

Entwicklung der funkbasierten Digitalisierung in der Industrie, Energiewirtschaft und Landwirtschaft und spezifische Frequenzbedarfe

Autoren:
Matthias Franken
Matthias Wissner
Bernd Sörries

Bad Honnef, Dezember 2019

Impressum

WIK Wissenschaftliches Institut für
Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik.org
www.wik.org

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin und Direktorin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor Abteilungsleiter Post und Logistik	Alex Kalevi Dieke
Direktor Abteilungsleiter Netze und Kosten	Dr. Thomas Plückebaum
Direktor Abteilungsleiter Regulierung und Wettbewerb	Dr. Bernd Sörries
Leiter der Verwaltung	Karl-Hubert Strüver
Vorsitzende des Aufsichtsrates	Dr. Daniela Brönstrup
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder. WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.

ISSN 1865-8997

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Summary	V
1 Einleitung	1
2 Leistungspotentiale von 5G	3
3 Industrie	5
3.1 Ausgangslage	5
3.2 Nachfrage	7
3.2.1 Industrierobotik	9
3.2.2 Augmented Reality	10
3.2.3 Fahrerlose Transportsysteme	11
3.2.4 Vorausschauende Wartung	13
3.3 Technische Entwicklungen	14
3.4 Zwischenfazit Industrie	16
4 Energiewirtschaft	18
4.1 Ausgangslage	18
4.2 Nachfrage	21
4.2.1 Realisierung einer dezentralen, vertrauenswürdigen Plug-&-Play-Infrastruktur	21
4.2.2 Ermöglichung vorausschauender Wartung aus der Luft	23
4.2.3 Ausfallsicherheit und Hochverfügbarkeit durch steuerbare Erzeuger und Verbraucher (DDR)	24
4.2.4 Aufbau lokaler 5G-Netze in Umspannwerken	25
4.2.5 Künstliche Intelligenz	25
4.3 Technische Entwicklungen	27
4.4 Zwischenfazit Energiewirtschaft	29
5 Landwirtschaft	30
5.1 Ausgangslage	30
5.2 Nachfrage	31
5.2.1 Unkrautbekämpfung	32
5.2.2 Überwachung	33
5.2.3 Ernte	34
5.2.4 Tierhaltung	34

5.3 Technische Entwicklungen	35
5.4 Zwischenfazit Landwirtschaft	36
6 Geschäfts- und Betreibermodelle	37
7 Frequenzbedarfe und regulatorische Implikationen	40
8 Fazit	41
Literatur	43

Abbildungen

Abbildung 1: Leistungspotenziale von 5G	3
Abbildung 2: 5G-Anwendungsszenarien	4
Abbildung 3: Unternehmen die planen, 5G einzusetzen – nach Ländern	6
Abbildung 4: Anwendungsfälle Industrie nach Dienste- und Anwendungskategorien	9
Abbildung 5: Überblick Anwendungsbeispiele	17
Abbildung 6: Übersicht der Einsatzbereiche für die Digitalisierung der Energiewende	20
Abbildung 7: Rolle der EVU im 5G-Markt	21
Abbildung 8: Lokales Energienetz	23
Abbildung 9: Potenzielle Einsatzstellen von KI in der Energiewirtschaft	25
Abbildung 10: 5G-Architektur für die Energiewirtschaft	28
Abbildung 11: Landwirte und zu ernährende Bevölkerung.	30
Abbildung 12: „Digital Farming“	32

Tabellen

Tabelle 1: Anwendungskategorien im Bereich der industriellen Fertigung mit 5G	8
Tabelle 2: Erfüllung von Industrieranforderungen über Network-Slicing	15

Zusammenfassung

Der neue Mobilfunkstandard 5G bietet durch hohe Bandbreiten, kurze Latenzzeiten und eine hohe Verlässlichkeit neue Möglichkeiten beim Angebot von spezifischen Telekommunikationsdiensten, die von Massenmarktanwendungen abweichen. Im Juni 2019 wurden 300 MHz im 3,6 GHz-Band für die bundesweite Nutzung erfolgreich versteigert. Angesichts einer Nachfrage nach lokalen Frequenznutzungen können entsprechende Frequenzen im Bereich von 3,7 GHz bis 3,8 GHz bei der Bundesnetzagentur beantragt werden. Damit sind auf der frequenzregulatorischen Seite wesentlichen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Einführung von 5G gemacht. Der Diskussionsbeitrag zeigt für die Sektoren Industrie, Energiewirtschaft und Landwirtschaft, welche funkbasierten Anwendungen vor dem Hintergrund der technischen Möglichkeiten von 5G diskutiert werden:

In der Industrie und gerade im Zusammenhang mit dem Aufbau von privaten, lokalen 5G-Campus-Netzen bestehen zahlreiche Anwendungsfelder mit Bedarf an 5G-Konnektivität. Hier sind etwa Fertigungs- und Prozessautomatisierung, Mensch-Maschine-Schnittstelle, Logistik und Lagerhaltung und Überwachung und Instandhaltung zu nennen. Die Entwicklung und Erprobung ist angesichts des noch nicht vollständig vorliegenden Standards noch in einem frühen Stadium. Zurzeit beschränken sich die Pilotprojekte in erster Linie auf große Industrieunternehmen oder wissenschaftliche Einrichtungen, die Testlabore implementiert haben. Für den Erfolg von 5G in der Industrie wird es darauf ankommen, dass sich ein 5G-Ecosystem entwickelt. Ebenso wird es essentiell sein, dass die Kosten von Endgeräten und 5G-Konnektivität niedrig ausfallen.

Die Energiewirtschaft ist aufgrund ihres geografisch weiträumigen Anwendungsgebietes weniger Treiber als vielmehr Nutzer der 5G-Technologie, zumal eine flächendeckende Versorgung mit 5G im Bereich 3,6 GHz wirtschaftlich kaum darstellbar ist und 5G sich im 700-MHz-Band nur hinsichtlich latenzkritischer Dienste von LTE abheben kann. Im Kontext von 5G wird deshalb die lokale Nutzung z. B. in Umspannwerken diskutiert.

Perspektivisch kann die 5G-Systemarchitektur eine Dezentralität des Energiesystems dahingehend unterstützen, dass zeitkritische Prozesse durch Edge-Cloud-Computing im Zugangsnetz verbleiben und damit nicht das vollständige Telekommunikationsnetz durchlaufen müssen. Der Nutzung von 5G ist aktuell die Frage vorgelagert, welche Frequenzen in besonderer Weise geeignet sind, die spezifischen Anforderungen in Verteilnetzen oder beim Messstellenbetrieb zu erfüllen. Von der Beantwortung dieser Frage hängt maßgeblich auch die Nutzung von 5G ab.

Im Bereich der Landwirtschaft stehen konkrete Projekte für Anwendungen mit 5G ebenfalls noch vor der Umsetzung. Eine tatsächliche Notwendigkeit zum Einsatz besteht zum Beispiel im Bereich selbstfahrender und sich koordinierender Fahrzeuge. Andere Anwendungen, auch in Verbindung mit KI, können durch 5G verbessert werden, benötigen den neuen Standard allerdings nicht als Grundvoraussetzung. Eine flächende-

ckende Abdeckung mit 4G wäre hier bereits ein wichtiger erster Schritt. Es zeichnet sich zusammenfassend ab, dass in einzelnen Sektoren relevante Stakeholder massiv an einem 5G-Ecosystem arbeiten. Dieses Ecosystem hängt von vielen Faktoren ab, so z. B. einer aus Sicht der Anwender erfolgreichen Standardisierung, der Verfügbarkeit von kostengünstigen Endgeräten sowie einer kostengünstigen 5G-Konnektivität. Wie diese Parameter zusammenspielen, werden die nächsten drei bis vier Jahre zeigen. Wie sich die Anwendungen dann auf (weitere) Frequenzbedarfe auswirken, kann heute noch nicht abgeschätzt werden. Aktuell geht es erst einmal um die Nutzung der heute verfügbaren Frequenzen.

In regulatorischer Hinsicht ist zu prüfen, inwiefern die festgelegten Lizenzgebühren für Campus-Netze vom Markt akzeptiert werden und keine Markteintrittshürden darstellen. Auch inwiefern der Betrieb eines lokalen 5G-Netzes innerhalb eines Jahres realistischere stattfinden kann, sollte geprüft werden. Der innovative Schritt in der Frequenzregulierung sollte nicht durch eine zu kurzfristige Betrachtung von Realisierungszeiträumen in seiner Wirkung begrenzt werden.

Summary

The new 5G mobile communications standard offers new possibilities in the provision of specific telecommunication services that deviate from mass market applications due to high bandwidths, short latencies and high reliability. In June 2019, 300 MHz in the 3.6 GHz band were successfully auctioned for nationwide use. In the light of a demand for local frequency uses, corresponding frequencies in the range from 3.7 GHz to 3.8 GHz can be applied for from the Federal Network Agency. Essential prerequisites for the successful introduction of 5G are thus fulfilled by frequency regulation.

Against this background, the discussion paper shows for the sectors industry, energy and agriculture which radio-based applications are discussed against the background of the technical possibilities of 5G:

In the industry sector, and especially in the context of building private, local 5G campus networks, there are many areas of application requiring 5G connectivity. These include manufacturing and process automation, man-machine interface, logistics and warehousing, and monitoring and maintenance. Nevertheless, the development and testing in practice is still at an early stage due to the not yet complete standard. At present, pilot projects are primarily limited to large industrial companies or scientific institutions that have implemented test laboratories. However, for the success of 5G in the industry sector, it will also be important that a 5G ecosystem is developed and the cost per end device and connectivity are very low.

Due to its geographically widespread application, the energy industry is less a driver than a 5G technology user especially since a nationwide supply of 5G in the 3.6 GHz range is economically difficult and 5G in the 700 MHz band only with regard to latency critical services can stand out from LTE. In the context of 5G, therefore, local usage is discussed, e.g. in substations. Perspectively, however, the 5G system architecture can help decentralize the energy system so that time-critical processes remain in the access network through edge cloud computing, rather than having to go through the full telecom network. The use of 5G is currently preceded by the question of which frequencies are particularly suitable for meeting the specific requirements in distribution grids or at metering operation. The use of 5G also depends on the answer to this question.

In the field of agriculture, concrete projects for 5G applications are still in the process of implementation. There is a real need for the 5G use, for example, in the field of autonomously driving and coordinating vehicles. Other applications, also in combination with AI, can be improved by 5G, but do not require the new standard as a prerequisite. A nationwide coverage with 4G would already be an important step here.

In summary, it is clear that stakeholders in particular sectors are working massively on a 5G ecosystem. This ecosystem depends on many factors, e.g. standardization from the users' point of view, availability of cost-effective devices and cost-effective 5G connec-

tivity. The next three to four years will show how these parameters work together. How the applications then affect (further) frequency requirements cannot yet be estimated. Currently, it's about the use of today's available frequencies.

From a regulatory point of view, it needs to be examined to what extent the stipulated license fees for campus networks are accepted by the market and do not constitute barriers to market entry. The extent to which the operation of a local 5G network can realistically take place within one year should also be analysed. The innovative step in frequency regulation should not be limited by a too short consideration of implementation periods.

1 Einleitung

Nach der Vergabe von 300 MHz aus dem 3,6-GHz-Frequenzband durch die Bundesnetzagentur im Juni 2019¹ und der teilweise bereits vorgenommenen Zuteilung dieser Frequenzen können die öffentlichen Mobilfunknetzbetreiber nunmehr 5G-Technologien in ihren Netzen einsetzen und damit „5G-Anwendungen“ im Massenmarkt und bei speziellen Anwendungen gewerblicher Nutzer unterstützen. Neben den bundesweiten Frequenznutzungsrechten können lokale Frequenzen im Bereich von 3,7 GHz bis 3,8 GHz bei der Bundesnetzagentur beantragt werden. Von der Nutzung dieser exklusiv zugeordneten, lokalen Frequenzen versprechen sich insbesondere Industrieunternehmen (wie BASF)² den Aufbau von optimal zugeschnittenen privaten Campus-Netzen.³

Vor dem Hintergrund des Ziels, dass die Frequenzpolitik die Digitalisierung der Volkswirtschaft unterstützt und – in Bezug auf 5G – laut Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD für die 19. Legislaturperiode, Deutschland ein Leitmarkt werden soll⁴, liegt der Schwerpunkt dieses Diskussionsbeitrags nicht auf der Massenmarktnachfrage, sondern auf der Nachfrage bzw. den Anwendungen von gewerblichen Nutzern in einzelnen Wirtschaftsbereichen der Volkswirtschaft. Im Weiteren werden wir die relevante Nachfrage bzw. potentielle Anwendungen, die im Zusammenhang mit 5G diskutiert werden, in den Sektoren Industrie, Energiewirtschaft und Landwirtschaft darlegen. Die Analyse erfolgt dabei auch mit Bezug auf Anwendungen, die auf Künstliche Intelligenz (KI) oder maschinelles Lernen abstellen. Im Hintergrund steht hierbei die Annahme, dass Anwendungen, die KI einsetzen oder darauf basieren, große Datenmengen benötigen, die wiederum aufgrund ihres Volumens und den Reaktionszeiten besondere Anforderungen an die sie übertragenden Telekommunikationsnetze stellen. 5G kann insofern „Enabler“ von KI sein.

Nach der Sektorenanalyse wird dargelegt, ob sich neue Geschäftsmodelle für die Anbieter der spezifischen Konnektivität (z. B. Mobilfunknetzbetreiber, Aggregatoren) einstellen könnten. In diesem Zusammenhang wird untersucht, welche Betreibermodelle ein Instrument sein könnten, um den Bedarf in den betrachteten Branchen effizient zu befriedigen.

Abschließend wird der Frage nachgegangen, ob zum jetzigen Zeitpunkt bereits Aussagen über mittelfristige (weitere) Frequenzbedarfe getätigt werden können und welche regulatorischen Aspekte eine Rolle für eine erfolgreiche Implementierung der 5G-Anwendungen in der Praxis spielen können.

1 Vgl.

https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze-node.html und Nett (2019).

2 Quelle: <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/ludwigshafen/Neuer-Mobilfunkstandard-Lizenzvergabe-fuer-5G-beginnt-BASF-beantragt-Netzwerk,basf-5g-102.html>.

3 Zu den Campus-Netzen siehe Nett u. Sörries (2019).

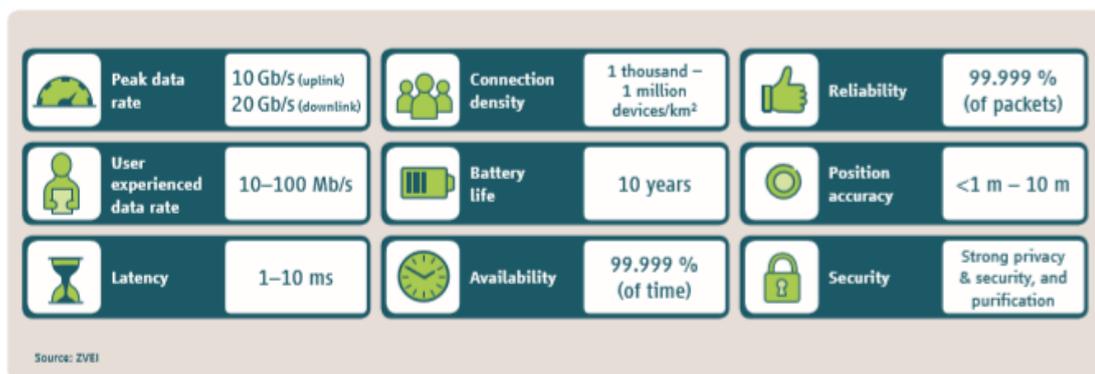
4 <https://www.swr.de/swraktuell/rheinland-pfalz/ludwigshafen/Neuer-Mobilfunkstandard-Lizenzvergabe-fuer-5G-beginnt-BASF-beantragt-Netzwerk,basf-5g-102.html>

Um den Mehrwert der möglichen 5G-Anwendungen in den drei Sektoren zu identifizieren, wurde neben der Berücksichtigung der entsprechenden Literatur eine Vielzahl von Expertengesprächen geführt.

2 Leistungspotentiale von 5G

Bevor auf die untersuchten Sektoren und spezifischen Anwendungen eingegangen wird, sollen kurz die Anforderungen bzw. Leistungspotenziale und Anwendungsszenarien von 5G dargestellt werden, wodurch der Mehrwert von 5G im Vergleich zu den bisherigen Mobilfunktechnologien (von 2G bis 4G) deutlich wird. 5G ermöglicht durch seine Eigenschaften (vgl. Abbildung 1) eine Vielzahl neuer Optionen beim Angebot von Telekommunikationsdiensten in einem Funknetz, z. B. Übertragungsraten im Gigabit-Bereich, sehr niedrige Latenzzeiten von bis zu einer Millisekunde (ms). Zum Vergleich, die menschliche Reaktionszeit liegt bei ungefähr zwölf Millisekunden.⁵ Im Übrigen soll 5G auch das Internet der Dinge, im Speziellen bis zu 1 Million Endgeräte pro Quadratkilometer, unterstützen.

Abbildung 1: Leistungspotenziale von 5G



Quelle: 5G ACIA (2019a)

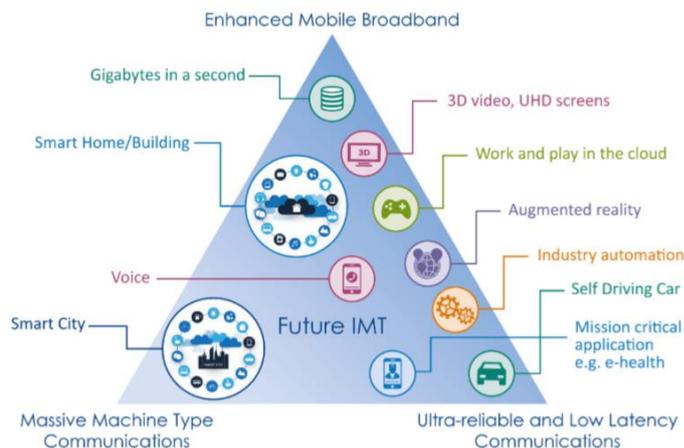
Die International Telecommunication Union (ITU) hat drei übergeordnete 5G-Anwendungsszenarien definiert⁶:

1. Enhanced mobile broadband (eMBB)
2. Massive machine-type communications (mMTC)
3. Ultra-reliable and low-latency communications (URLLC)

⁵ Roland Berger (2018)

⁶ ITU (2018)

Abbildung 2: 5G-Anwendungsszenarien



Quelle: ITU (2018)

5G wird zunächst in den Primärbändern 700 MHz und 3,6 GHz realisiert werden. Bei 700 MHz ist eine gemeinsame Realisierung mit LTE möglich. Künftig kann 5G auch bei 26 GHz oder oberhalb dieses Frequenzbereichs zum Einsatz kommen. Die Bedeutung von Frequenzen aus dem Millimeter-Bereich für industrielle Anwendung wird dabei derzeit kritisch diskutiert.⁷

⁷ Zum Beispiel können damit in der Industrie Autos oder Maschinen in kürzester Zeit mit großen Datenmengen „betankt“ werden. Laut Experten besteht für den Einsatz von 26GHz hinsichtlich von Abschattungsproblemen oder Elektromog jedoch noch keine ausreichende wissenschaftliche Grundlage.

3 Industrie

3.1 Ausgangslage

Eine Vielzahl der deutschen Industrieunternehmen nutzt bereits heute die Möglichkeiten, die Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) bieten.⁸ Unter dem Stichwort „Industrie 4.0“ werden Entwicklungsmöglichkeiten erfasst, die sich auch durch die Vernetzung von Maschinen und Prozessen eröffnen.

Laut BMWi und BMBF (2019) umfasst dies in erster Linie folgende Aspekte:

- Flexible Produktion
- Wandelbare Fabrik
- Kundenzentrierte Lösungen
- Optimierte Logistik
- Einsatz von Daten
- Ressourcenschonende Kreislaufwirtschaft

Der Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnologie liegt in erster Linie darin begründet, dass die Industrie damit ihre Wettbewerbsfähigkeit stärken möchte.⁹ Durch Industrie 4.0, also „die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von IKT“¹⁰, oder der „Losgröße 1“ in der Massenproduktion lassen sich Arbeitsprozesse verkürzen, flexibler gestalten und somit können im Ergebnis Kosten eingespart werden. Die Produktion wird dynamischer und effizienter. Bis 2025 werden Produktivitätssteigerungen von bis zu 30 % prognostiziert.¹¹

In einer Befragung von Industrieunternehmen sehen 75 % der Befragten 5G als einen zentralen Schlüsselfaktor bei der Bewältigung der digitalen Transformation an. Damit wurde 5G als zweithäufigste Antwort hinter Cloud-Computing (84 %) genannt.¹² Als ein zentrales Argument für 5G wird auch die damit verbundene höhere Sicherheit bei der Bereitstellung von Telekommunikationsdiensten für Industrieprozesse gesehen. Gerade die Nutzung exklusiv zugewiesener Frequenzen bietet diese Option und sorgt aktuell für einen Ideenwettbewerb hinsichtlich innovativer Konzepte in der Prozess- und Fertigungsindustrie, um nur einige Beispiele zu nennen.

⁸ Lange und Gentemann (2019).

⁹ <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2019/20190924-wettbewerbsfaehigkeit-der-industrie-weiter-staerken.html>.

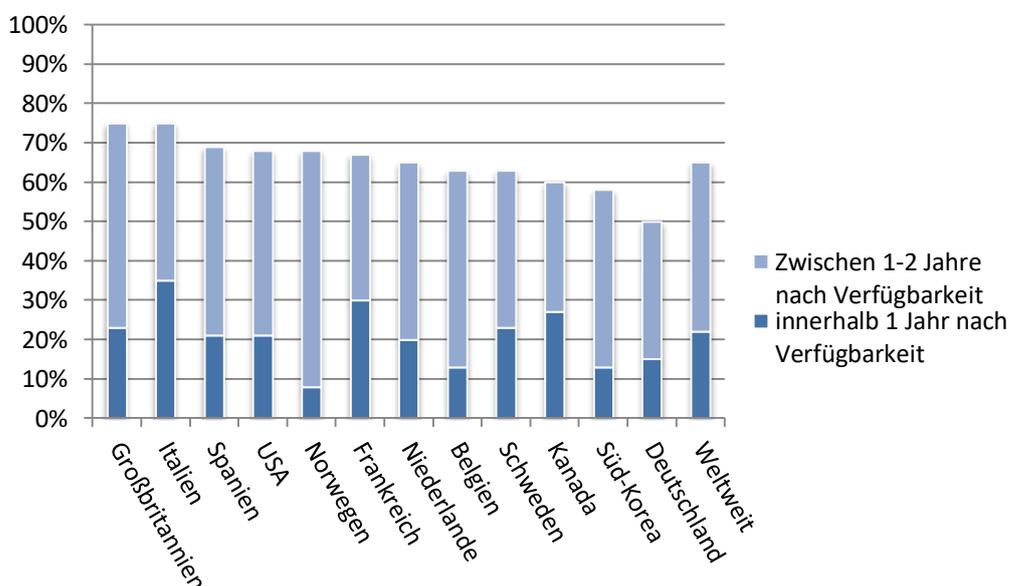
¹⁰ BMWi und BMBF (2019).

¹¹ BDI (2019)

¹² Fortier et al. (2019)

Im internationalen Vergleich gibt es größere Unterschiede bei der Geschwindigkeit, mit der Unternehmen 5G-Anwendungen nach Aufbau und Betrieb von bundesweiten oder lokalen 5G-Funknetzen nutzen wollen. Deutsche Industrieunternehmen nehmen dabei eine eher abwartende Haltung ein. Weniger als die Hälfte der befragten Unternehmen gibt an, innerhalb der ersten beiden Jahre nach Verfügbarkeit von 5G entsprechende Anwendungen einzusetzen. Damit bleibt Deutschland unterhalb des weltweiten Durchschnitts aber auch hinter vergleichbaren Ländern in Europa wie Großbritannien oder Italien.

Abbildung 3: Unternehmen die planen, 5G einzusetzen – nach Ländern¹³



Quelle: Fortier et al. (2019), (Abbildung Reproduziert).

Ericsson hat drei übergeordnete Herausforderungen bzw. Trends für die Fertigungsindustrie identifiziert, die durch die Implementierung von 5G adressiert werden können.¹⁴ Dazu zählen im industriellen Umfeld die stetige Veränderung von Produktionsprozessen, ein sich wandelnder Wettbewerb sowie die Optionen von sogenannten „intelligenten Fabriken“. Da Technologien sich immer schneller verändern, werden auch die Produktlebenszyklen kürzer. Gleichmaßen gilt dies auch für Fertigungsprozesse generell, die sich aufgrund wechselnder Kundennachfragen schneller anpassen müssen. Auch die Wettbewerbsintensität wird durch steigende Informationsverfügbarkeit und globale, stärker vernetzte Lieferketten getrieben. Digitalisierte Fertigung hat das Potenzial reaktionsschnellere und flexiblere Prozesse zu etablieren sowie die Automatisierung weiter voran zu treiben. Diese Herausforderungen können durch den Einsatz von 5G, aber

¹³ Capgemini Research Institute, Umfrage von Industrieunternehmen zu 5G, März–April 2019, N=806.

¹⁴ Ericsson (2017)

auch mithilfe von Künstlicher Intelligenz in der Form eines maschinellen Lernens angegangen werden. Dabei muss auch die Frage beantwortet werden, auf welcher Ebene Künstliche Intelligenz eingesetzt werden soll: Entweder im Endgerät, dass die Anwendung unterstützt oder im 5G-Netz. Von der Beantwortung der Frage hängt es ab, wer die entsprechenden Kosten zu tragen hat.

Künstliche Intelligenz bedeutet, dass Aufgaben auf Basis vielfältiger Methoden von einem Computersystem übernommen werden, das „menschliche Intelligenz“ erfordern. Dazu gehören Lernfähigkeit und eigenständige Problemlösungsfähigkeit. Somit können intelligente Systeme auf der Grundlage von Daten Ereignisse erklären und Vorhersagen treffen.¹⁵ Von der Basistechnologie betrachtet ist KI zwar getrennt von 5G zu sehen. Dennoch ist die Kommunikation, wie über 5G, für KI zentral, da große Datenmengen notwendig sind, um Analysen und Vorhersagen treffen zu können.

KI oder maschinelles Lernen hat in der Industrie das Potenzial einen zentralen Innovationstreiber darzustellen und kann somit auch in vielfältigen Anwendungsfeldern eingesetzt werden. Für die Industrie liegen die Vorteile von KI in der Reduktion von Kosten und Zeit sowie der Verbesserung von Qualität und Prozessen.¹⁶ Bereits heute setzen 12 % der Unternehmen in der Industrie KI ein.¹⁷

Die beiden Techniken, 5G und KI, sind in gewisser Weise komplementäre, da sie sich gegenseitig befördern. 5G dient als Grundlage, um hohe Datenmengen, die als Input von KI dienen sowie, teilweise und je nach Anwendung, von KI als Output produziert werden, schnell und zuverlässig transportieren zu können. KI kann auf der anderen Seite innerhalb des 5G-Netzes eingesetzt werden, etwa bei der Konfiguration von Network-Slices.

In den nachfolgend beschriebenen Anwendungsfällen der Industrie ist diese Kommunikation nicht kabel-, sondern funkbasiert.

3.2 Nachfrage

Um die relevante Nachfrage im Industriesektor darzulegen, werden zunächst die bislang geplanten und zum Teil in der Erprobung (Proof of Concept) befindlichen Anwendungen identifiziert. Zu berücksichtigen ist, dass erst nach Verabschiedung von Release 16 entsprechende Chipsets zur Verfügung stehen werden. Dies wird voraussichtlich 2020/2021 sein.

Es wird bei der Analyse herausgestellt, welche Anforderungen die Anwendungen an eine 5G-Netzinfrastruktur haben, ob mit 5G ein spezifischer Mehrwert zu bisherigen Technologien geliefert wird. Die Anforderungen werden u. a. über die erforderlichen

¹⁵ Plattform Industrie 4.0 (2019)

¹⁶ Plattform Industrie 4.0 (2019)

¹⁷ Bitkom (2019b)

Leistungspotenziale wie Datenübertragungsrate, Latenz oder Verfügbarkeit der jeweiligen Anwendung bestimmt.

Des Weiteren werden potentielle Schnittstellen oder Anwendungsbereiche von Künstlicher Intelligenz betrachtet.

Um insbesondere industrielle Anwendungen auch in die Standardisierung von 5G einzubringen, hat sich die Initiative 5G ACIA (Alliance for Connected Industries and Automation) gegründet. Sie sieht fünf wesentliche Anwendungskategorien im Bereich der industriellen Fertigung mit 5G:¹⁸

Tabelle 1: Anwendungskategorien im Bereich der industriellen Fertigung mit 5G

Anwendungskategorien im Bereich der industriellen Fertigung mit 5G	
1.	Fertigungsautomatisierung: automatisierte Steuerung, Überwachung sowie Optimierung von Arbeitsprozessen innerhalb einer Fabrik, zum Beispiel mithilfe von Robotik.
2.	Prozessautomatisierung: adressiert die Produktionskontrolle sowie das Ziel, Prozesse zu rationalisieren, den Energieverbrauch zu senken und die Sicherheit zu optimieren. Zum Beispiel über den Einsatz von einer Vielzahl an Sensoren („Massive Wireless Sensor Networks“).
3.	Mensch-Maschine-Schnittstelle: bedeutet den Einsatz einer Vielzahl von Geräten, welche die Interaktion zwischen Mensch und Maschine ermöglichen. Beispielsweise auch mithilfe von AR und VR.
4.	Logistik und Lagerhaltung: Optimierung der Organisation und Kontrolle von Materialien und Lagerung in der industriellen Produktion. Relevante Anwendungsfälle betreffen dabei Positionierung, Verfolgung und Überwachung von Assets, zum Beispiel über den Einsatz von fahrerlosen Transportsystemen.
5.	Überwachung und Instandhaltung: Überwachung von Prozessen ohne diese dabei direkt zu verändern, zum Beispiel zur Zustandsüberwachung auf Grundlage von Sensordaten oder vorausschauende Überwachung.

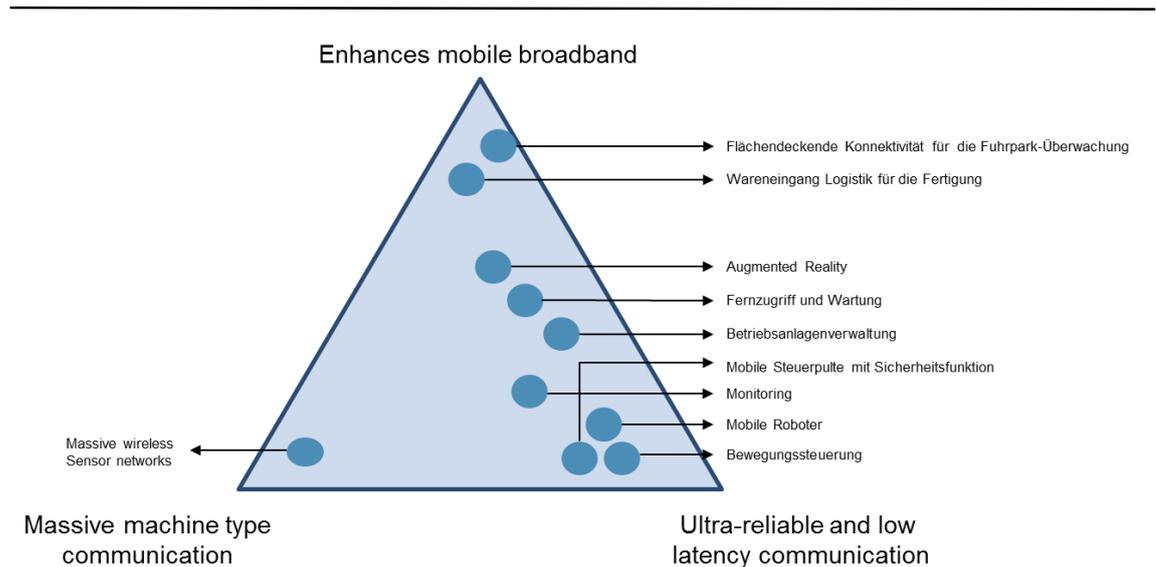
Quelle: 5G ACIA

Wie heterogen die Anforderungen von industriellen Anwendungen sind, zeigt sich bei der Zuordnung in die drei bereits dargelegten (siehe Kapitel 2) 5G-Anwendungskategorien. Dadurch wird auch der besondere Bedarf an flexiblen Nutzungsmöglichkeiten der 5G-Architektur deutlich. Abbildung 4 zeigt deutlich, dass viele Anwendungen insbesondere Bedarf an (extrem) niedrigen Latenzzeiten haben. Diese Anwendungen können nicht von anderen Funktechnologien unterstützt werden. Ebenso müssen die Anwendungen „ultra reliable“ sein, um in Produktionsprozessen eingesetzt werden zu können. Diese Anforderung lässt sich nur dann umsetzen, wenn exklusiv nutzbare Frequenzen zum Einsatz kommen. Damit ist ein wesentlicher Unterschied

¹⁸ 5G ACIA (2019b).

beispielsweise zu WiFi-Technologien genannt, weil hier Allgemeingenehmigungen für die Frequenznutzung bestehen.

Abbildung 4: Anwendungsfälle Industrie nach Dienste- und Anwendungskategorien



Quelle: 5G ACIA (2019a) und ZVEI, (Abbildung reproduziert).

3.2.1 Industrierobotik

Der erste Anwendungsfall betrifft den Einsatz von Industrierobotik, beispielsweise für die Montage in der Automobilindustrie. Fertigungsautomatisierung bedeutet ganz generell die automatisierte Steuerung, Überwachung und Optimierung von Arbeitsprozessen innerhalb einer Fabrik, die direkt den Produktionsprozess betreffen.

Gemeinsam mit Ericsson erprobt Audi den Einsatz von 5G für die Automobilfertigung. Dazu wird ein „Audi Production Lab“ in Gaimersheim mit einer 5G-Funkzelle aufgebaut. Vom Einsatz von 5G verspricht sich Audi größere Datendurchsatzraten, mehr Netzkapazitäten, sichere Verfügbarkeit und geringere Latenzen zwischen Anlagen im Fabrikssystem zu realisieren. Der Untersuchungsschwerpunkt des Testfeldes soll in erster Linie auf latenzkritischen Anwendungen liegen. Ein konkreter Anwendungsfall besteht für die kabellose Interaktion zwischen Industrieroboter und Klebeapplikation. Dieser Vorgang ist in der Automobilproduktion ein Routine-Arbeitsschritt und soll automatisiert ablaufen. Von dem Gesamtprojekt verspricht man sich Erfahrungen mit alternativen

bzw. ergänzenden Technologien zu WLAN oder kabelbasierten (Ethernet) Anbindungen zu erhalten.¹⁹

Auch Daimler hat ein Pilotprojekt zur Fabrik der Zukunft unter dem Titel „Factory 56“²⁰. Dafür soll in Zusammenarbeit mit Telefónica und Ericsson ein lokales 5G-Mobilfunknetz in Sindelfingen aufgebaut werden. Es soll das weltweit erste 5G-Mobilfunknetz für die Fahrzeugmontage werden. Als Vorteil eines privaten Campus-Netzes wird gesehen, dass die Datenhoheit ausschließlich beim (Anwender-) Unternehmen selbst liegt und aus der Netzwerkarchitektur heraus Dritte keine sensiblen Produktionsdaten erhalten. Für die Umsetzung werden 5G-Small-Cell-Indoor-Antennen und ein zentrales 5G-Hub eingesetzt.

Die Anforderungen für den Einsatz von Robotik in der Fertigung betreffen neben einer niedrigen Latenz gegebenenfalls auch eine hohe Datenübertragungsrate. Letztere ist erforderlich, sofern die Roboter auch kameragesteuert agieren sollen. Zusätzlich erfordert der Einsatz von Robotik eine latenzoptimierte Signalverarbeitung. Dies ist insbesondere aus Sicherheitsaspekten relevant, da bei einem Zwischenfall Not-Aus-Buttons unverzüglich funktionieren müssen. Um diese Sicherheit zu gewährleisten; ist es erforderlich, modulare Sicherheitssysteme auf Basis von KI einzusetzen. Wenn sich z. B. Roboter an andere Module in der industriellen Produktion andocken, erkennt das System, ob ein sicherer Zustand besteht. Bei Problemen fährt das System in den kritischen Zustand.

5G kann bisher kabelbasierte Datenübertragung ersetzen und dadurch z. B. Robotik flexibler einsetzen, Produktionsprozesse schneller anpassen und damit Kosten reduzieren. Damit kann 5G auch das Problem von Kabelbrüchen adressieren. Bislang müssen Kabelbäume, zum Beispiel für Maschinen, alle zwei bis fünf Jahre ausgetauscht werden. Die Dauer hängt u. a. von den Umgebungsbedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit etc.) des Industriestandortes ab. Darüber hinaus wird die Flexibilität in der Fertigung über 5G erhöht, da Prozesse über Funk schneller und einfacher angepasst werden können.

3.2.2 Augmented Reality

An der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine ist in der Zukunft eine Vielzahl von Anwendungen vorstellbar. Beispielsweise kann Augmented Reality (AR) bei der Montage eine wichtige Rolle spielen, da der Mensch bei komplexen Vorgängen zielgerichtet angeleitet werden kann. Dabei ist der Einsatz von Datenbrillen vorstellbar, die dem Techniker relevante Informationen zuspielden und somit den Arbeitsprozess erleichtern und beschleunigen.

¹⁹ <https://www.audi-mediacyter.com/de/pressemitteilungen/audi-und-ericsson-erproben-5g-technologie-fuer-die-automobilfertigung-10554>

²⁰ <https://media.daimler.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Mobilfunknetz-der-Zukunft-in-der-Factory-56-in-Sindelfingen-Mercedes-Benz-Cars-und-Telefnica-Deutschland-errichten-weltweit-erstes-5G-Netz-fuer-die-Automobilproduktion.xhtml?oid=43643942>

Voraussetzung für den Einsatz von AR-Anwendungen an ein 5G-Mobilfunknetz sind extrem niedrige Latenzzeiten sowie hohe Datenraten, um den reibungslosen Datenverkehr zu ermöglichen.²¹ Dies hängt damit zusammen, dass aufgrund von zu übertragendem Bild- und Videomaterial ein hohes Datenvolumen übertragen werden muss. Weder eine kabelbasierte Lösung, noch bisherige Mobilfunktechnologien können den Anforderungen von AR-Anwendungen gerecht werden. Zum einen, da Mitarbeiter frei beweglich und flexibel arbeiten können müssen und zum anderen, da WLAN oder LTE die erforderliche Latenz bzw. Datenübertragung nicht gewährleisten können.

Darüber hinaus können auch bei der Wartung und Reparatur von Produktionsanlagen Techniker durch den Einsatz von Augmented-Reality-Anwendungen unterstützt werden. Ein weiterer Vorteil von AR-gestützter Wartung liegt darin, dass ein Mitarbeiter ortsungebunden auf eine Vielzahl von Reparaturanweisungen zugreifen kann. Damit wird auch dem Umstand Rechnung getragen, dass Maschinen und Geräte immer individualisierter und damit schwieriger zu reparieren sind. Der Einsatz intuitiver Lösungen, wie AR oder der Einsatz von Applikationen wird durch die Mitarbeiter selbst stark nachgefragt, da diese die Arbeitsvorgänge deutlich erleichtern.

Auch beim Aufbau der „Smartfactory“ bei Osram sollen AR-Brillen eingesetzt werden. Dort mit dem Ziel, virtuelle Unterstützung von Facharbeitern weltweit jederzeit verfügbar zu haben. Damit kann bestehendes Know-how flexibel und ortsungebunden eingesetzt werden, wodurch Qualitätssteigerungen und Kosteneinsparungspotenzial für die Industrie realisiert werden können.²²

Der Mehrwert im Vergleich zu bisherigen Technologien zeigt sich in einem realen Anwendungsfall, der die oben beschriebene AR-gestützte Wartung von Maschinen betrifft. Dabei erhalten die Mitarbeiter während der Wartung Anweisungen direkt in der Brille eingeblendet. In der Versuchsphase hat sich jedoch gezeigt, dass das bisher vorhandene LTE-Mobilfunknetz unzureichend ist, um die Informationen adäquat zu übertragen, da die Bandbreiten nicht ausreichend waren.

3.2.3 Fahrerlose Transportsysteme

Unter fahrerlosen Transportsystemen (FTS) werden etwa Routenzüge und Flurfahrzeuge (wie z. B. Gabelstapler) verstanden, die autonom in oder zwischen unterschiedlichen Produktions- oder Lagerhallen agieren. Unter kooperierenden Fahrzeugen werden solche Systeme verstanden, die z. B. bei speziellen Bauteilen aufeinander abgestimmt den Transportvorgang gemeinsam vornehmen. Mit klassischen Technologien ist eine solche Kooperation nicht möglich, da diese in Echtzeit erfolgen muss. Die Nachfrage nach FTS in Industrieunternehmen ist groß, da intralogistische Prozesse optimiert und die Sicherheit erhöht werden können.

²¹ VDE (2019)

²² <https://www.t-systems.com/de/best-practice/02-2019/fokus/osram/produktion-der-zukunft-898036>

Ein Beispiel für den Aufbau einer smarten Fabrik mit zukünftigem Bedarf an 5G-Konnektivität zeigt OSRAM in Kooperation mit der Deutschen Telekom. Dort sollen mobile Roboter beim Materialtransport im Werk in Schwabmünchen zu effizienteren Produktionsprozessen führen. Die fahrerlosen Transportsysteme werden über Mobilfunk gesteuert, wobei ein „Dual-Slice“-System zum Einsatz kommt, welches öffentliches und privates LTE-Netz kombiniert.²³ Perspektivisch soll aber ein 5G-Netz aufgebaut werden, wodurch insbesondere niedrige Latenzzeiten ermöglicht werden. Vergleichbare Anwendungsfälle für den Einsatz von FTS bestehen auch in der Automobilindustrie, wo für den Transport zwischen unterschiedlichen Lagern und Produktionshallen autonome Fahrzeuge eingesetzt werden sollen.

Zentrale Anforderungen bei FTS sind extrem niedrige Latenzzeiten und hohe Verfügbarkeit bzw. Zuverlässigkeit. Dies hängt damit zusammen, dass die Systeme fortlaufend untereinander in Echtzeit kommunizieren müssen, um einen reibungslosen Ablauf und vor allem hohe Sicherheitsanforderungen zu gewährleisten. Im Gegensatz zur AR sind allerdings in der Regel nur geringe Datenmengen zu übertragen.

FTS kommunizieren in industriellen Prozessen zurzeit größtenteils über WLAN. Während sich diese Systeme durch die Fabrik bewegen, kann es passieren, dass die Anbindung an das WLAN-Netz für kurze Zeit unterbrochen wird. Dieses Problem tritt auf, weil die WLAN-Access-Points gewechselt werden müssen und kein Handover stattfindet. Diese Unterbrechung kann durch 5G verhindert werden, wodurch Verzögerungen im Transportablauf vermieden werden.²⁴ Darüber hinaus bestehen bei der Verwendung von WLAN Interferenzprobleme. Diese Störungen können zum Beispiel durch die Nutzung privater Handys von Mitarbeitern auftreten, was nicht vollständig verhindert werden kann und bislang Probleme verursacht.

Zurzeit werden z. B. Gabelstapler häufig nur innerhalb von festgelegten Quadranten geortet oder es wird Orientierung anhand von optischen Markern gegeben, wodurch weder eine genaue Standortbestimmung möglich ist noch Logistikprozesse flexibel verändert werden können. Ansonsten wird bei logistischen Prozessen häufig auf schienengeführte Transportvorgänge gesetzt, die jedoch ebenso unflexibel angepasst werden können.

Der Mehrwert von FTS liegt zudem im kabellosen Betrieb, der verlässlich nur über 5G möglich ist. Dabei spielt auch die Skalierbarkeit eine entscheidende Rolle, die bei Funk erheblich höher ist. Kabelbasierte Lösungen kommen bei Fragen der Skalierbarkeit schnell an ihre Grenzen der Umsetzbarkeit, weil physisch nicht immer weitere Kabel ergänzt werden können. Über die in Echtzeit ermittelten Standortdaten aller Fahrzeuge können die gesamten Transportabläufe in der Fabrik zurückverfolgt werden.

²³ <https://www.osram-group.de/de-de/media/press-releases/pr-2018/11-10-2018>

²⁴ VDE (2019)

Zusätzlich wird die Sicherheit auf den Transportwegen erhöht und während des gesamten Produktionsprozesses eine konstante Transportleistung erbracht, weil Transportsysteme aufeinander abgestimmt sind und unerwartete Unfälle vermieden werden. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Transportabläufe deutlich leichter und flexibler angepasst werden können.²⁵ Zudem sind mit 5G sowohl Indoor-, als auch Outdoor-Anwendungen und vor allem ein fließender Übergang möglich. WLAN ist in erster Linie für Indoor-Anwendungen gedacht, 4G hingegen vor allem für Outdoor-Anwendungen. 5G kann beide Anforderungen realisieren.

3.2.4 Vorausschauende Wartung

Vorausschauende Wartung soll dem Defekt von Geräten und den damit verbundenen hohen Reparaturkosten oder finanziellen Schäden aufgrund von Produktionsausfällen vorbeugen und bietet damit für die Industrie ein Anwendungsfeld mit hohem Kosteneinsparungspotenzial. Entsprechende Industrielösungen werden von den großen Netzbetreibern in Deutschland bereits beworben. T-Systems bietet sowohl eine Komplettlösung auf Plattformbasis an, die mit eigener Sensorik verbunden werden kann, als auch Ende-zu-Ende-Lösungen. Die Konnektivität soll in Zukunft auch mit 5G möglich sein.²⁶

Vorausschauende Wartung oder Instandhaltung umfasst auch die intelligente Verknüpfung der Sensorik, z. B. auf Basis von Künstlicher Intelligenz. KI kann bei der Maschinenüberwachung erreichen, dass Daten von mehreren potentiellen Faktoren für einen Ausfall erhoben, übertragen und miteinander kombiniert werden, um im Ergebnis einen Ausfall zu verhindern.

Ein konkretes Anwendungsbeispiel betrifft die Wartung von Maschinen. Wenn die Außentemperatur über einen längeren Zeitraum bei über 30 Grad C liegt, gleichzeitig der Ölwechsel länger zurückliegt und die Maschine ununterbrochen auf Höchstleistung läuft, erhöht sich das Risiko für einen Maschinenausfall. Auch für den Fall, dass eine Wartung der Maschine erst in wenigen Tagen ansteht, kann die Kombination der Risikofaktoren bereits jetzt sofortiges Handeln erfordern. Durch eine vorausschauende Wartung in Kombination mit KI können die Vielzahl an Risikofaktoren kombiniert und analysiert werden, woraufhin eine Wartung frühzeitig eingeleitet wird.²⁷

5G soll bei der Überwachung in der Industrie ermöglichen, dass schnell und zuverlässig viele Sensordaten erfasst werden und reaktionsschnell innerhalb von Millisekunden, z. B. durch KI in der Cloud verarbeitet, Probleme erkannt und gelöst werden.²⁸ Damit kann eine deterministische Service-Qualität realisiert werden. Voraussetzung für vorausschauende Wartung ist demnach ein engmaschiges Sensornetzwerk in der Indust-

²⁵ IT-Zoom (2018)

²⁶ <https://www.t-systems.com/de/de/loesungen/digitalisierung/loesungen/vorausschauende-wartung/predictive-operations-453112>

²⁷ <https://www.vodafone.de/business/featured/technologie/predictive-maintenance-eingreifen-bevor-alles-stillsteht/>

²⁸ <https://www.tmfforum.org/manufacturing-predictive-maintenance-using-5g/>

riehalle, um z. B. Maschinendaten vollumfänglich erfassen zu können. Allerdings sind laut einer Umfrage²⁹ erst 25 % der Industrieunternehmen von vorausschauender Wartung überzeugt.

Den zentralen Mehrwert stellt die Verfügbarkeit von Maschinen und anderen Geräten dar, weil diese seltener unvorhergesehen ausfallen und der Produktionsprozess damit weniger oft zum Erliegen kommt. Gleichmaßen können Wartungen besser geplant werden, z. B. indem an einem Tag alle notwendigen Wartungen vorgenommen werden und nicht mehr an unterschiedlichen Zeitpunkten. Dadurch wird der Produktionsprozess nur an einem Tag unterbrochen. Vorbeugende Wartungen, auch von Maschinen, die ohne Defekt sind, sind nicht mehr oder in deutlich geringerem Ausmaß erforderlich. Dadurch können Wartungsintervalle erheblich verlängert werden. Ein Beispiel einer industriellen Spindel hat gezeigt, dass das entsprechende Intervall um den Faktor 20 verlängert werden konnte. Damit wird neben einem Effizienzfortschritt auch der Nachhaltigkeitsgedanke adressiert, da nur dort Module ausgetauscht oder gewartet werden, wo tatsächlich ein Defekt vorliegt.

3.3 Technische Entwicklungen

Um den Anforderungen, beispielweise Echtzeitfähigkeit und hohe Datenübertragungsraten, von industriellen Anwendungen mit 5G-Bedarf gerecht werden zu können, ist die Integration zahlreicher Schlüsseltechnologien notwendig. Zu nennen sind dabei u. a. Network-Slicing, Small Cells und Mobile-Edge-Computing (MEC).

Mit am Häufigsten im Zusammenhang mit 5G fällt der Begriff Network-Slicing. Die in der Industrie nachgefragten und bislang beschriebenen Anwendungen mit Bedarf an 5G Konnektivität zeigen, wie unterschiedlich die Anforderungen bezüglich Übertragungsrate, Latenzzeit usw. sein können. Gerade für die flexible und bedarfsgerechte Nutzung von 5G ist demnach Network-Slicing elementar.

*Über **Network-Slicing** ist es möglich die physische Netzwerkinfrastruktur in virtuelle logische „Slices“ zu unterteilen, um unterschiedlichen Anforderungen gerecht zu werden. Demnach stellt Network Slicing für 5G eine Schlüsseltechnologie dar, die flexible und anwendungsbezogene Anwendungen in der Industrie, aber auch anderen Sektoren, erlaubt. So lassen sich Anwendungen aus den drei Hauptkategorien eMBB, uRLLC und mMTC auf einer einheitlichen 5G-Netzwerkinfrastruktur realisieren. Technisch betrachtet können anwendungsbezogene Slices dadurch bereitgestellt werden, dass sie softwarebasiert ausgestaltet sind. Grundlage dafür sind Software-Defined-Networking (SDN) und Network-Functions-Virtualization.³⁰*

Entscheidend für die Bedeutung von Network-Slicing ist, dass eine Vielzahl von Anforderung individuell erfüllt werden können. Die GSA (Global mobile Suppliers Associati-

²⁹ Industrieanzeiger (2018)

³⁰ <https://www.ip-insider.de/was-ist-network-slicing-a-828834/>

on) unterteilt diese Anforderungen für die Industrie in Leistungsanforderungen, Funktionale, und Operationale Anforderungen.

Tabelle 2: Erfüllung von Industrieranforderungen über Network-Slicing

Leistungsanforderungen	Funktionale Anforderungen	Operationale Anforderungen
Latenz, Datenrate, Verfügbarkeit, Verlässlichkeit und Abdeckung	Sicherheits- und Identitätsmanagement, Sicherheit der Benutzergeräte	Selbstverwaltung von Ressourcen, Personalisierung, Rechnungsstellung und globale Operationen

Quelle: GSA (2017)

Die beschriebenen Leistungsanforderungen lassen sich über Network-Slicing flexibel und bedarfsgerecht anpassen. Es lassen sich aber auch funktionale Anforderungen individuell einstellen. Zum Beispiel können Slices mit höheren Sicherheitsanforderungen besser geschützt oder nur für eine bestimmte private Nutzergruppe zur Verfügung gestellt werden. Operationale Anforderungen betreffen Möglichkeiten der Personalisierung oder die globale Anwendung einzelner Slices. Network-Slicing ist sowohl für große Industrieunternehmen relevant, die bedarfsgerechte Slices im Rahmen ihres Campus-Netzes benötigen, als auch für Unternehmen, die für bestimmte industrielle Anwendungen Bedarf über die öffentliche 5G-Mobilfunknetze der Netzbetreiber haben.

Eine Fragestellung, die es zu klären gilt, ist die Verbindung von Network-Slices verschiedener Betreiber. Es ist vorstellbar, dass Anwender für eine Anwendung verschiedene Slices benötigen. Dann müssen die Slices gleich konfiguriert sein, um einen reibungslosen Prozess zu gewährleisten. Dies kann perspektivisch z. B. durch Intermediäre geschehen.

Über den massiven Einsatz von drahtlosen Sensoren, können Fertigungsbereiche, die industrielle Logistik und alle damit verbundenen Prozesse vernetzt werden. Dazu können ganz unterschiedliche Sensortypen eingesetzt werden. Angefangen von Mikrofonen, über Drucksensoren bis hin zu Thermometern. Über die gewonnenen Daten können industrielle Prozesse dynamisch analysiert, gesteuert und somit optimiert werden. 5G-Technologien sollen dabei insbesondere bei den Sensoren den Energieverbrauch bei der Übertragung von Daten weiter reduzieren, so dass deutlich längere Batterielaufzeiten erreicht werden können. Hier ist zu beachten, dass die einzelnen Sensoren in der Regel keine großen Datenmenge übertragen müssen (schmalbandige Internet-der-Dinge-Anwendungen). Es geht vielmehr um eine hohe Verbindungsdichte sowie um eine hohe Verfügbarkeit der Konnektivität. 5G wird damit den bereits mit LTE-M beschrittenen Weg weiter fortsetzen.

Für die Vernetzung von Industriehallen oder sogar ganzer Betriebsgelände ist der Einsatz sogenannter Small Cells notwendig. Damit können eine dichte Abdeckung sowie

hohe Kapazitäten gewährleistet werden, die beispielsweise für vorausschauende Wartung notwendig sind. Die Nutzung von Small Cells mithilfe von Millimeterwellen wird in der Industrie hingegen auch kritisch gesehen, da die Ausbreitungseigenschaften durch Störfaktoren stark beeinträchtigt werden können.

***Small Cells** spielen schon unter 4G eine wichtige Rolle, jedoch wird die Bedeutung bei der Implementierung von 5G weiter zunehmen. Dies hängt mit vier Faktoren zusammen, die 5G erfordert.³¹ Zum einen ermöglichen Small Cells ein dichtes Netzwerk, wodurch mehr Kapazität generiert werden kann. Darüber hinaus können sie vergleichsweise einfach aufgebaut werden und erhöhen die Abdeckung. Vor allem, wenn perspektivisch höhere Frequenzen eingesetzt werden, braucht es Small Cells, um auf der kurzen Reichweite der Frequenzen für ausreichend Netzabdeckung zu sorgen. Abschließend ermöglichen sie eine höhere Bandbreite bei geringerer Energieleistung. Ihr Einsatz ist sowohl indoor als auch outdoor möglich.*

Für die Vernetzung in einer Indoor-Produktionshalle setzt z. B. ein Automobilunternehmen 36 Small Cells ein. Damit können 10 Gigabit Bandbreite und geringe Latenzzeiten erzielt werden, wodurch Transportfahrzeuge, Maschinen und Werkzeuge in Echtzeit Informationen untereinander austauschen können. Ebenso wird in der Produktionshalle Mobile-Edge-Computing eingesetzt (MEC).

***MEC** ist insbesondere für die Echtzeitfähigkeit von Anwendungen notwendig und bedeutet den Einsatz kleinster Rechenzentren im Netz, die direkt am Ort der Anwendung Daten verarbeiten und schnell weiterleiten können. Dadurch müssen diese nicht mehr längere Strecken durch das gesamte Netzwerk zurücklegen und die Latenzzeit verringert sich erheblich. Damit stellt MEC neben Network-Slicing eine Schlüsseltechnologie von 5G dar und wurde bei der Entwicklung der Standards, im Unterschied zu den vorherigen Mobilfunkgenerationen, miteinbezogen. Da Edge-Computing sämtliche Netzwerktechnologien, somit auch WLAN oder kabelbasierte Netzwerke unterstützen kann, wird häufig auch von Multi-Access-Edge-Computing gesprochen.³²*

Ein sogenanntes „Dual-Slice“-System kombiniert ein öffentliches und privates Netz und kann insbesondere für betriebsübergreifende Anwendungen relevant sein. Beispielsweise ist auf dem Campus-Netz von Osram ein solches System vorhanden für den Einsatz von fahrerlosen Transportsystemen. Ein Dual-Slice-System ist für den Fall sinnvoll, dass z. B. FTS das Betriebsgelände und damit das Campus-Netz verlassen. Dann muss ein Handover ins öffentliche Netz erfolgen.

3.4 Zwischenfazit Industrie

In der Industrie und gerade im Zusammenhang mit dem Aufbau von 5G-Campus-Netzen bestehen zahlreiche Anwendungsfelder mit Bedarf an 5G-Konnektivität. Die Entwicklung und Erprobung entsprechender Anwendungen befindet sich wegen der noch

³¹ <https://www.smallcellforum.org/what-is-a-small-cell/>

³² <https://www.ip-insider.de/was-ist-multi-access-edge-computing-mec-a-830163/>

laufenden Standardisierung naturgemäß noch in einem frühen Stadium. Die entsprechenden Standards sind noch nicht verabschiedet. Dies betrifft insbesondere Release 17, so dass sämtliche Voraussetzungen zur Etablierung eines notwendigen Ecosystems erst in den nächsten Jahren vorliegen werden. Jedoch befasst sich heute bereits eine Vielzahl von Unternehmen mit 5G, sowohl auf der Seite des Angebots (Chipset-Hersteller, Hersteller von Sensoren) als auch auf Seite der Nachfrage (z. B. Unternehmen in der Prozessindustrie). Letztere führen bereits Pilotprojekte durch, die die Potenziale von 5G aufzeigen sollen. Projekte im Zusammenhang mit 5G durch KMU sind bislang nicht zu identifizieren, was wenig überraschend ist, da diese Unternehmen häufig nicht über die Ressourcen für frühzeitige Piloten haben. Gegenwärtig werden zudem noch viele Tests mithilfe von 4G-Technologie durchgeführt, die perspektivisch auf 5G erweitert werden sollen. Dies hängt auch mit der geringen Hardware-Verfügbarkeit zusammen. Ab Mitte 2020 ist mit einer steigenden Verfügbarkeit von Hardware für Industrieanwendungen zu rechnen.

Einen Überblick über die dargestellten Anwendungsbeispiele und deren Anforderungen bietet Abbildung 5. Bei den Anwendungen ist zu beachten, dass diese zahlreiche Überschneidungspunkte untereinander umfassen. So ist die massive drahtlose Vernetzung Grundlage für viele Anwendungen, wie FTS oder auch vorausschauender Überwachung. Im Zusammenhang mit den genannten Anforderungen ist zu berücksichtigen, dass auch mit 5G nicht alle gleichzeitig erfüllt werden können, sondern immer ein Schwerpunkt, z. B. auf Latenz oder Datenmenge, festgelegt werden muss (siehe auch Abbildung 5).

Abbildung 5: Überblick Anwendungsbeispiele

Anwendungskategorien	Beispiel	Anforderungen
Fertigungsautomatisierung	Industrierobotik	<ul style="list-style-type: none"> Niedrige Latenz Hohe Sicherheitsanforderung Ggf. hohe Datenmengen
Prozessautomatisierung	Massive-wireless sensor networks	<ul style="list-style-type: none"> Hohe Verfügbarkeit Hohe Verbindungsdichte Geringe Datenmengen Hohe Energieeffizienz
Mensch-Maschine-Schnittstelle	Augmented Reality	<ul style="list-style-type: none"> Extrem niedrige Latenz Hohe Datenmengen Extrem hohe Verfügbarkeit
Logistik und Lagerhaltung	Fahrerlose Transportsysteme (FTS)	<ul style="list-style-type: none"> Extrem niedrige Latenz Extrem hohe Verfügbarkeit
Überwachung und Instandhaltung	Vorausschauende Überwachung	<ul style="list-style-type: none"> Teilweise niedrige Latenz Hohe Verbindungsdichte Hohe Sicherheitsanforderung

Zusammengefasst lassen sich die Bedeutung und der Mehrwert von 5G im Vergleich zu bisherigen Technologien durch drei Faktoren herleiten. Der zentrale Faktor ist die Flexibilität und Sicherheit, die durch die Kombination von exklusiv nutzbarem Spektrum mit der 5G-Technologie entstehen. So muss die notwendige Konnektivität (für Roboter, autonome Fahrzeuge, Maschinen) nicht ständig neu konfiguriert und angepasst werden. Fertigungsprozesse beispielsweise können so bedarfsgerecht ausgestaltet werden.

Zudem besteht das Potenzial für erhebliche Kosteneinsparungen, weil etwa Kosten für Wartung verringert werden oder potentielle Probleme wie Kabelbruch nicht mehr bestehen. Zuletzt ist 5G für einige der beschriebenen Anwendungen alternativlos. Dazu zählen etwa FTS oder Augmented Reality Anwendungen, die weder über kabelbasierte Technologien, noch WLAN oder 4G umsetzbar sind.

Für den Erfolg von 5G in der Industrie wird es jedoch auch darauf ankommen, dass sich ein für die Industrie relevantes 5G-Ecosystem entwickelt und die Kosten pro Endgerät und Konnektivität sehr niedrig ausfallen. Ein auf SIM-Karten basiertes Geschäftsmodell beim Angebot der Konnektivität wird Anwender nicht überzeugen können, weil mit jeder zusätzlichen SIM-Karte für Sensoren die Kosten anstiegen.

Im Ergebnis müssen zahlreiche Akteure – angefangen bei Anlagenbauern, über Softwareentwickler bis hin zu den Netzbetreibern bzw. -ausrüstern – an gemeinsamen Lösungen für Geschäftsmodelle in der Industrie arbeiten. Interdisziplinäre Zusammenarbeit ist dabei essentiell. Neben dem Aufbau von Campus-Netzen für große Industrieunternehmen geht es auch darum, Lösungen für kleine und mittlere Unternehmen zu realisieren. Im Hintergrund ist zu sehen, dass 5G im Wettbewerb mit alternativen Technologien (kabelgebunden, WLAN, LoRaWAN, LTE) steht.

4 Energiewirtschaft

4.1 Ausgangslage

In der Energiewirtschaft findet eine Digitalisierung auf allen Wertschöpfungsstufen statt. In diesem Rahmen ergeben sich durch 5G und KI neue Möglichkeiten, die derzeit teilweise in Pilotprojekten getestet werden.

Die Energiewirtschaft befindet sich in einem tiefgreifenden Wandel. Das vormals zentralistisch organisierte Energiesystem mit großen, zentralen Erzeugungsanlagen, das die Energie über die Übertragungs- und Verteilnetze nach relativ gut vorhersehbaren Lastmustern zu den Endverbrauchern brachte, wird abgelöst durch ein System mit vielen kleinen, dezentralen (zumeist EE-) Einspeiseanlagen und Speichern, die fluktuierend einspeisen und eine teilweise erratische Nachfrage bedienen. Um die in Deutschland

hohe Versorgungsqualität zu gewährleisten, müssen die Verteilnetze zu Smart Grids umgebaut werden, d. h. sie müssen überwachbar und steuerbar werden.³³

Das bedeutet, dass die Verteilnetzbetreiber im Zuge des beschriebenen Wandels mehr Systemverantwortung übernehmen müssen. Diese lag bisher weitgehend bei den Übertragungsnetzbetreibern. Dazu muss eine entsprechende Telekommunikationsinfrastruktur aufgebaut werden.

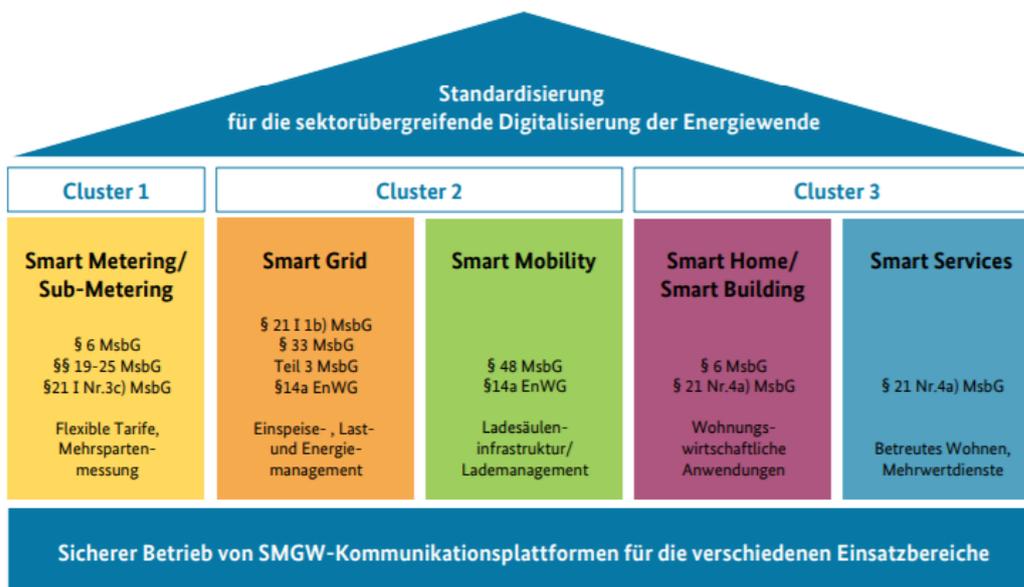
Perspektivisch bedeutet Dezentralität aber auch, dass die Systeme auf immer niedrigeren Ebenen immer mehr Informationen generieren, da sich die IKT-Infrastruktur derjenigen des Energiesystems immer mehr angleicht. Potenzielle Probleme (z. B. Netzengpässe) werden dort gelöst, wo sie entstehen.

Auslöser dieses Aufbaus sind neben der Aufgabe der Aufrechterhaltung eines stabilen Netzbetriebs auch gesetzliche Vorschriften wie z. B. das Messstellenbetriebsgesetz (MsbG), das ein Ausbringen intelligenter Messsysteme vorsieht, zum anderen aber auch der Wettbewerbsdruck in den liberalisierten Bereichen Erzeugung und Vertrieb, der die Suche nach technischem Fortschritt impliziert. Für den Netzbereich sorgt die Anreizregulierung für entsprechende Impulse in diese Richtung. Weitere Impulse kommen beispielsweise aus den Gesetzen für den Ausbau erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG), wo bestimmte Prozesse verpflichtend vorgeschrieben sind (z. B. Fernauslesung).

Abbildung 6 gibt einen Überblick über die verschiedenen Anwendungsfelder.

33 Wissner (2011).

Abbildung 6: Übersicht der Einsatzbereiche für die Digitalisierung der Energiewende



Quelle: BSI / BMWi (2019)

Die Digitalisierung und die damit verbundene Automatisierung kennt somit viele verschiedene Anwendungsbereiche. So wird in ersten Projekten die Blockchain erprobt, während auch im Bereich KI bereits Aktivitäten stattfinden.

In einer Studie für das BMWi³⁴ wurde festgestellt, dass eine dedizierte Funklösung in einem 450-MHz-Band eine gut geeignete Strategie für den Aufbau einer digitalen Infrastruktur darstellt und eine synergetische Nutzung ermöglicht. „Mit synergetischer Nutzung ist gemeint, dass sowohl eine Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln, eine sichere Integration von EEG-Anlagen sowie eine Notfallkommunikation möglich ist, die eine Schwarzfallfähigkeit des eingesetzten TK-Dienstes erfordern, als auch marktliche Anwendungen von den TK-Diensten ermöglicht werden.“³⁵ Der Aufbau einer schwarzfallfesten Kommunikation ergibt sich auch aus der EU-Verordnung 2017/2196 zur Festlegung eines Netzkodex über den Notzustand und den Netzwiederaufbau des Übertragungsnetzes. Aus Sicht der Betreiber kritischer Infrastrukturen geht es aktuell primär darum, einen Frequenzbereich zu identifizieren, der einen wirtschaftlich tragfähigen Aufbau und Betrieb einer schwarzfallfesten Telekommunikationsinfrastruktur ermöglicht. Im Fokus steht hier der Frequenzbereich 450 MHz, der perspektivisch auch den Einsatz von 5G erlaubt.

³⁴ Sörries et al. (2019).

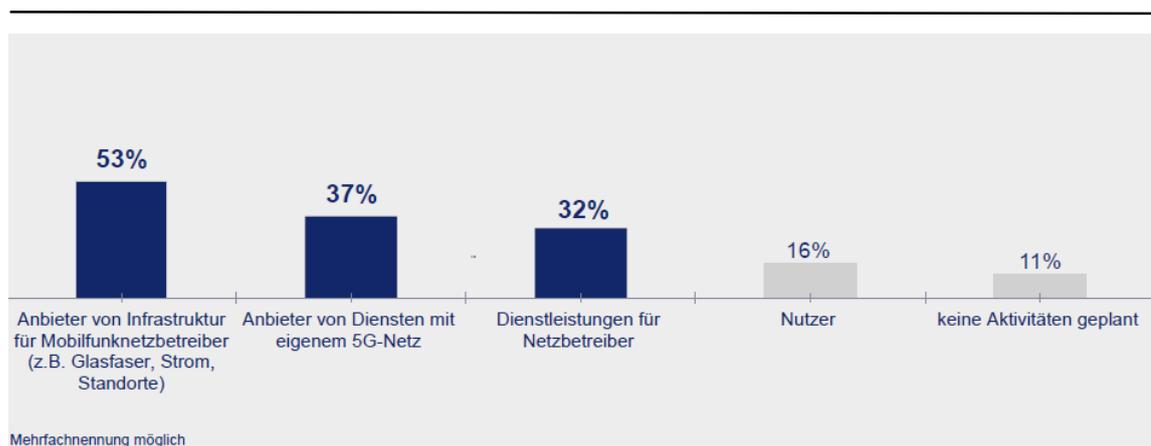
³⁵ Sörries et al. (2019).

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen werden im Folgenden die wichtigsten, spezifischen 5G-Anwendungen aufgeführt und erläutert, um daraus anschließend entsprechenden Bedarf an mobiler Kommunikation abzuleiten.

4.2 Nachfrage

Für die Energiewirtschaft ist zu konstatieren, dass verschiedene Anwendungsfälle als theoretische Möglichkeiten zum Einsatz von 5G existieren, die praktische Umsetzung in Deutschland unabhängig von der Kommunikationstechnologie aber noch in den Anfängen steht. Hinsichtlich 5G wird ein Geschäftsfeld von den meisten Energieversorgern auch weniger in der Anwendung für das eigene Unternehmen als vielmehr in der Bereitstellung von Infrastruktur für Mobilfunknetzbetreiber und dem Aufbau und Betrieb von 5G-Netzen für Dritte gesehen (vgl. Abbildung 7).

Abbildung 7: Rolle der EVU im 5G-Markt



Quelle: Detecon (2019).

An dieser Stelle werden dennoch Anwendungsfälle aufgeführt, die in der Literatur diskutiert werden. Im Rahmen des **EU-Projektes NRG-5**³⁶ wurden drei verschiedenen Anwendungsfälle für die Energiewirtschaft identifiziert, die in Zukunft mit 5G realisiert werden könnten. Sie werden im Folgenden beschrieben und um ähnliche Ideen anderer Akteure ergänzt.

4.2.1 Realisierung einer dezentralen, vertrauenswürdigen Plug-&-Play-Infrastruktur

Hiermit ist die Bereitstellung einer Struktur gemeint, die eine einfache automatische Geräteidentifizierung in Echtzeit ermöglicht. In einem solchen Szenario sind die Smart-

³⁶ Vgl. Auch im Folgenden: <http://www.nrg5.eu>, insbesondere Santori et al. (2017).

Metering-Geräte der Hauptakteur, die ein weitaus komplexeres Profil aufweisen als heute. Sie bieten Dienste, die über das herkömmliche 15-Minuten-Reporting hinausgehen, einschließlich Unterstützung für Echtzeitmessungen und Infrastrukturautomatisierung.³⁷

Dieser Anwendungsfall richtet sich auf:

- „Massive Machine-Type Communication“ (mMTC) über die große Anzahl intelligenter Zähler und
- „Ultra-Reliability Machine-Type Communication“ (uMTC) bzw. „Ultra-Reliable Low-Latency Communication“ (URLLC), da die meisten „Virtual Network Functions“ (VNFs) eine Echtzeitsteuerung der Smart-Energy-Dienste erfordern.

Der Aufbau **lokaler Netzwerke** basiert im Wesentlichen aus den Konsequenzen der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Entwicklung hin zu einer Dezentralisierung des Energiesystems. Aus Sicht der EUTC³⁸ bedarf es daher einer Ausstattung auch in den unteren Netzebenen mit Telekommunikationsinfrastruktur, die die dynamische Steuerung von Erzeugern, Lasten und Speichern ermöglicht. Hierzu sind Kommunikationsverbindungen in lokalen und regionalen Strukturen mit sehr geringer Latenz notwendig. Auch die direkte Interaktion zwischen Verbrauchern und Produzenten ohne Nutzung der Kerninfrastruktur des 5G-Netzes muss gewährleistet sein (Device-2-Device-Communication). Zu diesem Zweck werden sowohl Mechanismen für Peer-to-Peer-Kommunikation (Unicast) als auch für Massenkommunikation (Broadcast) eingesetzt.

„Infolge der Verlagerung von Erzeugung, Speicherung und Nachfrage in die Verteilungsnetze muss das Konzept des Starts des Energienetzes nach einem Blackout angepasst werden. [...] Die einzige Möglichkeit, das Energienetz [zukünftig] schwarz zu starten, besteht darin, die EE-Anlagen und die dezentralen Energiespeicher in den Verteilungsnetzen zu nutzen. Infolgedessen muss es möglich sein, lokale und regionale Energienetze unabhängig vom Übertragungsnetz zu betreiben. Die Koordination und Bilanzierung dieser lokalen Energienetze ist nur möglich, wenn alle Teilnehmer miteinander kommunizieren und eine Kommunikation mit einer lokalen Steuerungsinstanz haben. Darüber hinaus müssen im Falle eines Inselbetriebs die Marktmechanismen verschoben werden. Die lokale Kommunikation muss verfügbar sein, auch wenn das Backbone-Netzwerk des Telekommunikationsanbieters nicht verfügbar ist.“

5G-Technologien mit folgenden Funktionen können diesen Ansatz erleichtern:

- *Device-2-Device-Kommunikation*
- *Netzwerk-Slicing*
- *Extrem niedrige Latenz*

*massive M2M*³⁹

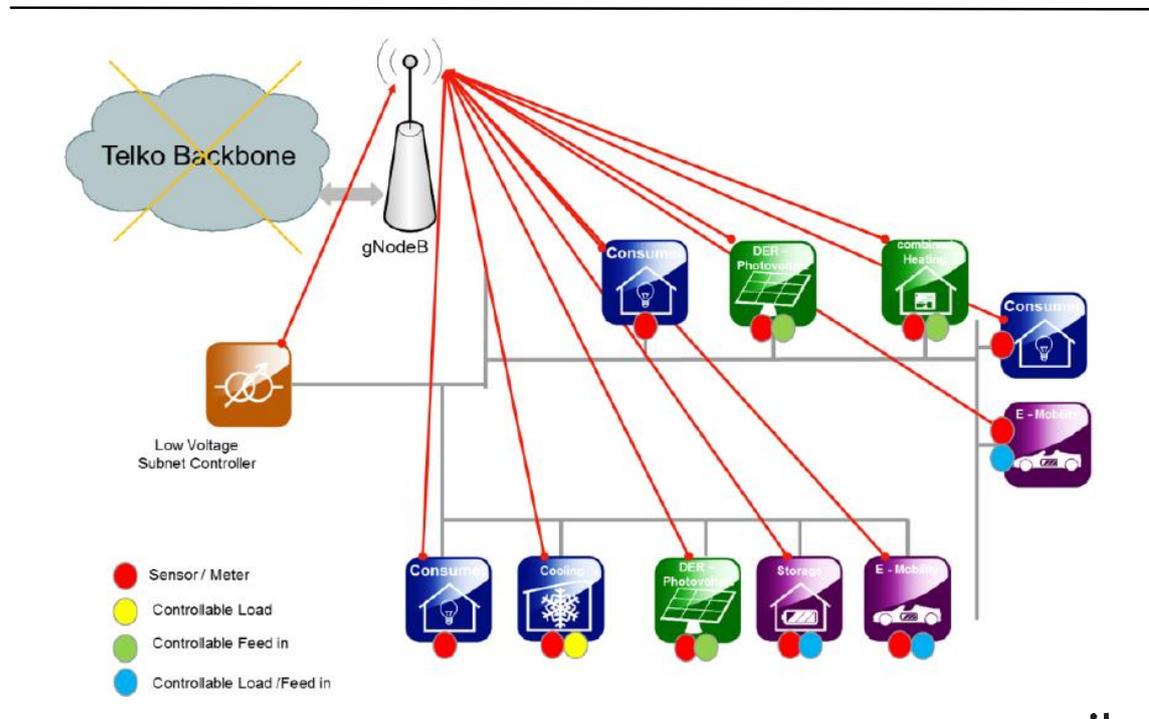
³⁷ Santori et al. (2017).

³⁸ Vgl. im Folgenden: EUTC (2017).

³⁹ EUTC (2017), Übersetzung aus dem Englischen.

Abbildung 8 stellt ein solches Netz schematisch dar.

Abbildung 8: Lokales Energienetz



Quelle: EUTC (2017).

4.2.2 Ermöglichung vorausschauender Wartung aus der Luft

Die 5G-basierte vorausschauende Wartung mit geringer Verzögerungszeit kann wesentlich zu einem effizienteren Betrieb, Vermeidung von Unfällen und der schnellen Wiederherstellung von Energienetzen beitragen, was zu geringeren Wartungskosten und einer Erhöhung der Versorgungsqualität führt, die den Bürgern von den Versorgungsunternehmen geboten wird.⁴⁰

Dieser Anwendungsfall adressiert:

- „Massive Broadband“ (xMBB) / „Enhanced Mobile Broadband“ (eMBB)-Kommunikation über die vMPA⁴¹-VNF für das Video-Streaming von den Drohnen zum „Extended Mobile Edge Computing“ (xMEC) und zur Versorgungsleitstelle und
- uMTC- / URLLC-Kommunikation über die „Virtual Drone Flight Control“ (vDFC) VNF zur Steuerung des Flugs von Drohnen.

⁴⁰ Santori et al. (2017).

⁴¹ vMPA: virtual Media Processing & Analysis

Die Drohnen sind mit Wärme- bzw. HD-Bildaufnahme und GPS ausgestattet.⁴² Sie können im Rahmen regelmäßiger Inspektionen über im Vorhinein ausgewiesene Flächen mit kritischer Infrastruktur fliegen, bei konkreten Ereignissen oder in nicht oder schwer zugänglichen Gebieten. Die Vorteile liegen in der sehr geringen Latenz zur Flugsteuerung und der Möglichkeit, Bilder in HD-Qualität zu übertragen.

4.2.3 Ausfallsicherheit und Hochverfügbarkeit durch steuerbare Erzeuger und Verbraucher (DDR⁴³)

Die Stabilität und Belastbarkeit des Energienetzes bei einem hohen Anteil an erneuerbaren Energien hängen in hohem Maße von der schnellen Reaktion ab. Da die meisten Speicher nicht vor Ort verfügbar sind, ist eine kurze Reaktion des Kontrollzentrums von entscheidender Bedeutung. Die Aktivierung von DDR in großem Maßstab erfordert extreme Kommunikationsanforderungen (für die heutigen Standards), da die Messung und die damit verbundenen Rechenprozesse mit sehr hohen Frequenzen durchgeführt werden sollten.⁴⁴

Dieser Anwendungsfall adressiert:

- mMTC-Kommunikation über die große Anzahl von EE-, Verbrauchs- und Kontrolleinheiten und
- uMTC- / URLLC-Kommunikation, da die meisten VNFs eine Echtzeitsteuerung der intelligenten Energieservices erfordern.

Dieser Anwendungsfall betrifft somit auch die Realisierung eines Flexibilitätsmanagements.⁴⁵ Um langfristig eine hohe Versorgungsqualität gewährleisten zu können, müssen EE und Verbraucher vom Verteilnetzbetreiber gesteuert werden können. Um die Rolle zu erfüllen, entwickelt der Verteilnetzbetreiber sein SCADA⁴⁶ zu verteilten Verwaltungssystemen weiter, die eine weitere Erfassung und verteilte Automatisierung erfordern. Strenge Steuerungs- und Überwachungsfunktionen, Konnektivitätsdienste unter 10 ms Round-Trip-Time (RTT) und eine Verfügbarkeit von mehr als 99,99 % sowie Funktionen zur Fehlerlokalisierung charakterisieren solch ein System.

⁴² Vgl. im Folgenden: Sánchez et al. (2018).

⁴³ Dispatchable Demand Reponse.

⁴⁴ Santori et al. (2017).

⁴⁵ Vgl. im Folgenden: EUTC (2017).

⁴⁶ „Aufsichtskontrolle und Datenerfassung (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) bezieht sich auf industrielle Kontrollsysteme (ICS), die zur Kontrolle und Überwachung von Geräten oder Anlagen in Branchen wie Wasser- und Abfallkontrolle, Telekommunikation, Energie, Verkehr sowie Öl- und Gasraffination eingesetzt werden. SCADA ist ein Computersystem zur Erfassung und Analyse von Echtzeitdaten.“ (<https://www.techopedia.com/definition/158/supervisory-control-and-data-acquisition-scada>, übersetzt aus dem Englischen).

4.2.4 Aufbau lokaler 5G-Netze in Umspannwerken

Ein weiterer Anwendungsfall betrifft die Umspannwerke im Stromsektor. Umspannwerke haben die Aufgabe die Spannung auf eine niedrigere Spannungsebene zu transformieren. Sie sind üblicherweise ab der Mittelspannung aufwärts installiert.

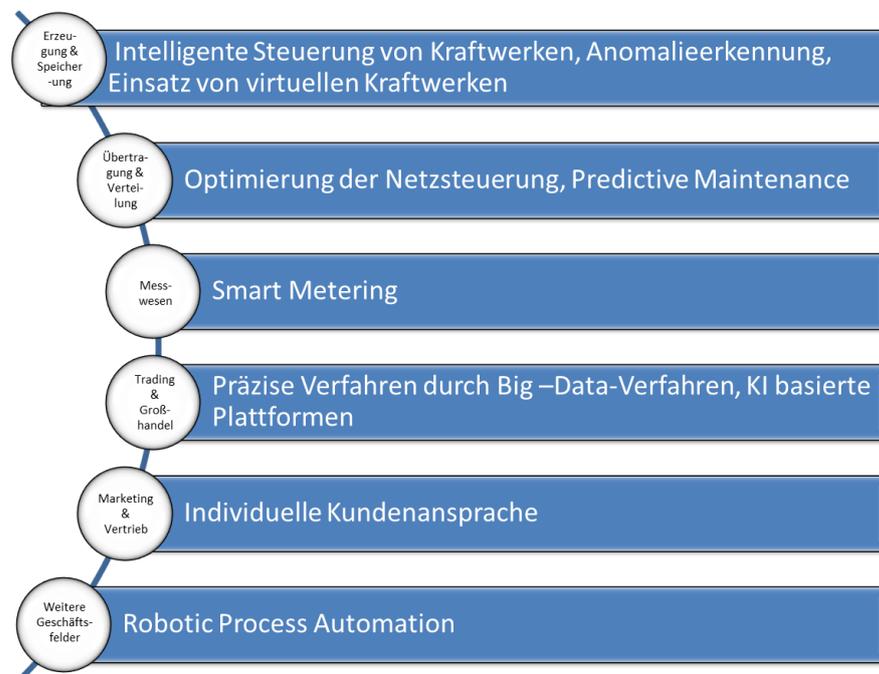
Um die Prozesse innerhalb der Umspannwerke zu optimieren, ist der Aufbau eines lokalen 5G-Netzes denkbar. Damit ließen sich z. B. durch die Übermittlung von Schaltplänen oder Arbeitsanweisungen in Echtzeit Kosten einsparen. Der Personaleinsatz könnte entsprechend reduziert und Effizienzpotenziale gehoben werden.

4.2.5 Künstliche Intelligenz

Im Bereich der **Künstlichen Intelligenz** existieren erste Ansätze zur Erforschung der Einsatzmöglichkeiten. Weigelin et al. (2018) sehen hier Potenziale in verschiedenen Bereichen der energiewirtschaftlichen Wertschöpfungsstufen.

Abbildung 9 gibt einen Überblick.

Abbildung 9: Potenzielle Einsatzstellen von KI in der Energiewirtschaft



Im Bereich der **Erzeugung** können Kraftwerke durch KI effizient gefahren werden. Bereits umgesetzt ist eine intelligente Steuerung von Gasturbinen durch die Firma Siemens⁴⁷. Die kontinuierliche Feinabstimmung der Verbrennungsventile optimiert den Betrieb der Gasturbinen hinsichtlich Emissionen und Verschleiß, indem ständig in Echtzeit nach der besten Einstellung gesucht wurde.⁴⁸

Im Bereich der **Netze** existieren bereits verschiedene Ansätze und Projekte. Hier besteht die Aufgabe darin, die durch die Digitalisierung des Messwesens anfallenden Daten so zu nutzen, dass insbesondere in den Verteilnetzen die in Abschnitt 4.1 beschriebenen Problematiken gelöst werden können. Das bedeutet, dass die Daten selbst, die in nie dagewesenen Datenmengen entstehen, durch KI aufbereitet werden können, um sie besser nutzbar zu machen.⁴⁹ *„In einem zweiten Schritt wurden die PMU-Messwert[e] verwendet, um Abweichungen vom normalen Netzbetrieb (Anomalieerkennung) zu erkennen, sowie bestimmte Betriebsstörungen (Fehlererkennung) in Echtzeit zu identifizieren. Hierbei werden Verfahren aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz zur automatischen Auswertung der Messwerte eingesetzt.“*⁵⁰

Im Projekt „PrognoNetz“⁵¹ soll mit Hilfe von KI die Kapazität in den Freileitungen erhöht werden. Dazu soll ein flächendeckendes Netzwerk von Sensoren in der Nähe der Leitungen aufgebaut werden, das die Umgebung meteorologisch erfasst. Auf Grundlage der gemessenen, historischen Daten kann ein Algorithmus eingesetzt werden, der für jede Leitung die Belastbarkeit prognostiziert.⁵²

Im Bereich des **Messwesens** können auf Grundlage der Daten aus intelligenten Zählern neue Dienstleistungen für Energieversorger und Endkunden entstehen. Hier gibt es bereits Angebote am Markt, wie beispielsweise zeitvariable Tarife optimal ermittelt oder die Rentabilität der individuellen Kundenverbräuche analysiert werden können.⁵³ Diese Berechnungen basieren auf KI.

Im **Handel** können neben dem Einsatz von Algorithmen beim Kauf und Verkauf von Rohstoffen auch plattformbasierte Lösungen durch KI effizienter gestaltet werden. Hier kann im Zusammenspiel mit der Blockchaintechnologie durch KI dafür gesorgt werden, dass die Verbraucher immer den günstigsten Marktpreis erhalten und nur so viel Energie beziehen wie nötig.⁵⁴ Eine solche Lösung bietet beispielsweise das Unternehmen „Electrify“ auf dem asiatischen Markt an.⁵⁵

Im Bereich **Vertrieb** können Daten aus verschiedenen Quellen (Smart Meter, Wetter, Wechselhistorie des Kunden etc.) genutzt werden, um das individuelle Kundenverhalten

⁴⁷ Siemens (2017).

⁴⁸ Siemens (2017).

⁴⁹ Fraunhofer IOSB (2019).

⁵⁰ Fraunhofer IOSB (2019).

⁵¹ Vgl. <https://www.itiv.kit.edu/6518.php>.

⁵² Vgl. <https://www.itiv.kit.edu/6518.php>.

⁵³ Vgl. beispielweise <https://smapenergy.com/our-product/>.

⁵⁴ Blockchainwelt (2018).

⁵⁵ Vgl. <https://electrify.asia/#home>.

mit Hilfe von KI zu analysieren bzw. zu prognostizieren. Darauf basierend können z. B. individuelle Angebote erstellt oder das Wechselrisiko eingeschätzt werden.

Schließlich können durch KI **unternehmensinterne Prozesse** effizienter gestaltet werden, insbesondere in den Bereichen Zählerdatenverarbeitung, Backoffice (Kandidatenmanagement, Zahlungsverkehr) und Frontoffice (Individualisierter Verkauf von Zusatzleistungen, Beantwortung von Standardkundenanfragen).⁵⁶

Inwiefern KI den Rückgriff auf 5G-Konnektivität benötigt, ist derzeit noch unklar. Die heutigen KI-Anwendungen erfordern noch keinen Einsatz von 5G-Funknetzen. Eines ist aber sicher: Es wird Konnektivität zu Millionen von Endpunkten in der Fläche für marktliche und kritische Anwendungen benötigt.

4.3 Technische Entwicklungen

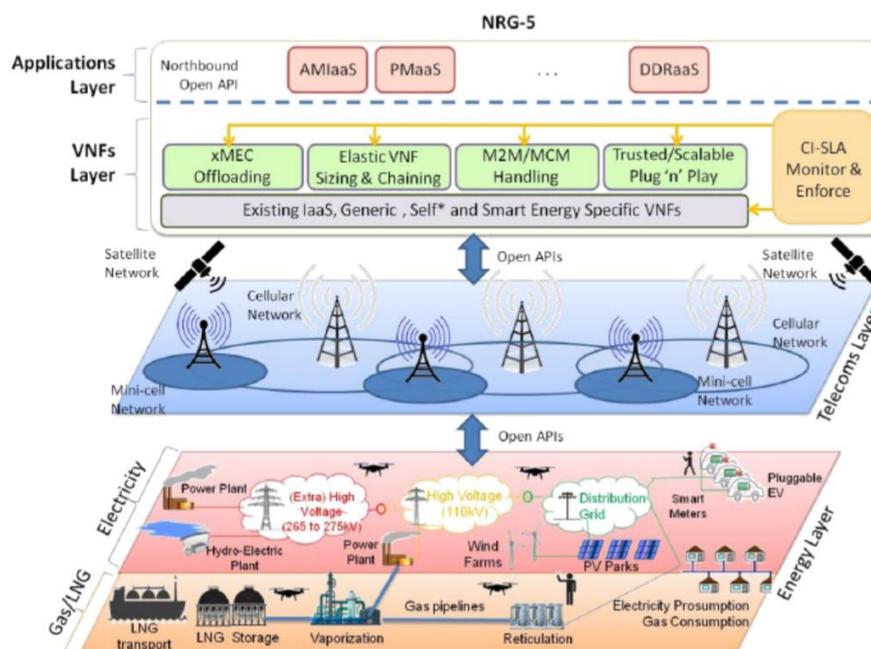
Tatsächliche Erfahrungen mit 5G in der Energiewirtschaft existieren nach unserem Kenntnisstand noch nicht. Deswegen werden an dieser Stelle zunächst erste Überlegungen aus dem Forschungsprojekt NRG-5 berichtet.

In Abbildung 10 wird auf der unteren Ebene die Smart-Energy-Schicht (Strom und Gas) gezeigt, die sich aus verschiedenen Energieinfrastruktur-Assets zusammensetzt.⁵⁷

⁵⁶ Weigelin et al. (2018).

⁵⁷ NRG-5 (2019).

Abbildung 10: 5G-Architektur für die Energiewirtschaft



Quelle: NRG5 (2019).

Darüber liegt die Telekommunikationsschicht. Sie besteht aus zellularen Netzwerken, Minizellen-IoT und Satellitenkommunikation. Hier kann 5G umgesetzt werden, indem Energie und-Kommunikationsinfrastruktur zusammenwachsen. ⁵⁸

Das NRG-5-Rahmenwerk beinhaltet sowohl Hardware als auch Software in standardisierter Form. Sie kann als eine Vielzahl von energiespezifischen VNFs angesehen werden. ⁵⁹

„Auf der höheren Ebene führt NRG-5-Mechanismen für das xMEC-Offloading (Mobile Edge Computing), die elastische Dimensionierung und Verkettung von VNF, die Machine-to-Machine- und Machine-Cloud-Machine-Kommunikation (M2M / MCM) sowie Trusted / Scalable Plug 'n' Play ein. Diese Aktivitäten werden durch einen Service-Level-Agreement-Mechanismus für kritische Infrastrukturen koordiniert und überwacht, bei dem es sich um eine Überwachungs- und Durchsetzungsinstanz wie Open Source MANO (OSM) handelt. Als Proof-of-Concept betrachtet NRG-5 viele neuartige Utility-Funktionen, die nach dem "X as a Service" -Ansatz angeboten werden, getrennt durch eine Open Northbound API (NBI).“⁶⁰

⁵⁸ NRG-5 (2019).

⁵⁹ NRG-5 (2019).

⁶⁰ NRG-5 (2019), übersetzt aus dem Englischen.

4.4 Zwischenfazit Energiewirtschaft

Da konkrete Umsetzungen von 5G noch nicht stattfinden, existieren noch keine Erfahrungen mit dem neuen Standard. Die Energiewirtschaft ist hier aufgrund ihres geografisch weiträumigen Anwendungsgebietes weniger Treiber als vielmehr Nutzer der Technologie im Rahmen der gesamtwirtschaftlichen Ausbringung. Ausnahme bildet die lokale Nutzung z. B. in Umspannwerken.

Perspektivisch könnte 5G durch seine Architektur mit dezentraler Rechenkapazität (Edge-Cloud-Computing) die Dezentralität der Energieerzeugung adressieren. Nicht nur die Erzeugung wird dann dezentral, sondern auch der Betrieb und das Management der Einspeisung, des Verbrauchs und ggf. der Netzführung. Aktuell geht es aber weniger um den Einsatz einer neuen Technologie, sondern vielmehr darum, dass die Energiewirtschaft ein dediziertes Funknetz nutzen kann, dass den regulatorischen und technischen Anforderungen des Energiebereichs genügt. Für Verteilnetzbetreiber und Messstellenbetreiber, die kritische Infrastrukturen betreiben, sind aktuell keine Frequenzen im Frequenzplan reserviert, deren Einsatz überhaupt erst das notwendige Angebot an Telekommunikationsdiensten ermöglicht.

5 Landwirtschaft

5.1 Ausgangslage

Grundsätzlich ist „die Absicherung einer ausreichenden Versorgung der Bevölkerung mit Nahrungsmitteln [...] ein wesentlicher Bestandteil der staatlichen Daseinsvorsorge. Dies gilt insbesondere auch dann, wenn auf Grund von Versorgungsstörungen das gewohnte, reichhaltige Angebot an Nahrungsmitteln nicht mehr zur Verfügung steht.“⁶¹

Die Landwirtschaft sieht sich in diesem Zusammenhang neben der Versorgung einer wachsenden Weltbevölkerung auch zunehmenden Anforderungen bezüglich des Umwelt- und Klimaschutzes gegenüber. Dabei gilt es, den besonderen Herausforderungen durch die erratischen Prozesse innerhalb der Natur (Wetter, Biologie) zu begegnen.⁶²

Die Landwirtschaft zeichnet sich weiterhin durch eine im Zeitablauf ansteigende Produktivität aus. Dies drückt sich z. B. im Verhältnis der zu ernährenden Menschen zur Zahl der Landwirte aus, wie Abbildung 11 zeigt.

Abbildung 11: Landwirte und zu ernährende Bevölkerung.



Quelle: BZL.

Die Digitalisierung bietet neue Chancen, diese Entwicklung fortzuführen und gleichzeitig Fragen des Umweltschutzes zu berücksichtigen. Unter dem Schlagwort „Digital Far-

⁶¹ BLE (o.D.).

⁶² DLG (2018).

ming“ oder „Smart Farming“ werden Anwendungen zusammengefasst, die durch den Einsatz von modernen Technologien wie Robotik, Sensoren oder Datenanalyse eintönige, wiederkehrende Arbeiten zu kontinuierlich automatisierten Prozessen umgestalten können.⁶³ Gleichzeitig kann damit ein nachhaltiger, ressourcen- und klimaschonender Pfad beschritten werden. Das Interesse an Digital Farming und entsprechenden Anwendungen in der Landwirtschaft ist groß. Bereits 53 % der landwirtschaftlichen Betriebe haben digitale Anwendungen im Einsatz. Weitere 6 % haben diese geplant und 24 % diskutiert. Nur für 16 % sind sie kein Thema. Insgesamt 66 % sehen die Digitalisierung als Chance, nur 13 % als Risiko während 19 % keinerlei Einfluss sehen.⁶⁴

Pilotversuche mit 5G existieren in Deutschland bisher nicht. Es gibt aber z. B. Ansätze bzw. Projektskizzen, die sich mit der Frage beschäftigen, inwiefern sich moderne Kommunikationstechnologien zur Lösung des Zielkonflikts zwischen einer Reduktion des Düngemittleinsatzes bei gleichzeitiger Begrenzung des Flächenverbrauchs eignen.

Im Hinblick auf die Kommunikationsinfrastruktur werden derzeit im Wesentlichen LTE in der Fläche (Felder) und WLAN in Gebäuden (Ställe) eingesetzt. Ein Problem dabei ist, dass LTE heute nicht flächendeckend zur Verfügung steht, in vielen ländlichen Bereichen gar nicht.⁶⁵

Heute sind in landwirtschaftlichen Maschinen häufig drei SIM-Karten integriert, um die Konnektivität zu erhöhen. Für zeitkritische Kommunikation garantiert LTE nicht die erforderlichen Latenz-Zeiten, die z. B. für autonom agierende Maschinen oder Maschinenschwärme essentiell wichtig sind. WLAN ist im landwirtschaftlichen Maßstab daher de facto eine reine Indoor-Lösung, und damit eine Insellösung.

Bei LTE ist ferner zu berücksichtigen, dass alle Daten über Provider-Netze transportiert werden, was bei 5G nicht zwangsläufig der Fall sein muss, da dort die Daten auch lokal gehalten und verarbeitet werden können. Gerade die Frage der Datenhoheit ist oft der Grund für die Ablehnung moderner Technologien durch die Landwirte.

5.2 Nachfrage

Die Anwendungen, die durch die Digitalisierung im Bereich Landwirtschaft möglich werden, sind vielfältig. Generell können Anwendungen aus dem Bereich „Digital Farming“ in drei Untergruppen unterteilt werden. Abbildung 12 unterscheidet dabei zwischen Bereichen der Pflanzenproduktion, Tierhaltungsverfahren und anderen Prozessen entlang der Wertschöpfungskette im Lebensmittelbereich.

⁶³ Shamshiri et al. (2018).

⁶⁴ Bitkom (2016) Digitalisierung in der Landwirtschaft

⁶⁵ WIK-Consult und umlaut (2019).

Abbildung 12: „Digital Farming“



Quelle: VDMA (2018)

Bei den Anwendungen, die spezifische 5G-Konnektivität erfordern, kommt es sowohl darauf an, wie der Datenaustausch stattfinden soll als auch auf die Reichweite, welche die Anwendung erfordert.

5.2.1 Unkrautbekämpfung

Zunächst können durch Feldroboter eine Reihe von Tätigkeiten durchgeführt werden. Hier sind zunächst Unkrautbekämpfung und gezieltes Spritzen zu nennen. Hierdurch konnte der Herbizideinsatz bereits um 5 bis 10 % gesenkt werden.⁶⁶ Dabei kommen unterschiedliche Technologien zum Einsatz, beispielsweise eine Maschine, die breitblättriges Unkraut in Getreidefeldern anhand von Bildaufnahmen identifiziert, indem Sie Form und Farbe erkennt.⁶⁷ Durch das Erkennen der Biomasse bestimmter Pflanzen (z. B. Kartoffeln) kann ein genau dosierter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln erfolgen.⁶⁸ Diese Aufgabe kann zukünftig auch durch den Einsatz von Drohnen ausgeführt werden.⁶⁹

Für die beschriebene Schädlingsbekämpfung über Bildaufnahmen stehen bereits Geräte zur Anwendung bereit. So existieren Spritzmaschinen mit 100 Düsen in Kombination mit ebenso vielen Kameras. Dabei wird die Pflanze und deren Zustand, ob krank oder gesund, in Echtzeit über KI erkannt. Dazu werden alle 10 Zentimeter Bilder aufgenommen, wobei diese auf die erforderlichen Merkmale reduziert werden, um das Datenvolumen zu reduzieren. An jeder Düse sind drei Flüssigkeiten angebracht, die je nach Zustand der Pflanze eingesetzt werden können. Damit die Daten direkt verarbeitet werden können, wird eine Edge-Cloud eingesetzt. Eine vergleichbare Anwendung ist auch zur Düngung von Pflanzen vorstellbar.

⁶⁶ Midtiby et al. (2011).

⁶⁷ Perez et al. (2000).

⁶⁸ BMEL (2016).

⁶⁹ DFKI Competence Center (o.D.).

Vorstellbar sind auch Sensornetzwerke mit massiv vielen Einzelkomponenten und der schnelle Aufbau von Ad-hoc-Netzwerken. Durch eine teilflächenspezifische Bewirtschaftung erfolgt somit eine schonende und ressourcenschonende Landwirtschaft. Des Weiteren können Maschinen durch KI auch lernen, Nutzpflanzen von Beikräutern zu unterscheiden, was im Pflanzenschutz schonenden Methoden erlauben würde.

Der niederländische Kommunikationsanbieter KPN hat eine 5G-Anwendung auf einer Testfarm in Valthermond in Drenthe getestet. Der Test verwendete eine Kameradrohne für den Kartoffelanbau, die sehr genaue Bilder des Feldes lieferte. Die Bilder wurden über eine mobile Verbindung verarbeitet und an eine Maschine gesendet, die dann nahezu in Echtzeit und mit sehr genauer Dosierung Pflanzenschutzmittel auf die Pflanzen aufbrachte.⁷⁰

Dank der mobilen Verbindung mit 5G-Eigenschaften konnten große Dateien sofort versendet und in einer Auftragskarte für die Landmaschine verarbeitet werden. Der Vorgang erforderte viel Bandbreite beim Upload, für die die aktuellen 4G-Netze nicht ausreichend sind.

5.2.2 Überwachung

Weiterhin können Roboter zur Beobachtung und Datengewinnung eingesetzt werden. So kann z. B. mit Hilfe von Sensorik und KI die Gesundheit der Pflanzen überwacht werden. Es können beispielsweise in Weinstöcken Daten über Wachstum, Nährstoffbedarf und Traubenzusammensetzung in Echtzeit gesendet werden.⁷¹

In Großbritannien laufen im Rahmen der Initiative „5G Rural First“⁷² verschiedene Pilotprojekte zur Nutzung von 5G in der Landwirtschaft. In Somerset wurde eine Rinderherde auf einer Milchviehfarm mit 5G-Halsbändern ausgestattet, die Informationen über die Gesundheit und das Verhalten der Tiere an eine App übermitteln. Die Landwirte können die Informationen somit sofort einsehen und an Tierärzte oder Ernährungswissenschaftler weitergeben. Die Technologie wird auch zum automatischen Melken und Füttern verwendet.

Darüber hinaus sind, vergleichbar zur Industrie, auch Anwendungen wie vorausschauende Wartung von Landmaschinen oder Fernwartung vorstellbar. Die ganzheitliche Überwachung kann mithilfe von Farming-Systemen erfolgen. Bisher nutzen etwa 15 % der Landwirte solche Systeme.

⁷⁰ <https://overons.kpn/en/news/2018/kpn-tests-5g-applications-for-precision-farming-in-drenthe>

⁷¹ EU Kommission (2017).

⁷² Vgl. <https://www.5gruralfirst.org>.

5.2.3 Ernte

Schließlich kann auch die Ernte automatisiert erfolgen. Um die Wirtschaftlichkeit zu gewährleisten, müssen Ernteroboter effizienter arbeiten als menschliche Arbeitskräfte. Dies drückt sich vor allen Dingen in der Zeit pro geerntetem Stück Obst oder Gemüse aus. Hier ist die menschliche Arbeitskraft derzeit noch weitgehend überlegen und eine technische Weiterentwicklung z. B. durch maschinelle Lernalgorithmen notwendig, um die Ernte durch Roboter zu realisieren.⁷³

In Shropshire in Großbritannien wird ein Hektar Land autonom von Maschinen bewirtschaftet („Hands Free Hectare“). Es existiert ein „Mission Control Van“-Kontrollzentrum neben dem Feld, das eine Drohne und einen Traktor auf dem Feld autonom bedient. Der „Mission Control Van“ wird derzeit durch eine kleine Windkraftanlage versorgt, die sich ebenfalls neben dem Feld befindet. „Hands Free Hectare“ verwendet derzeit eine Kombination von Funkgeräten (z. B. 433 MHz, 2,6 GHz und 5,6 GHz), damit Traktor und Drohne autonom arbeiten können.

Für die Nutzung autonomer Maschinen, wie z. B. für die Ernte, ist eine durchgängige Abdeckung auf dem Feld erforderlich. Daher reicht es für diesen Anwendungsfall auch nicht, dass nur am Rande des Feldes ausreichend Konnektivität gegeben ist. Im Gegensatz zur Erfassung von Daten auf dem Feld, die auch mit zeitlicher Verzögerung erfolgen kann, spielt eine niedrige Latenzzeit, die 5G verspricht, für autonome Fahrzeuge auf dem Feld eine entscheidende Rolle. Autonome Fahrzeuge haben zudem den Vorteil, dass die Sicherheit erhöht wird und kontrollierte Arbeitsprozesse realisiert werden.

5.2.4 Tierhaltung

Im Bereich der Tierhaltung existieren ebenfalls verschiedene Anwendungen, so z. B. „Melkroboter, sensorgestützte Abruffütterungen oder automatische Fütterungssysteme“.⁷⁴ Des Weiteren kann eine ständige Beobachtung der einzelnen Tiere erfolgen. Mit den erhobenen Daten über den Zustand der Tiere können mittels Algorithmen und selbstlernender Systeme Prognosen über den Gesundheitszustand der Tiere erstellt werden. So ist vorstellbar, dass Systeme individuelle Verhaltensprofile von Tieren anlegen und bei Abweichungen über die Entscheidung des Landwirts, ob ein Verhalten auffällig ist oder nicht, lernen, Auffälligkeiten und normales Verhalten sicher zu unterscheiden. Letztlich könnte das System jederzeit für jedes Tier zielsicher bestimmen, ob eine Intervention nötig ist, oder nicht.

⁷³ Shamshiri et al. (2018).

⁷⁴ Deutscher Bauernverband (2016).

5.3 Technische Entwicklungen

Viele der beschriebenen Anwendungen existieren bereits heute, würden durch die Nutzung von 5G aber erleichtert bzw. verbessert. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Zahl der Sensoren bzw. die Daten, die über die Sensoren gesendet werden, wachsen, Echtzeitanforderungen zunehmen und sichere Konnektivität benötigt wird.⁷⁵

Andere Anwendungen werden erst durch 5G realisierbar. So können Ad-hoc-Netzwerke zwischen den einzelnen Endgeräten gebildet werden (d. h. die Kommunikation läuft gar nicht zwingend über einen Funkmast, bzw. kann ein Endgerät mit Verbindung zum Funkmast die Kommunikation zu einem Endgerät ohne Verbindung zum Funkmast weiterleiten, wie in Mesh-Netzen), die Datenraten zu den Endgeräten können bedarfsorientiert verändert werden (Slicing), oder die Funkwellenausbreitung des Funkturms kann dem räumlichen Bedarf angepasst werden (Beamforming).

Beamforming zählt zu den Schlüsseltechnologien des 5G-Standards. Die Technologie an sich wurde jedoch auch bereits bei WLAN eingesetzt. Dabei wird das Signal nicht mehr in alle Richtungen gleichermaßen geschickt, sondern gebündelt und gezielt auf einen Punkt gesendet. Dadurch kommt das Signal beim Endgerät stärker und stabiler an.⁷⁶

Es zeichnen sich Anwendungsfelder ab, in denen Datenkommunikation via 5G (z. B. Machine-to-Machine-Kommunikation mit Echtzeitanforderungen) nötig ist, z. B. Schwarmtechnologien. Ein zweites Feld ist die Dezentralisierung der Datenströme. Derzeit müssen alle mobilen Daten in das Core-Netz des Providers und fließen von da aus wieder zurück zum Anwender. 5G hat das Potential, Datenströme lokal zu halten.

Hinsichtlich 5G-Modems zur Datenübertragung ist der Markt noch überschaubar – wahrscheinlich wird es erst Mitte 2020 kommerziell verfügbare 5G-Modem-Technik geben. Bezüglich KI baut diese in der Landwirtschaft wie in allen anderen Bereichen darauf auf, aus erhobenen Daten mittels Algorithmen Schlüsse zu ziehen und Prozesse stetig zu verbessern. Dadurch können die oben beschriebenen Anwendungsfälle effizienter und effektiver werden. Dazu ist ein Farm-Management-System zu installieren, in dem die Daten aus den Sensoren und externen Quellen (z. B. Wetterdaten) eingehen und entsprechend ausgewertet werden.

Die Frage, ob KI besser zentral oder auf der Maschine angesiedelt ist, ist dagegen eher eine Frage der Aufgabenstellung hinsichtlich der Datenverarbeitung. Sowohl die Integration von KI im Netz, als auch im Gerät ist vorstellbar. Für die konkrete Anwendung auf der Fläche wird KI hingegen eher in der Maschine realisiert werden.

⁷⁵ DotEcon und Axon (2017).

⁷⁶ <https://www.5g-anbieter.info/technik/beamforming.html>

Hinsichtlich der Frequenzbedarfe sind diese im Allgemeinen gleichzusetzen mit Bandbreitenbedarfen. Aktuell sind die erforderlichen Bandbreiten nicht das Kernproblem in der Landwirtschaft. Es wird nicht überall erforderlich sein, HD-Videoinhalte live übertragen zu können. Entscheidend ist zunächst die Versorgung überhaupt, und die Möglichkeit, Geräte in der Fläche untereinander und mit der (Hof-)Cloud vernetzen zu können.

5.4 Zwischenfazit Landwirtschaft

In Deutschland stehen konkrete Projekte für Anwendungen mit 5G noch vor der Umsetzung. Eine tatsächliche Notwendigkeit zum Einsatz besteht zum Beispiel im Bereich selbstfahrender und sich koordinierender Fahrzeuge. Andere Anwendungen, auch in Verbindung mit KI, können durch 5G verbessert werden. Eine flächendeckende Abdeckung mit 4G wäre hier bereits ein wichtiger Schritt. Mit steigendem Datenvolumen auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, steigen dann auch die Anforderungen an die in der Fläche verfügbare Übertragungskapazität. Hier ist dann zu prüfen, ob und wie mit den Frequenzen unterhalb von 1 GHz entsprechende Kapazitäten bereitgestellt werden können.

Campus-Lizenzen sind möglicherweise für Großbetriebe von Interesse. Ein Erwerb zum Einsatz in der Fläche macht allerdings mit Frequenzen bei 3,6 GHz weniger Sinn, vielmehr sind diese Frequenzen für den Einsatz in den Gebäuden bzw. dem eigentlichen Wirtschaftsbetrieb vorstellbar. Interessant ist perspektivisch der Aufbau von Ad-hoc-Netzwerken für regelmäßig wiederkehrende Arbeiten, z. B. in Weinbergen, die aber keine durchgängige Konnektivität benötigen. Dadurch können auch neue Geschäftsmodelle entstehen, welche den Verleih von mobilen Systemen umfassen, die dann für nur wenige Tage bei Bedarf zur Verfügung gestellt werden. Ein Produkt „Ad-hoc-Netze für die Landwirtschaft“ ist aktuell allerdings nicht abbildbar. Sofern beispielsweise Traktoren mit entsprechenden Funktionalitäten am Markt angeboten werden, sind diese mit sehr hohen Kosten verbunden.

Gerade Anwendungen zur Düngung oder zum Pflanzenschutz können einen wichtigen Beitrag leisten, um für mehr Nachhaltigkeit und geringere Umweltbelastungen zu sorgen. Dazu gehört z. B. gezielteres Spritzen. Auch Probleme der Bodenverdichtung können verringert werden, wenn Fahrwege minimiert werden. Die dazu notwendige Auswertung von Kartenmaterial oder effiziente Steuerung ist allerdings schon heute, beispielsweise über GPS, möglich.

6 Geschäfts- und Betreibermodelle

Um die erforderliche 5G-Konnektivität der dargestellten Anwendungen in den drei Sektoren bereitzustellen, sind unterschiedliche Geschäftsmodelle vorstellbar. Diese betreffen zum Teil die öffentlichen Netzbetreiber selbst, es sind aber auch andere, neue Geschäftsmodelle denkbar. Bei der Bereitstellung der 5G-Konnektivität ist ebenso relevant, ob diese über ein öffentliches, ein privates Netz oder eine Kombination aus beidem zur Verfügung gestellt wird. Insgesamt zeichnen sich Geschäftsmodelle aktuell in erster Linie für die Industrie und darauffolgend für landwirtschaftliche Betriebe ab.

Das erste Modell umfasst den Aufbau eines eigenen 5G-Campus-Netzes mithilfe der Beantragung lokaler Frequenzen. Dazu stehen Frequenzen zwischen 3,7 GHz und 3,8 GHz zur Verfügung. Campus-Netze sollen vor allem die Datensicherheit der Unternehmen und die Verlässlichkeit (Verfügbarkeit) des Funknetzes sicherstellen. Dieses Modell ist insbesondere für große Industrieunternehmen relevant, die zum einen die wirtschaftlichen Möglichkeiten zum Aufbau und Betrieb von privaten Campus-Netzen haben und zum anderen von einer skalierbaren, an den spezifischen Anwendungen orientierten Kommunikationsinfrastruktur, wie sie über 5G realisiert werden kann, in besonderem Maße profitieren. Der Aufbau eines solchen Campus-Netzes kann entweder eigenständig oder auch im Auftrag durch einen Netzbetreiber oder Netzausrüster oder Aggregatoren erfolgen, die beispielsweise Kernnetze entwickeln, mit denen mehrere lokale 5G-Zugangsnetze gleichen Typs verbunden sind. Es wird geschätzt, dass in Deutschland etwa 2000 Unternehmen groß genug sind, um solche 5G-Campus-Netze aufzubauen.

Dass insbesondere mittelständische Unternehmen bei der Frage „Make or Buy“ hinsichtlich eines privaten, lokalen Campus-Netzes vor Herausforderungen stehen, erscheint wenig überraschend. Es müsste gute Gründe geben, entsprechende Ressourcen und das Know-how aufzubauen, was mit dem Kerngeschäft zunächst keine unmittelbare Verbindung hat. Ein Grund für „Buy“ könnte darin liegen, dass der Aufbau eines Kern-Netzes, in dem die Anwendungen realisiert werden, nicht wirtschaftlich ist. Die Kosten hierfür können für einen Einzelbetrieb recht hoch sein. Hier könnte eine Harmonisierung im Sinne eines gemeinsamen Kernnetzes mit anderen, vergleichbaren Betrieben sinnvoll sein. Aggregatoren könnten sich hier im Markt etablieren.

Die drei bestehenden öffentlichen Netzbetreiber bieten alle bereits Campus-Netzlösungen an und kooperieren dabei mit großen Industrieunternehmen sowie mit Netzausrüstern. Wie bereits dargestellt sind die Nachfrager vor allem Automobilunternehmen wie z. B. Daimler und Audi, oder große Industrieunternehmen wie OSRAM oder BASF, die bereits Pilotprojekte über den Aufbau von 5G-Campus-Netzen gestartet haben.

Vergleichbare Projekte gibt es in der Energie- und Landwirtschaft bislang nicht. Dennoch ist für Akteure aus der Landwirtschaft vorstellbar, dass sich perspektivisch land-

wirtschaftliche Betriebe im Rahmen einer Genossenschaft zusammenschließen, um gemeinsam eigene lokale 5G-Netze aufbauen zu lassen. Die bestehenden Anwendungsszenarien haben gezeigt, dass im landwirtschaftlichen Bereich eine hohe Nachfrage für funkbasierte Konnektivität besteht.

Neben Kooperationen, die Unternehmen mit den bestehenden Netzbetreibern zum Aufbau von 5G-Campus-Netzen bereits eingehen, besteht für Netzbetreiber ein weiteres potenzielles Geschäftsmodell bei den sogenannten „Dual-Slice“-Systemen. Damit ist die parallele oder überschneidende Nutzung von privaten und öffentlichen Netzen gemeint. Die Nachfrage nach einem solchen System besteht beispielsweise für FTS, die sowohl auf dem Betriebsgelände und damit dem eigenen Campus-Netz agieren, als auch Strecken zurücklegen müssen, die sich in einem öffentlichen Netz befinden.

Abgesehen von den großen Industrieunternehmen und gegebenenfalls großen landwirtschaftlichen Betrieben oder Genossenschaften ist davon auszugehen, dass der Großteil von Unternehmen, insbesondere im Mittelstand, zunächst keine 5G-Campus-Netze eigenständig aufbauen wird. Ggf. warten diese Unternehmen zunächst auf die Etablierung des relevanten Ecosystems. In der Zwischenzeit könnte es für die öffentlichen Netzbetreiber interessant sein, das Produkt Campus-Netz über die eigenen Frequenzen den entsprechenden Unternehmen und Betrieben unterschiedlichster Sektoren anzubieten. Dabei könnte die Basisinstallation durch das öffentliche Netz bereitgestellt werden, mit der Option über lokales Slicing auch private Funktionen zu nutzen. Zurzeit ist allerdings davon auszugehen, dass aufgrund einer geringen Verfügbarkeit von relevanter 5G-Hardware, sich diesbezügliche Überlegungen bei Angebot und Nachfrage erst noch in der Konzeptphase befinden.

Für landwirtschaftliche Anwendungen mit Bedarf an 5G-Konnektivität werden auch Ad-hoc-Netze diskutiert, die temporär eingesetzt werden könnten. Allerdings kann dies nur für ausgewählte Anwendungsfelder eine Option sein, da auch in der Landwirtschaft fortlaufende Netzverfügbarkeit gegeben sein muss. Dies hängt unter anderem mit der Vielzahl an Arbeitsschritten (ca. 20-30) zusammen, die landwirtschaftliche Betriebe über das Jahr vornehmen müssen. Eine ständige Neukonfiguration scheint daher aufwändig und schwer praktikabel.

Das dritte Modell betrifft voraussichtlich den Großteil aller verbleibenden Nachfrager der relevanten Sektoren, die nur für spezielle Anwendungen 5G-Konnektivität benötigen werden oder nur einzelne Anwendungsfälle mit 5G finanzieren können. Die dazu notwendigen Dienste werden durch die Netzbetreiber über die öffentlichen Netze mithilfe von Network-Slicing zur Verfügung gestellt. Dies ermöglicht zwar auch eine bedarfsgerechte Konnektivität, allerdings können bei der Nutzung über ein öffentliches Netz auch Probleme auftreten, welche bei den privaten Campus-Netzen verhindert werden.

Bei der industriellen Nutzung öffentlicher Netze kann es zu Problemen kommen, die in privaten Netzwerken in der Art nicht bestehen. So kann eine schwankende Netzauslas-

tung zu Jitter führen und Asynchronität zwischen Produktionseinheiten auslösen. Darüber hinaus ist nicht geklärt, wie die Haftung im Störfall geregelt ist. Insgesamt könnte über den öffentlichen Zugang das Sicherheitsrisiko erhöht werden, weshalb sich für den vielfältigen Einsatz von Sensoren, z. B. in der industriellen Produktion, zusätzliche Sicherheitsanforderungen ergeben könnten.

Grundsätzlich bedarf es, wie im Abschnitt 3 bereits angedeutet, eines entsprechenden Ecosystems für 5G. Für ein 5G-Ecosystem ist nicht nur das Netz zentral, sondern es existieren viele Einflussparameter (Sensorik, Software etc.). Nur wenn langfristig eine „Plug-and-Play“-Infrastruktur entwickelt wird und Wettbewerb in den verschiedenen Bereichen gegeben ist, wird sich 5G durchsetzen. Dies zeigen Erfahrungen mit der Vorläufertechnologie 4G.⁷⁷ Ein wesentlicher Schritt ist hierbei die Entwicklung entsprechender Chipsets. Es wird insbesondere zu beobachten sein, in welchen Bereichen 5G die bereits heute vorhandenen Narrowband-IoT-Lösungen ablösen wird.

⁷⁷ Meindl (2018).

7 Frequenzbedarfe und regulatorische Implikationen

In der jetzigen Phase, in der größtenteils noch Pilotprojekte für industrielle Anwendungen durchgeführt werden und entsprechende Hardware häufig noch nicht auf dem Markt ist, sind valide Aussagen über mittelfristige Frequenzbedarfe äußerst schwierig. Konkrete Beurteilungen können erst dann getätigt werden, wenn eine Vielzahl der Anwendungen mit Bedarf an 5G-Konnektivität tatsächlich im praktischen Einsatz sind. Dazu müssen noch entsprechende Standards (beispielsweise im Release 17) verabschiedet werden.

Dennoch wird bereits heute vereinzelt darüber diskutiert, ob die für lokale Zwecke in Aussicht gestellten 100-MHz-Frequenzbereiche für komplexe industrielle Produktionsbetriebe ausreichend sind und inwieweit der Bedarf für Industrieanwendungen insgesamt eher unterschätzt worden ist. Andere Industrieteilnehmer bestätigen hingegen den Eindruck, dass zu dieser frühen Phase keine fundierte Beurteilung über die Frequenzbedarfe möglich ist. Darüber hinaus bestehen für die Indoor-Versorgung, z. B. von Industriehallen, perspektivisch Bedarfe nach höheren Frequenzbereichen, wie etwa nach 26 GHz.

Viel wichtiger ist ohnehin zunächst, von Beginn an die verfügbaren Frequenzen möglichst effizient zu nutzen, um zukünftig steigenden Frequenzanforderungen besser gerecht werden zu können. Entscheidend ist ebenfalls, die in Aussicht gestellten lokalen Frequenzen zeitnah bereitzustellen, um mehr Anwendungen testen zu können.

Im Bereich der Energiewirtschaft wird aktuell über den Einsatz von 450-MHz-Frequenzen, d. h. über den Aufbau und Betrieb eines dedizierten Netzes diskutiert. Sofern es hier zum Einsatz dieser Frequenzen kommt, wäre es im Hinblick auf 5G zentral, in diesem Frequenzband weitere Frequenzen zur Verfügung zu stellen.

8 Fazit

Der neue Mobilfunkstandard 5G eröffnet in den betrachteten Wirtschaftsbereichen Industrie, Energie und Landwirtschaft neue Möglichkeiten des Angebots von Telekommunikationsdiensten. Er versetzt die Akteure in die Lage, auf die jeweiligen Herausforderungen der Digitalisierung in den Sektoren flexible Antworten zu finden. Dies basiert vor allen Dingen auf den verbesserten technischen Parametern im Bereich Zuverlässigkeit, Latenz und Datenübertragung. Zentral ist in allen Bereichen, dass auf exklusiv nutzbare Frequenzen zurückgegriffen werden muss. Ansonsten sind die hohen technischen und teilweise rechtlichen Anforderungen nicht umsetzbar.

Während sich in der Industrie bereits konkrete Anwendungsfelder herauskristallisieren und vereinzelt im Rahmen von Pilotprojekten schon umgesetzt werden, stehen die Bereiche Landwirtschaft und Energie in Deutschland noch am Beginn der Entwicklung. Ein Grund hierfür sind zum einen die relativ stabilen Umgebungsparameter der Industrie (z. B. gleiche Temperaturverhältnisse in einer Fabrikhalle, lokales Umfeld) im Vergleich etwa zur Landwirtschaft, wo sich die Verhältnisse stetig ändern und den Einsatz dort schwieriger gestalten. Dennoch liegt im Bereich der Landwirtschaft großes Potenzial, da viele Anwendungen durch 5G verbessert werden können und autonome Feldbewirtschaftung als ein wesentliches, neues Zukunftsfeld gesehen wird, das durch 5G wesentlich leichter umzusetzen ist.

Im Bereich der Energiewirtschaft besteht ein Bedarf an hochverfügbarer, resilienter Konnektivität. Hier wird aktuell diskutiert, ob dedizierte Frequenzen für Anwendungen der Energiewirtschaft bereitgestellt werden. Geschieht dies im Bereich 450 MHz, so kann dort perspektivisch auch 5G eingesetzt werden. Ansonsten können die hier tätigen Unternehmen mit den bestehenden Funktechnologien (LTE, LTE-M) sehr gut ihre Anwendungen umsetzen. 5G hat primär aus seiner dezentraleren Systemarchitektur eine Relevanz für Verteilnetzbetreiber oder Messstellenbetreiber.

Ein Treiber der Digitalisierung und von 5G wird der Aufbau von Campus-Netzen insbesondere in der Industrie sein. Durch die lokalen Frequenzen kann ein Wettbewerb um kostengünstigere Produktionsprozesse in Gang gesetzt werden, der mittel- bis langfristig die Wettbewerbsfähigkeit der Industrie befördert.

Auf technischer Ebene werden neue Ansätze wie Small Cells, Edge-Computing oder Beamforming entsprechend den einzelnen Anwendungsfällen eingesetzt werden. Eine generelle Aussage ist hier nicht zu treffen. Im Bereich der Landwirtschaft ist zum Einsatz untereinander kommunizierender Fahrzeuge beispielsweise eine gewisse Intelligenz im Fahrzeug vorzuhalten, während für die vorausschauende Wartung das Senden kleiner Datenmengen in die Cloud zunächst völlig ausreichend ist. Die Daten werden dort mit Daten anderer Maschinen bzw. Nutzer zusammengeführt und als Grundlage für KI zur Optimierung von Prozessen weiterverarbeitet.

Die benötigten Frequenzbedarfe werden sich mithin erst im Laufe der konkreten Umsetzung in den Anwendungsfeldern herauskristallisieren, eine effiziente Nutzung steht hier im Vordergrund.

In regulatorischer Hinsicht ist zu prüfen, inwiefern die festgelegten Lizenzgebühren für Campus-Netze vom Markt akzeptiert werden und keine Markteintrittshürden darstellen. Auch inwiefern der Betrieb eines lokalen 5G-Netzes innerhalb eines Jahres realistisch stattfinden kann, sollte geprüft werden. Der innovative Schritt in der Frequenzregulierung sollte nicht durch eine zu kurzfristige Betrachtung von Realisierungszeiträumen in seiner Wirkung begrenzt werden.

Literatur

- BDI [Bundesverband der Deutschen Industrie](2019): Was ist Industrie 4.0?, abrufbar unter: <https://bdi.eu/themenfelder/digitalisierung/industrie-40/#/artikel/news/was-ist-industrie-40/>, zuletzt abgerufen am: 07.06.2019.
- Bitkom (2019): Industrie 4.0: Künstliche Intelligenz zieht in Fabrikhallen ein, abrufbar unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Industrie-40-Kuenstliche-Intelligenz-zieht-Fabrikhallen-ein>, zuletzt abgerufen am: 09.08.2019.
- BLE [Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung](o.D.): Kritische Infrastruktur Landwirtschaft, abrufbar unter: https://www.ble.de/DE/Themen/Landwirtschaft/Kritische-Infrastruktur/Landwirtschaft_node.html, zuletzt abgerufen am: 29.05.2019
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft](2016): Landwirtschaft verstehen, Im Fokus: Chancen der Digitalisierung.
- BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] und BMBF [Bundesministerium für Bildung und Forschung](2019): Was ist Industrie 4.0?, abrufbar unter: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>, zuletzt abgerufen am: 07.06.2019.
- Blockchainwelt (2018): Electrify | Die Blockchain Energieplattform, abrufbar unter: <https://blockchainwelt.de/electrify-blockchain-energieplattform/>, zuletzt abgerufen am 03.06.2019
- BMWi [Bundesministerium für Wirtschaft und Energie] / BSI [Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik] (2019): Standardisierungsstrategie zur sektorübergreifenden Digitalisierung nach dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, Roadmap für die Weiterentwicklung der technischen BSI-Standards in Form von Schutzprofilen und Technischen Richtlinien.
- Detecon (2019): 5G in der Energiewirtschaft – Ergebnisse der Detecon-Marktumfrage, Juli 2019.
- Deutscher Bauernverband (2016): Situationsbericht 2016/17, Trends und Fakten zur Landwirtschaft.
- DotEcon und Axon (2017): Study on Implications of 5G Deployment on Future Business Models, No BEREK/2017/02/NP3.
- DFKI Competence Center (o.D.): ZIM Kartoffelfäule, Smart Agriculture Technologies (CC-SaAT), abrufbar unter: <https://saat.dfki.de/de/projekte/zim-kartoffelfaeule.html>, zuletzt abgerufen am: 04.06.2019.
- DLG [Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft] (2018):Digitale Landwirtschaft, Ein Positionspapier der DLG.
- Ericsson (2017), The 5G Business Potential: Industry Digitalization and the untapped opportunities for operators, abrufbar unter: http://www.5gamericas.org/files/7114/9971/4226/Ericsson_The_5G_Business_Potential.pdf, zuletzt abgerufen am: 09.08.2019.

- EU Kommission (2017): Ein Roboter auf Rädern überwacht das Traubenwachstum, CORDIS Forschungsergebnisse der EU, abrufbar unter:
<https://cordis.europa.eu/news/rcn/128526/de>, zuletzt abgerufen am: 03.06.2019.
- EUTC [European Utilities Telecom Council](2017): Use case for the adoption of 5G Telecommunications within the operations of electric utilities.
- Fraunhofer IOSB (2019): Fraunhofer-Energieforscher entwickeln KI-basierte Verfahren für hochautomatisierte und sichere Stromnetze, Pressemitteilung vom 19.02.2019.
- Fortier, P., Bagnon, P., Larsson, T., Puttur, R. K., Mindala-Freeman, M., Tignon, M., Buvat, J., Ghosh, A. (2019): 5G in industrial operations: How telcos and industrial companies stand to benefit, abrufbar unter:
<https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2019/06/5G-in-industrial-operations.pdf>, zuletzt abgerufen am 09.08.2019.
- GSA [Global mobile Suppliers Association] (2017): 5G Network Slicing for Vertical Industries, White Paper.
- Industrieanzeiger (2018): Nutzen von Predictive Maintenance ist ausbaufähig, abrufbar unter:
<https://industrieanzeiger.industrie.de/top-news/nutzen-von-predictive-maintenance-ist-ausbaufaehig/>, zuletzt abgerufen am: 09.08.2019.
- IT-Zoom (2018): Fahrerloser Transport als Schlüssel für Industrie 4.0, abrufbar unter:
<https://www.it-zoom.de/mobile-business/e/fahrerloser-transport-als-schluessel-fuer-industrie-40-21545/>, zuletzt abgerufen am: 09.08.2019.
- ITU (2018): Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges
- Lange, B. und L. Gentemann (2019): Don't panic!, Gelassen zur Digitalisierung: Wie sich deutsche Unternehmen in der neuen Zeit orientieren.
- Nett, L. (2019): Neue Märkte – neue Technologien, Die Frequenzversteigerung 2019, Bericht.
- Nett, L. u. B. Sörries (2019): Lokale/regionale Anwendungsfälle bei 5G für bundesweite Mobilfunknetzbetreiber sowie für regionale und lokale Betreiber unter besonderer Betrachtung der europäischen Länder sowie von China, Südkorea und den Vereinigten Staaten von Amerika, WIK-Diskussionsbeitrag.
- Meijer, E. (2018): KPN test met succes 5G-toepassingen voor precisielandbouw in Drenthe, Techzine Nederland, abrufbar unter:
<https://www.techzine.nl/nieuws/412383/kpn-test-met-succes-5g-toepassingen-voor-precisielandbouw-in-drenthe.html>, zuletzt abgerufen am: 05.06.2019.
- Meindl, H. (2018): Standards werden das mobile Ökosystem voranbringen, abrufbar unter:
<https://www.industry-of-things.de/standards-werden-das-mobile-oekosystem-voranbringen-a-779002/>, zuletzt abgerufen am: 03.12.2019.
- Midtiby, H. S, Mathiassen, S. K, Andersson K. J. und R N. Jørgensen (2011): Performance evaluation of a crop/weed discriminating microsprayer, in: Comput. Electron. Agric., 2011; 77(1): 35–40.
- Perez, A. J., Lopez, F., Benloch, J. V. und S, Christensen S. (2000): Colour and shape analysis techniques for weed detection in cereal fields. Comput. Electron. Agric., 2000; 25(3): 197–212.

- Plattform Industrie 4.0 (2019): Technologieszenario "Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0", abrufbar unter:
https://www.plattform40.de/PI40/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/KI-industrie40.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt abgerufen am: 09.08.2019.
- Roland Berger (2018), Erfolgsfaktor 5G. Online verfügbar unter:
<https://www.rolandberger.com/de/Media/Neuer-Mobilfunkstandard-5G-Schlüsseltechnologie-für-den-Standort-Deutschland-.html> , zuletzt abgerufen am: 18.10.2019.
- Sánchez et al. (2018): 5G-Cognitive Drone System for Preventive Maintenance in Energy Infrastructures, Experience in 5G-PPP NRG-5 project.
- Santori, F et al. (2017): Enabling Smart Energy as a Service via 5G Mobile Network advances, Deliverable 1.1, Use Case scenarios analysis and 5G requirements.
- Shamshiri, R.R., Weltzien, C., Hameed, I.A., Yule, I.J., Grift, T.E., Balasundram, S.K., Pitonakova, L., Ahmad, D. und Chowdhary, G. (2018): Research and development in agricultural robotics: A perspective of digital farming, in: International Journal of Agricultural and Biological Engineering, Vol. 11 No.4, P. 1-14, July 2018.
- Siemens (2017): Volkmar Sterzing and Steffen Udluft rank among the first inventors of data-efficient AI applications in the world.
- Sörries, B., Stronzik, M, Tenbrock, S., Wernick, C. u. M. Wissner (2019): Die ökonomische Relevanz und Entwicklungsperspektiven von Blockchain: Analysen für den Telekommunikations- und Energiemarkt, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 445.
- Sörries, B., Lucidi, S., Nett, L. u. M. Wissner (2019): Tophthema 3: TK-Netzinfrastruktur und TK-Regulierung, Gutachten, Digitalisierung der Energiewende.
- VDE (2019): Faktencheck 5G, abrufbar unter:
<https://www.vde.com/resource/blob/1877380/6d8f4a4d6b68f205739f18ed21327881/faktencheck-5g-data.pdf>, zuletzt abgerufen am: 09.08.2019
- Weigelin, L., Stork, J. und M. Gatzke (2018): Künstliche Intelligenz in der Energiewirtschaft, Virtuelles Institut Smart Energy, Policy Brief Q4/2018.
- WIK-Consult und umlaut (2019): Abschlussbericht zur Versorgungs- und Kostenstudie Mobilfunk für das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Version 2.1, 14. November 2019.
- Wissner, M. (2011): The Smart Grid – A saucerful of secrets?, in: Applied Energy, Volume 88, Issue 7, July 2011, p. 2509-2518.
- 5G ACIA [Alliance for Connected Industries and Automation](2019a): 5G for Connected Industries and Automation, White Paper.
- 5G ACIA [Alliance for Connected Industries and Automation](2019b): 5G for Automation in Industry - Primary use cases, functions and service requirements, White Paper.
- 5G RuralFirst (2018): Exploring our Shropshire use cases, abrufbar unter:
<https://www.5gruralfirst.org/exploring-our-shropshire-use-cases/>, zuletzt abgerufen am: 06.06.2019.

Als "Diskussionsbeiträge" des Wissenschaftlichen Instituts für Infrastruktur und Kommunikationsdienste sind zuletzt erschienen:

- Nr. 373: Christine Müller, Andrea Schweinsberg:
Der Netzbetreiber an der Schnittstelle von Markt und Regulierung, 2013
- Nr. 374: Thomas Plückebaum:
VDSL Vectoring, Bonding und Phantoming: Technisches Konzept, marktliche und regulatorische Implikationen, Januar 2013
- Nr. 375: Gernot Müller, Martin Zauner:
Einzelwagenverkehr als Kernelement eisenbahnbezogener Güterverkehrskonzepte?, Dezember 2012
- Nr. 376: Christin-Isabel Gries, Imme Philbeck:
Marktentwicklungen im Bereich Content Delivery Networks, April 2013
- Nr. 377: Alessandro Monti, Ralf Schäfer, Stefano Lucidi, Ulrich Stumpf:
Kundenbindungsansätze im deutschen TK-Markt im Lichte der Regulierung, Februar 2013
- Nr. 378: Tseveen Gantumur:
Empirische Erkenntnisse zur Breitbandförderung in Deutschland, Juni 2013
- Nr. 379: Marcus Stronzik:
Investitions- und Innovationsanreize: Ein Vergleich zwischen Revenue Cap und Yardstick Competition, September 2013
- Nr. 380: Dragan Ilic, Stephan Jay, Thomas Plückebaum, Peter Stamm:
Migrationsoptionen für Breitbandkabelnetze und ihr Investitionsbedarf, August 2013
- Nr. 381: Matthias Wissner:
Regulierungsbedürftigkeit des Fernwärmesektors, Oktober 2013
- Nr. 382: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke, Petra Junk, Sonja Thiele:
Netzzugang im Briefmarkt, Oktober 2013
- Nr. 383: Andrea Liebe, Christine Müller:
Energiegenossenschaften im Zeichen der Energiewende, Januar 2014
- Nr. 384: Christan M. Bender, Marcus Stronzik:
Verfahren zur Ermittlung des sektoralen Produktivitätsfortschritts - Internationale Erfahrungen und Implikationen für den deutschen Eisenbahninfrastruktursektor, März 2014
- Nr. 385: Franz Büllingen, Annette Hillebrand, Peter Stamm:
Die Marktentwicklung für Cloud-Dienste - mögliche Anforderungen an die Netzinfrastuktur, April 2014
- Nr. 386: Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Smart Metering Gas, März 2014
- Nr. 387: René Arnold, Sebastian Tenbrock:
Bestimmungsgründe der FTTP-Nachfrage, August 2014
- Nr. 388: Lorenz Nett, Stephan Jay:
Entwicklung dynamischer Marktszenarien und Wettbewerbskonstellationen zwischen Glasfasernetzen, Kupfernetzen und Kabelnetzen in Deutschland, September 2014
- Nr. 389: Stephan Schmitt:
Energieeffizienz und Netzregulierung, November 2014
- Nr. 390: Stephan Jay, Thomas Plückebaum:
Kostensenkungspotenziale für Glasfaseranschlussnetze durch Mitverlegung mit Stromnetzen, September 2014
- Nr. 391: Peter Stamm, Franz Büllingen:
Stellenwert und Marktperspektiven öffentlicher sowie privater Funknetze im Kontext steigender Nachfrage nach nomadischer und mobiler hochbitratiger Datenübertragung, Oktober 2014
- Nr. 392: Dieter Elixmann, J. Scott Marcus, Thomas Plückebaum:
IP-Netzzusammenschaltung bei NGN-basierten Sprachdiensten und die Migration zu All-IP: Ein internationaler Vergleich, November 2014

- Nr. 393: Stefano Lucidi, Ulrich Stumpf:
Implikationen der Internationalisierung von Telekommunikationsnetzen und Diensten für die Nummernverwaltung, Dezember 2014
- Nr. 394: Rolf Schwab:
Stand und Perspektiven von LTE in Deutschland, Dezember 2014
- Nr. 395: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke, Petra Junk, Antonia Niederprüm:
Produktive Effizienz von Postdienstleistern, November 2014
- Nr. 396: Petra Junk, Sonja Thiele:
Methoden für Verbraucherbefragungen zur Ermittlung des Bedarfs nach Post-Universaldienst, Dezember 2014
- Nr. 397: Stephan Schmitt, Matthias Wissner:
Analyse des Preissetzungsverhaltens der Netzbetreiber im Zähl- und Messwesen, März 2015
- Nr. 398: Annette Hillebrand, Martin Zauner:
Qualitätsindikatoren im Brief- und Paketmarkt, Mai 2015
- Nr. 399: Stephan Schmitt, Marcus Stronzik:
Die Rolle des generellen X-Faktors in verschiedenen Regulierungsregimen, Juli 2015
- Nr. 400: Franz Büllingen, Solveig Börnsen:
Marktorganisation und Marktrealität von Machine-to-Machine-Kommunikation mit Blick auf Industrie 4.0 und die Vergabe von IPv6-Nummern, August 2015
- Nr. 401: Lorenz Nett, Stefano Lucidi, Ulrich Stumpf:
Ein Benchmark neuer Ansätze für eine innovative Ausgestaltung von Frequenzgebühren und Implikationen für Deutschland, November 2015
- Nr. 402: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke, Petra Junk:
Zur Marktabgrenzung bei Kurier-, Paket- und Expressdiensten, November 2015
- Nr. 403: J. Scott Marcus, Christin Gries, Christian Wernick, Imme Philbeck:
Entwicklungen im internationalen Mobile Roaming unter besonderer Berücksichtigung struktureller Lösungen, Januar 2016
- Nr. 404: Karl-Heinz Neumann, Stephan Schmitt, Rolf Schwab unter Mitarbeit von Marcus Stronzik:
Die Bedeutung von TAL-Preisen für den Aufbau von NGA, März 2016
- Nr. 405: Caroline Held, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückebaum:
Entgelte für den Netzzugang zu staatlich geförderter Breitband-Infrastruktur, März 2016
- Nr. 406: Stephan Schmitt, Matthias Wissner:
Kapazitätsmechanismen – Internationale Erfahrungen, April 2016
- Nr. 407: Annette Hillebrand, Petra Junk:
Paketshops im Wettbewerb, April 2016
- Nr. 408: Tseveen Gantumur, Iris Henseler-Unger, Karl-Heinz Neumann:
Wohlfahrtsökonomische Effekte einer Pure LRIC - Regulierung von Terminierungsentgelten, Mai 2016
- Nr. 409: René Arnold, Christian Hildebrandt, Martin Waldburger:
Der Markt für Over-The-Top Dienste in Deutschland, Juni 2016
- Nr. 410: Christian Hildebrandt, Lorenz Nett:
Die Marktanalyse im Kontext von mehrseitigen Online-Plattformen, Juni 2016
- Nr. 411: Tseveen Gantumur, Ulrich Stumpf:
NGA-Infrastrukturen, Märkte und Regulierungsregime in ausgewählten Ländern, Juni 2016
- Nr. 412: Alex Dieke, Antonia Niederprüm, Sonja Thiele:
UPU-Endvergütungen und internationaler E-Commerce, September 2016 (in deutscher und englischer Sprache verfügbar)

- Nr. 413: Sebastian Tenbrock, René Arnold:
Die Bedeutung von Telekommunikation in intelligent vernetzten PKW, Oktober 2016
- Nr. 414: Christian Hildebrandt, René Arnold:
Big Data und OTT-Geschäftsmodelle sowie daraus resultierende Wettbewerbsprobleme und Herausforderungen bei Datenschutz und Verbraucherschutz, November 2016
- Nr. 415: J. Scott Marcus, Christian Wernick:
Ansätze zur Messung der Performance im Best-Effort-Internet, November 2016
- Nr. 416: Lorenz Nett, Christian Hildebrandt:
Marktabgrenzung und Marktmacht bei OTT-0 und OTT-1-Diensten, Eine Projektskizze am Beispiel von Instant-Messenger-Diensten, Januar 2017
- Nr. 417: Peter Kroon:
Maßnahmen zur Verhinderung von Preis-Kosten-Scheren für NGA-basierte Dienste, Juni 2017
- Nr. 419: Stefano Lucidi:
Analyse marktstruktureller Kriterien und Diskussion regulatorischer Handlungsoptionen bei engen Oligopolen, April 2017
- Nr. 420: J. Scott Marcus, Christian Wernick, Tseveen Gantumur, Christin Gries:
Ökonomische Chancen und Risiken einer weitreichenden Harmonisierung und Zentralisierung der TK-Regulierung in Europa, Juni 2017
- Nr. 421: Lorenz Nett:
Incentive Auctions als ein neues Instrument des Frequenzmanagements, Juli 2017
- Nr. 422: Christin Gries, Christian Wernick:
Bedeutung der embedded SIM (eSIM) für Wettbewerb und Verbraucher im Mobilfunkmarkt, August 2017
- Nr. 423: Fabian Queder, Nicole Angenendt, Christian Wernick:
Bedeutung und Entwicklungsperspektiven von öffentlichen WLAN-Netzen in Deutschland, Dezember 2017
- Nr. 424: Stefano Lucidi, Bernd Sörries, Sonja Thiele:
Wirksamkeit sektorspezifischer Verbraucherschutzregelungen in Deutschland, Januar 2018
- Nr. 425: Bernd Sörries, Lorenz Nett:
Frequenzpolitische Herausforderungen durch das Internet der Dinge - künftiger Frequenzbedarf durch M2M-Kommunikation und frequenzpolitische Handlungsempfehlungen, März 2018
- Nr. 426: Saskja Schäfer, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückebaum unter Mitarbeit von Stephan Schmitt:
Zugang zu gebäudeinterner Infrastruktur und adäquate Bepreisung, April 2018
- Nr. 427: Christian Hildebrandt, René Arnold:
Marktbeobachtung in der digitalen Wirtschaft – Ein Modell zur Analyse von Online-Plattformen, Mai 2018
- Nr. 428: Christin Gries, Christian Wernick:
Treiber und Hemmnisse für kommerziell verhandelten Zugang zu alternativen FTTB/H-Netzinfrastrukturen, Juli 2018
- Nr. 429: Serpil Taş, René Arnold:
Breitbandinfrastrukturen und die künftige Nutzung von audiovisuellen Inhalten in Deutschland: Herausforderungen für Kapazitätsmanagement und Netzneutralität, August 2018
- Nr. 430: Sebastian Tenbrock, Sonia Strube Martins, Christian Wernick, Fabian Queder, Iris Henseler-Unger:
Co-Invest Modelle zum Aufbau von neuen FTTB/H-Netzinfrastrukturen, August 2018
- Nr. 431: Johanna Bott, Christian Hildebrandt, René Arnold:
Die Nutzung von Daten durch OTT-Dienste zur Abschöpfung von Aufmerksamkeit und Zahlungsbereitschaft: Implikationen für Daten- und Verbraucherschutz, Oktober 2018
- Nr. 432: Petra Junk, Antonia Niederprüm:
Warenversand im Briefnetz, Oktober 2018

- Nr. 433: Christian M. Bender, Annette Hillebrand:
Auswirkungen der Digitalisierung auf die Zustelloogistik, Oktober 2018
- Nr. 434: Antonia Niederprüm:
Hybridpost in Deutschland, Oktober 2018
- Nr. 436: Petra Junk:
Digitalisierung und Briefsubstitution: Erfahrungen in Europa und Schlussfolgerungen für Deutschland, Oktober 2018
- Nr. 437: Peter Kroon, René Arnold:
Die Bedeutung von Interoperabilität in der digitalen Welt – Neue Herausforderungen in der interpersonellen Kommunikation, Dezember 2018
- Nr. 438: Stefano Lucidi, Bernd Sörries:
Auswirkung von Bündelprodukten auf den Wettbewerb, März 2019
- Nr. 439: Christian M. Bender, Sonja Thiele:
Der deutsche Postmarkt als Infrastruktur für europäischen E-Commerce, April 2019
- Nr. 440: Serpil Taş, René Arnold:
Auswirkungen von OTT-1-Diensten auf das Kommunikationsverhalten – Eine nachfrageseitige Betrachtung, Juni 2019
- Nr. 441: Serpil Taş, Christian Hildebrandt, René Arnold:
Sprachassistenten in Deutschland, Juni 2019
- Nr. 442: Fabian Queder, Marcus Stronzik, Christian Wernick:
Auswirkungen des Infrastrukturwettbewerbs durch HFC-Netze auf Investitionen in FTTP-Infrastrukturen in Europa, Juni 2019
- Nr. 443: Lorenz Nett, Bernd Sörries:
Infrastruktur-Sharing und 5G: Anforderungen an Regulierung, neue wettbewerbliche Konstellationen, Juli 2019
- Nr. 444: Pirmin Puhl, Martin Lundborg:
Breitbandzugang über Satellit in Deutschland – Stand der Marktentwicklung und Entwicklungsperspektiven, Juli 2019
- Nr. 445: Bernd Sörries, Marcus Stronzik, Sebastian Tenbrock, Christian Wernick, Matthias Wissner:
Die ökonomische Relevanz und Entwicklungsperspektiven von Blockchain: Analysen für den Telekommunikations- und Energiemarkt, August 2019
- Nr. 446: Petra Junk, Julia Wielgosch:
City-Logistik für den Paketmarkt, August 2019
- Nr. 447: Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Entwicklung des Effizienzvergleichs in Richtung Smart Grids, September 2019
- Nr. 448: Christian M. Bender, Antonia Niederprüm:
Berichts- und Anzeigepflichten der Unternehmen und mögliche Weiterentwicklungen der zugrundeliegenden Rechtsnormen im Postbereich, September 2019
- Nr. 449: Ahmed Elbanna unter Mitwirkung von Fabian Eltges:
5G Status Studie: Herausforderungen, Standardisierung, Netzarchitektur und geplante Netzentwicklung, Oktober 2019
- Nr. 450: Stefano Lucidi, Bernd Sörries:
Internationale Vergleichsstudie bezüglich der Anwendung und Umsetzung des Nachbildbarkeitsansatzes, Dezember 2019
- Nr. 451: Matthias Franken, Matthias Wissner, Bernd Sörries:
Entwicklung der funkbasierten Digitalisierung in der Industrie, Energiewirtschaft und Landwirtschaft und spezifische Frequenzbedarfe, Dezember 2019

ISSN 1865-8997