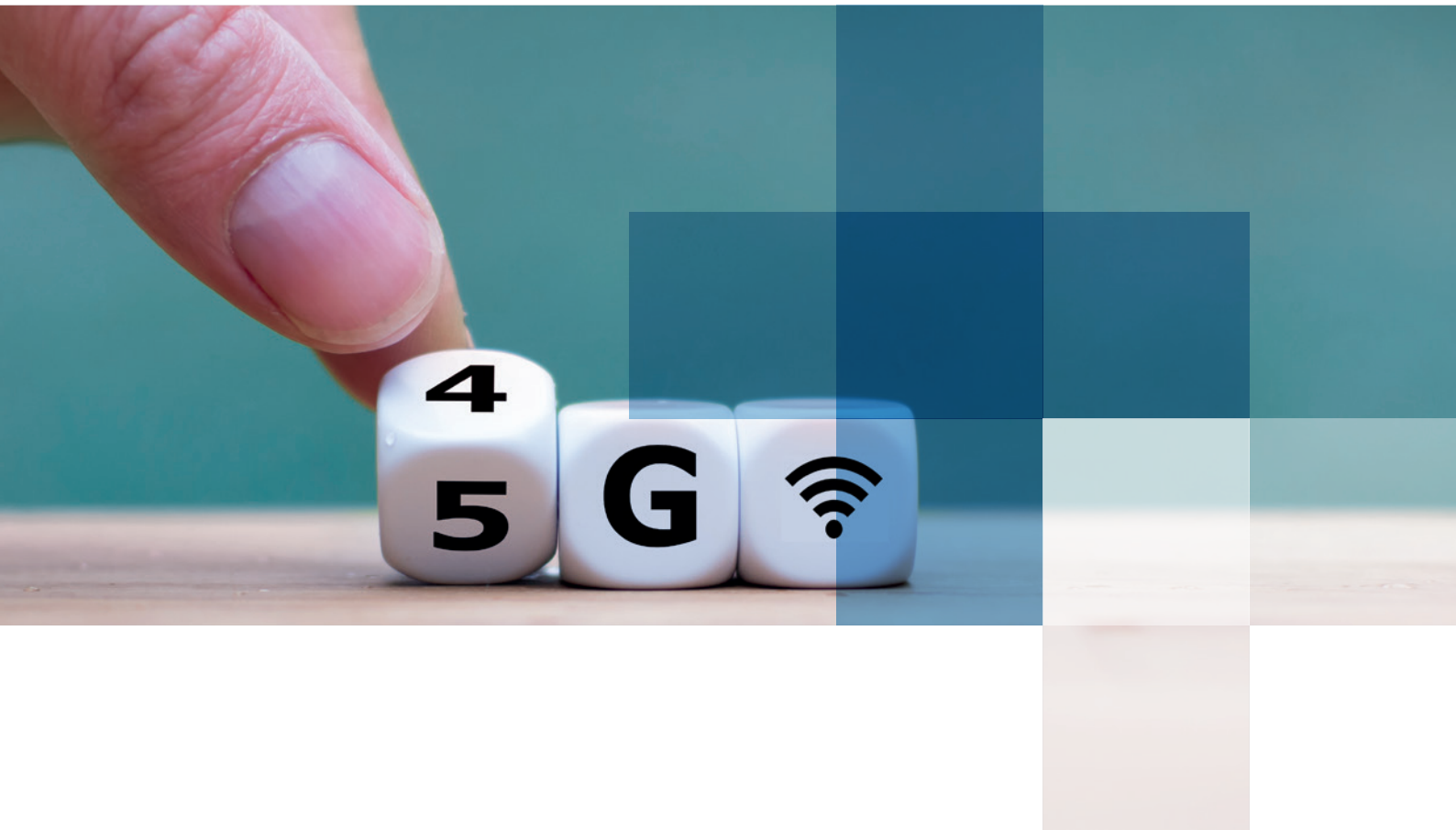




**CENTER
CONNECTED
INDUSTRY**



Whitepaper

5G – Evolution oder Revolution?

Inhalt

Einleitung	3
Evolution des Mobilfunks	4
Anwendungsszenarien	6
Network Slicing	8
Edge Computing	9
5G Frequenzen	10
Aufbau eines Mobilfunknetzwerks	12
Small Cells	13
Massive MIMO und Beamforming	14
Full Duplex	15
5G für die Industrie	16
Condition Monitoring	18
Flexible Produktion	19
Intralogistik	20
Retrofit	22
Kontroverse	23
Fazit	26
Glossar und Quellen	27

Impressum

Herausgeber:

Prof. Dr.-Ing. Volker Stich
Geschäftsführer des FIR e. V. an der RWTH Aachen
Leiter des Clusters Smart Logistik

Christian Maasem
Leiter des Centers Connected Industry
Geschäftsführer der EICe Aachen GmbH

Autoren:

Christine Leidinger
Leiterin 5G-Projekte
Center Connected Industry

Vasco Seelmann
Projektmanager
FIR e. V. an der RWTH Aachen

Christian Maasem
Leiter des Centers Connected Industry
Geschäftsführer der EICe Aachen GmbH

Lizenzbestimmungen/Copyright:

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten.

Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtsgesetzes.

© 2019
Center Connected Industry | EICe Aachen GmbH
Campus-Boulevard 55 | 52074 Aachen
Telefon +49 241 47705-610
E-Mail info@connectedindustry.net
www.connectedindustry.net

5G – Evolution oder Revolution?

5G, das Kürzel hinter dem sich die kommende fünfte und damit neueste Mobilfunkgeneration verbirgt, ist aktuell nicht zuletzt wegen der diesjährigen Versteigerung der ersten Frequenzen durch die Bundesnetzagentur ein Thema, über das in den Medien ausführlich berichtet wird. Verglichen mit der Einführung früherer Mobilfunkgenerationen ist der Hype jedoch diesmal besonders groß, denn zum ersten Mal liegt das Hauptinteresse an den Potenzialen der neuen Technologie nicht mehr nur beim privaten Endnutzer.

Ausgelöst durch die rasante technologische Entwicklung der letzten Jahrzehnte bewegt sich der globale gesellschaftliche und strukturelle Wandel immer stärker in Richtung umfassender Digitalisierung und Vernetzung. Dies betrifft nicht nur den Privatmenschen, sondern umfasst alle Produkte und Dienstleistungen der Wirtschaft und zieht sich quer durch alle Branchen.

Im Rahmen von Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge (IoT, engl. Internet of Things) werden immer mehr Daten aus unterschiedlichen Systemen gesammelt, verarbeitet und gespeichert. Eine 2017 von Cisco veröffentlichte Studie sagt bis zum

Jahr 2022 eine Zunahme des mobilen Datenverkehrs um das Siebenfache voraus.^[1] Allein deshalb scheint das Vorhandensein einer Technologie zur mobilen, sicheren, schnellen und zuverlässigen Übertragung von Daten eine essenzielle Voraussetzung für eine erfolgreiche Einführung zukunftsweisender Technologien zu sein.

Das Interesse von Industrie und Wirtschaft am neuen Mobilfunkstandard ist daher besonders groß. Für jedes zweite Unternehmen ist eine künftige 5G-Verfügbarkeit wichtig.^[2]

Aber was genau ist 5G eigentlich? Welche Vorteile und Möglichkeiten eröffnen sich durch die Nutzung? Wie unterscheidet es sich von den vorangegangenen Mobilfunkgenerationen? Vor allen Dingen auch die Vielzahl kursierender Abkürzungen (2G, 3G, 4G, GSM, EDGE, HSDPA usw.) führt häufig zu Verwirrung.

Um ein wenig Licht ins Dunkel zu bringen, muss man etwas ausholen, denn die Entwicklung des Mobilfunks begann bereits vor über 60 Jahren, siehe auch Abbildung 1.



Evolution des Mobilfunks

Die **erste Generation (1G)** der Mobilfunknetze, nach ihren Entwicklungsstufen als A-Netz, B-Netz und C-Netz bezeichnet, war von 1958 bis ins Jahr 2000 in Betrieb. Sie ermöglichte eine analoge Sprachübertragung zu mobilen Endgeräten, die zu Anfang noch manuell vermittelt werden musste, und die über keinen einheitlichen Standard verfügte.

Mit dem 1992 eingeführten Mobilfunknetz der **zweiten Generation (2G)** wurde der Übergang zur digitalen Sprachübertragung vollzogen, was eine gravierende Verbesserung der Sprachqualität zur Folge hatte. Durch die Zusammenarbeit von Regulierungsbehörden 48 europäischer Staaten wurde außerdem mit GSM (Global System for Mobile Communications) ein erster, in Europa einheitlicher Standard eingeführt. Mit dem für GSM entwickelten SMS-(Short Message

Service)Dienst war erstmals auch eine Übertragung von Textnachrichten möglich. Als Erweiterungen zu GSM ermöglichten GPRS (General Packet Radio Service) und EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution) unter anderem höhere Datenraten¹, mit denen auch (obwohl nur sehr langsam) Daten, wie beispielsweise Fotos oder einfache Webseiten, übertragen werden konnten.

Mit der Einführung der **dritten Mobilfunkgeneration (3G)** und dem dafür entwickelten UMTS (Universal Mobile Telecommunications Standard) wurde wegen der deutlich höheren erreichbaren Datenraten eine breitflächige, mobile Nutzung des Internets ermöglicht. Durch die beiden UMTS-Erweiterungen HSPA (Highspeed Packet Access) und HSPA+ wurden zudem erneut höhere Datenraten erreicht.










1G	2G	3G	4G	5G
1958	1998	2001	2010	2020
Erste Generation 	Zweite Generation 	Dritte Generation 	Vierte Generation 	Fünfte Generation 
Standards und ungefähre maximale Datenraten				
AMTS: – TACS: –	GSM: 9 kbit/s GPRS: 115 kbit/s EDGE: 236 kbit/s	UMTS: 384 kbit/s HSPA: 14 Mbit/s HSPA+: 42 Mbit/s	LTE: 100 Mbit/s LTE-Adv. 1 Gbit/s	NR ~20 Gbit/s
Wie lange würde es ungefähr dauern, einen HD Film herunterzuladen?				
–	 280 Tage Eine komplette Schwangerschaft	 26 h Einen Flug von New York nach Sydney	 6 min Einen Kilometer weit zu gehen	 4 s Zu fragen wie lange der Download noch dauert

Abbildung 1: Überblick über die Evolution der Mobilfunkgenerationen und ihre Leistungsparameter.

Die **vierte Generation der Mobilfunknetze (4G)** mit dem zugehörigen Standard LTE (Long Term Evolution) wurde erstmals 2010 in Betrieb genommen. Hier war außer der wiederum wesentlich höheren Datenrate im Vergleich zur Vorgängergeneration auch die Latenz² zwischen Sender und Empfänger deutlich niedriger. Es war damit erstmals möglich, über das Mobilfunknetz Onlinespiele zu spielen. Außerdem zeichnete sich LTE durch bessere Empfangs- und Sprachqualität, geringeren Energieverbrauch und höhere Sicherheit aus. Durch eine Weiterentwicklung zu LTE-Advanced konnten erneut höhere Datenraten und gleichzeitig niedrigere Latenz erreicht werden.

Mit Spitzendatenraten von 1.000 Mbit/s (entspricht 1 Gbit/s) und einer Spitzenlatenz von 10 ms ist LTE-Advanced bereits bestens für eine Vielzahl von zukunftsweisenden Anwendungen mit hohen Ansprüchen an die Datenübertragung geeignet. So ist es beispielsweise möglich, einen Videostream in HD-Qualität zu übertragen. Für die Industrie bedeutet dies

zum Beispiel die Möglichkeit, eine Fernüberwachung von Produktionsanlagen durchzuführen, Sensorwerte und andere Informationen in Echtzeit auf tragbaren Geräten wie Tablets darzustellen, oder Daten von Fahrzeugen während der Fahrt mit hohen Geschwindigkeiten zuverlässig und unterbrechungsfrei zu übertragen.

Wozu benötigt man nun also **5G**, die fünfte, nach dem Namen des zugehörigen Standards auch als New Radio (NR) bezeichnete, Mobilfunkgeneration?

In Abbildung 2 sind einige der von der Internationalen Fernmeldeunion (ITU – International Telecommunication Union) seit Februar 2016 erarbeiteten Leistungs-Anforderungen für die 5G-Funktechnik^[3] zusammengefasst.

Der Wert, der dabei in der Öffentlichkeit wohl am prominentesten ist, ist die Datenrate, die mit bis zu 20 Gbit/s im Vergleich zu LTE-Advanced bis zu zwanzigfach höher ist. Allerdings sind einige der anderen Eigenschaften für zukunftsweisende Anwendungen wie beispielsweise autonomes Fahren viel entscheidender. So können mit 5G ultrakurze Latenzzeiten erreicht werden, eine circa tausendmal größere Anzahl an Endgeräten eingebunden und mobile Endgeräte, die sich deutlich schneller bewegen, versorgt werden.

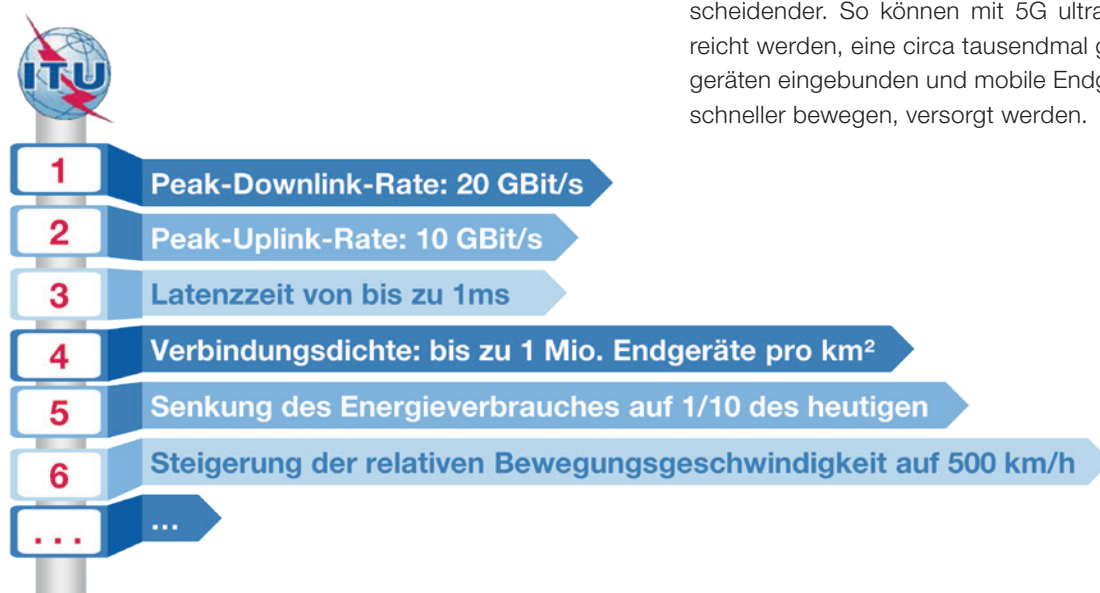


Abbildung 2: Zusammenfassung einiger von der ITU für 5G erarbeiteten Leistungsanforderungen.[3]

Anwendungsszenarien

Durch die Erfüllung der in Abbildung 2 definierten Leistungsanforderungen ergeben sich eine Reihe neuer Anwendungsszenarien, die sich in dieser Form mit LTE nicht abdecken lassen. Diese neuen Anwendungsszenarien lassen sich grob in drei Kategorien einteilen, siehe auch Abbildung 3:

1. **Enhanced Mobile Broadband (eMBB)** fasst die Anwendungen zusammen, für die besonders hohe Datenraten bzw. Bandbreiten³ benötigt werden oder die Übertragungen von Daten aus sich sehr schnell bewegenden Fahrzeugen notwendig machen. Beispiele dafür sind die Übertragung von 3D- oder 4K-Videostreams, rechenintensive Anwendungen mit Nutzung dezentraler Rechenleistung auf der Cloud oder die Übertragung von Daten von und zu Hochgeschwindigkeitszügen oder Flugzeugen.
2. **Massive Machine Type Communications (mMTC)** umfasst die Anwendungsfälle, bei denen die Anzahl der übertragenden Geräte pro Fläche besonders groß und damit die Anforderungen an die Kapazität einer Funkzelle besonders hoch sind. Dies kann beispielsweise bei Anwendungen im Lager- und Logistikbereich der Fall sein, wo die Anzahl an Sensoren (z. B. in Hochregallagern) sehr groß werden kann, aber auch für Smart City und Smart Building Szenarien oder auch im Gesundheitssektor.
3. **Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC)** nennt man diejenigen Anwendungsfälle, bei denen höchste Anforderungen an Verbindungsqualität, Verfügbarkeit und Störanfälligkeit gestellt werden. Dies trifft beispielsweise auf die Übertragung von Steuersignalen an autonome Fahrzeuge oder Roboter und auf die Echtzeitübertragung bei Augmented- und Virtual Reality (AR/VR) Anwendungen zu.

Jede der Kategorien stellt stark unterschiedliche Ansprüche daran, was das versorgende Funknetz leisten können muss. Will man ausschließlich Anwendungen aus einer einzelnen Kategorie abdecken, genügt es, das physische Funknetzwerk so zu gestalten und zu dimensionieren, dass es die erforderlichen Ressourcen zur Verfügung stellen kann. Im Beispiel von eMBB eine sehr hohe Bandbreite.

Will man jedoch Anwendungsszenarien aus mehr als einer Kategorie gleichzeitig abdecken (beispielsweise hohe Bandbreite und niedrige Latenz), hat man theoretisch zwei Möglichkeiten.

Man kann

1. für jedes der Szenarien ein separates, entsprechend konfiguriertes physisches Funknetz aufbauen, das so jeweils die benötigten Ressourcen garantiert,
2. oder ein einzelnes physisches Funknetz verwenden, das so konfiguriert ist, dass es alle Anforderungen erfüllen, also beispielsweise sowohl eine hohe Bandbreite als auch eine niedrige Latenz liefern kann.

Die erste Möglichkeit ist insbesondere wegen der damit verbundenen hohen Kosten keine valide Option. Wenn die abzudeckenden Anwendungsszenarien zuverlässig und damit durch jeweils fest zugesicherte Ressourcen versorgt werden müssen, entfällt auch die zweite Option, da sich hier klassischerweise beide Anwendungen die zur Verfügung stehenden Ressourcen teilen müssten.

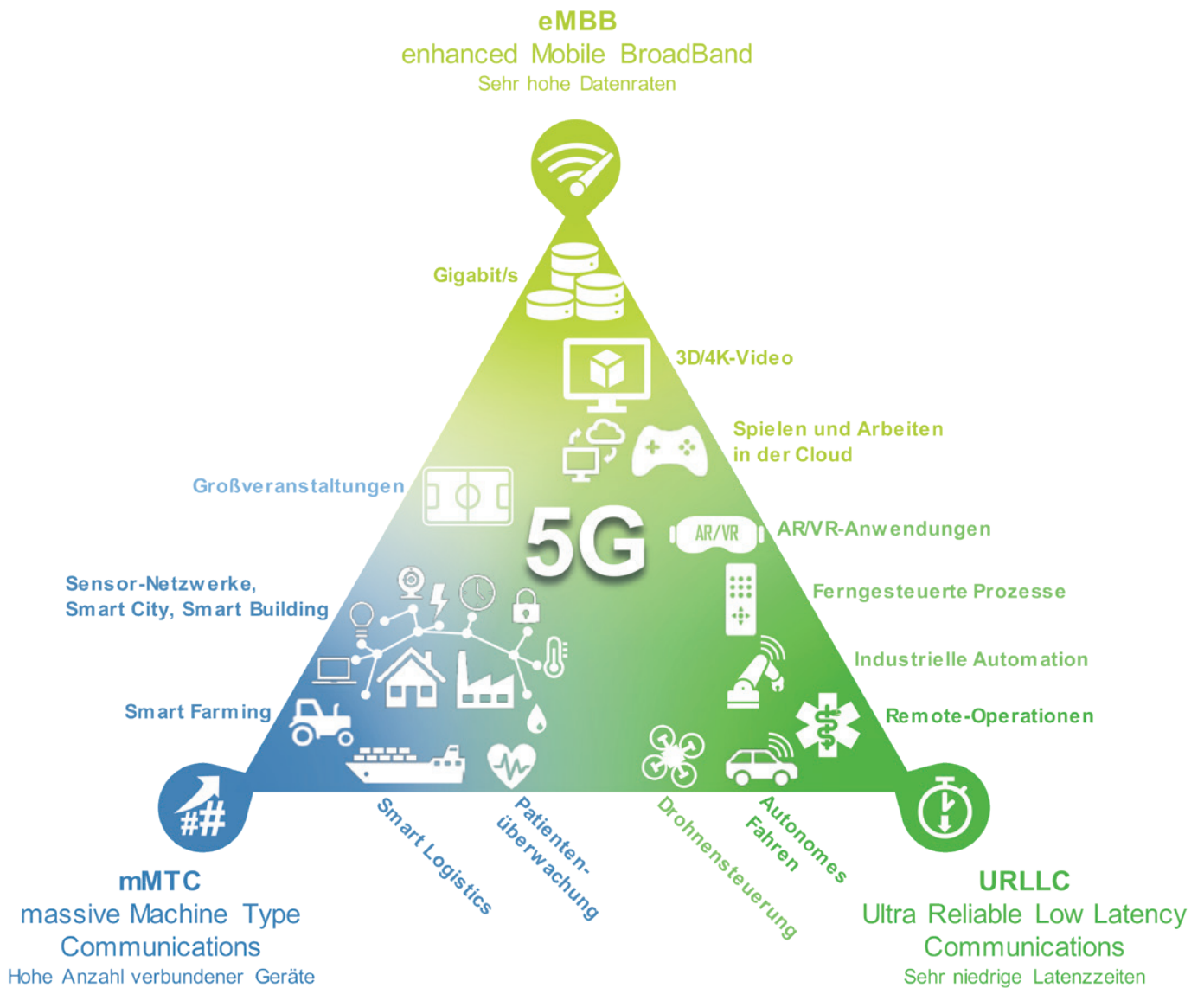


Abbildung 3: Überblick über die drei Anwendungskategorien und Verortung der jeweiligen neuen Anwendungsszenarien für 5G (nach ITU-R IMT 2020).

Network Slicing

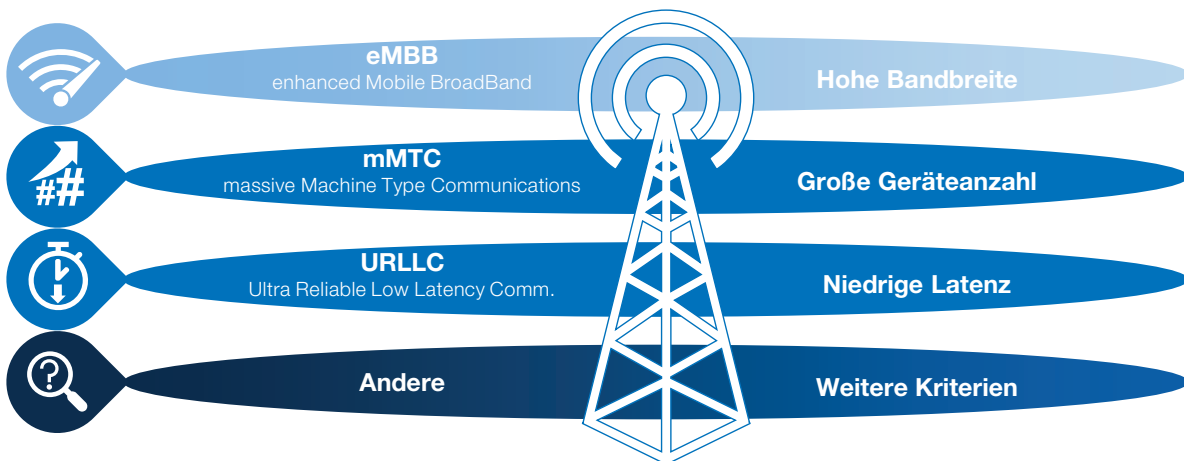


Abbildung 4: Schematische Darstellung von Network Slicing, bezogen auf die drei beschriebenen Anwendungskategorien.

Als Lösung dafür bietet sich mit 5G das sogenannte „**Network Slicing**“ an. Technisch gesehen bedeutet das, dass man ein einziges physikalisches Funknetzwerk virtuell in mehrere, voneinander autonome und getrennte Netze mit dedizierten Ressourcen, die sogenannten „**Slices**“ unterteilt. Jedem dieser Slices lassen sich dann spezifische Eigenschaften zuweisen, die den jeweils adressierten Anwendungsanforderungen gerecht werden (siehe Abbildung 4). Auch lässt sich so die Anzahl von möglichen Anwendungsfeldern jederzeit durch Hinzufügen weiterer Slices mit anderen Eigenschaften erweitern. Auf diese Weise ist eine Vielzahl von Anwendungen möglich und Kosten, Effizienz, Komplexität und Flexibilität sind frei adressierbar.^[4] Prinzipiell ist Network Slicing zwar auch bei 4G Netzwerken möglich^[5], es kann aber auf dieser Plattform wegen der im Vergleich zu 5G begrenzten Leistungsparameter nicht sein volles Potenzial entfalten.

Tatsächlich ist in der Realität mit Network Slicing allein in vielen Fällen nicht zu erwarten, dass das 5G-Funknetzwerk die

angegebenen hohen Leistungen bezüglich Datenrate und Latenz tatsächlich erreichen kann. Dies begründet sich darin, dass Daten, die zur dezentralen Verarbeitung beispielsweise in die Cloud gesendet werden müssen, Zeit benötigen, um den Weg zwischen dem Gerätestandort und dem Serverstandort zurückzulegen. Möchte man beispielsweise in Deutschland generierte Daten auf einem Server in den USA verarbeiten, erhält man allein für Hin- und Rückweg durch eine ca. 8.000 km lange Glasfaserleitung bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von ca. 200.000 km/s schon eine Latenz von etwa 80 ms. Für zeitkritische Ereignisse und Informationen ist dies bereits deutlich zu viel. Die momentane Entwicklung der Datenverarbeitung geht jedoch immer stärker in Richtung Datenverarbeitung in Cloud-Systemen, die sich meist in einiger Entfernung befinden. Insbesondere gilt dies für Anwendungen, die eine so hohe Rechenleistung benötigen, dass man sie nicht mehr einfach so direkt auf dem sendenden Gerät (Sensor, Roboter, Smartphone etc.) unterbringen kann.

Edge Computing

Um also die Potenziale der möglichen niedrigen Latenz von 5G-Netzwerken voll ausschöpfen zu können, muss die Datenverarbeitung näher an den Ursprung, also näher an die Grenze zum Funknetzwerk rücken.

Deshalb wird der Begriff „**Mobile Edge Computing**“⁴ oder nur „**Edge Computing**“⁵ oft in einem Atemzug mit 5G genannt.

Hierbei verlagert man Teile der Datenverarbeitung auf Server, die sich näher am Anwender befinden als die Cloudserver von großen Anbietern. So kann man beispielsweise Daten, die in verschiedenen Produktionsstätten am selben Standort generiert wurden, von Software verarbeiten lassen, die auf Servern in einem sich lokal vor Ort befindlichen Serverraum, einer Art lokalen Cloud, läuft. Durch Kombination mit einer Übertragungstechnologie wie 5G lässt sich so eine sehr niedrige Latenz, wie sie für Echtzeitanwendungen wie Augmented Reality (AR) notwendig ist, erreichen.

Ein weiterer Vorteil von Edge-Cloud-Lösungen ist darin zu sehen, dass eine Verteilung der Rechenleistung auf viele lokale Standorte mit kurzen Übertragungswegen den Datenverkehr ins Gesamtnetz verringert. Zudem müssen eventuell sensible Daten den geschützten Bereich einer Unternehmens-IT so nicht verlassen.

In der Praxis ist es meist nicht möglich oder wirtschaftlich, den Leistungsumfang

einer Edge Cloud dem einer „großen“ Cloudlösung anzupassen. Es ist daher sinnvoll, die Daten je nach den Ansprüchen der Anwendungsfälle an die Datenverarbeitung (z. B. hohe Rechenleistung für rechenintensive Aufgaben, niedrige Latenz für Echtzeitanwendungen) entweder direkt auf dem Gerät oder auf einer lokalen Edge Cloud zu verarbeiten. Werden umfangreichere Ressourcen benötigt, ist aber auch möglich die weiter entfernten Ressourcen einer „großen“ Cloud zu nutzen (siehe Abbildung 5). Auch Hybridlösungen, bei denen alle drei Fälle genutzt und Daten gegebenenfalls entsprechend aufgeteilt werden, sind denkbar.

Neben Network Slicing und der neuartigen Datenverarbeitung in Edge-Cloud-Systemen ist noch ein weiterer Faktor für das Erreichen der für 5G definierten Leistungsziele essenziell: Die Nutzung eines größeren Frequenzbereiches.

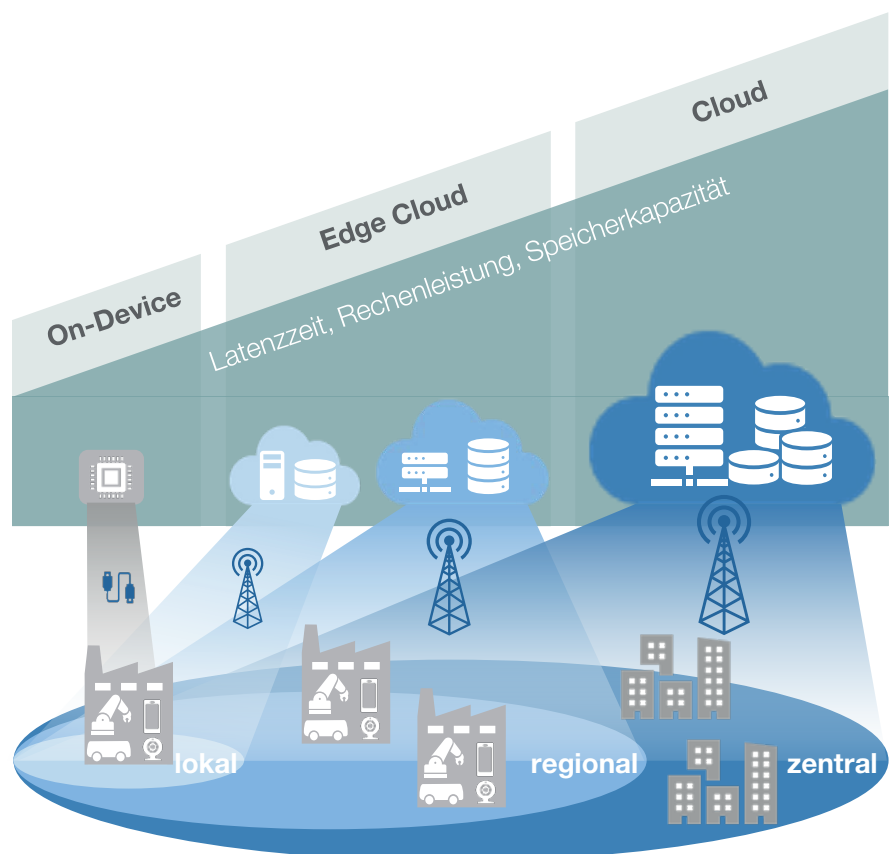


Abbildung 5: Schematische Darstellung von Edge und Cloud Computing.

5G Frequenzen

Bei 5G im Speziellen und bei jeglicher Art von Funk (Radio, WLAN, Mobilfunk etc.) im Allgemeinen handelt es sich physikalisch gesehen um sogenannte elektromagnetische Wellen, die von sich hin und her bewegenden elektrischen Ladungen in metallischen Antennen⁶ ausgesendet werden. Diese erzeugen wechselnde elektrische und magnetische Felder, die dann miteinander verkettet abgestrahlt werden. Im Gegensatz zu anderen Wellenarten, wie beispielsweise Schall- oder Wasserwellen, benötigen sie dafür kein Medium. Außer Funkwellen gehören auch Mikrowellen, Röntgenstrahlung, Infrarotstrahlung und Licht zu den elektromagnetischen Wellen. Unterscheiden lassen sie sich unter anderem durch ihre

Wellenlänge bzw. die zugehörige Frequenz.⁷ Sichtbares Licht hat mit Wellenlängen zwischen etwa 300 nm⁸ und 700 nm Frequenzen im Bereich von einigen hundert Terahertz. Mobilfunk wie 4G hingegen hat bisher Frequenzen zwischen ca. 700 MHz und 2,6 GHz. Dieser Bereich überschneidet sich teilweise mit den für WLAN genutzten Frequenzen um 2,4 GHz und 5 GHz, wodurch es zu Kollisionen und damit einer verringerten Datenrate und Zuverlässigkeit kommen kann (siehe Abbildung 6).

Für 5G sollen zunächst einmal auch die bisher genutzten Frequenzbereiche verwendet werden, deren Ressourcen sich 5G

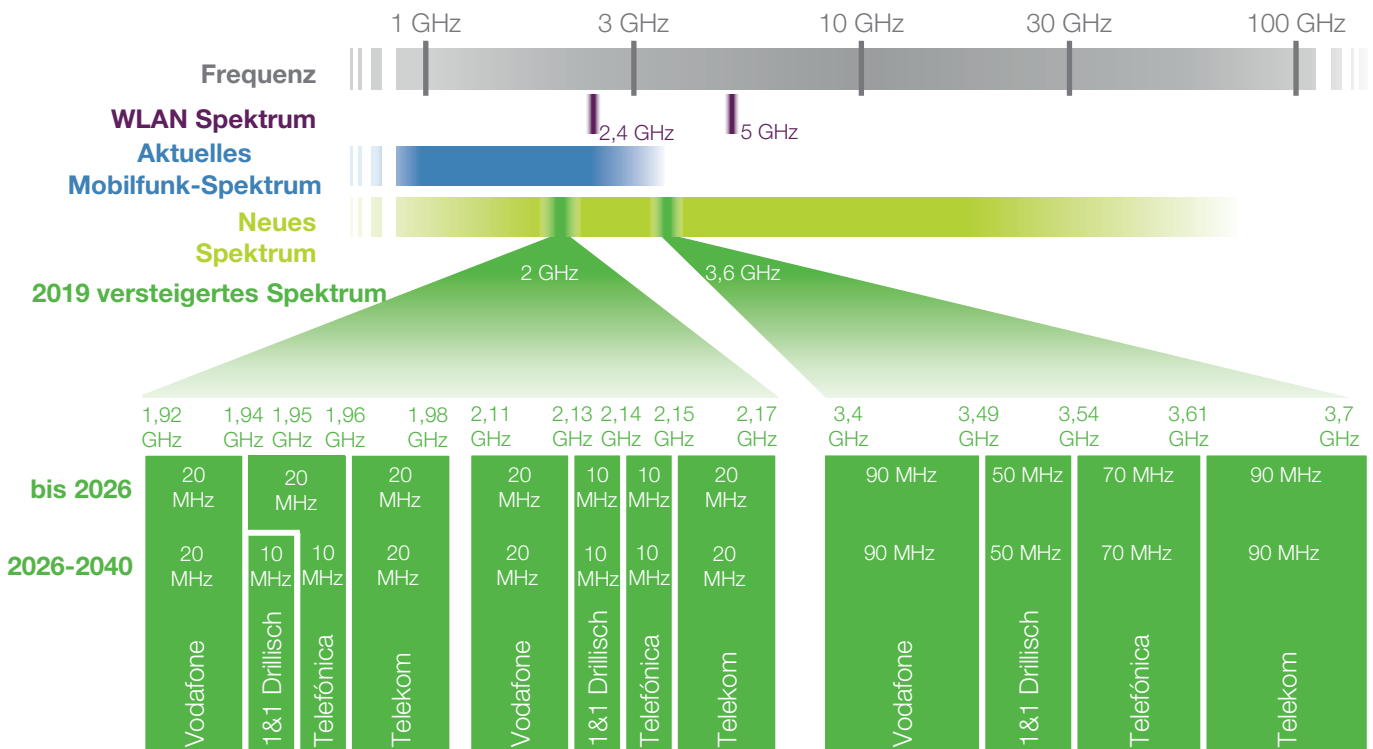


Abbildung 6: Verortung der bisherigen und der zukünftigen Mobilfunkfrequenzen, sowie von WLAN im Frequenzspektrum. Zusammenfassung des Versteigerungsergebnisses der ersten 5G-Frequenzen.



jedoch dann mit den bisherigen Mobilfunkgenerationen teilen müsste. Die 2019 von der Bundesregierung versteigerten Frequenzen im Bereich 2 GHz dienen momentan noch der Versorgung mit UMTS (3G) und müssen für die Nutzung mit 5G entsprechend freigegeben werden. So hält sich einer der größten deutschen Mobilfunkanbieter, Telekom Deutschland, scheinbar die Einstellung von UMTS bis Ende 2020 offen.^[6] An der Versteigerung der Frequenzen nahmen diesmal nicht nur die drei größten Netzbetreiber, Telekom Deutschland GmbH, Vodafone GmbH und Telefónica Germany GmbH & Co. OHG teil, sondern mit der Drillisch Netz AG erstmals auch ein weiterer Mitbewerber. Im Bereich von 1,92 GHz bis 2,17 GHz konnten sich Telekom und Vodafone je 2 x 20 MHz und Telefónica und Drillisch je 2 x 10 MHz sichern, siehe Abbildung 6.

Die ebenfalls versteigerten Frequenzbereiche zwischen 3,4 GHz und 3,7 GHz sind bisher nicht belegt. Sie sollen zukünftig die angekündigten Datenraten im zweistelligen Gigabitbereich ermöglichen und sind die ersten reinen 5G Frequenzen.^[7] In diesem Bereich erhielten Telekom und Vodafone jeweils für 90 MHz den Zuschlag während sich Telefónica 70 MHz und Drillisch 50 MHz sichern konnte. Insgesamt ergab sich bei der Versteigerung Anfang des Jahres so ein Auktionserlös von ca. 6,5 Milliarden Euro.^[8]

Zusätzlich hat die Bundesnetzagentur jedoch auch eine neue Form des Wettbewerbs auf dem Mobilfunkmarkt eingeführt. Besitzer von Gebäuden und Grundstücken können nun, ohne dafür Frequenzen ersteigern oder einen Vertrag mit einem Mobilfunkanbieter schließen zu müssen, ihre eigenen, lokalen Mobilfunknetze aufbauen. Zur Nutzung der Frequenzen soll zukünftig ein simpler Nutzungsantrag ausreichen.^[9] Die Frequenzbereiche zwischen 3,7 GHz und 3,8 GHz und später auch bei 26 GHz sollen für solche lokalen 5G-Anwendungen reserviert bleiben.

Perspektivisch ist die Versteigerung weiterer Frequenzbereiche für 5G, zunächst bei 6 GHz, vorgesehen. Zudem gibt es bereits Pläne, auch weit höhere Frequenzbereiche bei und jenseits von 24 GHz zu erschließen.

Nicht jeder Frequenzbereich eignet sich jedoch für jedes Anwendungsszenario. Die Bandbreite und damit auch die zur Verfügung stehende Datenrate hängen stark von der verwendeten Frequenz ab. Je höher die Frequenz, desto größere Datenraten und Bandbreiten lassen sich erreichen. Mit steigender Frequenz steigt jedoch auch die Dämpfung der Funksignale, sowohl bei Durchquerung von Luft (Freiraumdämpfung) als auch von Gebäuden oder anderen Hindernissen. Dies hat zur Folge, dass die Reichweite der Funksignale sinkt, je höher die genutzte Frequenz ist.

Aufbau eines Mobilfunknetzwerks

Ein Mobilfunknetz ist räumlich zellulär⁹ aufgebaut (siehe Abbildung 7) und setzt sich aus einzelnen Funkzellen zusammen, die jeweils von einer fest installierten Sendestation (der Mobilfunkbasisstation) versorgt werden. Diese besteht aus einer Antennenanlage mit meist mehreren Antennen und einer Einheit, die bei LTE „eNode-B“ genannt wird und die unter anderem die Datenverbindung zwischen Antenne und Mobilgeräten regelt. Das System aus Mobilgeräten und Basisstation bezeichnet man als **Radio Access Network** bzw. RAN (engl. für Funkzugangnetzwerk). Zuständig für Funktionalitäten wie die Vermittlung von Verbindungen zwischen mehreren Geräten, die Regelung von Berechtigungen der einzelnen Geräte und die Weiterleitung von Verbindungen in andere Netzwerke wie z. B. das Internet ist das sogenannte **Core Network** (engl.

für Kernnetzwerk). Dieses kann, gerade bei großen, öffentlichen Netzwerkinstallationen, meist mehrere RANs versorgen. Die Datenverbindungen zwischen RAN und Core Network (genannt Backhaul) sowie zwischen den einzelnen Einheiten des Core Networks selbst (genannt Backbone) werden meist durch Glasfaserkabel realisiert und als **Transportnetzwerk** bezeichnet. Daher spielt auch ein gut ausgebautes Glasfasernetzwerk für den Aus- und Aufbau eines Mobilfunknetzwerks eine wichtige Rolle.

Was die Größe der Zellen betrifft bedeutet die Frequenzabhängigkeit der Reichweite, dass für eine flächendeckende Versorgung mit niedrigen Frequenzen (wie aktuell im ländlichen Raum) weniger Sendestationen pro Fläche benötigt werden als für hohe Frequenzen. Allerdings steht dann aber entsprechend auch nur eine geringere Datenrate zur Verfügung.

Für die sehr hohen Frequenzbereiche ab 24 GHz, die die angekündigten extrem großen Datenraten bei 5G erst ermöglichen, sind hingegen engmaschige Netzwerke (wenige Meter bis wenige hundert Meter) notwendig. Insbesondere deshalb, weil die Gebäudedurchdringung bei diesen Frequenzen sehr niedrig ist. Frequenzen jenseits der 24 GHz können keine steinernen Hauswände durchdringen und können sogar von Bäumen oder starkem Regen absorbiert werden.

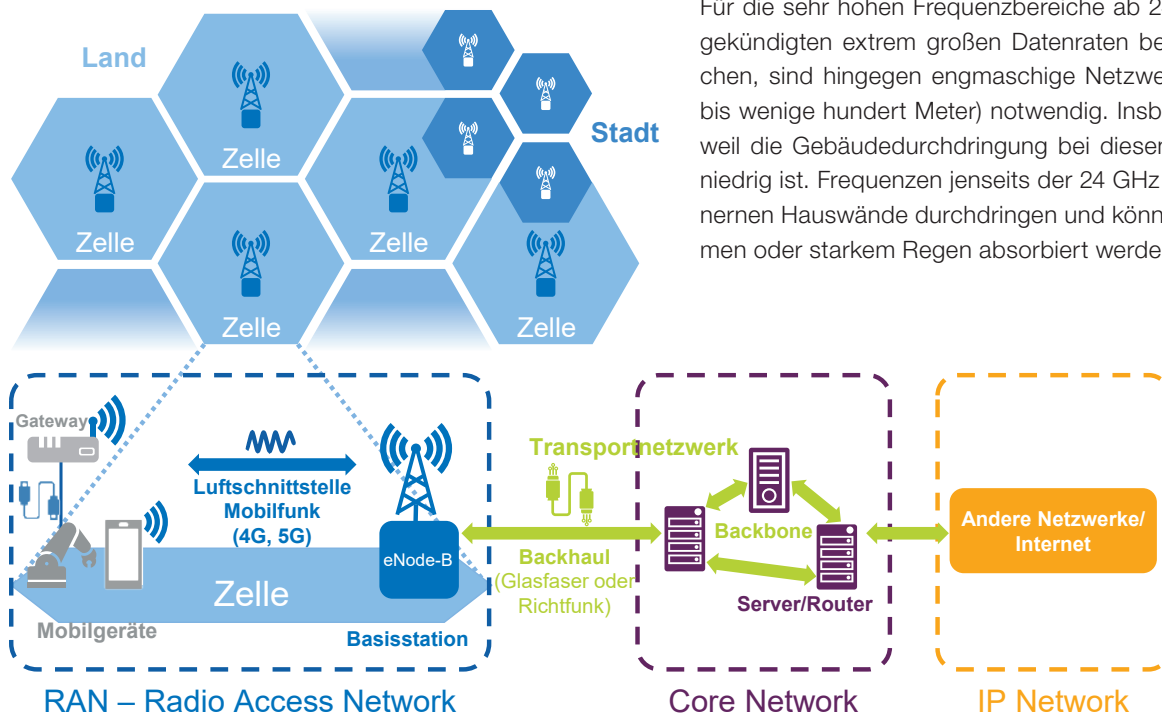


Abbildung 7: Vereinfachte, schematische Darstellung des Aufbaus eines Mobilfunknetzwerks.

Small Cells

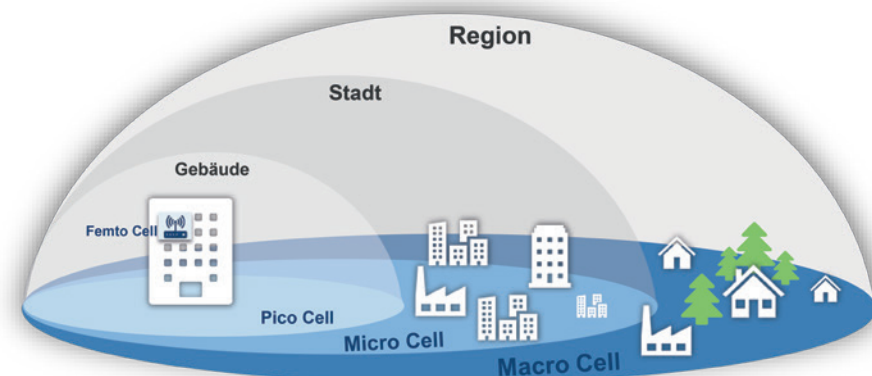
Um dieses Problem zu lösen, werden die Mobilfunknetzwerke der Zukunft verstärkt durch viele kleine Sendestationen mit niedriger Sendeleistung, die sogenannten „Small Cells“, aufgespannt sein, die jeweils nur eine kleine Fläche versorgen. Durch den geringen Abstand zwischen den einzelnen Sendestationen kann ein Gerät (z. B. Smartphone oder IoT-Gerät) immer eine Verbindung mit guter Signalstärke aufbauen.^[10]

Je nach Sendeleistung und räumlicher Ausdehnung des abgestrahlten Funknetzes, unterteilt man die Small Cells weiter in Femto, Pico und Micro Cells (siehe Abbildung 7), während die Sendestationen, die eine deutlich größere Fläche versorgen können, als Makrozellen bzw. „Macro Cells“ bezeichnet werden.

Pico und Micro Cells können sowohl in Gebäuden als auch außerhalb, zum Beispiel durch Anbringen der entsprechenden Antennentechnologie an Straßenlaternen, genutzt werden, während Femto Cells wegen ihrer sehr geringen Reichweite die Netzabdeckung in Gebäuden gewährleisten können. Die verschiedenen Technologien greifen ineinander, bilden ein heterogenes Gesamtnetz und sorgen so für eine flächendeckende Versorgung mit mobiler Konnektivität.

Auch für Unternehmen kann der Aufbau von Small Cells (4G oder 5G) zur Versorgung ihrer Produktionsstandorte von Interesse sein, da sie die bereits erwähnten, reservierten Frequenzbereiche für den Aufbau kleiner privater Netzwerke nutzen können.

Durch Small Cells ist es also möglich, die für 5G versprochenen sehr hohen Datenraten dem Nutzer trotz geringer Reichweite flächendeckend zur Verfügung zu stellen. Dennoch ist die Kapazität einer Funkzelle, also die Anzahl der Endgeräte, die sie gleichzeitig nutzen können, auch mit 5G weiterhin begrenzt. Die verbundenen Endgeräte müssen sich dann die zur Verfügung stehende Gesamtdatenrate aufteilen. Laut dem Cisco Virtual Networking Index^[12] wird aber der mobile Datenverkehr in den nächsten Jahren jedes Jahr um etwa 50 Prozent steigen, was hohe Ansprüche an die verfügbare Mobilfunknetzwerkkapazität stellt. Wie kann man also dem Bedarf an größerer Kapazität gerecht werden, wenn die verfügbare Bandbreite trotz der Erweiterung um 5G sowohl physikalisch als auch gesetzlich und durch die Aufteilung auf verschiedene Netzbetreiber begrenzt ist?



Zelltyp	Abgabeleistung [W]	Zellradius [km]	Benutzerzahl	Bereich
Femto Cell	0,001 – 0,25	0,01 – 0,1	1 – 30	Innen
Pico Cell	0,25 – 1	0,1 – 0,2	30 – 100	Innen&Außen
Micro Cell	1 – 10	0,2 – 2	100 – 2000	Innen&Außen
Macro Cell	10 – >50	8 – 30	>2000	Außen

Abbildung 8: Schematische Darstellung zur Verdeutlichung der verschiedenen Mobilfunk-Zelltypen, Femto, Pico, Micro und Macro Cells und ihrer jeweiligen Parameter (nach ^[11]).

Massive MIMO und Beamforming

Eine Antwort ist das sogenannte MIMO, was für Multiple-Input Multiple-Output (engl. für Mehrfach-Eingabe Mehrfach-Ausgabe) steht. Dabei wird die Kapazität eines Funknetzwerks durch die Erhöhung der Anzahl der pro Sendestation verfügbaren Antennen vergrößert. Auf diese Weise können mehr Signale simultan übertragen und so über dasselbe Frequenzband mehr Endgeräte gleichzeitig mit hohen Datenraten versorgt werden.^[13] Aktuell verfügen die meisten 4G (und auch WLAN) Basisstationen zwar bereits über MIMO-Technologie, allerdings ist die Anzahl der Antennen bisher eher gering und auf zwei bis vier begrenzt.

Bei 5G wird dieses Konzept daher auf sogenanntes massive MIMO erweitert. Hierbei sollen Antennenfelder mit hunderten Antennen zum Einsatz kommen. Nach Feldversuchen der Universitäten von Bristol und Lund lässt sich die zur Verfügung stehende Datenrate mit bis zu 128 Antennen pro Sendestation im Vergleich zu LTE um das zehnfache steigern.^[14]

Ein Problem dieser Technologie sind allerdings die Interferenzen zwischen den Signalen der verschiedenen Antennen, die sich mit steigender Antennenanzahl bemerkbar machen.

Daher kommen die Vorteile von massive MIMO erst durch eine weitere Neuerung, das sogenannte „Beamforming“ (engl. für Strahlformung) zum Tragen. Eine einzelne Antenne weist eine flache, unidirektionale Abstrahlkeule auf. Wie in Abbildung 9 schematisch dargestellt, kann durch zweidimensionale Anordnung der Antennen und die Kombination ihrer Signale eine sehr viel mehr gerichtete Abstrahlung in einer spitzen Abstrahlkeule mit höherer Sendeleistung erreicht werden. Auf diese Weise lassen sich Signale sowohl vertikal als auch horizontal auf ein bestimmtes Endgerät ausrichten. Selbst dann, wenn es sich bewegt, da die Antennenfelder in der Lage sind, das Endgerät mit dem Strahl zu verfolgen. Interferenzen und sonstige Störungen werden deutlich reduziert und die für den einzelnen Nutzer verfügbare Datenrate erhöht.

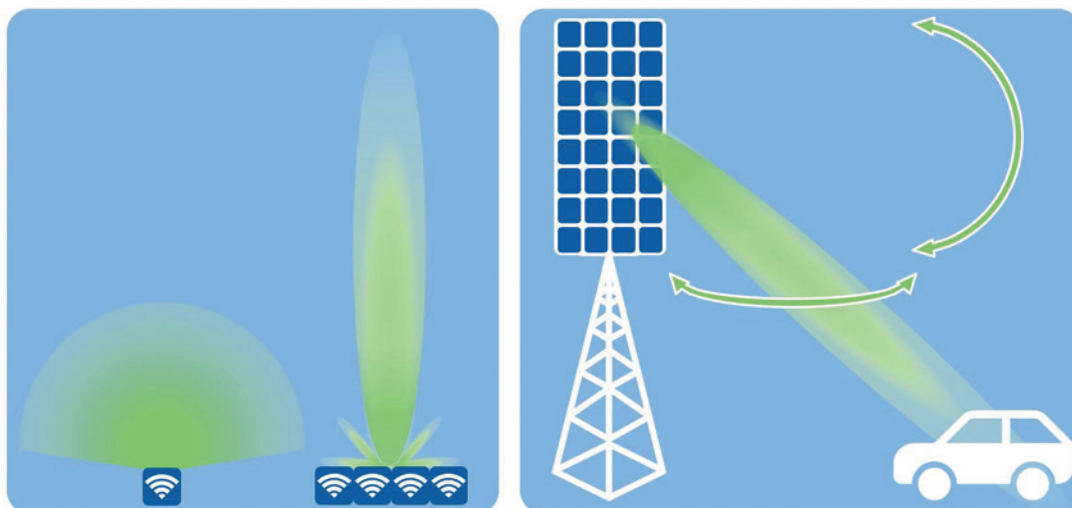
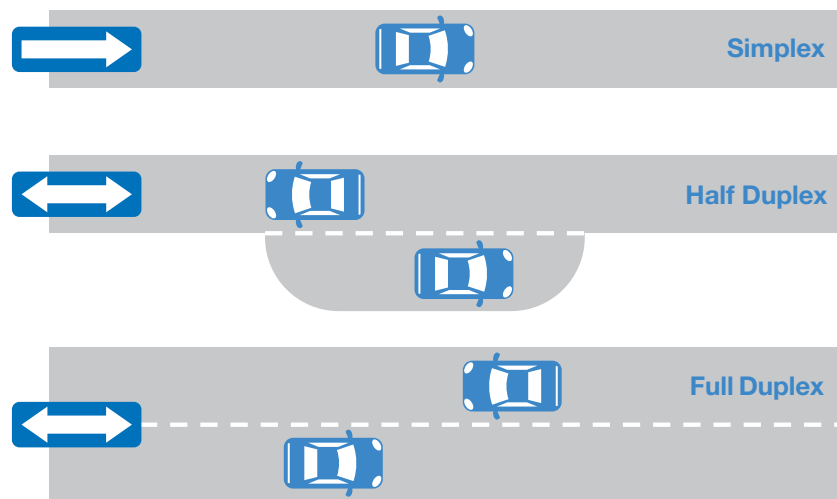


Abbildung 9: Veranschaulichung von horizontalem und vertikalem (3D) Beamforming bei 5G-Antennenfeldern zur gezielten Adressierung einzelner Endgeräte.

Full Duplex



Quelle: <https://community.fs.com/blog/simplex-vs-duplex-fiber-optic-cables.html>

Abbildung 10: Schematische Darstellung des Prinzips von Full Duplex.

Trotz des Einsatzes von MIMO konnte eine Herausforderung mit bisherigen Mobilfunktechnologien nicht gelöst werden. Aktuelle Basisstationen und Endgeräte basieren auf Sendempfänger-Technologie, die nicht gleichzeitig auf derselben Frequenz senden und empfangen können. Das bedeutet, dass entweder auf anderen Frequenzen gesendet werden muss als empfangen werden kann, oder dass sich Basisstation und Endgerät abwechseln müssen. Man kann sich das so vorstellen, wie eine Unterhaltung zwischen zwei Personen, bei der immer nur eine redet während die andere zuhört. Dieses Prinzip nennt man „Half Duplex“.

Mit der 5G-Technologie werden die Sendempfänger-Einheiten in der Lage sein, simultan und auf derselben Frequenz Daten zu senden und zu empfangen, was als „Full Duplex“ bezeichnet wird. Man kann sich das so vorstellen, dass zwei Personen gleichzeitig reden, aber trotzdem in der Lage sind einander zu verstehen. Dadurch können in derselben Zeitspanne doppelt so viele Daten übertragen werden.

Allerdings steht diese Technologie einigen Herausforderungen gegenüber, da dafür Schaltkreise designt werden müssen, die verhindern, dass ankommende und abgehende Signale mit-

einander kollidieren. Auch können Interferenzen zwischen ankommendem und abgehendem Signal ein Problem sein und machen den Einsatz von ausgefeilter Selbstinterferenzunterdrückungstechnologie notwendig.

Mit den Schlüsseltechnologien Full Duplex, massive MIMO und Beamforming, Small Cells, Network Slicing und Edge Computing wird 5G voraussichtlich in der Lage sein, die Erwartungen an die Leistungssteigerung der neuen Mobilfunkgeneration zu erfüllen. Auch wenn momentan noch nur vereinzelt kompatible Endgeräte zu kaufen oder angekündigt sind, soll ab 2020 5G auch einer breiten Nutzerschicht verfügbar gemacht werden und so ein neues Zeitalter des Mobilfunks einläuten. Daher ist es zurzeit eine der meisten diskutierten Technologien und wird von Vertretern aus Politik und Wirtschaft häufig als „Schlüsseltechnologie“ bezeichnet. Beispielsweise glauben 75 % der Führungskräfte der Industrie- und Kommunikationsbranche, dass 5G der Schlüsselfaktor für ihre Digitale Transformation in den nächsten fünf Jahren sein wird.^[15] Insbesondere die bereits erwähnte Möglichkeit, lokale Frequenzen für private Mobilfunknetze zu beantragen und zu nutzen, macht den Mobilfunk besonders interessant für Industrieunternehmen, die ihn nun leichter zur Umsetzung von Industrie-4.0-Projekten nutzen können.

5G für die Industrie

Da der globale Trend immer mehr in Richtung individualisierter Produkte und Transparenz über die gesamte Wertschöpfungskette geht, werden an die Produktion der Zukunft völlig neue Anforderungen bezüglich Flexibilität, Effizienz und Geschwindigkeit gestellt. So ist es denkbar, eine Montagelinie sogar während der Produktion umzustellen, um sie den sich kurzfristig ändernden Bedarfen anzupassen. Eine drahtlose Netzwerktechnologie zur Übertragung von Produktions- und Sensordaten hat hierbei den Vorteil, dass die Fähigkeit zum Datenaustausch mit dem Netzwerk erhalten bleibt, ohne zeit- und kostenintensive Arbeiten zur Neuverkabelung durchführen zu müssen. Alle drahtlosen Kommunikationstechnologien, ob WLAN oder Mobilfunk, teilen daher zunächst einmal den Vorteil der kabelunabhängigen Anbindung betrieblicher Objekte. Neben meist ortsfesten Objekten wie Produktionsmaschinen in Montagelinien können auch ständig bewegliche Objekte, wie beispielsweise die in Produktion und Logistik eingesetzten Transportmittel, mit Konnektivität versorgt werden.

Ein wichtiger Punkt in dem sich ein Mobilfunk- von einem WLAN-Netz unterscheidet, ist die Möglichkeit, neue Anwendungen zusätzlich einzubinden oder bestehende skalieren zu können. Viele Produktions- und IT-Verantwortliche der Industrie lassen in ihren produktiven Abläufen keine weiteren WLAN-Geräte mehr zu, um die bestehenden Prozessabläufe nicht zu stören. Im Sinne der fortschreitenden Digitalisierung des Shopfloors bleibt so meist nur der Weg zu dedizierten Mobilfunknetzen, deren Architektur auf die gleichzeitige, stabile und zuverlässige Versorgung einer deutlich höheren Geräteanzahl ausgelegt sind.

Ein gutes Beispiel dafür findet sich in den innerbetrieblichen Transportflüssen, wo zukünftig nicht nur Stapler und andere Fahrzeuge Positions-, Zustands- und Umgebungsdaten an zentrale Datenverarbeitungsstandorte senden, sondern auch Ladungsträger und sogar Produkte und Betriebsstoffe selbst vernetzt sind. So wird eine informatorische Transparenz des Hallengeschehens geschaffen, die es ermöglicht, Auftragsstände in Echtzeit zurückzumelden und sogar steuerbar zu machen. Andere Beispiele schließen drahtlos vernetzte Werkzeuge an Arbeits- und Montagestationen ein, die sich automatisch auf die nötigen Parameter für den gerade getätigten Vorgang einstellen können.

Weitere industrielle Anwendungsfelder eröffnen sich besonders durch die bereits erwähnte Ultra Reliable Low Latency Communications. Mittels Virtual Reality (VR) kann ein zentraler Experte die Arbeitsumgebung eines Kollegen vor Ort virtuell so erleben, als wäre er selbst vor Ort. So kann er seinen Kollegen zielgerichtet mit Hinweisen und Informationen bei Wartung oder Instandhaltung unterstützen. Aufgrund der mobilen Konnektivität ergibt sich ein sehr weites Anwendungsspektrum im Innen- und Außenbereich. Entsprechende Lösungen steigern die Effizienz von Spezialisten, die so ohne extra anreisen zu müssen mehrere Standorte betreuen können, womit auch der Bedarf nach gut ausgebildeten Fachkräften gesenkt wird.

Viele dieser Beispiele sind zu Beginn auch mit 4G/LTE realisierbar. Wenn jedoch eine größere Anzahl an Objekten eingebunden werden müssen und zusätzlich auch die übertragenen Datenmengen zunehmen, wird irgendwann ein Umstieg auf dedizierte 5G-Technik ratsam, um die Qualitätsanforderungen der Anwendungen zuverlässig erfüllen zu können.

Trotz einer Vielzahl an bereits bekannten möglichen Anwendungsfeldern befinden sich industrielle Mobilfunk- und 5G-Anwendungen heute zum Großteil noch im Entwicklungsstadium. Aufgrund des hohen erkennbaren Potenzials wird die Entwicklung aber von Anwendern (wie produzierende Unternehmen), Technologieanbietern und der Forschung rasch vorangetrieben. Im Speziellen werden die für die Industrie relevantesten 5G-Anwendungsfälle wahrscheinlich erst in mehreren Jahren, wenn 5G-Technologie breitflächig zur Verfügung steht, identifiziert und erschlossen werden.

Dennoch werden im Folgenden erste Anwendungsfälle dargestellt, denen nach heutigen Erkenntnissen ein signifikanter wirtschaftlicher Nutzen zugesprochen wird. Sie sind in Abbildung 10 zusammengefasst und grob in die drei bereits erläuterten Anwendungsfallkategorien eingeordnet. Möchte ein Unternehmen Vorreiter beim industriellen Einsatz von 5G sein, so stellen diese Anwendungen mögliche Startpunkte dar.

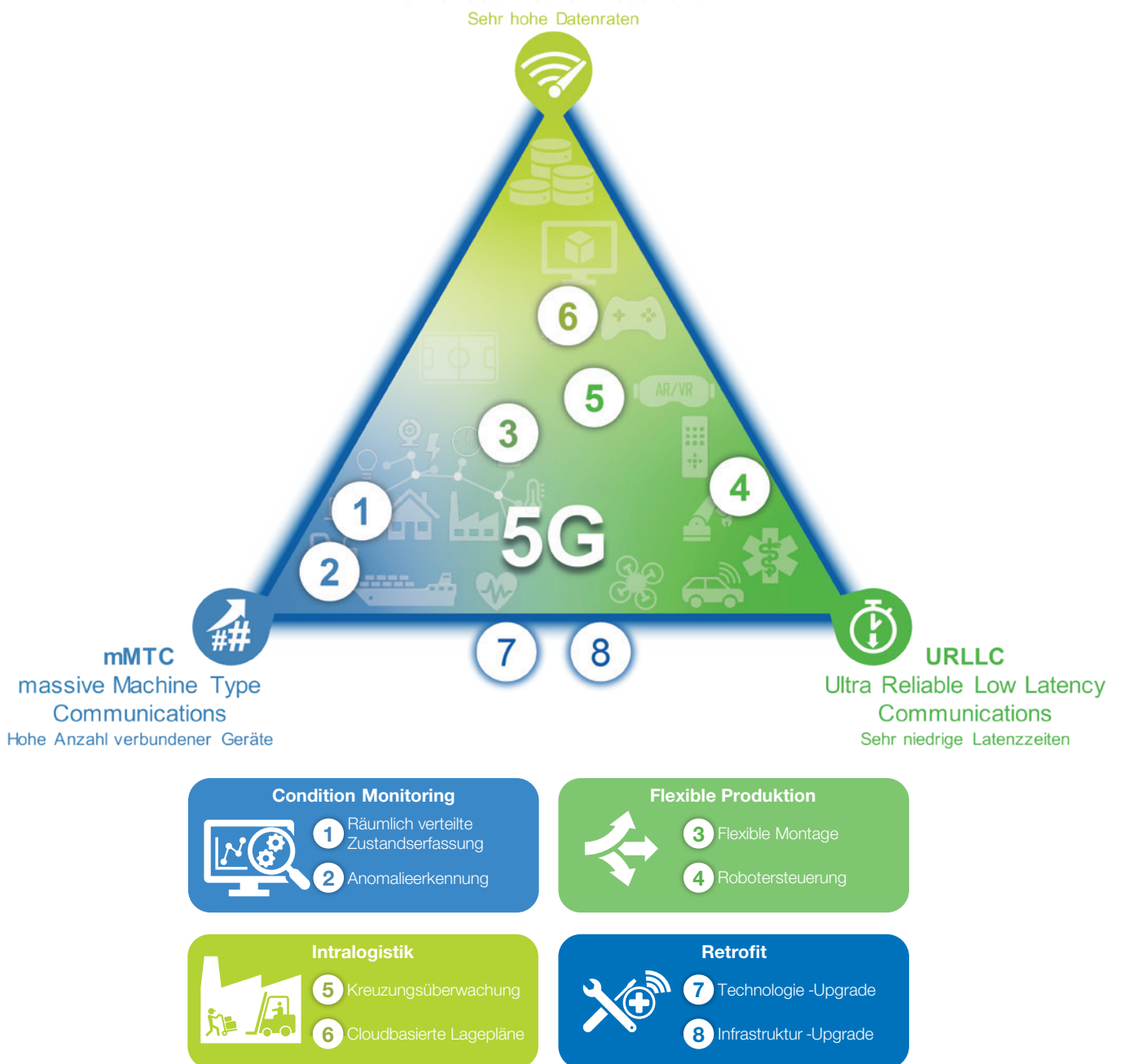
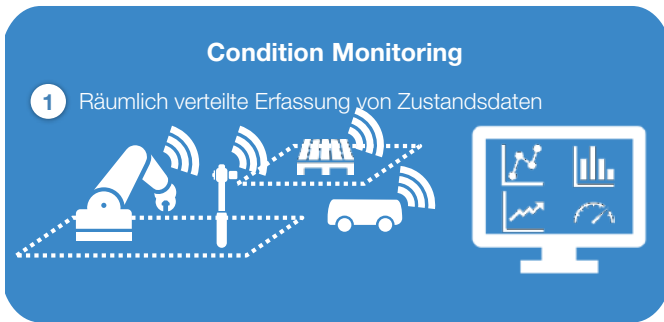


Abbildung 11: Einordnung der hier vorgestellten industriellen 5G-Anwendungsfälle in die drei bereits erläuterten Kategorien.

Condition Monitoring

Das Anwendungsfeld Condition Monitoring (Zustandsüberwachung) beinhaltet alle Anwendungen, durch die Maschinenparameter und Qualitätsmerkmale überwacht werden. Dazu zählt nicht nur die Erfassung von Störungen, sondern auch die Dokumentation von Aktionen von Maschinen und Werkzeugen. Zwei Anwendungsbeispiele des Condition Monitoring sind die räumlich verteilte Erfassung von Zustandswerten und die Anomalieerkennung.

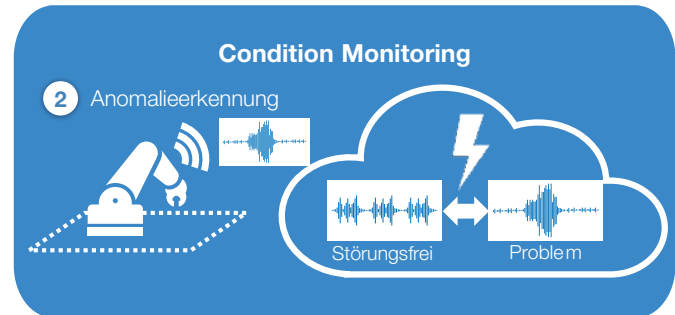


1. Räumlich verteilte Erfassung von Zustandsdaten

In der Produktion der Zukunft wird nicht nur der aktuelle Zustand aller relevanten Produkte und Produktionsgüter bekannt sein, sondern es werden sich alle durchgeführten Arbeitsschritte anhand einer dokumentierten Historie nachverfolgen lassen. Auf diese Weise können systematische Fehler schnell und effektiv beseitigt werden. Eine mit dem falschen Drehmoment festgezogene Schraube beispielsweise ließe sich nicht nur im Nachgang in der dokumentierten Historie eindeutig identifizieren, sondern könnte vom führenden System sofort als Fehler erkannt und zur Nachbesserung zurückgemeldet werden. Voraussetzung dafür ist allerdings die datentechnische Anbindung aller Betriebsmittel und damit eine extrem hohe Anzahl an Geräten, die mit heutiger Kommunikationstechnologie nicht zu bewältigen ist. 5G wurde so ausgelegt, dass gegenüber Technologien wie WLAN oder LTE eine deutlich höhere Anzahl an Geräten simultan versorgbar ist. Hoch genug, um in einer typischen Produktionshalle jedes Werkzeug, jede Maschine und jeden Ladungsträger anzubinden.

Auf der Produktionsfläche generierte Daten können jedoch nicht nur zur Fehlervermeidung und Dokumentation herangezogen werden. Durch Analyseverfahren von Mustern und weitere Ver-

fahren lassen sich gegebenenfalls Anomalien erkennen, wodurch im Sinne präventiver Instandhaltung entstehende Probleme frühzeitig erkannt und behoben werden können.



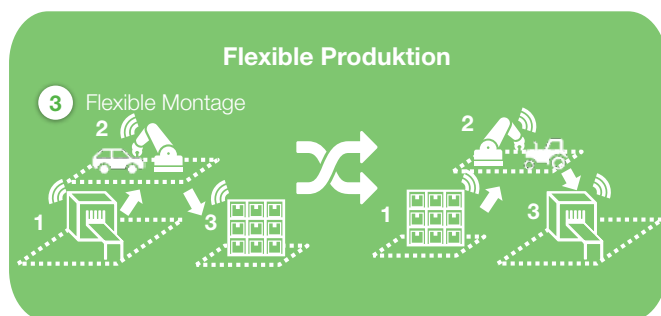
2. Anomalieerkennung

Im Feld der präventiven Instandhaltung (engl. Predictive Maintenance) entstehen neue Ansätze, die es dem Anwender erlauben, frühzeitig und gezielt Anomalien zu erkennen und zu beheben. Oftmals kennzeichnet diese Anwendungsfälle eine enorme Anzahl an Sensoren, die ihre Daten an eine zentrale Auswertungsplattform schicken. In ersten Produktionswerken wird aktuell mit verteilten Mikrofonsystemen experimentiert. Auf einer Werkshalle verteilt befinden sich mehrere hundert oder tausend Mikrofone, die Umgebungsgeräusche aufnehmen und weiterleiten. Eine Software lernt, was normale Geräusche sind und identifiziert auf Basis dieser Erfahrungswerte Anomalien, die möglicherweise auf einen baldigen Wartungsfall hindeuten. Da die Position der Mikrofone bekannt ist, lässt sich auch auf die Lokalisierung der Anomalie, d. h. auf eine bestimmte Maschine, schließen.

Mit konventionellen Kommunikationstechnologien ist dieser Anwendungsfall nicht realisierbar. Er scheitert an zwei Hürden: keine heutige Technologie kann so eine hohe Dichte verbundener Geräte zuverlässig realisieren, und die Mikrofone müssten entweder mit einer Stromversorgung ausgestattet werden oder häufige Batteriewechsel müssten geplant werden. 5G ermöglicht die Verbindung einiger tausend verbundener Geräte innerhalb einer Produktionshalle und verfügt in dieser speziellen Konfiguration über einen sehr geringen Energieverbrauch, sodass Batterien nur alle 5 – 10 Jahre ausgetauscht werden müssen.^[16]

Flexible Produktion

Serielle Maßanfertigung (engl. Mass Customisation) und agile Produktion (engl. Agile Manufacturing) sind Trends, welche die Zukunft der Industrie immer stärker prägen und nachhaltig verändern werden. Konkret bedeutet dies für Betriebe, dass die Produktvielfalt steigt und die produzierten Güter immer individueller werden während Marktbedürfnisse immer schneller adressiert werden müssen und sich die Produktionszyklen verkürzen. Eine flexible, anpassbare Produktion und kurze Anlaufzeiten sind wichtige Erfolgsfaktoren zur Umsetzung dieser Anforderungen. Heute sind Produktionsmaschinen und -anlagen jedoch häufig über Kabel angebunden. Dadurch ist es teuer, die Produktion umzustellen und das gesamte System wird starr. Eine Anbindung der Anlagen durch 5G würde zumindest die datentechnische Anbindung vereinfachen und das Aufstellen der Anlagen in allen möglichen Lagen der Halle ermöglichen. Die zwei folgenden Anwendungsfälle flexible Montage und Robotersteuerung beschreiben zwei Ansätze, wie durch 5G die Produktion flexibler gestaltet werden kann.



3. Flexible Montage

Ein Beispiel für eine flexible Montage ist die automatische Anpassung von bisher starren Montagelinien auf verschiedene Arten von Produkten. Werden Produktionsmittel, wie Werkzeuge und Maschinen, einer Montagelinie statt sie zu verkabeln über 5G drahtlos angebunden, kann der Fertigungsbereich schnell und effizient umgebaut und erweitert werden. So wird eine flexible Anpassung auf verschiedene Produkte und Anforderungen möglich und sowohl Investitionskosten als auch Anlaufzeiten werden verringert. Durch die Datenverbindung mit hoher Daten-

rate und niedriger Latenz können außerdem die Informationen zur aktuellen Fertigung in Echtzeit zu den Produktionsmitteln übertragen werden.



4. Robotersteuerung

In der Robotik können leistungsfähige 5G-Komponenten bisher vorhandene Kabelverbindungen ersetzen. So muss beispielsweise ein Roboterarm, dessen automatisierte Funktionen eine Regelung in Echtzeit also mit extrem niedriger, zuverlässiger Latenz erfordern, bisher über Kabel verbunden werden. Da dieser sich jedoch ständig in Bewegung befindet, unterliegt die Verkabelung insbesondere an den Gelenken einem hohen Verschleiß. Daraus resultieren eine eingeschränkte Bewegungsfähigkeit und ein erhöhter Wartungsaufwand. Durch die mit 5G erreichbare zuverlässige Datenverbindung mit extrem niedrigen Latenz, können die Kabelverbindungen durch 5G-Funklösungen ersetzt werden und die notwendigen Wartungen und Reparaturen werden reduziert.

Intralogistik

In der Logistik bietet 5G die Möglichkeit, die Vision der durchgehend vernetzten Lieferkette Realität werden zu lassen. Fahrzeuge, Ladungsträger und auch Produkte werden jederzeit transparent abbildbar und steuerbar. Das volle Potenzial von 5G kommt gerade auch beim Einsatz von fahrerlosen Transportsystemen (FTS) und Robotern zum Tragen. Durch das zuvor bereits beschriebene Network Slicing können verschiedene Informationsströme voneinander getrennt behandelt werden. Die Übertragung von Zustands- und Positionsdaten eines Fahrzeugs benötigt beispielsweise nur eine geringe Datenrate, während für das Auslesen von Kamera- und Laserscanner-Daten, die dem Fahrzeug die räumliche Orientierung erlauben, eine sehr hohe Datenrate erforderlich ist. Gleichzeitig müssen Steuersignale und Aktualisierungen von Softwarekomponenten zuverlässig, sicher und mit geringer Latenz übertragen werden. Mit Network Slicing lassen sich diese Anforderungen getrennt adressieren und so gezielt dedizierte Ressourcen bereitstellen. In Kombination mit performanten Edge- oder Cloud-Systemen, die eine weitere Analyse von Fahrzeugdaten beispielsweise zur Objekterkennung übernehmen können, können so Informationen über Hindernisse an andere Transportfahrzeuge und -systeme weitergereicht und sogar individuelle Objekte identifiziert und rückgemeldet werden.

Besonders auch beim Betrieb einer Vielzahl von Fahrzeugen, die sich nicht nur innerhalb, sondern auch zwischen Gebäuden eines Standortes bewegen können, ist ein Mobilfunknetz von Vorteil, da eine hohe Verbindungsqualität nahtlos zur Verfügung gestellt werden kann. Zwei mögliche Anwendungen für 5G in der Intralogistik, insbesondere für den Einsatz von FTS, werden im Folgenden erläutert.

5. Kreuzungsüberwachung

In heutigen Produktionsanlagen, Lagern, oder sonstigen industriellen Umgebungen sind FTS häufig in ihrer Geschwindigkeit begrenzt und fahren deutlich langsamer, als eigentlich möglich wäre. Einer der Gründe für diesen Umstand ist eine erhöhte Kollisionsgefahr. FTS sind mit Sensorik ausgestattet, welche Menschen und Hindernisse erkennen, ggf. umfahren und das FTS bei Kollisionsgefahr zum Anhalten bringen kann. Kreuzungen stellen jedoch eine besondere Herausforderung dar. Ein Mensch oder ein bewegliches Objekt, das sich aus einem Quergang einer Kreuzung nähert, ist für die Sensorik des FTS häufig durch Gegenstände oder andere Hindernisse verdeckt und kann daher nicht oder nur spät erkannt werden. Aus diesem Grund muss bisher die Geschwindigkeit eines FTS im Bereich von Kreuzungen und Seitengängen generell reduziert werden, um die erforderliche Betriebssicherheit zu gewährleisten. Durch den Einbau von Sensorik wie Kameras und Laserscanner in der Infrastruktur und der Auswertung der davon übermittelten Daten können Objekte oder Personen, die sich auf Kreuzungen oder Einmündungen zubewegen, rechtzeitig erkannt und diese Information an sich nähernde FTS übermittelt werden. So können FTS ihre Geschwindigkeit auch an Kreuzungen beibehalten und nur nach Bedarf verringern, was die Fahrzeiten reduziert. Allerdings muss diese Kommunikation extrem zuverlässig funktionieren und über eine sehr geringe Latenz verfügen, um den Anforderungen an die Sicherheit zu genügen. 5G erfüllt diese Kriterien und ermöglicht somit erstmals die Umsetzung eines solchen Systems. Der Vorteil ist ein Produktivitätsgewinn durch die niedrigeren Fahrzeiten der FTS.





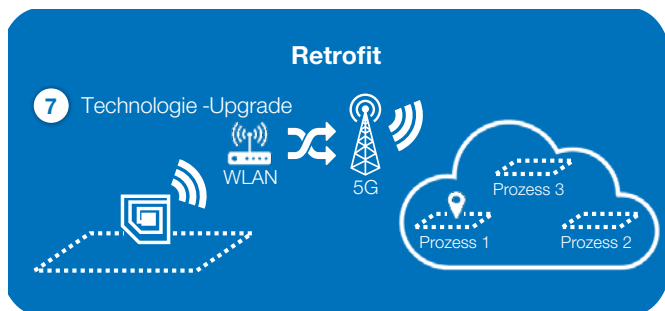
6. Cloudbasierte Lagepläne

FTS können dank verbauter Sensorik autonom navigieren. Allerdings erfasst die verbaute Sensorik ausschließlich die unmittelbare Umgebung des FTS. Änderungen in der entfernten Umgebung, wie beispielsweise das Blockieren eines Wegs durch abgestellte Objekte, werden erst in direkter Nähe erfasst. Eine rechtzeitige Umplanung der Route ist somit nicht möglich. Cloudbasierte Lagepläne sind Umgebungskarten von Produktionshallen oder Lagern, die durch die Sensor-Informationen aller angebotenen FTS in Echtzeit aktualisiert und genauso wieder allen FTS zur Verfügung gestellt werden. Es entsteht ein gemein-

sam genutzter, ständig aktualisierter Lageplan, der den Echtzeit-zustand des gesamten Geländes wiedergibt. 5G ermöglicht in diesem Anwendungsfall die latenzkritische Übertragung der sehr hohen Datenmengen von in FTS integrierten Kameras und Laserscannern und die Verarbeitung in einem Edge-System. Produktionsleiter haben so jederzeit Zugriff auf ein aktuelles Bild der Produktionsumgebung und können mögliche Abweichungen durch falsch platziertes Material mit potenziell sicherheitskritischen Auswirkungen frühzeitig erkennen. Des Weiteren können Routen der FTS schneller angepasst und Hindernisse effizient umfahren werden.

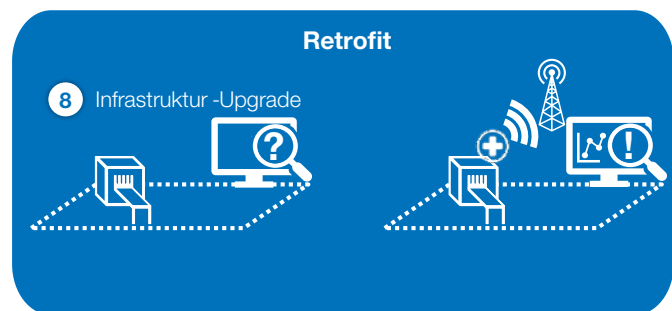
Retrofit

Unter einem Retrofit (engl. für Nach- oder Umrüstung) versteht man gemeinhin die Modernisierung von bestehenden, meist älteren Produktionsmitteln durch den Einsatz neuer Technologie. Dies kann, wie in den folgenden zwei Anwendungsfällen beschrieben, entweder durch eine Umrüstung bzw. einen Ersatz bereits bestehender Technologie durch eine neuere Variante mit erweiterter Funktionalität geschehen oder durch Ausrüstung mit bisher nicht vorhandener Technologie.



7. Technologie-Upgrade

Beim Technologie-Upgrade werden vorhandene Netzwerkkomponenten durch 5G-Komponenten ersetzt, die eine höhere Leistungsfähigkeit besitzen und durch die Verwendung von standardisierten Schnittstellen eine geringere Systemkomplexität verursachen. Die Menge an benötigter, unterschiedlicher Hardware wird so reduziert („Ein Netzwerk für alles“) und die Installation wird vereinfacht, wodurch eine Zeiterparnis bei der Implementierung möglich ist. Zudem können durch den Einsatz von 5G die Funktionalitäten erweitert werden. So kann beispielsweise eine RFID^[10]-Sensorstation mit einer 5G-Kommunikationslösung ausgerüstet werden, die außer der Übertragung von Identifikationsdaten auch eine grobe Lokalisierung ermöglicht. Wird die RFID-Sensorstation an einen anderen Platz verschoben, könnten dieser mittels Geofencing^[11] neue Aufgaben zugeteilt werden. Hierdurch würde die Flexibilität der Prozesse bei gleichzeitiger Reduzierung der Umstellungskosten erhöht.



8. Infrastruktur-Upgrade

Ein Infrastruktur-Upgrade bedeutet die Neuausstattung einer industriellen Infrastruktur mit 5G-Technologie. Das Upgrade einer (analogen) Infrastruktur schafft die Möglichkeit, alte Maschinen und Anlagen mit der Produktions-IT zu verbinden. So wird eine bisher fehlende Transparenz bzw. Sichtbarkeit von Abläufen und Zuständen in der Produktion geschaffen. Diese datentechnische Anbindung der Anlagen ist erforderlich, um das volle Potenzial von Industrie 4.0 entfalten zu können. Der Einsatz von 5G gestaltet hier die Anbindung deutlich einfacher als sie mit teuren und unflexiblen, kabelgebundenen Lösungen gewesen wäre.

Die hier beschriebenen Anwendungsfälle stellen nur einen kleinen Teil der denkbaren Lösungen dar. In jedem Fall hat 5G das Potenzial, die industrielle Prozesslandschaft radikal zu verändern. Es erfüllt die meisten Anforderungen bestehender Anwendungsfälle, die heute auf WLAN, Bluetooth oder Auto-ID-Technologien basieren, und eröffnet gleichzeitig eine breite Palette neuer Möglichkeiten. Allerdings hängt die zukünftige tatsächliche Nutzung von 5G wie bei jeder neuen Technologie von der Akzeptanz der potenziellen Anwender ab. In der Öffentlichkeit ist 5G momentan nicht unumstritten.

Kontroverse

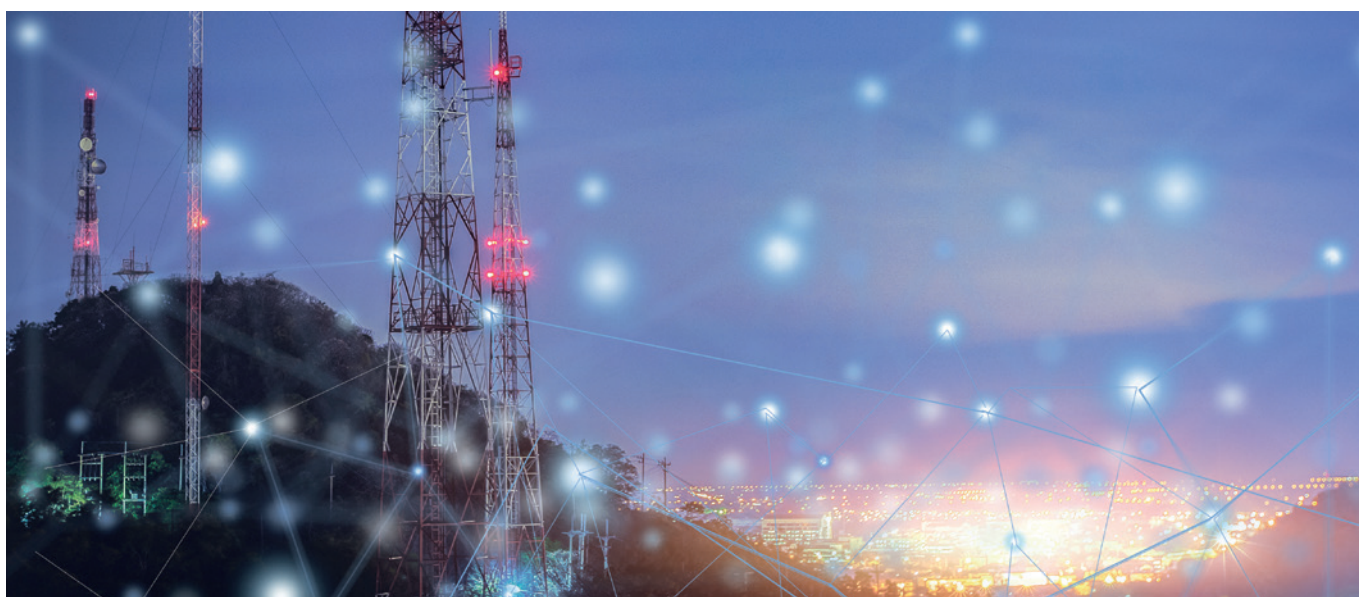
Trotz der meist positiven Berichterstattung und der fast euphorischen Erwartungshaltung der neuen Mobilfunkgeneration gegenüber gibt es auch Aspekte von 5G, die kontrovers diskutiert werden.

Zwar freuen sich die Industrieverbände über die Möglichkeiten zur lokalen, nicht-öffentlichen Nutzung von 5G-Frequenzbereichen^[17], die großen Netzbetreiber hingegen dürften weniger erfreut sein.^[18] Die lokal vergebenen Frequenzen bieten schließlich den Industrieunternehmen mehr Unabhängigkeit von den etablierten Netzbetreibern und enthalten diesen einen Teil ihres Kerngeschäfts vor. Um eine mobile Datenanbindung jedoch nahtlos über die gesamte Wertschöpfungskette von Produktion und Logistik nutzen zu können, ist eine Zusammenarbeit zwischen beiden Parteien zwingend notwendig. Einige Netzbetreiber haben das erkannt und planen daher explizit den Schulterschluss mit der deutschen Industrie zum gewinnbringenden Netzwerkaufbau.^{[19] [20]}

Außerdem eröffnen sich, sowohl für die Anbieter von Netzwerktechnologie als auch für Unternehmen, deren Beschäftigungs-

feld bisher die Planung industrieller WLAN-Netzwerke war, neue Märkte.

Auch über die Finanzierung des Netzausbaus wird viel diskutiert. So gibt es beispielsweise Kritik am rasanten Wettbieten bei der vergangenen Frequenzversteigerung^[21]. Die Summe der Gebote kletterte bereits nach weniger als vier Wochen auf fast 5,4 Milliarden Euro und endete in einer Gesamtsumme von ca. 6,5 Milliarden Euro. Nun besteht die Sorge, dass diese Kosten ein Loch in die Investitionsbudgets der Netzbetreiber reißen und den Netzausbau somit wegen fehlender Ressourcen verzögern. Außerdem könnten die Preise für die 5G-Tarife deshalb deutlich höher ausfallen als erhofft. Grundsätzlich ist jedoch die Ersteigerung von Frequenz-Lizenzen mit bestimmten Auflagen zum Netzausbau verknüpft. Bis Ende 2022 sollen beispielsweise mindestens 98 Prozent der Haushalte mit Übertragungsraten von mindestens 100 Mbit/s versorgt werden. Auch für die Übertragungsraten entlang wichtiger Infrastruktur, wie Straßen oder Bahnschienen, gibt es Auflagen. In der Praxis muss dieser Ausbau aber nicht mit 5G erfolgen, weshalb vermutlich besonders in ländlichen Gebieten auf 4G zurückgegriffen werden



wird. Zudem soll der Erlös aus der Frequenzversteigerung laut Bundesminister für Verkehr und digitale Infrastruktur Andreas Scheuer (CSU) „zu 100 Prozent in das Sondervermögen ‚Digitale Infrastruktur‘“^[22] fließen, mit dem unter anderem der Breitbandausbau auf dem Land gefördert werden soll, der auch für den Mobilfunkausbau ein wichtiger Faktor ist.

Tatsächlich ist es auch fraglich, ob sich mit 5G für den privaten Endnutzer überhaupt deutliche Änderungen ergeben, lassen sich doch die meisten Anwendungen für Smartphones und Tablets nahezu problemlos auch mit 4G abdecken. Für anspruchsvolle Online-Multiplayer-Spiele oder Augmented Reality Anwendungen kann 5G jedoch von Vorteil sein.

Für die Industrianwendungen gibt es zwar bereits wie beschrieben erste Ideen und Testfelder, das vollständige Potenzial ist aber noch bei weitem nicht ausgelotet und konkrete Anwendungen müssen noch erprobt und vollständig definiert werden. Hier ist es wichtig, dass getestet wird welche spezifischen Anwendungsszenarien entlang der Wertschöpfungskette mit 4G abbildbar sind und wo die Ansprüche an die Netzwerkeistungsfähigkeit so hoch sind, dass perspektivisch auf 5G erweitert werden muss.

Wie der tatsächliche Netzausbau, sowohl von Netzanbietern als auch bei Industrieunternehmen, letztendlich also voranschreiten wird, bleibt daher abzuwarten.

Ein weiterer, extrem kontrovers diskutierter Punkt ist der Einfluss von 5G-Mobilfunk auf die Gesundheit. Hier werden oft Ängste der Nutzer durch Fehl- oder Halbinformationen geschürt. Dabei lässt sich zumindest die aktuelle Lage eindeutig zusammenfassen:

Die momentan versteigerten Frequenzen liegen in einem Frequenzbereich, der schon seit Jahren breitflächig für Mobilfunk und WLAN genutzt wird und daher schon Gegenstand vieler Untersuchungen war. Die WHO und das Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) kommen beispielsweise nach eigenen Untersuchungen und der Auswertung anderer Studien zu dem Schluss, dass kein Zusammenhang zwischen den Feldern von Mobilfunkbasisstationen und Befindlichkeitsstörungen wie Kopfschmer-

zen nachgewiesen werden konnte. Auch konnte in den Studien kein Zusammenhang mit Leukämie oder Krebserkrankungen wie Hirntumoren oder ein Einfluss auf die Fortpflanzungsfähigkeit hergestellt werden.^[23] Bei den drei großen, weltweit hervorgerufenen Studien (Interphone^[24], Danish^[25], Million Woman^[26]) an insgesamt mehr als 1,5 Millionen Menschen konnte ebenfalls keine übereinstimmende Korrelation mit Krebs gefunden werden – auch nicht über mehr als zehn Jahre Nutzungsdauer. Solange die vorgegebenen Grenzwerte für die spezifische Absorptionsrate, den sogenannten SAR-Wert, eingehalten werden, sind also keine negativen Effekte auf die Gesundheit zu erwarten.

Aktuelle Untersuchungen können beispielsweise auch über das EMF-Portal der RWTH Aachen abgerufen werden.^[27]

Was die „echten“ 5G-Frequenzen angeht, die mittelfristig eingeführt werden sollen, gibt es dazu noch relativ wenige Untersuchungen. Allerdings ist auf Basis der physikalischen Grundlagen für die Wechselwirkung von elektromagnetischer Strahlung mit Materie kein gravierender Einfluss zu erwarten. Generell teilt man elektromagnetische Strahlung nach der Art ihrer Wechselwirkung mit Materie in ionisierende und nicht ionisierende Strahlung ein (siehe Abbildung 11). Ionisierende Strahlung, zu der beispielsweise Röntgen- oder Gammastrahlung gehört, ist aufgrund ihrer hohen Energie in der Lage, Elektronen aus ihrer vorgesehenen Position am Atom zu entfernen. In der Konsequenz kann solche Strahlung chemische Bindungen aufbrechen und abhängig von eingestrahelter Leistung und Dauer der Bestrahlung akute und chronische Strahlungsschäden (wie Hautverbrennungen, Organschäden, genetische Schäden, Krebs) hervorrufen.

Mobilfunk ist jedoch durch seine deutlich kleinere Frequenz (und damit auch kleinere Energie) weit davon entfernt solche Schäden hervorrufen zu können. Der Frequenzbereich, in dem Mobilfunk operiert, gehört inklusive der Erweiterung auf die höheren 5G-Frequenzen komplett zur Kategorie der nicht-ionisierenden Strahlung. Deren Wechselwirkung mit Materie ist auf thermische Effekte begrenzt. Abhängig von Frequenz und abgestrahlter Leistung ist auch die Eindringtiefe in den

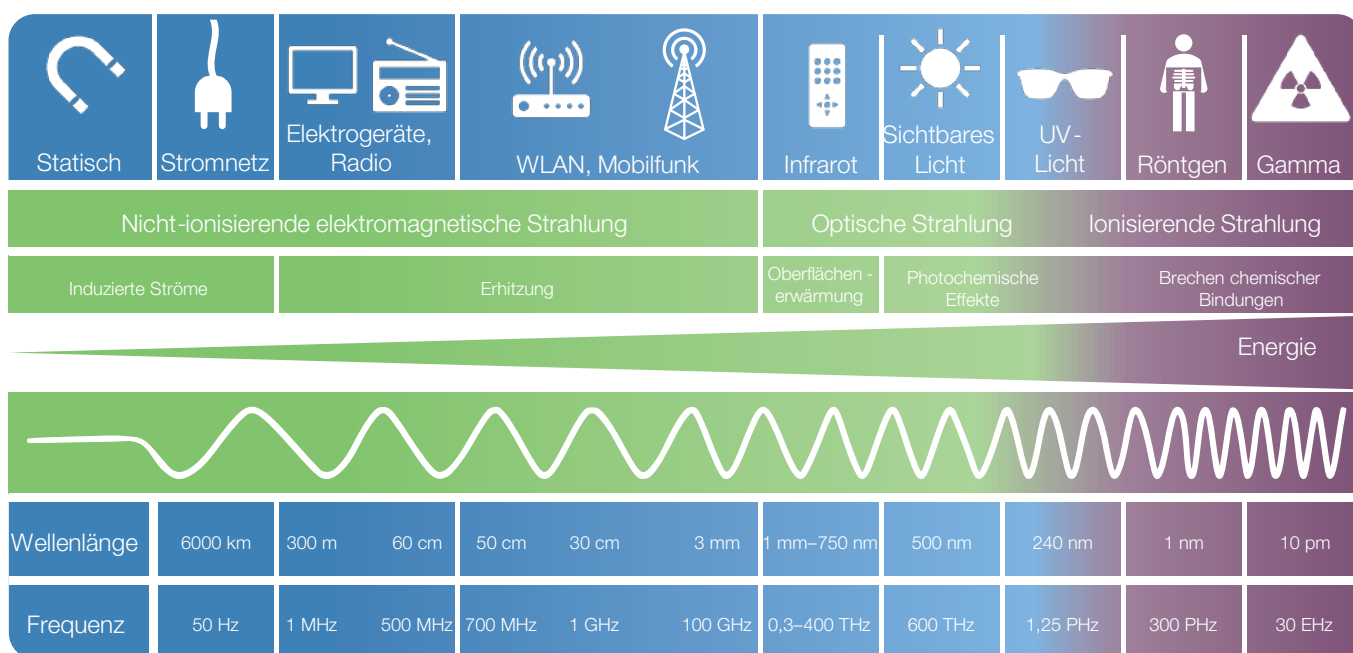


Abbildung 12: Übersicht über Frequenzen und Wellenlängen im elektromagnetischen Spektrum, sowie über die jeweilige Art der Materiewechselwirkung und tatsächliche Anwendungsfelder.

Körper gering. Insbesondere die sehr hohen Frequenzen jenseits der 20 GHz werden schon an der Körperoberfläche absorbiert und dringen so gar nicht erst in den Körper ein. Ein Einfluss auf Augen, Haut und Schweißdrüsen muss allerdings noch untersucht werden. Der Vergleich mit der gängigen, zur Erwärmung von Speisen verwendeten, Mikrowelle ist jedoch allein schon deshalb hinfällig, weil eine Mikrowelle mit mehr als 500 W eine um mehrere Größenordnungen höhere Strahlungsleistung hat, als beispielsweise eine Mobilfunk-Pico Cell mit unter 0,25 W. Sogar eine Mobilfunkbasisstation für eine große Makrozelle strahlt mit um die 50 W eine deutlich geringere Leistung ab.

Außerdem gibt es auch für die neuen 5G-Frequenzen Grenzwerte. Obwohl diese Grenzwerte teilweise auf Extrapolationen beruhen, sind sie laut Professor Achim Enders, Leiter des Instituts für Elektromagnetische Verträglichkeit der TU Braun-

schweig, „[...] wissenschaftlich aber sehr gut begründet. Einen auch nur annähernd seriösen wissenschaftlichen Hinweis auf weitergehende Effekte, unabhängig ob schädlich oder harmlos, gibt es nicht.“^[28] Zudem können laut Dirk Geschwentner, Mitglied der Arbeitsgruppe Elektromagnetische Felder des BfS, „Die Erkenntnisse, die wir von anderen Mobilfunknetzen haben, [...] zu einem großen Teil auf 5G übertragen werden.“^[29] Nach heutigem Kenntnisstand sind also wohl keine gravierend anderen als die bisher beobachteten Effekte von Mobilfunkstrahlung zu erwarten. Dennoch ist es gut und notwendig, besonders auch zur Beruhigung der betroffenen Bevölkerung, zu den Auswirkungen der deutlich höheren Frequenzen wissenschaftliche Untersuchungen durchzuführen. Das BfS plant bereits laut Dirk Geschwentner noch „Noch bestehende Unsicherheiten bei der gesundheitlichen Bewertung der neuen Technik“ auszuräumen, indem sie „den Ausbau wissenschaftlich begleiten“. Für ein Moratorium sehe er jedoch nicht.^[29]

Fazit

Zusammenfassend ist 5G, besonders wegen seines zu erwartenden Einflusses auf den weiteren Verlauf der Digitalisierung und den Ausbau von Industrie 4.0, ein spannendes und vielfältiges Thema, bei dem es sich lohnt einen tieferen Einblick zu wagen.

Nicht nur durch die Steigerung von Netzwerkeleistungen wie Datenrate und Latenz, mit der sich 5G nahtlos in die in

Abbildung 1 gezeigte Evolutionslinie von Mobilfunkgenerationen einreicht, sondern auch die neuen 5G-Technologien und die Fülle der daraus resultierenden, bahnbrechenden neuen Möglichkeiten, machen das Thema 5G so interessant.

Abschließend lässt sich daher auch die im Titel gestellte Frage, ob 5G eine Evolution oder eine Revolution sei, klar beantworten: Es ist beides!



Glossar und Quellenverzeichnis

Glossar

- 1 Als Datenrate oder Übertragungsrate bezeichnet man die Anzahl der Dateneinheiten, die pro Zeiteinheit übertragen werden können.
- 2 Latenz ist das Zeitintervall zwischen einem Ereignis und dem Eintreten der sichtbaren Reaktion darauf. Bezogen auf Mobilfunk ist damit meist die Reaktionszeit des Netzwerks gemeint.
- 3 Bandbreite bezeichnet in der Signaltechnik die Differenz zwischen der höchsten und der niedrigsten Frequenz in einem Übertragungskanal. Sie bedingt die Datenrate, weshalb der Begriff oft fälschlicherweise als Synonym dafür verwendet wird.
- 4 Auch Fog Computing genannt.
- 5 Das „Edge“ bezieht sich hier nicht auf den 2G Übertragungsstandard EDGE sondern bezeichnet die Nähe zum Funknetzwerk (edge, engl. für Kante, Rand).
- 6 Im einfachsten Fall einfach ein Metallstab
- 7 Die Frequenz ist proportional zum Inversen der Wellenlänge, d.h. eine höhere Frequenz bedeutet eine kleinere Wellenlänge
- 8 1 nm (Nanometer) entspricht einem Teilstück von einem Meter, das man erhält, wenn man diesen in 1000000000 Stücke teilt
- 9 Daher kommt auch der im US-amerikanischen Raum gebräuchliche Begriff für Mobiltelefon: cell phone
- 10 RFID – Radio Frequency Identification, engl. für Radiofrequenz-Identifikation, ein System zur Kennzeichnung und Identifizierung von Objekten mit Hilfe spezieller Marker und dazu passender Sensoren.
- 11 Geofencing ist das automatisierte Auslösen einer Aktion durch das Überschreiten einer virtuellen Begrenzung

Quellen

- [1] Cisco, „VNI Mobile Forecast Highlights,“ [Online]. Available: https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/forecast-highlights-mobile.html.
- [2] Bitkom e.V., „Großteil der deutschen Industrie plant mit 5G,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Grossteil-der-deutschen-Industrie-plant-mit-5G>. [Zugriff am 2019].
- [3] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, „5G-Strategie für Deutschland,“ BMVI Hausdruckerei, 2017.
- [4] 5G-Anbieter.info, „5G:Network Slicing & Virtualisierung,“ [Online]. Available: <https://www.5g-anbieter.info/technik/slicing-virtualisierung.html>.
- [5] A. Sawall, „Ericsson und Swisscom demonstrieren Network Slicing,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.golem.de/news/fuer-4g-und-5g-ericsson-und-swisscom-demonstrieren-network-slicing-1802-132902.html>.
- [6] A. Sawall, „Telekom Mobilfunkverträge nehmen UMTS-Ende,“ Golem.de, 2017. [Online]. Available: <https://www.golem.de/news/3g-abschaltung-telekom-mobilfunkvertraege-nennen-umts-ende-1701-125782.html>.
- [7] Deutsche Telekom, „5G Frequenzauktion der Bundesnetzagentur – 5 Fragen und Antworten zur Versteigerung,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.telekom.com/de/konzern/details/5-fragen-und-antworten-zur-5g-frequenzauktion-550968>.
- [8] Bundesnetzagentur, „Mobilfunknetze,“ [Online]. Available: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze-node.html.
- [9] J. Berke, „Neueinsteiger haben endlich eine Chance auf dem Mobilfunkmarkt,“ Wirtschaftswoche, 2018. [Online]. Available: <https://www.wiwo.de/technologie/digitale-welt/5g-frequenzen-neueinsteiger-haben-endlich-eine-chance-auf-dem-mobilfunkmarkt/22950090.html>.

- [10] Infineon, „5G – Das Highspeed-Mobilfunknetz der Zukunft,“ [Online]. Available: <https://www.infineon.com/cms/de/discoveries/mobile-communication-5g/>.
- [11] T. Nguyen, „Small Cell Networks and the Evolution of 5G,“ Qorvo, [Online]. Available: <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/small-cell-networks-and-the-evolution-of-5g>.
- [12] Cisco, „Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017-2022,“ 2019.
- [13] T-Systems, „Netze der Zukunft - Antennenschwärme,“ 2019. [Online]. Available: <https://www.t-systems.com/de/blickwinkel/netze/multiple-input-multiple-output/massive-mimo-800124>.
- [14] University of Bristol, „Bristol and BT collaborate on massive MIMO trials for 5G wireless,“ [Online]. Available: http://www.bris.ac.uk/news/2017/february/massive-mimo-trials.html#_ga=2.90641754.1776340411.1519642087-1544193016.1519642087.
- [15] Caggemini, „Die Industrie setzt auf die 5G-Revolution,“ Juni 2019. [Online]. Available: <https://www.caggemini.com/de-de/news/die-industrie-setzt-auf-die-5g-revolution/>. [Zugriff am 2019].
- [16] Ericsson, „This is 5G,“ 2018. [Online]. Available: https://www.ericsson.com/49df43/assets/local/newsroom/media-kits/5g/doc/ericsson_this-is-5g_pdf_2019.pdf, S.2.
- [17] VCI, „5G-Frequenzvergabe in Deutschland: Industrieverbände befürworten lokale Vergabe im 3,6 GHz-Band,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.vci.de/presse/pressemitteilungen/5g-frequenzen-in-deutschland-industrieverbaende-befuerworten-lokale-vergabe-im-3-komma-6-ghz-band.jsp>.
- [18] t-online.de, „Kampf um 5G-Frequenzen - Gebote liegen jetzt bei mehr als sechs Milliarden Euro,“ 2019. [Online]. Available: https://www.t-online.de/digital/handy/id_85430272/telekom-hadert-mit-den-5g-auktionsbedingungen.html.
- [19] S. Broszio, „5G Netz für unser Land,“ Telekom, 2018. [Online]. Available: <https://www.telekom.com/de/konzern/details/5g-netz-fuer-unser-land-545416>.
- [20] T. Krzossa, „Continental & Vodafone: Erfolgreiche Kooperation für sicheren Straßenverkehr,“ Vodafone, [Online]. Available: <https://www.vodafone.de/newsroom/digitales-leben/continental-vodafone-erfolgreiche-kooperation-fuer-sicheren-strassenverkehr/>.
- [21] V. Briegleb, „5G-Frequenzauktion geht bei 6,55 Milliarden Euro zu Ende,“ Heise.de, [Online]. Available: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/5G-Frequenzauktion-beendet-4445365.html>.
- [22] BMVI, „Frequenzauktion beendet,“ [Online]. Available: <https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Artikel/DG/Frequenzauktion-faq.html>.
- [23] Bundesamt für Strahlenschutz, „Ergebnisse des Deutschen Mobilfunk Forschungsprogramms (DMF),“ Wirtschaftsverband NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, 2008.
- [24] The INTERPHONE Study Group, „Brain tumor risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study,“ International Journal of Epidemiology, pp. 675-694, Juni 2010.
- [25] P. Frei, A. Poulsen, C. Johansen, J. Olsen, M. Steding-Jessen und J. Schüz, „Use of mobile phones and risk of brain tumors: update of Danish cohort study,“ BMJ, Bd. 343, p. d6387, Oktober 2011.
- [26] V. S. Benson, K. Pirie, J. Schüz, G. K. Reeves, V. Beral und J. Green, „Mobile phone use and risk of brain neoplasms and other cancer: prospective study,“ International Journal of Epidemiology, Bd. 3, Nr. 42, pp. 792-802, 2013.
- [27] „EMF-Portal,“ [Online]. Available: <https://www.emf-portal.org/>.
- [28] NRZ, „Eine Gefahr für die Gesundheit? Alles zum neuen 5G-Netz,“ März 2019. [Online]. Available: <https://www.nrz.de/wirtschaft/was-das-neue-5g-netz-handynutzern-und-der-wirtschaft-bringt-id216696899.html>.
- [29] F. Schumann, „Strahlendes Experiment,“ Zeit Online, Januar 2019. [Online]. Available: <https://www.zeit.de/2019/04/mobilfunknetz-5g-datenerhebung-gesundheitsgefahr-strahlenbelastung/seite-2>.

Quellen der Bilder

Titel: ©Fokussiert - stock.adobe.com

S. 3: Michael J Berlin – stock.adobe.com

S. 23: © Urupong – stock.adobe.com

S. 11: © Tom Wang – stock.adobe.com

S. 26: © tampatra - stock.adobe.com

Center Connected Industry

ElCe Aachen GmbH

Campus-Boulevard 55

52074 Aachen

Telefon +49 241 47705-610

Fax +49 241 47705-199

Web connectedindustry.net