ausgeschlossen ist und gleichzeitig die gewünschte Nutzfunktionalität umgesetzt werden kann. Hier bedarf es weiterer Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen. Überzeugende technische und regulatorische Lösungen sind die Grundlage dafür, JC&S erfolgreich in der Breite auszurollen.

## 4.7 Nachhaltigkeit

JC&S hat direkte und indirekte Auswirkungen auf den Energieverbrauch von Bereichen, die für die Nachhaltigkeit primär kritisch sind, wie dem Verkehr oder der Industrie (z. B. Energieregulierung und Wärmebereitstellung). Die Anzahl von Sensoren und 6G-Kommunikationssystemen, insbesondere deren Materialverbrauch bei der Herstellung und die spätere Recyclingfähigkeit, wird zu einem Anstieg der bislang verbrauchten Energie- und Ressourcenmengen führen. In der Integration von Sensing und Kommunikation liegt daher ein hohes Potenzial in der Steigerung der Ressourceneffizienz und damit einer höheren Nachhaltigkeit. Hier liegt ein wesentliches Ziel darin, dadurch mehr Ressourcen einzusparen, als das 6G-Netz zusätzlich verbraucht. Somit müssen die erarbeiteten Konzepte vergleichend bewertet und eingeordnet werden, z.B. durch Aussagen über den LifeCycle oder den Vergleich von verbrauchter Energie des JC&S-Netzes im Vergleich zur eingesparten Energie durch die Optimierung des Verkehrs, so dass die Nachhaltigkeit der JC&S-Entwicklungen sichergestellt ist und darüber hinaus die übergeordneten Klimaziele unterstützt werden.

## 4.8 Geschäftsmodelle

Durch die Vernetzung und den dadurch möglichen Austausch der vorverarbeiteten Sensor-Daten ergeben sich die drei folgenden neuen und übergeordneten Anwendungsmöglichkeiten:

- 1) Austausch der Sensor-Rohdaten und Aggregation in einer Basisstationen oder einem MEC-Standort;
- 2) Austausch vorverarbeiteter Sensor-Daten und erzeugen von 3D- Lagebildern der Umgebung oder 3D-Spektroskopie-basierten Karten von Materialien (z.B. zur Verfolgung von Umweltverunreinigungen in Land/Wasser/Luft). In diesem Fall kann auch „probing-on-demand“ der Funknetz-Infrastruktur oder der Terminals zur Verbesserung der Auflösung als Dienst vorstellbar sein.
- 3) Austausch kognitiv vorverarbeiteter Sensordaten, insbesondere für erfasste bewegende Objekte, wie Personen, Fahrräder, Fahrzeuge, Vögel und autonome robotische Systeme.

Um den Erfolg von JC&S als Massenprodukt zu gewährleisten, benötigt es Verwertungsmethoden und Geschäftsmodelle für die MNOs. Beispiele dafür sind die Energieeinsparung aufgrund detaillierter Verläufe in einem Lokationsmuster („on demand“-Ressourcen-Bereitstellung), die Messung der Kundenerfahrung sowie eines Indexes für die Kundenerfahrung in Lokationsgittern, sowie die DSGVO-konforme Datenbereitstellung für verschiedene Anwendungszwecke und der Verkauf der Daten an Dritte. Die Bereitstellung der Daten erfolgt flexibel je nach Priorität und Anwendungsbedarf, z.B. ereignisbezogen, in vordefinierten Abständen oder auf Anfrage. Eine weitere Option ist, dass eine Sensorik-Funktion von den MNOs als Mehrwertdienst angeboten wird („Radar as a Service“).

# 5 Handlungsempfehlungen

Neben einer Erhöhung der Datenrate, der Energieeffizienz und der Sicherheit wird insbesondere JC&S das wichtigste Thema für die Entwicklung und Standardisierung von 6G-Funkzugangsnetzen werden. Hiermit wird der Grundstein für die Zukunft der persönlichen mobilen Robotik gelegt, insbesondere durch die Verschmelzung von Vernetzung, Sensorik und Robotik. Dadurch ermöglicht 6G die persönliche mobile Robotik im Endverbraucher-Markt, sei es zum Spielen, als Alltagshilfe, in der Pflege, als Lieferdrohne oder als autonomes Auto im koordinierten Straßenverkehr. Der Traum aus vielen Science-Fiction Romanen des letzten Jahrhunderts wird wahr. Es wird fast alle Endverbraucher-Sektoren revolutionieren, ob Sport, Fitness, Hausarbeit, Assistenz, Gartenarbeit, Küche, Einkauf oder persönliche Mobilität. Einen Vorgeschmack dieser Träume bieten erste Level-2 autonome Fahrzeuge oder Staubsaugerroboter schon heute. In allen oben aufgeführten Markt-Sektoren ist Deutschland in Produkten heute noch führend, wird aber durch Innovationen von außen herausgefordert werden. So wie der Tesla-Schock durch die europäische Automobilindustrie fegte und weiterhin anhält, werden ab ca. 2030, insbesondere durch 6G, alle anderen Sektoren der deutschen Endverbraucher-Industrie herausgefordert.

Deutschland hat heute eine riesige Chance eine Führungsrolle bei 6G und JC&S einzunehmen. Technologisch ist Deutschland bzgl. des Knowhows in der Kommunikationstechnik wie in der Sensorik und der Robotik in einer Poleposition. Auch hat Deutschland in weiten Teilen der bald durch Robotik revolutionierten Endverbraucher-Sektoren eine global bedeutende Stellung, und kann Produkte über den Lebenszyklus hinaus vertreiben, warten, sowie recyceln.

Die nächsten 5 Jahre kann diese Technik- sowie Produkt-Poleposition Deutschlands genutzt werden, um in 6G eine Führungsposition aufzubauen und die Transformation der Endverbraucher-Sektoren anzuführen. Daraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen für die Forschung und Entwicklung zu JC&S:

## 1. Forschungsförderung

- Förderung von Forschungsverbunden zwischen Herstellern von JC&S-Hardware, kommerziellen Betreibern (MNOs), Behörden (aufgrund der öffentlichen Sicherheit), Forschungsinstituten und Universitäten.
- Gemeinsame Forschung zur physikalischen Schicht sowie zum Funkzugriff für die Integration von Sensorik sowie Datenübertragung in einem Funkzugangsnetz.
- Forschung zum Aufbau von Datenagglomeration (durch föderierte/konsensus-basierte KI) von geteilten Dateninformationen.
- Forschung zu KI-gestützter Kartographie von Sensorik-Daten im Netz, und zwar weniger der Sensor-Rohdaten, sondern
  - i. der Sensorik-Imaging Karten (z.B. Geolokalisationsdaten, Radar-Imaging-Karten, Spektroskopie-Imaging-Karten) durch Fusions-KI und mit föderierter KI, sowie
  - ii. der Objekt-Imaging-Karten (z.B. Objektlokalisierung, Objekt-Erkennung und -Platzierungskarten, Material-Erkennung und -Verortung).
- Forschung an Algorithmen zur Objekterkennung und Klassifizierung durch Datenfusion verteilter Sensorknoten.
- Forschung an kosteneffizienter Hardware zur Realisierung (z.B. Antennensysteme, Transceiver und digitale Signalverarbeitung).
- Forschung an DSGVO-konformer System-Realisierung des Sensing-Datenzugriffs.
- Forschung zum Thema Nachhaltigkeit, Ressourcenverbrauch und Kreislaufwirtschaft.

## 2. Einbindung von JC&S in bestehende Testfelder und Ausbau von Testfeldern:

- Für autonomes Fahren.
- An Verkehrsbrennpunkten zur Verkehrsüberwachung und Steuerung.
- In Campusnetzen auf offenen Industriegeländen.
- Experimentierumgebungen für Endverbraucher-Produkte, z.B. Drohnen.

## 3. Standardisierung und Regulierung

- Stimulierung einer koordinierten 3GPP-Standardisierungsinitiative für JC&S-Systeme.
- Unterstützung bei bereits begonnenen Aktivitäten, wie etwa IEEE 802.11bf (WLAN-Sensing).
- Erarbeitung von Regularien zur Frequenznutzung und zum Datenschutz.
- Eine zügige Durchführung der nötigen Studien zur Unbedenklichkeit der Exposition.
- Eine zügige Durchführung von Studien zur Erstellung von Empfehlungen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit.

## 4. Übergang von der Forschung zur Entwicklung von konkreten Produkten und Geschäftsmodellen

- Entwicklung einer Systemarchitektur, die alle 3 Ebenen neuer Geschäftsmodelle ohne Monopolisierung zulassen.
- Förderung der deutschen Industrie, um den Endgeräte-Markt durch 6G auszubauen.
- Fertigung von Kern-Komponenten in Deutschland und Europa.
- Unterstützung der Entwicklung von JC&S-fähigen Hardwarekomponenten und Algorithmen in Deutschland und Europa.
- Förderung der relevanten Halbleitertechnologien zur Sicherstellung der technologischen Hoheit in Deutschland und Europa (nicht notwendigerweise höchstskaliertes CMOS) und von Technologien zur Hetero-Integration auf Chip-Level.
- Förderung der Aufbau- und Verbindungstechnik für hochintegrierte hybride Systeme.
- Entwicklung von nahtlosen Designflows über verschiedene Technologiegrenzen hinweg zur Entwicklung komplexer Multitechnologiesysteme.
- Erarbeitung von DSGVO-konformen Geschäftsmodellen für die MNOs.

## Über den VDE

Der VDE, eine der größten Technologie-Organisationen Europas, steht seit mehr als 125 Jahren für Innovation und technologischen Fortschritt. Als einzige Organisation weltweit vereint der VDE dabei Wissenschaft, Standardisierung, Prüfung, Zertifizierung und Anwendungsberatung unter einem Dach. Das VDE Zeichen gilt seit 100 Jahren als Synonym für höchste Sicherheitsstandards und Verbraucherschutz.

Wir setzen uns ein für die Forschungs- und Nachwuchsförderung und für das lebenslange Lernen mit Weiterbildungsangeboten „on the job“. 2.000 Mitarbeiter an über 60 Standorten weltweit, mehr als 100.000 ehrenamtliche Experten und rund 1.500 Unternehmen gestalten im Netzwerk VDE eine lebenswerte Zukunft: vernetzt, digital, elektrisch. Wir gestalten die e-diale Zukunft.

Hauptsitz des VDE (Verband der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e. V.) ist Frankfurt am Main.

Mehr Informationen unter [www.vde.com](http://www.vde.com).

## Über die VDE ITG

Die VDE ITG wurde 1954 gegründet und ist als interdisziplinär arbeitende, wissenschaftliche Fachgesellschaft in das fachübergreifende Netzwerk des VDE eingebunden. Sie agiert als Schnittstelle für Experten der Informationstechnik (ITK) in Wirtschaft, Verwaltung, Lehre und Forschung. Ihre Mitglieder bündeln in enger internationaler Anbindung die deutsche Kompetenz im Bereich der ITK.

Die VDE ITG fördert Forschung und Anwendung dieser Schlüsseltechnologie sowie deren effizienten Einsatz in den Bereichen Daten- und Kommunikationstechnik sowie -systeme, Umweltschutz, Medizin und Verkehr.

Mit ihrem weitgespannten internationalen Netzwerk versteht sich die VDE ITG als Plattform für Innovationen und Wissenstransfer für die erfolgreiche Kooperation von Industriepartnern und Forschungseinrichtungen. Hierzu führt die VDE ITG eine ganze Reihe von Fachtagungen, Diskussionssitzungen und Workshops durch. Mit ihren Studien und Empfehlungen bringt die VDE ITG ihre Expertise in Politik und Gesellschaft ein und nimmt an Förderprogrammen teil.

Ein weiterer Schwerpunkt der VDE ITG Aktivitäten ist die intensive Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie der Aus- und Weiterbildung der auf dem Gebiet der Informationstechnik tätigen Ingenieur\*innen und Wissenschaftler\*innen.

Die Informationstechnische Gesellschaft im VDE e.V. hat zurzeit ca. 7.200 Mitglieder und 1200 ehrenamtliche Mitarbeiter. Die fachliche Arbeit vollzieht sich in 7 Fachbereichen mit 34 Fachausschüssen und 32 Fachgruppen sowie mehreren Fokusprojekten.

[www.vde.com/itg](http://www.vde.com/itg)

VDE Verband der Elektrotechnik  
Elektronik Informationstechnik e.V.

Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt  
Tel. +49 69 6308-0  
Fax +49 69 6308-9865  
[info@vde.com](mailto:info@vde.com)  
[www.vde.com](http://www.vde.com)

**VDE**