

# SCHRIFTENREIHE DER FAKULTÄT FÜR TECHNIK DER DUALEN HOCHSCHULE BADEN-WÜRTTEMBERG RAVENSBURG

2017/01

---

Vernetzung durch zukünftige Mobilfunksysteme –  
Herausforderungen und Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. Jens Timmermann, M. Sc. Patrick Lehmann, B.Eng. Kris Dalm MBA



**SCHRIFTENREIHE DER FAKULTÄT FÜR TECHNIK  
DER DUALEN HOCHSCHULE BADEN-WÜRTTEMBERG  
RAVENSBURG**

2017/01

---

Vernetzung durch zukünftige Mobilfunksysteme –  
Herausforderungen und Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. Jens Timmermann, M. Sc. Patrick Lehmann, B.Eng. Kris Dalm MBA



## **IMPRESSUM**

Schriftenreihe der Fakultät für Technik  
der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg

### **Herausgeber**

Prof. Dr. Heinz-Leo Dudek  
Prorektor und Dekan der Fakultät für Technik

### **Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg**

Baden-Wuerttemberg Cooperative State University  
Marienplatz 2  
88212 Ravensburg  
Deutschland

<http://www.ravensburg.dhbw.de>

2017/01, Oktober 2017

ISBN 978-3-945557-03-7

ISSN 2199-238X

DOI 10.12903/DHBW\_RV\_FN\_01\_2017\_TIMMERMANN\_LEHMANN\_DALM

© Timmermann, Lehmann, Dalm 2017  
Alle Rechte vorbehalten.

Der Inhalt der Publikation wurde mit größter Sorgfalt erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität des Inhalts übernimmt der Herausgeber keine Haftung.

### **Druck und Verarbeitung**

#### **Gestaltung**

Nicole Stuepp  
DHBW Ravensburg  
Marienplatz 2, 88212 Ravensburg

#### **Druck**

Frick Kreativbüro & Onlinedruckerei e.K.  
Brühlstraße 6  
86381 Krumbach



# Vernetzung durch zukünftige Mobilfunksysteme – Herausforderungen und Anwendungen

Prof. Dr.-Ing. Jens Timmermann<sup>1</sup>

M. Sc. Patrick Lehmann<sup>2</sup>

B.Eng. Kris Dalm MBA<sup>3</sup>

## **ABSTRACT**

Spricht man heutzutage von den Anforderungen an zukünftige Mobilfunksysteme, so geht es vor allem um folgende Aspekte: deutliche Erhöhung der Datenrate sowie minimale Verzögerungen beim Datenaustausch zur Realisierung von Echtzeit-Anwendungen. Hierdurch sollen völlig neue Anwendungen in den unterschiedlichsten Lebensbereichen ermöglicht werden, die zum großen Teil auf einer mobilfunkbasierten Vernetzung zwischen Dingen beruhen (z.B. Vernetzung von Fahrzeugen, Vernetzung von Alltagsgegenständen etc.). Um ein passendes Mobilfunksystem zu entwickeln, müssen aktuelle Forschungsansätze aus den unterschiedlichsten technischen Wissensgebieten zusammengeführt werden, unter anderem aus der Nachrichtentechnik, der Informationstechnik, der Halbleiterphysik, der Antennentechnologie und der Energietechnik. Gleichzeitig soll die Wirtschaftlichkeit des Systems gegeben sein und der resultierende Mobilfunktarif für den Endkunden bezahlbar bleiben. Der vorliegende Artikel beleuchtet dieses Spannungsfeld und thematisiert zuletzt die möglichen Anwendungen des zukünftigen 5G-Mobilfunksystems (Mobilfunk der 5. Generation).

---

<sup>1</sup> Komm. Studiengangsleitung „Nachrichtentechnik – Kommunikationstechnik für Verkehrssysteme (TEK)“, Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Ravensburg, Campus Friedrichshafen, Fakultät für Technik

<sup>2</sup> Wissenschaftlicher Mitarbeiter, Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW) Ravensburg, Campus Friedrichshafen, Fakultät für Technik

<sup>3</sup> Projektleiter Lernfabrik Fallenbrunnen; IWT Wirtschaft und Technik GmbH, Ravensburg

# 1 ANFORDERUNGEN AN ZUKÜNFTIGE MOBILFUNKSYSTEME

Die Evolution der Mobilfunkstandards zeigt, dass mit jeder Einführung eines neuen Standards (genannt Mobilfunkgeneration) ein deutlicher Zugewinn an Datenraten einherging. Dieser Trend ist auch für die Zukunft absehbar, aber zugleich rückt das Thema Echtzeitfähigkeit (d.h. geringe Ende-zu-Ende-Verzögerung) in den Vordergrund sowie die Steigerung von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Energieeffizienz. Ein Umsetzen dieser Ziele wird zu vielen neuen Anwendungen führen, welche die Lebensqualität des Menschen steigern und einen schonenderen Umgang mit Ressourcen ermöglichen.

Nachfolgend werden die wichtigsten Ziele des angestrebten 5G-Mobilfunknetzes genannt. Hierbei ist zu sagen, dass die Anforderungen derzeit noch nicht final festgeschrieben sind. Es existiert derzeit ein Vorschlag der International Telecommunications Union (ITU) vom Februar 2017, welcher voraussichtlich im November 2017 verabschiedet wird [1]. Dieser wird auch in [2] für weitere Betrachtungen aufgegriffen und soll auch hier als Grundlage dienen. Ausgewählte, wichtige Anforderungen in [1] sind:

- Spitzendatenraten von bis zu 20 Gbit/s im Downlink und 10 Gbit/s im Uplink
- Datenrate von 100 Mbit/s im Downlink und 50 Mbit/s im Uplink pro Nutzer zu jeder Zeit in zentralem, urbanen Gebiet
- Sehr geringe Latenzzeit von 1 ms für einzelne Dienste
- Verkehrsdichten von 10 (Mbit/s)/m<sup>2</sup> für Hotspots innerhalb von Gebäuden

Im Folgenden werden einzelne Aspekte genauer dargestellt.

## 1.1 LATENZZEIT

In vielen zukünftigen Anwendungen ist es wichtig, Daten möglichst schnell zur Verfügung zu stellen. Man spricht hierbei von Echtzeit-Kommunikation, d.h. die Ende-zu-Ende-Verzögerung zwischen Sendeeinheit und Empfangseinheit, genannt Latenzzeit, muss minimal sein. Diese Zeit entspricht der Summe aller eintretenden Verzögerungen, die sich bei Kommunikation zweier Mobilfunkteilnehmer in momentanen Mobilfunknetzen z.B. aus folgenden Beiträgen zusammensetzt: Flugzeit (im Sinne einer Übertragungsdauer) der Funkwelle von sendender Mobilstation zur Basisstation, Verarbeitungs- und Wartezeiten (beispielsweise aufgrund des Zeitrasters im Multiplex-Verfahren oder der eingesetzten Protokolle), Zeit zum Durchleiten der Daten zur Ziel-Basisstation, Flugzeit der Funkwelle von der Ziel-Basisstation zur empfangenden Mobilstation. Diese Schritte sind derzeit auch dann notwendig, wenn sich beide Mobilstationen quasi nebeneinander befinden und die versorgende Basisstation deutlich weiter entfernt ist als der Abstand der Mobilstationen.

Der Beitrag zur Latenzzeit aufgrund der endlichen Ausbreitungsgeschwindigkeit (nämlich Lichtgeschwindigkeit) einer Funkwelle ist auf Grund physikalischer Gesetze nicht eliminierbar.

Allerdings könnte man auf die Idee kommen, dass mobile Teilnehmer direkt miteinander kommunizieren und zur Kommunikation nicht den Umweg über eine ortsfeste Basisstation nehmen (sogenannte Device-to-Device [D2D] Kommunikation). In einem solchen Szenario könnten Mobilstationen zugleich als (mobile) Basisstation fungieren und die Daten anderer Teilnehmer weiterleiten. Könnten zwei Mobilstationen in einem solchen Szenario direkt miteinander kommunizieren, so wäre bei der Kommunikation nur eine (möglicherweise recht kurze) Funkstrecke statt – wie bisher - zwei Funkstrecken via ortsfester Basisstation zu bewältigen. Beispiel: Befinden sich zwei Mobilstationen in einem Abstand von 20 m mit Sichtverbindung (z.B. Abstand zweier kommunizierender Autos bei car-to-car Kommunikation), so beträgt die Flugzeit der elektromagnetischen Welle nur  $t = s/c_0 \approx 66 ns$ . Natürlich treten bei jedem technischen Übertragungssystem - wie bereits erwähnt - noch weitere Beiträge zur Verzögerung auf. In heutigen Mobilfunknetzen beträgt die Latenzzeit typischerweise 20 bis 80 ms.

Angestrebte Latenzzeiten bei 5G liegen bei maximal 1 ms für Echtzeitanwendungen. Hintergrund ist, dass z.B. beim automatisierten Fahren unter Nutzung des zukünftigen 5G-Netzes im Falle einer Gefahrensituation möglichst schnell reagiert werden muss: Wenn in einer Autokolonne, die mit 100 km/h unterwegs ist, eine erkannte Gefahr innerhalb von 1 ms an die umgebenden Autos übermittelt werden kann, sind diese zwischenzeitlich nur  $s = v \cdot t \approx 2.8 cm$  weitergefahren. Die umgebenden Autos können quasi in Echtzeit auf die Gefahr reagieren, um einen Unfall zu vermeiden. Zum Vergleich: Eine Latenzzeit von 1 ms ist ca. 1000 Mal geringer als die Zeit, die ein Mensch benötigen würde, bis er die Gefahr erkannt und das Bremspedal durchgetreten hat. Ein manuell gefahrenes Auto würde in dieser Zeit ca. 28 m statt 2.8 cm zurücklegen.

Vergleicht man den oben beispielhaft berechneten Wert von  $66 ns$  mit der Vorgabe von maximal 1ms Latenzzeit, so sieht man, dass der Beitrag der Funkstrecke zur maximalen Latenzzeit im Falle der direkten Kommunikation recht gering ist. Zum Vergleich: Bei einer Kommunikation via ortsfester Basisstation, die beispielsweise 100 m von Sender und Empfänger entfernt ist, ergäbe sich bei Sichtverbindung eine Flugzeit der Funkwellen von  $t = s/c_0 = 2 \cdot 100m / (3 \cdot 10^8 m/s) \approx 0.000666 ms$ . Auch diese Zeit ist deutlich geringer als die Zielvorgabe von max. 1 ms Latenzzeit. Die Flugzeit der Welle ist folglich in beiden Szenarien nicht der dominierende Faktor bei Betrachtung der maximal akzeptablen Ende-zu-Ende-Verzögerung. Folglich kann man ein zellulares Konzept mit Kommunikation via Basisstation beibehalten.

Entscheidend ist es vor allem, in zukünftigen Mobilfunknetzen alle sonstigen Verzögerungen zu minimieren, d.h. es müssen wesentliche Verbesserungen im Mobilfunk-Kernnetz und an der Anbindung anderer Netze (z.B. Internet-Server) an das Kernnetz erreicht werden [3]. Weiterhin ist die Optimierung von Internet- und Übertragungsprotokollen essentiell, um Verzögerungen zu minimieren [4]. Wenn im Kernnetz Server für die Realisierung echtzeitkritischer Anwendungen verwendet werden, so macht es weiterhin Sinn, diese möglichst nahe am Endgerät (statt möglicherweise mehrere Hundert Kilometer entfernt) bereitzustellen. Mit diesen Fragen beschäftigt sich die Technik des Mobile Edge Computing (MEC). In Echtzeitanwendungen, die auf der Interaktion von Sensoren und Aktoren bestehen, liefert weiterhin die Ansprechzeit des Sensors sowie die Zeit zum Auslösen des Aktors einen wesentlichen Beitrag zur Latenzzeit [3].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine geringe Latenzzeit essentiell ist, um Echtzeitanwendungen zu realisieren. Das automatisierte Fahren dient hier lediglich als Beispiel. Weitere Echtzeitanwendungen werden im Kapitel zu Anwendungen näher thematisiert.

## **1.2 ZUVERLÄSSIGKEIT UND VERFÜGBARKEIT**

Sicherheitskritische Anwendungen, die auf ein Mobilfunknetz zurückgreifen (wie z.B. ein automatisiert betriebener Straßenverkehr), stellen besondere Anforderungen an die Zuverlässigkeit und die Verfügbarkeit eines solchen Netzes. Für diese Dienste gilt es, geeignete „Quality of Service“ Parameter zu definieren und Grenzwerte festzulegen, die zwingend eingehalten werden müssen. Es könnte z.B. gefordert werden, dass eine Latenzzeit von 1 ms für sicherheitskritische Anwendungen mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.9999 % eingehalten werden muss [3], während die Anforderungen an andere Dienste beispielsweise relaxiert sind. Da nicht alle Anwendungen im Mobilfunknetz sicherheitskritisch sein werden, kann es vorteilhaft sein, eine Priorisierung der Anwendungen vorzunehmen und die sich zeitlich ändernden verfügbaren Ressourcen (wie Bandbreite, Datenrate etc.) nach Priorität zur Verfügung zu stellen: Die Aufrechterhaltung der Verkehrssteuerung ist beispielsweise wichtiger als die Verfügbarkeit einer Virtual Reality Anwendung.

## **1.3 ENERGIEEFFIZIENZ**

Das mobile Endgerät muss „energy smart“ sein, d.h. eine hinreichend lange Akkulaufzeit aufweisen trotz möglicherweise hoher Rechenleistung im Mobilgerät. Weiterhin soll aber auch die Netz-Infrastruktur einen möglichst geringen Energiebedarf aufweisen, um die laufenden operationellen Kosten gering zu halten.

## 1.4 WIRTSCHAFTLICHKEIT

Neben der technischen Herausforderung stellt sich auch eine wirtschaftliche Herausforderung beim Aufbau eines zukünftigen Mobilfunksystems, denn die angestrebte Lösung muss sowohl für den Mobilfunkbetreiber als auch für den Nutzer bezahlbar und damit für den Massenmarkt geeignet sein. Da die Datenraten in Zukunft deutlich steigen, werden Mobilfunkanbieter das monatlich nutzbare Datenvolumen in typischen Mobilfunkverträgen deutlich anheben müssen, im Idealfall jedoch ohne Preissteigerung in den Mobilfunktarifen. Es gilt also, eine Vielzahl neuer Technologien zu vereinen unter der Vorgabe, dass minimale Kosten für den Aufbau und den Betrieb der Netzinfrastruktur entstehen, so dass bezahlbare Mobilfunktarife resultieren, während gleichzeitig das mobile Endgerät kostengünstig bleibt und die Wirtschaftlichkeit des Systems somit insgesamt gegeben ist. In [6] werden Kosten von 300 bis 400 Milliarden Euro genannt, um Europa flächig mit zukünftiger 5G-Infrastruktur zu versorgen. Andererseits erwartet McKinsey allein für das Internet der Dinge bis 2025 einen globalen wirtschaftlichen Mehrwert von ca. 9.5 Billionen Euro, was ca. 11% der globalen Wirtschaftsleistung entspricht [7].

## 2 FORSCHUNGSANSÄTZE ZUR REALISIERUNG NEUER MOBILFUNKSYSTEME

### 2.1 FORSCHUNG IN DEUTSCHLAND

In Deutschland wird an verschiedenen Orten und von unterschiedlichen Akteuren im Bereich zukünftiger Mobilfunktechnologie geforscht. Tabelle 1 zeigt eine kurze Übersicht ausgewählter Forschungsaktivitäten im Bereich 5G-Mobilfunk.

Ort / Partner	Aktivität / Projekt	Ziele
Technische Universität Dresden	5G Germany Lab	Bündelung von 5G-Forschungsaktivitäten aus 19 Lehrstühlen der Fakultäten Elektrotechnik & Informationstechnik, Informatik und Maschinenbau; 50 Partner wie z.B. Bosch, Claas, Deutsche Telekom, Ericsson, IDT, National Instruments, NEC, Nokia, Rohde&Schwarz, und Vodafone. [8]
Deutsche Telekom AG, diverse Standorte (z.B. Berlin, Bonn...)	5G:haus	5G:haus als Entwicklungslabor für die Forschung mit Partnern wie Stanford University, Fraunhofer-Gesellschaft, Startups wie RF DSP, Kumu Networks und Moogsoft und Hardware-Herstellern wie Ericsson, Nokia, Samsung, ZTE, Qualcomm und Huawei [9]
Alcatel-Lucent Deutschland AG, Stuttgart	Mehrere Forschungsprojekte in Zusammenarbeit mit Bell Labs (METIS und 5G NOW, Fantastic-5G)	Erforschung spezifischer Teilbereiche für 5G [8]
Nokia Networks, Ulm	5G Integrated fronthaul/backhaul	Implementierung von Netzwerkelementen [8]
Nokia Networks, München	METIS-II	Gesamtdesign für 5G-Funknetze und Analyse der Leistungsmerkmale [8]
TU Kaiserslautern	METIS II, 5G NORMA und 5G AURA	Entwicklung der Grundlagen von 5G [8]
Standardization Council Industrie 4.0, Frankfurt	Vertretung deutschen Interessen gegenüber internationalen Konsortien, Weiterentwicklung der Normungs-Roadmap Industrie 4.0	Nationale und internationale Koordinierung von Normung und Standardisierung im Bereich der digitalen Produktion [8]
Ericsson Eurolab in Aachen (zusammen mit Vodafone Innovation Park Labs)	Bereits durchgeführt: 5G – Anwendung im Live-Betrieb	Einsatz von Network Slicing und dezentralisierter Cloud-Technologie; maschinelle Objekterkennung in Echtzeit [8]
Ericsson GmbH, Düsseldorf	„5G for Germany“	Entwicklung von 5G gemäß den Bedürfnissen von Schlüsselzukunftsmärkten und

		Anwendungsindustrien [8]
Technische Universität Dortmund (und deutsch-französische Partner)	BERCOM - Blueprint for Pan-European Resilient Critical Infrastructures based on evolved LTE/5G communications	Erhöhung der Widerstandsfähigkeit kritischer Infrastrukturen auf Basis einer evolutionären Weiterentwicklung von LTE zu 5G (Erkennen und Abwehr von Cyberangriffen und Störungen sowie automatische Behebung von Schäden) [8]
Universität Bremen	Physical Layer Kooperation in verteilten Relayingssystemen	Einsatz mobiler Terminals, Relays und Sensorknoten für 5G-Anwendungen [8]
5G Automotive Association (diverse Standorte)	Erforschung von vernetztem Infotainment und vernetztem automatisierten Fahren	Entwicklung, Test und Förderung von Kommunikationslösungen für vernetzte Systeme (Partner z.B.: AUDI AG, BMW Group, Daimler AG, Ericsson, Huawei, Intel, Nokia und Qualcomm Inc.) [10]

Tabelle 1: Ausgewählte Forschungsaktivitäten in Deutschland

Die folgenden Abschnitte thematisieren ausgewählte Forschungsansätze in unterschiedlichen Wissensgebieten, die bei der Realisierung zukünftiger Mobilfunknetze (wie z.B. 5G und darüber hinaus) und den sich abzeichnenden Anwendungen eine zentrale Rolle spielen können.

## 2.2 FORSCHUNGSANSÄTZE DER NACHRICHTENTECHNIK

### 2.2.1 AUSWAHL VON BANDBREITE UND FREQUENZ

Bandbreite und Frequenz haben einen Einfluss auf die Übertragung. Dieser Aspekt wird nun näher beleuchtet: Den prinzipiellen Einfluss der Bandbreite kann man in der Shannon'schen Kapazitätsformel erkennen. Sie lautet:

$$C = B \cdot \log_2(1 + S/N) \quad (1)$$

Hierbei ist  $C$  die Kapazität,  $B$  die Bandbreite und  $S/N$  das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Die Formel sagt aus, dass die Kapazität (und damit die maximal erzielbare Datenrate für fehlerfreie Übertragung) in einem AWGN-Kanal (AWGN = Additive White Gaussian Noise) proportional zur Bandbreite ist. Somit stellen große Bandbreiten einen wesentlichen Schlüssel dar, um hohe Datenraten zu erreichen.

Beim Mobilfunkstandard LTE Advanced sind Bandbreiten bis zu 20 MHz pro Träger möglich, wobei durch das Verfahren „Carrier Aggregation“ je nach Gerätekategorie bis zu fünf Bänder gebündelt werden dürfen. Diese müssen im Frequenzspektrum nicht

notwendigerweise nebeneinander liegen. Mit LTE Advanced werden also bis zu  $5 \cdot 20 \text{ MHz} = 100 \text{ MHz}$  Bandbreite zur Verfügung gestellt.

Wenn in zukünftigen Mobilfunknetzen zur Steigerung der Datenrate noch größere Bandbreiten zur Verfügung stehen sollen, ist natürlich die Frage zu stellen, in welchen Frequenzbereichen das Spektrum angesiedelt wird. Weiterhin hat die Frequenzlage einen unmittelbaren Einfluss auf die erzielbare Reichweite. Zum besseren Verständnis dieses Einflusses wird die Friis Übertragungsgleichung herangezogen. Sie lautet

$$P_{Rx} = P_{Tx} \cdot G_{Tx} \cdot \left( \frac{c_0}{4\pi \cdot r \cdot f} \right)^2 \cdot G_{Rx} \quad (2)$$

und beschreibt, wie sich die Empfangsleistung einer Funkwelle im einfachen Fall einer Freiraumausbreitung (d.h. Sichtverbindung) und Polarisationsanpassung berechnet. Hierbei ist  $P_{Rx}$  die Empfangsleistung,  $P_{Tx}$  die Sendeleistung,  $G_{Tx}$  der Antennengewinn des Senders in Blickrichtung zum Empfänger,  $G_{Rx}$  der Antennengewinn des Empfängers in Blickrichtung zum Sender,  $c_0$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (in guter Näherung auch für Luft),  $r$  der Abstand zwischen Sender und Empfänger und  $f$  die Frequenz. Aus der Friis-Übertragungsgleichung geht hervor, dass die Empfangsleistung mit dem Quadrat der Frequenz abnimmt. Dies bedeutet: Je höher die Frequenz, desto geringer die Empfangsleistung und folglich desto geringer die Reichweite im Vergleich zu einer Übertragung mit niedrigerer Frequenz.

Da die terrestrische Funkkommunikation bislang vor allem im unteren GHz-Bereich stattfand und das Spektrum bereits entsprechend belegt ist, ist es nicht ohne Weiteres möglich, mehrere GHz Bandbreite im unteren GHz-Bereich zur Verfügung zu stellen. Da Frequenzzuweisungen jedoch zeitlich befristet sind, können zeitlich abgelaufene Frequenzbänder prinzipiell für neue Dienste zur Verfügung gestellt werden. Die Zuteilung von Frequenzen wird von der Bundesnetzagentur durchgeführt, welche wiederum die international vereinbarten Frequenzbereichszuweisungen (hervorgegangen aus den zurückliegenden Weltfunkkonferenzen (=World Radio Conference = WRC)) berücksichtigt. Neben Spektrum im unteren GHz-Bereich wird auch die Idee verfolgt, zusätzlich noch Spektrum bei deutlich oberhalb von 6 GHz für Mobilfunkdienste zur Verfügung zu stellen, bis hin zu 100 GHz (mm-Wellen Kommunikation). Im Mai 2017 wurde bekannt, dass Apple eine experimentelle Lizenz bei 28 GHz und 39 GHz beantragt hat [11], [12]. Diese Frequenzlagen sind durch die amerikanische Behörde FCC (Federal Communications Commission) für 5G-Anwendungen vorgesehen.

Problematisch bei hohen Frequenzen ist jedoch, wie bereits oben angesprochen, die Reichweite: Entweder akzeptiert man eine kleine Reichweite (z.B. akzeptable Lösung für eine kleine Funkzelle in indoor-Umgebung), oder man vergrößert die Reichweite durch hohe Richtwirkung von Sende- und Empfangsantenne. Für den letzten Fall wird in der Friis Übertragungsgleichung letztlich die hohe Frequenz im Nenner durch gleichzeitig hohe Antennengewinne im Zähler kompensiert.

Auf der letzten Weltfunkkonferenz im Jahr 2015 wurden bereits erste neue Frequenzbereiche definiert, die zukünftig für den öffentlichen Mobilfunk, d.h. insbesondere auch für 5G-Kommunikation, genutzt werden dürfen. Hierbei gilt es zu beachten, dass bis zur endgültigen Freigabe in Europa auch EU-Entscheidungen abzuwarten sind. Für Europa sind folgende Bänder vorgesehen [13]:

- 694 MHz – 790 MHz: Umwidmung für öffentlichen Mobilfunk bis 2020 durch EU-Kommission geplant
- 1427 MHz – 1518 MHz: entspricht Erweiterung des bereits in Deutschland lizenzierten Bereichs von 1452-1492 MHz
- 3400 MHz – 3800 MHz

Der größte Block ist damit derjenige zwischen 3400 MHz und 3800 MHz. Weiterhin werden (zur Vorbereitung der nächsten Weltfunkkonferenz im Jahr 2019) Studien laufen, welche die Eignung von Frequenzbereichen oberhalb 6 GHz untersuchen. In diesem Zusammenhang weist [13] auf die Möglichkeit eines zusätzlichen, 5 GHz breiten Bandes von 24.5 GHz bis 29.5 GHz hin, welches folglich noch größere Datenraten ermöglichen könnte.

Laut [13] kann das Frequenzband um 700 MHz dazu dienen, erste 5G-Dienste zur Maschinen-Maschinen-Kommunikation mit geringer Latenzzeit zu ermöglichen, während das Band von 3400-3800 MHz erste breitbandige 5G-Dienste in Städten mit Datenraten bis zu 2 Gbit/s erlauben würde. Die nächste Weltfunkkonferenz wird zeigen, ob bzw. welche weiteren Bänder freigegeben werden.

## **2.2.2 NEUE SIGNALFORMEN**

Bei LTE werden derzeit Signalformen basierend auf dem Verfahren CP-OFDM („Cyclic Prefix Orthogonal Frequency Division Multiplex“) eingesetzt. Hierbei wird ein Vielträgerverfahren verwendet, bei welchem die Bandbreite in viele schmalbandige Kanäle zerlegt wird. Generell haben Vielträgerverfahren gegenüber einem Einzelträgerverfahren den Vorteil, dass sich frequenzselektive Schwankungen des Funkkanals

weniger stark auf die Bitfehlerrate auswirken. Bei CP-OFDM gibt es jedoch zwei wesentliche Nachteile:

- Es wird eine hohe Linearität des Leistungsverstärkers benötigt [14], wobei letztere nur durch Leistungsverstärker geringer Effizienz zu realisieren ist. Dies wirkt sich beispielsweise negativ auf die Akkulaufzeit in einem mobilen Endgerät aus.
- Weiterhin kann das zur Verfügung stehende Spektrum mit CP-OFDM aufgrund von Nebenkeulen nur suboptimal genutzt werden [14], was die spektrale Effizienz und damit die erzielbare Kapazität beschränkt.

Verbesserungen verspricht man sich zukünftig durch Verwendung anderer Signalformen. Gegenwärtig werden weltweit verschiedene neue Ansätze erforscht. Vielversprechende Kandidaten sind beispielsweise die Verfahren UF-OFDM (Universal Filtered Orthogonal Frequency Division Multiplex [auch genannt UPMC = „Universal Filtered Multicarrier]), FBMC (Filter Band Multi-Carrier) und GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) [14]. Gemäß [15] rechnet man mit bis zu 30 % höherer Kapazität bei gleichzeitig geringerem Energiebedarf.

### **2.2.3 ÜBERTRAGUNG DURCH MASSIVE MIMO**

MIMO steht für „Multiple Input Multiple Output“ und bedeutet, dass bei der Funkübertragung sowohl auf Sende- als auch auf Empfangsseite mehrere Antennen verwendet werden. Im Zusammenspiel mit der Technik des Beamformings (Strahlformung) wird die räumliche Mehrwegeausbreitung von Funkwellen, d.h. die Tatsache, dass Funkwellen durch Interaktion mit Objekten (Reflexion, Streuung und Beugung) zum Empfänger gelangen können, gezielt genutzt. Die Kombination von MIMO und Beamforming ermöglicht es, unabhängige Datenströme gleichzeitig und auf der gleichen Frequenz in verschiedene Raumrichtungen zu versenden und empfängerseitig die aus unterschiedlichen Raumrichtungen eintreffenden Datenströme wieder zusammzusetzen. Hiermit geht eine Steigerung der Datenrate gegenüber dem SISO-Fall (SISO = „Single Input Single Output“) einher, die umso deutlicher ausfällt, je ausgeprägter die Mehrwegeausbreitung ist und je höher die Anzahl der verwendeten Antennen ist.

Eine ausgeprägte Mehrwegeausbreitung ist in der Regel in urbaner Umgebung gegeben, weshalb MIMO sein Potential in urbaner Umgebung besonders gut entfalten kann. Beim Mobilfunkstandard LTE Advanced ist bereits die Ausnutzung von 8 x 8 MIMO vorgesehen, d.h. es gibt acht Sendeantennen und acht Empfangsantennen. Zukünftige Mobilfunkstandards könnten die Datenrate durch den Einsatz von „Massive MIMO“, d.h. durch Verwendung Hunderter Antennenelemente [16], deutlich steigern

Bei Massive MIMO verwendet die Basisstation eine hohe Anzahl an Antennenelementen (höher als die Anzahl der zu versorgenden Teilnehmer in der Funkzelle).

Abbildung 1 visualisiert das Prinzip: Hierbei werden die Beams im Falle einer Sichtverbindung direkt auf die Zielteilnehmer ausgerichtet.

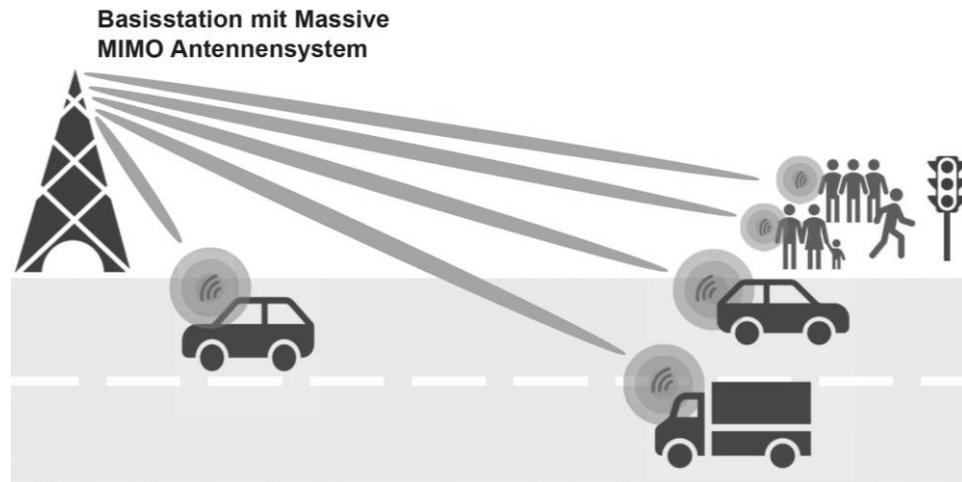


Abbildung 1: Prinzip von Mehrnutzer-MIMO; Quelle: Bundesregierung [17];  
Bild: mit freundlicher Genehmigung durch das BMVI

Nutzt auch das (mobiles) Endgerät eine hohe Anzahl an Antennen, so ist grundsätzlich auch die Frage der Integrierbarkeit der Antennen zu stellen. Diese Frage hängt von der Anwendung ab: In einem LKW ist beispielsweise mehr Platz zur Integration enthalten als in einem Smartphone. Weiterhin hängt die Frage der Integrierbarkeit mit der verwendeten Frequenz der Funkwelle zusammen: Je höher die Frequenz, desto kleiner dürfen die Antennenabmessungen zur effizienten Abstrahlung von Funkwellen sein, d.h. desto mehr Antennenelemente lassen sich in einem gegebenen Volumen unterbringen und desto höher ist folglich die erzielbare Datenrate.

Ein Prototyp von Ericsson basierend auf Massive MIMO besteht aus 128 Antennenelementen und erzielte im Jahr 2016 eine Datenrate von 10 Gbit/s [18]. Ebenfalls 2016 konnte Ericsson in Stockholm Übertragungsraten von 7 Gbit/s zu einem fahrenden LKW erreichen [19].

Es muss aber auch angesprochen werden, dass der Aufwand der MIMO-Signalprozessierung mit der Anzahl der verwendeten Antennenelemente steigt und damit verbunden auch der dafür nötige Energiebedarf. Bei batteriebetriebenen mobilen Endgeräten ist ein Kompromiss zwischen Datenrate und Energiebedarf zu treffen. Eine gute Übersicht zu den Grundzügen von Massive MIMO findet sich in [20],[21],[22] und [23].

## 2.2.4 QUANTENKOMMUNIKATION

Quantenkommunikation wird im kommenden 5G-Mobilfunkstandard noch nicht umgesetzt, könnte aber in zukünftigen Standards eine wichtige Rolle spielen, um abhörsichere Übertragungen zu realisieren.

Hierbei geht es um die Übertragung verschränkter Photonen (Lichtteilchen) mittels eines Lasers, wobei die Lichtteilchen entweder eine Strecke im freien Raum überbrücken oder in eine Glasfaser eingekoppelt werden.

Ein Abhören der Informationsübertragung würde Quantenzustände verändern, sodass der Empfänger den Abhörversuch bemerken würde [24].

Quantenkommunikation könnte in zukünftigen Mobilfunknetzen überall dort eine Rolle spielen, wo das Signal in Lichtform vorliegt, beispielsweise im glasfaserbasierten „Backbone“. Allerdings ist zu beachten, dass bei Quantenkommunikation mittels Glasfaser kein klassischer Verstärker zum Einsatz kommt, welcher das Signal nach einer gewissen Strecke verstärkt. Vielmehr benötigt man sogenannte Quantenrepeater.

Mobilfunknetze könnten auch mit einem zukünftigen (beispielsweise auch satellitengestützten) Quanten-Internet in Verbindung stehen. Im Juni 2017 realisierte der chinesische Satellit Micius einen neuen Reichweitenrekord in der Quantenübertragung: Die vom Satelliten per Laser an verschiedene Bodenstationen geschickten verschränkten Photonen legten hierbei eine Strecke von 2000 km zurück [25]. Weitere Informationen finden sich auch in [26].

## **2.3 FORSCHUNGSANSÄTZE DER INFORMATIONSTECHNIK**

### **2.3.1 SOFTWARE-GESTEUERTES, ADAPTIVES NETZWERK**

Um die Latenzzeit zu minimieren, besteht die grundsätzliche Idee darin, die Netzwerkinfrastruktur und die Netzwerkprozesse insgesamt aufeinander abzustimmen [3]. Im Rahmen des gegenwärtig laufenden, europäischen Projekts „5G-NORMA“ (5G Novel Radio Multiservice Adaptive Network Architecture) wird eine Netzwerkarchitektur entwickelt, welche den Funknetzzugang (Radio Access Network – RAN) und das Kernnetz (Core) einschließt. Hierbei steht die software-basierte Adaptierbarkeit des Netzwerks im Vordergrund, d.h. Netzfunktionen werden je nach Bedarf lokal erzeugt, zugewiesen und auch wieder aufgelöst [27].

Eine Schlüsselrolle zur Realisierung dieses Ziels könnte hierbei die Technik des Mobile Edge Computing (MEC) spielen. Gemäß [28] versteht man darunter die Verlagerung von Rechenleistung, Anwendungen, Daten und Services an die logische Randstelle („edge“) eines Netzwerks, also in geographische Nähe des beispielsweise mobilen Nutzers. Man spricht auch von „local cloud“. Eine weitere Idee besteht in diesem Zusammenhang darin, verteilte Server zur Informationsverarbeitung einzusetzen [3]. Insgesamt führt der MEC-Ansatz zu einem erhöhten Einsatz von Software im Funksystem, was zugleich auch die Flexibilität des Systems erhöht [29]. Weitere Details finden sich beispielsweise in [30].

### **2.3.2 RESSOURCEN-MANAGEMENT DURCH NETWORK SLICING**

Die Idee des “network slicing” besteht darin, ein physikalisches Netzwerk in viele virtuelle Netzwerke zu zerlegen, welche jeweils unterschiedliche Dienste unterstützen [31]. Beispielsweise benötigt nicht jeder Dienst bzw. jede Anwendung in zukünftigen Mobilfunksystemen zugleich extrem geringe Latenzzeiten und ultra-hohe Datenraten. Mit Hilfe von Network slicing kann man die Netzwerkressourcen intelligent aufteilen und zuweisen, und zwar dergestalt, dass jeder Dienst gerade so viel Ressourcen (z.B. Bandbreite) erhält, wie er zur Erfüllung der dienstspezifischen Anforderungen (requirements) benötigt. Ein solcher Ansatz erlaubt es, die verfügbaren Ressourcen gezielt dort einzusetzen, wo sie auch wirklich gebraucht werden. Um ein solches Konzept umzusetzen, werden im Vorfeld Anwendungsszenarien („use cases“) mit zugehörigen requirements und Quality of Service (QoS) Parametern definiert.

Bei der Realisierung von Network Slicing muss jedoch geprüft werden, ob die angestrebte Lösung im Einklang mit geltendem, nationalem Recht zur Netzneutralität steht. Vereinfacht gesagt geht es bei der Netzneutralität um die Gleichbehandlung von Daten bei der Übertragung im Internet. Eine zusammenfassende Darstellung der Regeln zur Netzneutralität in der Europäischen Union findet sich in [32].

### **2.3.3 SELBSTORGANISIERENDES NETZ**

Cognitive Radio beschäftigt sich mit der Selbstorganisation eines Netzes, z.B. eines Mobilfunknetzes: Das Netzwerk soll selbständig mögliche Beeinträchtigungen, beispielsweise der Signalqualität, feststellen (z.B. in Folge von Interferenz, Abschattung etc.) und Gegenmaßnahmen einleiten wie beispielsweise das Ändern der Trägerfrequenz.

### **2.3.4 SICHERHEITSASPEKTE**

Zukünftige Mobilfunksysteme werden in einer vollständig vernetzten Gesellschaft eine zentrale Rolle spielen. Aus diesem Grund ist es essentiell, das Funktionieren solcher Netze sicherzustellen und auch gegen (gezielte) Angriffe zu schützen. Daher gilt es, Schutzmaßnahmen auf allen Systemschichten zu implementieren.

Möglichkeiten zum Schutz bieten sich auf

- Hardwareebene
  - In [33] wird beispielsweise der Einsatz von Sicherheitsschaltkreisen, genannt „Secure Elements“, thematisiert.
  - [34] spricht von der Notwendigkeit eines „Security by Design“, d.h. Sicherheitsaspekte sollen gezielt in das Design der Hardware einfließen.

- Softwareebene
- Übertragungsebene (beispielsweise durch neue Ansätze in der Verschlüsselung)

Eine detaillierte Darstellung mit Empfehlungen zur Realisierung von Sicherheitsaspekten in zukünftigen Mobilfunksystemen ist in [35] zu finden.

## **2.4 FORSCHUNGSANSÄTZE DER HALBLEITERPHYSIK**

In zukünftigen Mobilfunknetzen sollen Frequenzbereiche genutzt werden, die auch oberhalb von 2.7 GHz (LTE) angesiedelt sind. Weiterhin wird eine höhere Bandbreite zur Verfügung stehen. Daher gilt es, Verstärker für die Funkübertragung zu entwickeln, die bei erhöhter Frequenzlage arbeiten, gleichzeitig breitbandig und in der Lage sind, hinreichend hohe Leistungen auszusenden, beispielsweise beim Einsatz in der Basisstation. Zugleich sollen diese Verstärker energieeffizient arbeiten, um beispielsweise die Betriebskosten von Basisstationen zu minimieren. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden derzeit am Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik (AIF) in Freiburg Galliumnitrid-Leistungstransistoren und integrierte Schaltungen auf Galliumnitrid-Basis (GaN) erforscht und entwickelt. Nähere Informationen sind in [36] und [37] zu finden.

## **2.5 FORSCHUNGSANSÄTZE DER ENERGIETECHNIK**

Forschungsansätze in der Energietechnik zielen darauf ab

- den nötigen Energieverbrauch zukünftiger Mobilfunknetze so gering wie möglich zu halten
- Energie kostengünstig zu erzeugen und bereitzustellen
- eingesetzte Energiespeicher wie Akkus und Batterien möglichst lange nutzen zu können, beispielsweise durch hohe Energiedichten des Speichers selbst oder durch minimale Entnahme von Energie.

Zusammenfassend geht es um Lösungen, die „energy smart“ sind.

### **2.5.1 AKKULAUFZEITEN**

Akkulaufzeiten in mobilen Endgeräten sollten möglichst hoch sein, schon aus Gründen der Akzeptanz durch den Nutzer. Während dies in der Größenordnung von Tagen liegt und je nach Nutzerverhalten dabei hohe Datenraten übertragen werden, können die Rahmenbedingungen in Sensornetzwerken gänzlich andere sein.

Batteriebetriebene Sensoren in einem Sensornetzwerk, die nur sporadisch Informationen austauschen und dabei niedrige Datenraten übertragen, könnten mit Batterien ausgestattet werden, die bis zu 15 Jahre Lebensdauer aufweisen [38], denn ein häufiges Tauschen von Batterien ist ineffizient und kostenintensiv. Hier gilt es, intelligente Konzepte zur minimalen Stromaufnahme umzusetzen.

## **2.5.2 ENERGETISCHE BETRACHTUNGEN ZUM NETZBETRIEB**

Auch die Netz-Infrastruktur soll einen möglichst geringen Energiebedarf aufweisen, um die laufenden operationellen Kosten gering zu halten.

Der Einsatz energieeffizienterer Leistungsverstärker in Basisstationen wurde bereits angesprochen. In Hinblick auf die Stromversorgung zukünftiger Basisstationen ist es denkbar – ähnlich wie bei Parkautomaten - eine Solarzelle als Energiequelle zu verwenden (sogenanntes „off-grid deployment“) [3]. Wenn der Strom nicht zugekauft werden muss, sinken die Betriebskosten der Basisstation deutlich. Mit einer solchen Lösung könnten auch Gebiete funktechnisch versorgt werden, die nicht an das Stromnetz angeschlossen sind. Dieser Aspekt ist nicht nur für den Aufbau zukünftiger Mobilfunknetze in Entwicklungsländern relevant, sondern könnte auch das Mittel der Wahl sein, um beispielsweise dünn besiedelte Gegenden in Industrieländern zu versorgen, die bisher noch nicht funktechnisch erschlossen sind. Selbst in urbaner Umgebung könnte es wirtschaftlicher sein, eine Solarzelle zu verwenden als einen Stromanschluss zur Basisstation zu legen.

Eine solche Herangehensweise ist jedoch auch mit Risiken verbunden, denn im Falle einer unzureichenden Lichteinstrahlung (beispielsweise durch Smog oder Naturereignisse wie länger anhaltende Schlechtwetterphase, Vulkanasche in der Atmosphäre) könnte die Funkversorgung großflächig ausfallen und in einer vollständig vernetzten Gesellschaft neben der individuellen Kommunikation auch die Produktion sowie den Verkehr beeinträchtigen. Andererseits ist zu bedenken, dass auch die Stromerzeugung in Deutschland mittlerweile zu einem erheblichen Anteil auf Nutzung alternativer Energiequellen wie Wind und Photovoltaik beruht, so dass auch Basisstationen, die ans Stromnetz angeschlossen sind, nicht per Definition vor den Folgen ausbleibenden Windes oder unzureichender Lichteinstrahlung geschützt sind. Laut Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [39] sind erneuerbare Energien (Windkraft, Photovoltaik, Biomasse, Wasserkraft, Hausmüll) mittlerweile die wichtigste Stromquelle im deutschen Energiemix und stellten im Jahr 2016 einen Anteil von 29 % an der deutschen Bruttostromerzeugung dar (gefolgt von 23.1 % Braunkohle, 17.2 % Steinkohle, 13 % Kernenergie, 12.4 % Erdgas und 5.1 % „Sonstige“). Die Photovoltaik trägt beispielsweise bereits durchschnittlich mit 5.9 % zur Bruttostromerzeugung bei, Windkraft zu 11.9 %.

### 3 ZUKÜNFTIGE ANWENDUNGSFELDER

Zukünftige Anwendungsfelder des geplanten 5G-Netzes ergeben sich in den unterschiedlichsten Bereichen, wie Abbildung 2 darstellt. Ausgewählte Anwendungen werden in den folgenden Abschnitten näher thematisiert.

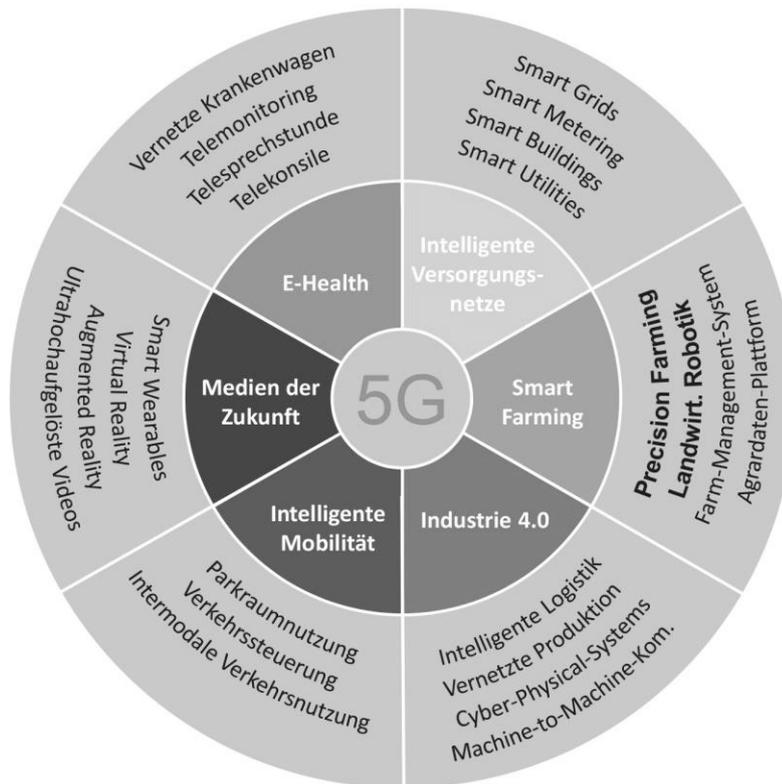


Abbildung 2: Anwendungsfelder von 5G-Technologie; Quelle: Bundesregierung [17];  
Bild: mit freundlicher Genehmigung durch das BMVI

#### 3.1 AUTONOMES FAHREN

Mit Hilfe zukünftiger Mobilfunknetze soll die Vision vom Fahren ohne Fahrer, genannt Autonomes Fahren, möglich werden. Hierbei unterscheidet man in den USA und Europa sechs verschiedene Autonomiestufen. In Anlehnung an [40] lassen sich diese wie folgt zusammenfassen:

- Level 0:
  - Fahrer fährt selbst, und es sind keine Assistenzsysteme vorhanden.
- Level 1:
  - „Assistiertes Fahren“, d.h. Fahrer fährt selbst, aber es sind bereits Assistenzsysteme vorhanden (z.B. Adaptive Cruise Control)

- Level 2:
  - „Teilautomatisiertes Fahren“, d.h. das Fahrzeug unterstützt z.B. automatisches Einparken und Spurhalten, automatisches Abbremsen und Beschleunigen (z.B. durch Stauassistent)
- Level 3:
  - „Hochautomatisiertes Fahren“: Das Fahrzeug fährt selbst, aber der Fahrer muss den Straßenverkehr beobachten und innerhalb einer Vorwarnzeit durch das System in der Lage sein, selbst die Kontrolle zu übernehmen. Entsprechende Fahrzeuge sollen mit Blackbox ausgestattet werden, um die Frage der Haftung im Falle eines Unfalls zu klären. Eine Zulassung von Level-3 Fahrzeugen in Deutschland ist zunächst auf Autobahnen geplant. Ein entsprechendes Gesetz wurde am 12. Mai 2017 durch den Bundesrat bestätigt. Erste Level-3 Fahrzeuge werden ab ca. 2018 - 2020 erwartet.
- Level 4:
  - „Vollautomatisiertes Fahren“, d.h. der Fahrer muss den Straßenverkehr nicht mehr beobachten. Der Einsatz soll auch auf Landstraßen und in der Stadt möglich sein. Das System kann den Fahrer jedoch immer noch auffordern, selbst die Kontrolle zu übernehmen. Eine Umsetzung ist bis ca. 2022 zu erwarten.
- Level 5:
  - „Autonomes Fahren“ bzw. „Fahrerloses Auto“, d.h. es ist kein Fahrer mehr erforderlich. Eine Umsetzung erfolgt frühestens im Jahr 2025.

Um Level 4 und Level 5 zu erreichen, ist es nötig, auf ein zukünftiges Mobilfunksystem zurückzugreifen, welches sehr geringe Latenzzeit (Ziel 1 ms) und gleichzeitig sehr hohe Systemkapazität aufweist.

Die geringe Latenzzeit ist nötig, um auf Gefahrensituationen in Echtzeit reagieren zu können und entsprechende Daten in Echtzeit an die umgebenden Fahrzeuge zu übermitteln (Car-to-Car Kommunikation) [40]. Auch die Car-to-X-Kommunikation, d.h. der Austausch von Daten zwischen Auto und der Umgebung (wie z.B. Ampeln, Straßenbahnen etc.) muss in Echtzeit erfolgen. Hohe Systemkapazität ist nötig, weil ein Auto mit möglicherweise Tausenden umgebenden Autos Datenaustausch betreibt (etwa in einem Stau) [3].

Zukünftig kann in diesem Zusammenhang auch das Thema Daten-Relaying eine zentrale Rolle spielen: Wenn eine (ortsfeste) Basisstation nicht jeden Streckenabschnitt funktechnisch versorgt, so könnten die mobilen Fahrzeuge die Funktion einer Basisstation übernehmen und Signale in bisher unversorgte Gebiete weiterleiten.

Teleoperiertes Fahren ist ein weiteres Forschungsgebiet, welches im Kontext zum automatisierten Fahren steht. Hier besteht die Idee darin, einen Menschen einzusetzen, der das Fahrzeug unter Nutzung eines Mobilfunknetzes „fernsteuert“ bzw. „teleoperiert“. Dies könnte z.B. nötig sein, falls das System temporär überfordert ist oder der Fahrer während der Fahrt nicht mehr in der Lage ist, das Fahrzeug zu steuern. Weiterhin könnte teleoperiertes Fahren auch als Service angeboten werden, beispielsweise für Menschen ohne Führerschein oder mit eingeschränkter Mobilität [3].

Zum Thema der Realisierbarkeit autonomen Fahrens (d.h. Level 5) in näherer Zukunft gibt es durchaus kritische Stimmen, beispielsweise in [41] und [42].

### 3.1.1 PEOPLE UND CARGO MOVER

Das Forschungsgebiet „Autonomes Fahren“ beschäftigt derzeit auch den Systemanbieter ZF Friedrichshafen AG, der einen Kooperationsvertrag mit der e.GO Mobile AG geschlossen hat. Hierbei geht es um die Entwicklung, die Produktion und den Vertrieb eines sogenannten People und Cargo Movers für den Stadtverkehr [43], siehe Abbildung 3.



Abbildung 3: T. Gollewski (lks), Leiter der ZF Vorentwicklung und Prof. Dr. G. Schuh, CEO der e.GO Mobile AG aus [43]; Bild mit freundlicher Genehmigung durch © ZF Friedrichshafen AG

Für das Projekt liefert die ZF Friedrichshafen AG beispielsweise die Antriebslösung, System- und Fahrzeugkomponenten, welche ein autonomes Fahren ermöglichen. Vor allem für die Elektrifizierung des Antriebsstranges ist die ZF als führender Automobilzulieferer bekannt.

Besonders in Ballungsräumen kann man den Verkehr über autonome Elektromobilität sauberer, effizienter, sicherer sowie umweltschonender gestalten. Ein erster Prototyp dieses „e GO Mover“ wurde bereits auf dem Campus der RWTH Aachen vorgestellt.

Als ein ins Fahrzeug integriertes, Cloud-updatefähiges System wird die Supercomputing-Steuerbox „ZF ProAI“ eine essentielle Aufgabe übernehmen. Diese auf künstliche Intelligenz-Algorithmen designte Box, welche auch lernfähig ist, ermöglicht es, mit anderen Fahrzeugen wie auch mit der Umgebung zu kommunizieren und somit auf der Basis einer Schwarmintelligenz Fahrzeugflotten effizienter und sicherer fahren zu lassen. Für die Entwicklung von serientauglichen Fahrzeugen hat die e.GO Mobile AG bereits auf dem Campus der RWTH Aachen eine großteils vernetzte Industrie 4.0-Infrastruktur errichtet. Das Ziel von e.GO Mobilie ist es, dass mittels der ZF schon bald in Städten zulassungstaugliche Testflotten angeboten werden können. Seitens ZF werden weltweit große Potentiale für die Beförderung von Lasten und Personen mittels elektrischen und autonomen Fahrzeugen gesehen.

## 3.2 INDUSTRIE 4.0

Der Begriff „Industrie 4.0“ steht für die vierte industrielle Revolution, die mit dem Aufbau zukünftiger Mobilfunknetze möglich wird. Gemäß [44] gliedern sich die wesentlichen Fortschritte der industriellen Produktion in folgende vier Phasen:

- Stufe 1: Mechanisierung: Mechanischer Webstuhl (1784)
- Stufe 2: Elektrifizierung: Fließband (1870)
- Stufe 3: Automatisierung: Speicherprogrammierbare Steuerung (1969)
- In Zukunft:
  - Stufe 4: Vernetzung: „Industrie 4.0“

„Industrie 4.0“ soll den Weg für eine selbstorganisierte Produktion ebnen, d.h. Maschinen, Anlagen, Produkte und Logistik tauschen Informationen (wie Statusmeldungen) im Sinne einer umfangreichen Maschinen-Maschinen-Kommunikation („massive Machine Type Communication“ = mMTC; Machine-to-Machine auch M2M genannt) aus, um daraus die nächsten Schritte in der Produktions- und Logistikkette einzuleiten. Der Informationsaustausch wird beispielsweise durch moderne Funknetze realisiert, die eine sehr geringe Latenzzeit aufweisen, sodass die Steuerung der intelligenten Fabrik („smart factory“) und das Abarbeiten notwendiger Schritte in Echtzeit erfolgt. Ausgetauschte Informationen sind hierbei z.B. Statusmeldungen und Anweisungen, die auf der Auswertung von Sensordaten oder Systemzuständen beruhen. Gemäß [8] könnten in einer intelligenten Fabrik Millionen bis Milliarden Meldungen ausgetauscht werden. Neben der Maschinen-Maschinen-Kommunikation wird auch die Interaktion zwischen Mensch und Maschine eine zentrale Rolle spielen.

Mit Hilfe von „Industrie 4.0“ wird die Effizienz der Produktion und der Lieferkette gesteigert. Beispielsweise können Standzeiten verringert, Wartungsintervalle von Anlagen individuell angepasst und damit die Zuverlässigkeit der Anlagen gesteigert werden [3].

Ein darüber hinausgehender Ansatz ist, nicht nur die Produktion und die Logistik zu verknüpfen, sondern alle Phasen im Lebenszyklus eines Produktes zu vernetzen, was dann auch beispielsweise die Entwicklung, Nutzung, Wartung und das Recycling einschließt [45]. Damit einher geht auch die Hybridisierung von Produkten, bei welcher die Produktion an Dienstleistungen gekoppelt wird und der Abnehmer des Produkts in die Wertschöpfungskette einbezogen ist [45].

Besonders wichtig zur Realisierung von „Industrie 4.0“ ist ein zuverlässiges Funknetz, während die Datenrate eines Sensors in einem Sensornetz gegenwärtig typischerweise eher gering bis moderat ist. In [3] wird ein Bereich von kbit/s bis Mbit/s angegeben.

### **3.2.1 LERNFABRIK FALLENBRUNNEN IN FRIEDRICHSHAFEN**

Auf dem Technik-Campus „Fallenbrunnen“ der Dualen Hochschule Baden Württemberg (DHBW) in Friedrichshafen wird ebenfalls am Thema Industrie 4.0 geforscht.

Am Campus ist unter dem Träger IWT (Institut für Weiterbildung, Wissens- und Technologietransfer) die Forschungseinrichtung Lernfabrik Fallenbrunnen angesiedelt. Diese forscht in enger Kooperation mit der DHBW Ravensburg Campus Friedrichshafen und industriell orientierten Unternehmen am Thema Industrie 4.0.

Das IWT ist eine gemeinnützige Tochtergesellschaft des Vereins der Förderer und Alumni der DHBW Ravensburg e.V. und der Forschungs- und Innovationszentren gGmbH der Dualen Hochschule Baden-Württemberg. Dabei fungiert das IWT als Partner der DHBW Ravensburg und ergänzt diese in den Bereichen Weiterbildung, Wissens- und Technologietransfer, Forschung und Dienstleistungen.

Im Jahr 2016 wurde dem IWT durch die Zeppelin-Stiftung der Stadt Friedrichshafen die mehrjährige Förderung des Projekts Lernfabrik Fallenbrunnen zugesagt, in dem ein Lern- und Demonstrationszentrum für Produktion und produktionsnahe Anwendungsfelder im Campus Fallenbrunnen aufgebaut und betrieben werden soll. Besonderer Fokus liegt dabei auf Forschung und Wissensvermittlung im Umfeld der Industrie 4.0. Beispiele dafür sind digitale Vernetzung oder die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine.

Im Rahmen des Projekts Lernfabrik Fallenbrunnen werden moderne Methoden und Prozesse in Produktion und Logistik begreifbar und erlebbar gemacht. Auf dieser Basis können dann sowohl Forschungsaktivitäten mit dem Ziel der Veröffentlichung in der Fachwelt, als auch konkrete Aus- und Weiterbildungsmaßnahmen entwickelt werden.

Auf operativer Seite forscht die Lernfabrik einerseits mit akademischen Einrichtungen, andererseits mit branchengleichen Unternehmen aus ganz Deutschland zusammen an innovativen Industrie 4.0 Projekten.

Im akademischen Bereich wird die Lernfabrik vorrangig für Studienarbeiten und Abschlussarbeiten eingesetzt, teilweise werden auch vorlesungsbegleitende Veranstaltungen und Live-Demonstrationen dort angeboten.

Die Unternehmen hingegen nutzen die Forschungseinrichtung zur Vernetzung und zum Informationsaustausch mit anderen Einrichtungen und Unternehmen sowie um eigene Forschungsvorhaben auf einer Demonstrationsplattform umsetzen zu können.

Aufgrund dieser verschiedenen Umgebungsparameter und Anforderungen stellt sich die Lernfabrik im Bereich Produktion mehrgleisig auf und teilt sich aktuell in zwei Bereiche: die Automatisierung und der Handarbeitsbereich. Zur weiteren Erläuterung wird im nächsten Abschnitt eine visionäre Anwendung aus dem Bereich Automatisierung beschrieben, die bereits teilweise umgesetzt wurde.

Im Automatisierungsbereich gibt es Projekte wie zum Beispiel die modulare und individuelle Produktionsumgebung, welche sich je nach den Anforderungen an die Prozesse zusammensetzt. Dabei gibt es diverse so genannte Standardzellen, mit welchen die benötigten Prozesse an das Bandumlaufsystem adaptiert werden. Dieses Verfahren ist auch unter Plug-and-Produce bekannt. Die Kontaktierung erfolgt dabei über eine modulare und erweiterbare Schnittstelle. Das Plug-and-Produce-Verfahren wird in mehreren Schritten nach und nach aufgebaut. Angefangen bei einer einfachen, aber definierten Standardzelle mit Steckerkontaktierung und einer manuellen Stationsbesetzung, soll es am Ende des Automatisierungsprojekts eine selbstfahrende Zelle mit einer automatischen Federkontaktierung und einer produktabhängigen Stationsbesetzung geben, siehe Abbildung 4.

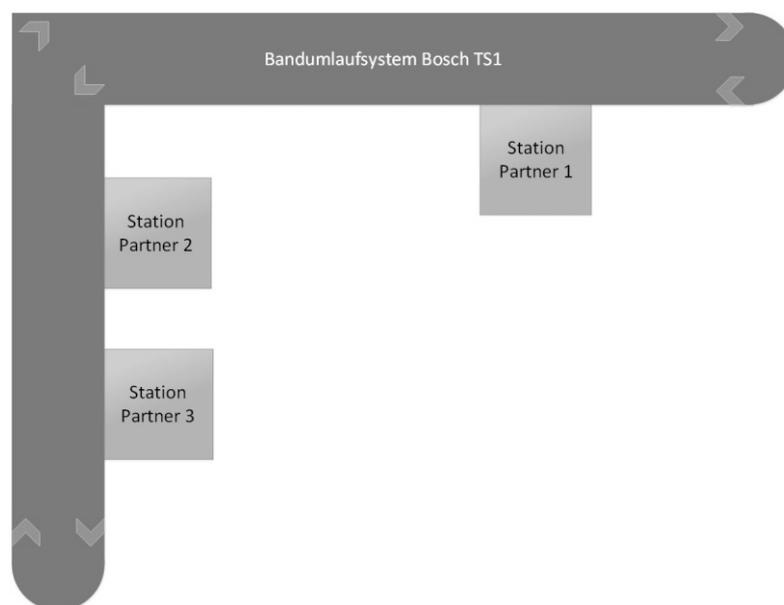
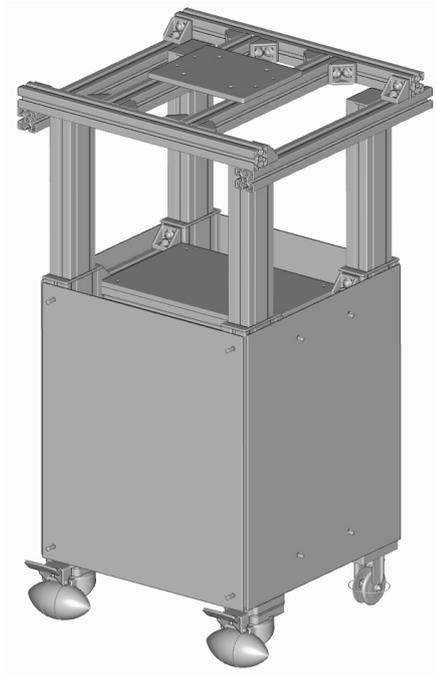


Abbildung 4: Automatisierungsumgebung

Im ersten Anlauf werden die Standardzellen konzipiert, entwickelt und aufgebaut. Der rein mechanische Aufbau der Zelle ist in Abbildung 5 zu sehen. Dabei ist an der oberen Seite deutlich eine Platte erkennbar, durch welche die einzelnen Prozesse mit der Standardzelle fest verbunden werden. Ebenfalls ist in diesem Schritt wichtig, dass die Schnittstelle zum Bandumlaufsystem vorausschauend ausgelegt wird, damit die dafür benötigte Infrastruktur rechtzeitig berücksichtigt werden kann. Aufgrund von diversen Analysen, Planungen und Erfahrungen wird die Schnittstelle mit Signal-, Versorgungs-, Pneumatik- und Kommunikationsblöcken bestückt.

Die Zelle befindet sich in diesem Stadium noch auf Rädern und erfordert eine menschlich-getriebene Positionierung an der jeweiligen Station aus Abbildung 4.



*Abbildung 5: Standardzelle*

Im zweiten Teil des Automatisierungskonzepts wird eine durch Federkontakte bewerkstelligte Kontaktierung der Standardzelle an das Bandumlaufsystem umgesetzt. Hierbei werden die bereits erarbeiteten Überlegungen zu den notwendigen Schnittstellenblöcken realisiert. Parallel dazu wird bereits im Bereich fahrerlose Transportsysteme (FTS) geforscht und dabei Konzepte hinsichtlich Logistik und Konstruktion erstellt. Hierbei ist stets zu berücksichtigen, dass das FTS mechanisch sehr stabil ist und mit einer hohen Genauigkeit und Reproduzierbarkeit platziert werden kann. Zudem muss das System preislich attraktiv und automatisiert steuerbar sein.

Der dritte Schritt beinhaltet die Implementierung der konzeptionellen Erkenntnisse bezüglich des FTS aus Phase zwei. Dabei werden nun die beiden Systeme vereint, indem die Standardzelle mechanisch mit dem FTS verbunden wird. Bei der Zelle entfällt sodann der untere Bereich mit den Rollen und wird durch das fahrerlose Transportsystem ersetzt. Dabei ist darauf zu achten, dass die Maße des Prozessaufbaus gleichbleiben und sich die Position der Kontaktierung nicht verändert, um Inkompatibilität zu vermeiden.

In der letzten Phase müssen nun die Forschungs- und Entwicklungsergebnisse der Schritte eins bis drei zusammengefügt werden: die Standardzelle mit dem fahrerlosen Transportsystem als Antrieb, das durch Federkontakte geführte Kontaktierungskonzept und das automatische Bestellsystem. Das online-Bestellsystem für diese Anwendung ist bereits verfügbar, da es aus einer vergangenen Studienarbeit entstanden ist.

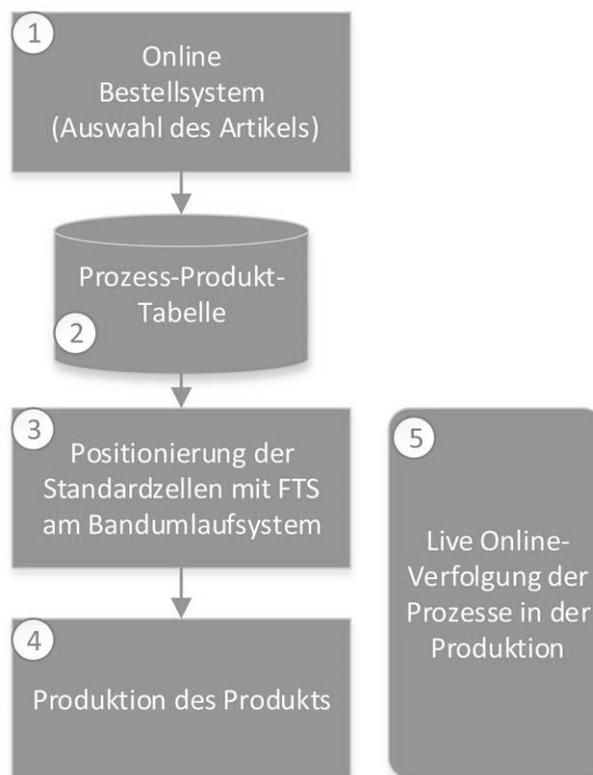


Abbildung 6: Bestellablauf Produktion

Das Szenario wird dann wie folgt ablaufen. Der Kunde wählt zuerst online, über den Webbrowser oder mit dem Smartphone, einen Artikel aus und bestellt diesen (Abbildung 6, ①). In der Datenbank ist dabei hinterlegt, welche Prozesse zur Herstellung des ausgewählten Produkts an welcher Stelle des Bandumlaufsystems in der Produktion benötigt werden. (In Abbildung 6 ist diese Datenbank mit ② gekennzeichnet.) Mit diesen Informationen kann sich anschließend das Produktionssystem automatisch positionieren und das gewünschte Produkt fertigen (siehe Abbildung 6 Punkt ③ und ④).

Ab der Bestellung, bis hin zum gefertigten Produkt hat der Besteller hierbei die Möglichkeit, die einzelnen Schritte der Fertigung live online nachzuverfolgen (Abbildung 6 ⑤).

Alleine aus diesem Beispielprojekt wird ersichtlich, dass Kommunikationstechnologien auch bei Industrie 4.0 eine tragende Rolle übernehmen. Dabei kann die 5G-Technologie beispielsweise bei der online-Bestellung und der Live online-Nachverfolgung des Produktionsgeschehens Einsatz finden. Außerdem können fahrerlose Transportsysteme mit dieser Technologie ausgestattet und dadurch (fern-)gesteuert werden.

### **3.3 VERNETZUNG UND SYSTEMSTEUERUNG IN VERKEHRSSYSTEMEN**

Das Prinzip einer „Smart Factory“, welches unter dem Stichwort „Industrie 4.0“ beschrieben wurde, lässt sich auch auf große Systeme erweitern, beispielsweise auf das System Bahn. In diesem Zusammenhang wird auch von „Bahn 4.0“ gesprochen [46].

Die Veröffentlichung [3] beschreibt beispielsweise die Echtzeit-Interaktion von Schienenfahrzeugen mit Infrastruktur wie Weichen und Signalanlagen unter Einsatz von Maschinen-Maschinen-Kommunikation. Diese Vernetzung im System Bahn kann gemäß [47] zu einem Zuwachs an Kapazität sowie zu verbesserter Zuverlässigkeit im Betrieb und in der Pünktlichkeit führen, aber auch zu Energieeinsparungen in der Größenordnung von bis zu 25%. Am Ende könnte auch die Möglichkeit selbstfahrender Züge stehen (selbstfahrende U-Bahnen sind bereits in Nürnberg und Paris im Einsatz).

In Anlehnung an den Begriff „Industrie 4.0“ hat die Deutsche Bahn sechs Initiativen ins Leben gerufen, welche im Zusammenhang mit der Digitalisierungsstrategie der Deutschen Bahn stehen:

- Mobilität 4.0
  - Hierunter fällt beispielsweise die Entwicklung von Apps und Lösungen, um dem Kunden das Reisen so angenehm wie möglich zu machen: Dies reicht vom digitalen Fahrschein bis hin zur Versorgung mit Informationen zu Verkehr, Mobilitätsangeboten etc.
- Logistik 4.0
  - Sensorsysteme im Zug ermitteln beispielsweise den Zustand oder den Abnutzungsgrad technischer Systeme, übermitteln diese Informationen in Echtzeit via „Train2X-Kommunikation“ an Werkstätten und veranlassen eine Wartung, bevor es zum Ausfall kommt.

- Infrastruktur 4.0:
  - Hier kommunizieren beispielsweise Bahnhofsanlagen wie Aufzüge und Rolltreppen mit einer Überwachungsstelle, um Störungen frühzeitig vorherzusagen oder zu erkennen [48].
- Produktion 4.0:
  - Hier geht es um die Optimierung von Produktionsabläufen im System Bahn.
- Arbeitswelten 4.0:
  - Diese Initiative untersucht die Auswirkungen der Digitalisierung auf das Arbeitsumfeld der DB-Mitarbeiter und die zukünftigen beruflichen Anforderungen.
- IT 4.0
  - Hier geht es u.a. um die Erfassung, Speicherung und Analyse großer Datenmengen („big data“) sowie das Ableiten von Handlungsschritten [49].

### 3.4 INTERNET OF THINGS

Das Internet of Things (IoT) ist ein Netzwerk, in welchem intelligente Gegenstände („smart objects“) via Maschinen-Maschinen-Kommunikation kommunizieren und gleichzeitig mit dem Internet verbunden sind. Die Objekte sind hierbei beispielsweise fix installierte oder mobile (Alltags-) Gegenstände, welche Zustandsinformationen (z.B. „Rolladen hochgefahren“, „Kaffee fertig“, „Druckpatrone leer“) austauschen und diese im Internet zur Verfügung stellen. Der Mensch kann dann durch Abruf dieser Informationen eine Aktion ableiten, oder das Objekt führt selbst eine geeignete Aktion durch (z.B. automatische Bestellung einer neuen Druckerpatrone oder Anweisung an ein anderes vernetztes Objekt, eine gewisse Aktion durchzuführen). Im IoT können folglich autonom agierende Objekte eingesetzt werden.

Die Anbindung mobiler Objekte an das Netz erfolgt funkbasiert, so dass diese mit Batterie, Prozessor und zugehöriger Elektronik (Sende- und Empfangstechnik) ausgestattet werden müssen. Hierbei gilt es, den Energiebedarf so gering wie möglich zu halten sowie Größe und Gewicht zu minimieren.

Eine Auswahl möglicher Anwendungen ist nachfolgend beschrieben:

- Smart Home (vernetzte Objekte im Haus)
  - Hier soll ein Zugewinn an Lebensqualität und ein schonender Umgang mit Ressourcen (wie z.B. Energie) mittels intelligenter Gebäudetechnik erreicht werden
- Smart City
  - Hier geht es beispielsweise um intelligente Sicherheitskonzepte, Verkehrssteuerung und optimierten Ressourcen-Einsatz [50]

- Wearables
  - Hierunter versteht man vernetzte Endgeräte, die am Körper getragen werden (z.B. Fitnessbänder) oder in die Kleidung integriert werden. Diese Objekte sind z.B. mit Sensoren ausgestattet, um Zustandsinformationen zu sammeln und auszutauschen.
- Anwendungen in der Industrie, z.B. vernetzte Produktion (Industrie 4.0)

In [51] wird prognostiziert, dass im Jahr 2020 mehr als 100 Milliarden Objekte vernetzt sind.

### 3.5 INTELLIGENTE ENERGIENETZE

Zur Steuerung des Energienetzes ist es essentiell, die Einspeise- und Verbrauchswerte im Netz zu kennen und zu prognostizieren. Bei Nutzung erneuerbarer Energien wie Wind und Photovoltaik kommt es jedoch zu lokalen, wetterbedingten Schwankungen der Energieerzeugung, sodass Energie aus Kraftwerken mit anderen Energieträgern hinzugenommen oder abgekoppelt werden muss. Zur intelligenten Steuerung des Energienetzes (beispielsweise dynamisches Befüllen lokaler Energiespeicher bei günstigen Wetterverhältnissen [8]) ist es somit wichtig, die Zustandswerte aller Energieproduzenten (darunter fallen auch viele Haushalte) und Energieabnehmer zu kennen. Um dieses Ziel zu erreichen, können vernetzte, intelligente Messsysteme („smart meter“) zum Einsatz kommen, die eine Echtzeit-Vernetzung zwischen Erzeuger, Netzbetreiber und Verbraucher realisieren [17].

Schon heute stellen die erneuerbaren Energien den größten Anteil am deutschen Energiemix (Bruttostromerzeugung) dar. Da der Anteil bis zum Jahr 2050 von derzeit ca. 29 % auf 80 % steigen soll, wird die Präsenz eines intelligenten Energienetzes eine immer wichtigere Rolle spielen. Aktuelle Fakten zum Ausbau der Photovoltaik in Deutschland sind in [52] zu finden.

### 3.6 EHEALTH

Zukünftige Anwendungen werden u.a. in folgenden Bereichen gesehen:

- Telemedizin: Hier geht es um das Hinzuziehen eines Arztes zum Zwecke der Diagnostik oder Therapie trotz Präsenz einer räumlichen oder zeitlichen Distanz. Mit Hilfe zukünftiger Mobilfunknetze soll Telemedizin in Echtzeit möglich sein. Folgende Szenarien könnten von Telemedizin profitieren:
  - Telemedizin im Rettungswagen:
    - Hier kann beispielsweise ein spezialisierter Facharzt hinzugeschaltet werden, um bestimmte Vorgehensweisen einzuleiten [53]

- Telemedizin als Ersatz für persönliche Vorstellung beim Arzt: Ein solches Vorgehen wird nur in bestimmten Fällen sinnvoll sein, beispielsweise, wenn
  - routinemäßige Untersuchungen auch vom Patienten selbst durchführbar sind und es nur um die Übermittlung der Daten an den Arzt geht [53]
  - es in entlegenen Gebieten keine oder nur eine unzureichende ärztliche Versorgung gibt.

Weiterhin ist es denkbar, robotergestützte Operationen ferngesteuert durch einen spezialisierten Facharzt durchführen zu lassen. Hierbei ist es wesentlich, dass das Mobilfunknetz hochzuverlässig arbeitet und Echtzeitkommunikation stattfindet, damit die Bewegungen des Roboters beispielsweise bei einer Fehlfunktion innerhalb kürzester Zeit gestoppt werden können [3].

### **3.7 WEITERE ANWENDUNGEN**

Weitere Anwendungen sind im Bereich Virtual Reality bzw. Augmented Reality denkbar. Hierbei werden hochauflösende Inhalte in eine Datenbrille übertragen. Bei Virtual Reality taucht der Nutzer in eine virtuelle Welt ein, während es bei Augmented Reality um das Einblenden von Zusatzinformationen in eine Brille geht. Weitere Details findet man beispielsweise in [17].

Auch die Echtzeit-Übertragung von (Fernseh-) Inhalten im Ultra HD Format auf mobile Endgeräte ist eine weitere, mögliche Anwendung von 5G-Technologie [54].

## 4 SCHLUSSBETRACHTUNGEN

Wie im vorherigen Kapitel vorgestellt, werden mit der Einführung von 5G bzw. zukünftiger Mobilfunkstandards neue Anwendungen möglich, welche darauf abzielen, Ressourcen zu schonen, Effizienzen zu steigern (Stichwort Industrie 4.0), den Menschen zu entlasten (Stichwort autonomes Fahren) und die Lebensqualität zu verbessern. Der Aufbau entsprechender Infrastruktur und das Anstreben einer flächendeckenden Versorgung stellt eine große Herausforderung dar, und es bleibt zu hoffen, dass die resultierenden Tarife für den Endkunden bezahlbar bleiben.

Nachdem sich der Beitrag bisher auf die technologischen Möglichkeiten und Chancen konzentriert hat, erfolgt noch abschließend eine kurze Betrachtung der Risiken:

In einer vollständig vernetzten Gesellschaft, deren Kommunikation, Mobilität und industrielle Produktion von der Präsenz funktionierender Mobilfunknetze abhängt, kann eine Störung des Netzes (egal ob fehlerhaft aufgetreten oder beispielsweise gezielt herbeigeführt) negative oder sogar gefährliche Folgen entfalten. Daher gilt es, kluge Konzepte einzusetzen, um ein solches Szenario zu verhindern bzw. die Folgen abzumildern. Einen wichtigen Ansatz könnten hierbei resiliente Netze mit Funkzugang darstellen, die sich durch Widerstandsfähigkeit, Regenerationsfähigkeit und Lernfähigkeit auszeichnen. Details werden im VDE Positionspapier [55] vom März 2017 thematisiert.

Nach Meinung der Autoren sollte bei der Vernetzung Sorge getragen werden, genügend Backup-Systeme und Rückfallebenen vorzuhalten, um auch im Falle einer Netzstörung die öffentliche Ordnung, die industrielle Produktion und die individuelle Mobilität zu gewährleisten. Konkretes Beispiel: Auch in Zukunft sollte z.B. die Möglichkeit bestehen, Fahrzeuge manuell zu steuern, damit Lieferketten und folglich die Nahrungsmittelversorgung gewährleistet bleibt.

Weiterhin wird es Bereiche der Infrastruktur oder auch (z.B. öffentliche) Einrichtungen geben, die aus guten Gründen nicht nach außen vernetzt werden, beispielsweise Kraftwerke. Stattdessen könnten nicht-öffentliche Netze aufgebaut werden.

## QUELLENANGABEN

- [1] Radiocommunication Study Groups; „Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)“; Draft new Report ITU-R M.[IMT-2020.TECH PERF REQ] ; 23 Feb 2017;  
<https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [2] Deubelius A. et. al.; „Glasfaserausbau und 5G Zusammenhänge und Synergien“; Projektgruppe „Konvergente Netze als Infrastruktur für die Gigabit-Gesellschaft“; Fokusgruppe „Aufbruch in die Gigabit-Gesellschaft“; Plattform „Digitale Netze und Mobilität“, Herausgeber: Digital-Gipfel; Juni 2017;  
[http://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2017/06/20170608\\_PF1-Glasfaserausbau-und-5G.pdf](http://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2017/06/20170608_PF1-Glasfaserausbau-und-5G.pdf) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [3] Reus O. et. al.; „5G – Schlüsseltechnologie für die vernetzte Gesellschaft“; Nationaler IT Gipfel Berlin; 2015;  
[http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/it-gipfel-fg-5g-vision.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/Digitales/it-gipfel-fg-5g-vision.pdf?__blob=publicationFile) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [4] „5G: Mobilfunk Standard der 5. Generation“; Internetartikel vom 25.9.2016;  
<https://www.fts-hennig.de/ratgeber/5g-mobiles-internet/#netz-standard> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [5] Krüger A., Hahn S.-H.; „Wir bauen de facto ein neues Netz“; Internetartikel vom 28.2.2017; <http://www.heute.de/mobile-world-congress-telekom-chef-hoettges-zum-neuen-mobilfunkstandard-5g-46652022.html> [Zugriff am 28.02.2017]
- [6] “5G: A Technology Vision”; Huawei White paper; 2013;  
[www.huawei.com/ilink/en/download/HW\\_314849](http://www.huawei.com/ilink/en/download/HW_314849) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [7] „VDE fordert mehr Tempo bei 5G“; Internetartikel vom 14.3.2016;  
<https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/vde-fordert-tempo-bei-5g> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [8] „5G - Mobilfunk- und Netztechnologie der Zukunft“, Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur“; <http://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/5g-aktivitaeten-in-deutschland.html> [Zugriff am 18.7.2017]
- [9] „Telekom gründet 5G:haus als Entwicklungslabor“; Internetartikel vom 25.3.2015;  
<http://www.telecom-handel.de/consumer-communications/5g/telekom-gruendet-5g-haus-entwicklungslabor-917131.html> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [10] [http://www.volkswagenag.com/de/news/2016/9/5G\\_Automotive\\_Association.html](http://www.volkswagenag.com/de/news/2016/9/5G_Automotive_Association.html) [letzter Zugriff am 5.10.2017]

- [11] „5G Rahmenbedingungen“; Nationaler IT-Gipfel; Fokusgruppe 5G Plattform „Digitale Netze und Mobilität“; 27.10.2015; [http://webspecial.intelligente-welt.de/app/uploads/2015/11/151105 PF1 007 FG3 Rahmenbedingungen 5G PDF -Vorlage.pdf](http://webspecial.intelligente-welt.de/app/uploads/2015/11/151105_PF1_007_FG3_Rahmenbedingungen_5G_PDF-Vorlage.pdf) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [12] Becker L.; „Apple bereitet sich auf 5G-Mobilfunk vor“; Internetartikel vom 24.5.2017; <https://www.heise.de/mac-and-i/meldung/Apple-bereitet-sich-auf-5G-Mobilfunk-vor-3725233.html> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [13] „5G Spektrumbedarf und –nutzung. Technologische und regulatorische Anforderungen“; Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G Plattform „Digitale Netze und Mobilität“; 2016; [http://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2016/11/PF1\\_5G\\_Spektrumbedarf\\_web\\_20161111.pdf](http://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2016/11/PF1_5G_Spektrumbedarf_web_20161111.pdf) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [14] „5G - New Waveform Signal Analysis“; Anritsu Technical Review No.24; September 2016; <http://dl.cdn-anritsu.com/en-en/about-anritsu/r-d/technical/e-24/24-04-5g.pdf> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [15] Kimery J.; „5G in 5 Abschnitten: Über die Zukunft des Mobilfunkstandards“ (2015); Funkschau; [http://ftp.ni.com/pub/branches/germany/2015/artikel/10-oktober/07\\_5G\\_in\\_5\\_Abschnitten\\_James\\_kimery\\_funkschau\\_19\\_2015.pdf](http://ftp.ni.com/pub/branches/germany/2015/artikel/10-oktober/07_5G_in_5_Abschnitten_James_kimery_funkschau_19_2015.pdf) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [16] „5G radio access“; Ericsson White paper; Uen 284 23-3204 Rev C; April 2016; <https://www.ericsson.com/assets/local/publications/white-papers/wp-5g.pdf> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [17] „5G-Strategie für Deutschland“; Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur; September 2017; [https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/098-dobrindt-5g-strategie.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/098-dobrindt-5g-strategie.pdf?__blob=publicationFile) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [18] „Ericsson and Verizon 5G field trial hits multi-Gbps speeds“; Ericsson Pressemitteilung; Internetartikel vom 22.2.2016; <https://www.ericsson.com/en/press-releases/2016/2/ericsson-and-verizon-5g-field-trial-hits-multi-gbps-speeds> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [19] Kalenda F.; „5G-Test: Ericsson vernetzt fahrenden Lkw mit 7 GBit/s“; Internetartikel vom 30.6.2016; [http://www.zdnet.de/88273499/5g-test-ericsson-vernetzt-fahrenden-lkw-mit-7-gbits/?inf\\_by=59672571681db8be728b4929](http://www.zdnet.de/88273499/5g-test-ericsson-vernetzt-fahrenden-lkw-mit-7-gbits/?inf_by=59672571681db8be728b4929) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [20] Björnson E., Larsson E. G., Marzetta T. L.; „Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question“ (Mar. 2015); IEEE Commun. Mag.

- [21] Larsson E.G. et al; "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems" (Feb. 2014); IEEE Commun. Mag.; vol. 52; no. 2; pp. 186-195
- [22] Rusek F. et. al; "Scaling up MIMO: Opportunities and Challenges with Very Large Arrays" (Jan. 2013); IEEE Signal Proces. Mag.; vol. 30; no. 1; pp. 40-46
- [23] Yang S., Hanzo L.; "Fifty Years of MIMO Detection: The Road to Large-Scale MIMOs" (Sep. 2015); IEEE Communications Surveys & Tutorials; Vol.17; no. 4; pp. 1941 – 1988
- [24] Lossau N.; „Einzelnes Photon macht Datenübertragung abhörsicher“; Internetartikel vom 14.10.2015; <https://www.welt.de/wissenschaft/article147579327/Einzelnes-Photon-macht-Datenuebertragung-abhoersicher.html> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [25] Taschwer K.; „Durchbruch bei der Quantenkommunikation“; Internetartikel vom 16.6.2017; <http://derstandard.at/2000059364211/Durchbruch-bei-der-Quantenkommunikation> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [26] „Das abhörsichere Quanten-Internet kommt“; Internetartikel vom 8.6.2017; <http://www.heute.de/bundesregierung-legt-forschungsprogramm-fuer-abhoersichere-quanten-internet-auf-47326454.html> [Zugriff am 31.8.2017]
- [27] <https://5g-ppp.eu/5g-norma/> ; [Zugriff am 24.7.2017]
- [28] Wanner W.; „Cloud- versus Edge-Computing“; Internetartikel vom 6.6.2016; <http://www.funke.de/telekommunikation/artikel/130928/> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [29] <http://www.oeffentliche-it.de/-/5g> ; Internetartikel; [Zugriff am 24.7.2017]
- [30] Hu Y. et al.; "Mobile Edge Computing - A key technology towards 5G" (Sep. 2015); ETSI White Paper No. 11; ISBN No. 979-10-92620-08-5
- [31] Tomás J. P.; "Understanding network slicing, a key technology for 5G"; Internetartikel vom 6.1.2017; <http://www.rcrwireless.com/20170106/internet-of-things/network-slicing-5g-tag23-tag99> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [32] „Europa sichert die Netzneutralität: Das bedeuten die Regeln im Alltag“; Internetartikel vom 2.9.2016; <https://netzpolitik.org/2016/europa-sichert-die-netzneutralitaet-das-bedeuten-die-regeln-im-alltag/> [Zugriff am 31.8.2017]
- [33] „Bedeutung der Mikroelektronik für Industrie 4.0“; Positionspapier aus der AG Silicon Germany; <https://www.infineon.com/dgdl/mikroelektronik-industrie40-positionspapier-silicon-germany.pdf?fileId=5546d4614c330b50014c9897795d0170> [Zugriff am 19.7.2017]
- [34] Pierre H.; „5G-Mobilfunk bringt neue Herausforderungen für die IT-Sicherheit“; Internetartikel vom Februar 2017; <http://www.searchnetworking.de/meinung/5G-Mobilfunk-bringt-neue-Herausforderungen-fuer-die-IT-Sicherheit> [Zugriff am 24.7.2017]

- [35] "5G Security – Making the Right Choice to Match your Needs"; SIMalliance 5GWG technical white paper; 2016; <http://simalliance.org/wp-content/uploads/2016/02/5G-Security-%E2%80%93-Making-the-Right-Choice-to-Match-your-Needs.pdf> [Zugriff am 24.7.2017]
- [36] „Leistungsverstärker für den Mobilfunk der 5. Generation“; Internetseite des Fraunhofer Instituts für Angewandte Festkörperphysik; <https://www.iaf.fraunhofer.de/de/leistungsangebot/angebot/leistungsverstaerker-fuer-den-mobilfunk.html> [Zugriff am 19.7.2017]
- [37] Dammann M.; „Gan-Basierte Transistoren für die Mobilkommunikation“; Auszug aus dem Jahresbericht 2016 des Fraunhofer Instituts für Angewandte Festkörperphysik; [https://www.iaf.fraunhofer.de/content/dam/iaf/documents/ausz%C3%BCge-jahresberichte/16\\_gf2\\_1\\_gan-transistors.pdf](https://www.iaf.fraunhofer.de/content/dam/iaf/documents/ausz%C3%BCge-jahresberichte/16_gf2_1_gan-transistors.pdf) [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [38] „Energieeffizienz nicht länger Nebensache“; Internetartikel vom 26.4.2017; <http://www.elektroniknet.de/design-elektronik/industrial-internet-industrie-4/energieeffizienz-nicht-laenger-nebensache-141077.html> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [39] „Erneuerbare Energien“; Dossier Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/erneuerbare-energien.html> [Zugriff am 19.7.2017]
- [40] Dahlmann D.; „Die fünf Level des Autonomen Fahrens“; Internetartikel vom Mai 2017 <http://www.dondahlmann.de/?p=24974> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [41] Haist T.; „Autonomes Fahren: Eine kritische Beurteilung der technischen Realisierbarkeit“; Universität Stuttgart; Institut für Technische Optik; Artikel vom 9.9.2016; <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/8881/1/TechnischeProblemeAutonomesFahren.pdf> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [42] „Porsche-Chef bezeichnet selbstfahrende Autos als "Hype"; Internetartikel vom 13.9.2015; <http://www.spiegel.de/auto/aktuell/porsche-chef-matthias-mueller-bezeichnet-autonomes-fahren-als-hype-a-1052688.html> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [43] „Innovativer People und Cargo Mover für den Stadtverkehr der Zukunft“; Internetartikel vom 19.05.2017; <http://www.tagesspiegel.de/advertorials/ots/zf-friedrichshafen-ag-innovativer-people-und-cargo-mover-fuer-den-stadtverkehr-der-zukunft/19826622.html> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [44] <https://www.euromicron.de/kompetenzen/industrie-4-0> ; Internetseite [Zugriff am 19.7.2017]

- [45] „Was ist Industrie 4.0?“; Internetartikel;  
<http://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html;jsessionid=D7ED4118DED525F176F382A8F939369D>  
 [Zugriff am 19.7.2017]
- [46] Fitzek F. et. al.; „5G ermöglicht Bahn 4.0“ (Jan+Feb. 2016); Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), NR 1+2; [http://5glab.de/wp-content/uploads/10\\_14\\_Stoll\\_ua.pdf](http://5glab.de/wp-content/uploads/10_14_Stoll_ua.pdf)  
 [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [47] Hill J.; „Bei der deutschen Bahn rollt die Digitalisierung bereits“; Internetartikel vom 14.1.2016; <https://www.computerwoche.de/a/bei-der-deutschen-bahn-rollt-die-digitalisierung-bereits,3217918> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [48] Sawall A.; „Digitalisierung bei der Bahn: DB Navigator will Reisende bis zum Sitzplatz leiten“; Internetartikel vom 5.6.2015; <https://www.golem.de/news/digitalisierung-bei-der-bahn-db-navigator-will-reisende-bis-zum-sitzplatz-leiten-1506-114490.html>  
 [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [49] „Die großen Initiativen“; Interartikel;  
[https://www.deutschebahn.com/file/de/11877836/lkWedbWmwd9W7Y-UenbcsIN8ZXQ/9367578/data/altarfalz\\_digitalisierung\\_mobil\\_062015.pdf](https://www.deutschebahn.com/file/de/11877836/lkWedbWmwd9W7Y-UenbcsIN8ZXQ/9367578/data/altarfalz_digitalisierung_mobil_062015.pdf)  
 [Zugriff am 24.7.2017]
- [50] „IoT applications spanning across industries “; Internetartikel vom 28.4.2017;  
<https://www.ibm.com/blogs/internet-of-things/iot-applications-industries/>  
 [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [51] <http://www.lte-anbieter.info/5g/> [Zugriff am 1.7.2017]
- [52] Wirth H.; „Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland“; Fraunhofer ISE, Fassung vom 26.3.2017;  
<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [53] Schwerz G.; „5G City: Wie Telemedizin Leben retten kann“; Internetartikel vom 16.11.2016; <https://www.vodafone.de/featured/digital-life/5g-city-wie-telemedizin-leben-retten-kann/> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [54] „5G TV Could Become Rival to Cable, Satellite and IPTV“; Internetartikel vom 21.2.2017;  
<http://www.newenglandone.com/news/technology/broadcast-engineering/5g-tv-could-become-rival-to-cable-satellite-and-iptv.html> [letzter Zugriff am 5.10.2017]
- [55] „Resiliente Netze mit Funkzugang“; VDE Positionspapier; März 2017;  
[http://industrialradio.de/Attachments/VDE\\_PP\\_Resiliente\\_Funksysteme\\_RZ\\_Web.pdf](http://industrialradio.de/Attachments/VDE_PP_Resiliente_Funksysteme_RZ_Web.pdf)  
 [letzter Zugriff am 5.10.2017]





## **Herausgeber**

Prof. Dr. Heinz-Leo Dudek  
Prorektor und Dekan der Fakultät für Technik

## **Duale Hochschule Baden-Württemberg Ravensburg**

Baden-Wuerttemberg Cooperative State University  
Marienplatz 2  
88212 Ravensburg

ISBN 978-3-945557-03-7

ISSN 2199-238X

DOI 10.12903/DHBW\_RV\_FN\_01\_2017\_TIMMERMANN\_LEHMANN\_DALM