ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Baischew, Dajan; Elbanna, Ahmed; Lucidi, Stefano; Sörries, Bernd; Plückebaum, Thomas

Working Paper

Die Grundzüge von 6G

WIK Diskussionsbeitrag, No. 479

Provided in Cooperation with:
WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH, Bad Honnef

Suggested Citation: Baischew, Dajan; Elbanna, Ahmed; Lucidi, Stefano; Sörries, Bernd; Plückebaum, Thomas (2021) : Die Grundzüge von 6G, WIK Diskussionsbeitrag, No. 479, WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste, Bad Honnef

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/248435

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

WIK • Diskussionsbeitrag

Nr. 479

Die Grundzüge von 6G

Autoren:
Dajan Baischew
Ahmed Elbanna
Stefano Lucidi
Bernd Sörries
Thomas Plückebaum

Bad Honnef, Dezember 2021

wik Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste

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	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

Abbildungsverzeichnis **II**

Tabellenverzeichnis **III**

Abkürzungsverzeichnis **IV**

Zusammenfassung **VII**

Summary **VIII**

1 Einleitung **1**

2 Der 6G-Wettlauf: 6G-Initiativen **4**

3 Vertikale Treiber bei der Entwicklung von 6G **6**

3.1 Anwendungsprofile und Anwendungsbereiche 6

3.1.1 Anwendungsprofile 7

3.1.2 Zielvorgaben für 6G 10

3.1.3 Anwendungsbereiche von 6G 14

3.2 Netzwerkarchitektur 19

3.2.1 Unterschiedliche Funkzugangsnetze (RAN) 20

3.2.2 Cloud-, Edge- und Far-Edge-Computing 22

3.2.3 Einbeziehung von KI- und ML-Modellen 24

3.2.4 Nichtterrestrische Netzwerke 25

3.3 Frequenznutzung 26

3.4 Zwischenfazit vertikale Treiber 28

4 Horizontale Treiber bei der Entwicklung von 6G **29**

4.1 Regulatorische Aspekte 29

4.1.1 Frequenzregulierung 30

4.1.2 Erweiterte Regulierungsfelder bei 6G 31

4.2 Digitale Souveränität und Sicherheit 32

4.2.1 Digitale Souveränität als Forschungsgegenstand 34

4.2.2 Sicherheitsrelevante Aspekte von 6G 35

4.3 Energie- und umweltpolitische Aspekte 36

4.3.1 IKT für mehr Nachhaltigkeit 38

4.3.2 Nachhaltige IKT 39

4.4 Zwischenfazit horizontale Treiber 42

5 Fazit **43**

Anhang **44**

Detaillierte Übersicht über 6G-Forschungsinitiativen weltweit 44

Europäische 6G-Initiativen 44

US-amerikanische 6G-Initiativen 47

Chinesische 6G-Initiativen 48

Japanische 6G-Initiativen 50

Südkoreanische 6G-Initiativen 51

Literatur **53**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Prognostizierter Zeitplan für 6G 2

Abbildung 1-2: 6G-Vision 3

Abbildung 2-1: 6G-Patenenanmeldungen in unterschiedlichen Ländern und Regionen (Stand August 2021) 5

Abbildung 3-1: Prognostiziertes weltweites monatliches mobiles Datenvolumen bis 2026 8

Abbildung 3-2: Prognose für weltweites Wachstum verbundener Endgeräte 9

Abbildung 3-3: Evolution von 5G aus Sicht von 3GGP Releases 10

Abbildung 3-4: Sechs Schlüsseldimensionen von 6G 14

Abbildung 3-5: Decentralized versus Centralized RAN 21

Abbildung 3-6: Next Generation IoT 24

Abbildung 3-7: Resonanzabsorption in der Atmosphäre 27

Abbildung 4-1: Zeithorizont Frequenzregulierung 31

Abbildung 4-2: Mögliche Verlagerung der Abhängigkeit von Mobilfunknetzbetreibern durch neue Netzwerkarchitekturansätze 34

Abbildung 0-1: Hexa-X-Konsortium 45

Abbildung 0-2: Beitragende White Paper on 6G Vision and Candidate Technologies 49

Abbildung 0-3: Beyond 5G Promotion Strategy Japan 51

Abbildung 0-4: Koreanischer Zeitplan für 6G 52

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Ausgewählte 6G-Flagschiffprojekte nach Regionen	6
Tabelle 3-1:	Vergleich von Leistungsindikatoren von 5G NR und Prognosen zu 6G von NTT DOCOMO, EMPOWER und 6G Summit 2020	12
Tabelle 3-2:	Kurzübersicht Anwendungsbereiche 6G	15
Tabelle 3-3:	Anwendungsbeispiele für Sensorik, Bildgebung und Positionierung	18
Tabelle 4-1:	Nachhaltigkeit und IKT	38
Tabelle 0-1:	Deutsche 6G-Initiativen, Stand August 2021	47

Abkürzungsverzeichnis

3G	Dritte Mobilfunkgeneration
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Vierte Mobilfunkgeneration
5G	Fünfte Mobilfunkgeneration
6G	Sechste Mobilfunkgeneration
AP	Access Point
AR	Augmented Reality
ARIB	Association of Radio Industries and Businesses, japanische Rundfunk-Standardisierungsorganisation
ATIS	Alliance for Telecommunications Industry Solutions
BBUs	Baseband Units
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BS	Basisstationen
COTS	commercial off-the-shelf
C-RAN	Centralized Radio Access Network
dB	Dezibel
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EU	Europäische Union
FWA	Fixed Wireless Access
GB	Gigabyte
GBit/s	Gigabits pro Sekunde
GEO	Geosynchronous Earth Orbiting
GHz	Gigahertz
HAPS	High-altitude platform systems
IKT	Information und Kommunikationstechnik
IMT	International Mobile Telecommunications
IoT	Internet of Things, Internet der Dinge
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	Radiocommunication Sector of ITU
KI	Künstliche Intelligenz
LEO	Low Earth Orbit
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MBit/s	Megabits pro Sekunde
MEO	Medium Earth Orbit
MHz	Megahertz
MIST	Ministry of Science and ICT, Südkorea
ML	Machine Learning
mMTC	Massive Machine-type Communications
NFV	Network Functions Virtualization
NR	New Radio
NTN	Nicht-terrestrische Netze
ORAN	Open Radio Access Networks

RAN	Radio Access Network
RRHs	Remote Radio Head
RSPG	Radio Spectrum Policy Group
SDN	Software Defined Network
TBit/s	Terabits pro Sekunde
THz	Terahertz
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
URLLC	Ultra-reliable and Low Latency Communications
VR	Virtual Reality

Zusammenfassung

Die Erwartung ist, dass der zukünftige Mobilfunkstandard 6G im kommenden Jahrzehnt eine neue Ära einleiten wird, bei der Milliarden von Dingen und Menschen eine Vielzahl an digitalen Informationen erzeugen und kommunizieren werden.

Der ab 2030 anvisierte Rollout von 6G wird sich mit anspruchsvolleren Anwendungen befassen als die bisherigen Mobilfunkstandards, z. B. holografische Kommunikation und das „Internet der Sinne“ („Internet of Senses“). Der geplante Einsatz von Sub-Terahertz- und Terahertz-Frequenzen wird außerdem neue Anwendungsbereiche für die Sensorik, Bildgebung und Positionierung ermöglichen und das Funknetzwerk selbst zum Sensor machen. Unterstützt durch Künstliche Intelligenz werden 6G-Netze selbstlernend sein und kontextabhängig agieren können. Intelligente Antennen und Edge Computing, die bereits in 5G-Mobilfunknetzen zum Einsatz kommen, werden in zukünftigen Standardisierungen von 6G-Netzen eine noch größere Rolle spielen und sich zum Far-Edge-Computing weiterentwickeln. Der Trend von Open RAN und Cloudifizierung wird sich mit 6G fortsetzten. In diesem Zusammenhang wird erwartet, dass verstärkt Chiphersteller, Cloud-Anbieter, Raumfahrtunternehmen und andere Marktteilnehmer als Partner und Wettbewerber traditioneller Mobilfunk-Equipmenthersteller in den Mobilfunkmarkt eintreten werden. Somit wird sich auch die Marktstruktur deutlich verändern.

Kritischer Treiber hinter 6G sind sogenannte Megatrends, das heißt Trends, die für das kommende Jahrzehnt besonders relevant sein werden, wie zum Beispiel eine weiterwachsende globale Bevölkerung, Klimawandel, Umweltverschmutzung oder ein globaler Wettbewerb um Ressourcen. 6G-Forschungsgruppen sind davon überzeugt, dass Konnektivität ein Schlüssel für mehr nachhaltiges Wachstum sein kann. Sie gehen davon aus, dass Mobilfunk einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Zielsetzungen der UN-Agenda 2030 leisten kann, indem er Infrastruktur und Zugang zu digitalen Diensten bietet, die wiederum zu Wachstum, Effizienzsteigerung und verbesserter Nachhaltigkeit führen. Neben leistungsstarken und neuartigen Anwendungsbereichen werden deshalb regulatorische Aspekte, Digitale Souveränität und Sicherheit sowie energie- und umweltpolitische Aspekte eine ebenso wichtige Rolle bei der Entwicklung des neuen Mobilfunkstandards einnehmen.

Um einen nachhaltigen Fortschritt für die Gesellschaft zu ermöglichen, ist es von entscheidender Bedeutung, dass die 6G-Technologie dringende gesellschaftliche Bedürfnisse erfüllt und gleichzeitig neue Funktionen bereitstellt. Die folgende Studie gibt einen Überblick über die kürzlich begonnenen 6G-Forschungsaktivitäten in Europa und der Welt.

Summary

The expectation is that the future 6G cellular standard will usher in a new era over the next decade, with billions of things and people generating and communicating a vast amount of digital information.

The rollout of 6G envisaged for 2030 will address more sophisticated applications than previous mobile standards, e.g. holographic communication and the "Internet of Senses". The planned use of sub-terahertz and terahertz frequencies will also enable new application areas for sensing, imaging and positioning and even turn the wireless network itself into a sensor. Supported by artificial intelligence, 6G networks will be self-learning and able to act contextually. Smart antennas and edge computing, migrating to far-edge computing, already used in 5G mobile networks, will play an even greater role in future standardisations of 6G networks. The trend of Open RAN and cloudification will continue with 6G. In this context, it is expected that more chip manufacturers, cloud providers, space companies and other market players will enter the mobile communications market as partners and competitors of traditional mobile communications equipment vendors.

Critical drivers behind 6G are so-called megatrends, i.e. trends that will be particularly relevant for the coming decade, such as a growing global population, climate change, environmental pollution or global competition for resources. 6G research groups believe that connectivity is key to address the associated challenges. They believe that mobile communications can make a significant contribution to achieving the UN 2030 Agenda goals by providing infrastructure and access to digital services, which in turn lead to growth, increased efficiency and sustainability. Therefore regulatory aspects, digital sovereignty and security, as well as energy and environmental aspects will play an equally important role in the development of the new mobile communications standard besides high performance and new applications areas.

To enable sustainable progress for society, it is crucial that 6G technology meets societal needs while providing new capabilities. The following study provides an overview of recently initiated 6G research activities in Europe and the world.

1 Einleitung

Der öffentliche Mobilfunk bleibt sich dahingehend treu, dass parallel zur Einführung der fünften Mobilfunkgeneration (5G) bereits mit den ersten Arbeiten an der Nachfolgetechnologie, der sechsten Mobilfunkgeneration (6G) begonnen wird. Aus dem Blickwinkel von Entwicklungszeiträumen ist die Befassung mit 6G dagegen weniger überraschend. Die Entwicklung einer neuen Mobilfunktechnologiegeneration benötigt ungefähr acht bis zehn Jahre[1], so dass bei einer avisierten Einführung von 6G im Jahr 2030 bereits heute mit der Entwicklung für einen kommerziellen 6G-Rollout begonnen wird (siehe Abbildung 1-1). Die Entwicklung von 6G ist somit in einem frühen Stadium, wobei es Wechselwirkungen zu 5G geben wird und 5G die Basis für die weiteren Entwicklungen legt.

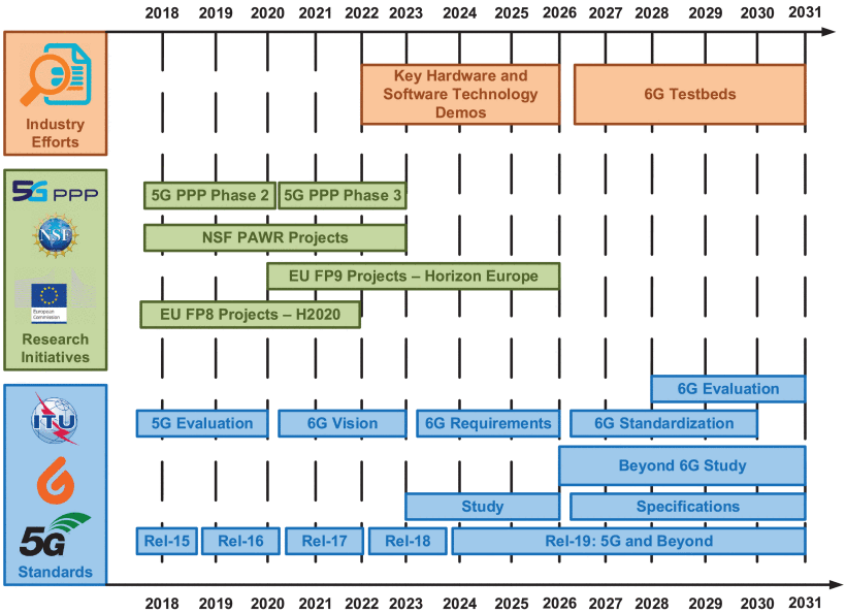
Die sich weltweit abzeichnenden Forschungsaktivitäten zu 6G, die in einigen Teilen der Welt im engen Zusammenhang mit der Industrie- und Standortpolitik des jeweiligen Landes stehen, zeigen, dass der Mobilfunk immer mehr zu einer Schlüsseltechnologie bei der weiteren Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft wird. Der mit 5G eingeschlagene Pfad, wonach Mobilfunk für die Digitalisierung von Wertschöpfungsprozessen genutzt wird, wird mit 6G konsequent weiterverfolgt und vertieft werden.

Dieser Diskussionsbeitrag verfolgt das Ziel, einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand zu geben, der sich aus wissenschaftlichen, industriellen und politischen Aktivitäten einer Vielzahl von Akteuren speist. Von besonderem Interesse ist hierbei, wesentliche Treiber hinter der neuen Mobilfunktechnologie zu identifizieren. Außerdem werden mögliche Zielvorgaben benannt, die in unterschiedlichen Forschungsgemeinschaften erarbeitet werden und die technischen Herausforderungen darstellen. Darüber hinaus werden regulatorische Aspekte behandelt, die sich unter anderem aus der möglichen Erschließung neuen Mobilfunkspektren ergeben sowie Implikationen für bestehende Netze erarbeitet.

Vor dem Hintergrund steigender politischer und gesellschaftlicher Aufmerksamkeit gegenüber der Abhängigkeit nicht-europäischer Hersteller in den Wertschöpfungsketten von Mobilfunknetzen und darauf fußenden kritischen Infrastrukturen werden in diesem Diskussionsbeitrag außerdem Fragen hinsichtlich der digitalen Souveränität Europas erörtert. In der Öffentlichkeit mindestens so stark diskutiert ist das Thema der ökologischen Nachhaltigkeit, wobei Digitalisierung und Konnektivität einerseits durch CO_2- und Stromeinsparungen effizienzsteigernd sein können, andererseits, durch einen erhöhten digitalen Konsum, einen beachtlichen Teil an Strom und Ressourcen konsumieren und damit heute CO_2 freisetzen. Welche Rolle 6G dabei zugeschrieben wird, wird in diesem Diskussionsbeitrag ebenso beleuchtet.

1 EMPOWER (2020), S. 6.

Abbildung 1-1: Prognostizierter Zeitplan für 6G

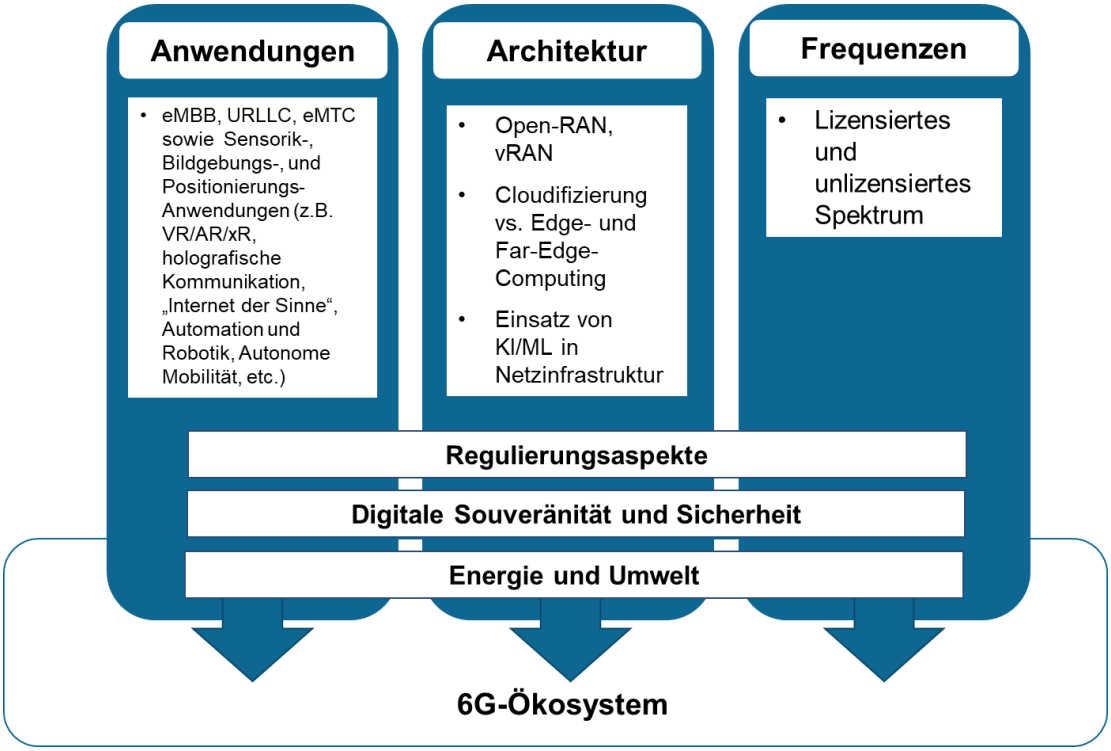


Quelle: Akyildiz et al. (2020), S. 134025.

In diesem Diskussionsbeitrag werden zunächst drei Säulen untersucht, die in Anlehnung an das derzeitige Entwicklungsstadium der Forschungsaktivitäten weltweit im Mittelpunkt stehen: 1) Anwendungsprofile und Anwendungsbereiche, 2) Netzwerkarchitektur sowie 3) Frequenznutzung.

Über diese drei vertikalen Themenbereiche hinweg werden anschließend drei horizontale Treiber identifiziert, welche alle drei Säulen berühren: a) Regulatorische Aspekte, b) Digitale Souveränität und Sicherheit sowie c) Energie- und umweltpolitische Aspekte. Zusammen bilden diese Themen das 6G-Ökosystem ab (siehe Abbildung 1-2).

Abbildung 1-2: 6G-Vision



Quelle: WIK.

Die Studie gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 werden bisherige internationale Initiativen im Zusammenhang mit 6G aufgezeigt, aus denen sich, kombiniert mit weiteren Forschungspapieren, der Inhalt dieses Diskussionsbeitrags zusammensetzt.

In Kapitel 3 erfolgt die Beschreibung der vertikalen Treiber: Anwendungsprofile und Anwendungsbereiche, Netzwerkarchitektur sowie Frequenznutzung, wie sie in der Einleitung dieser Studie identifiziert werden.

In Kapitel 4 erfolgt die Beschreibung horizontal wirkender Treiber von 6G. Dies sind regulatorische Aspekte, Digitale Souveränität und Sicherheit sowie energie- und umweltpolitische Aspekte.

Kapitel 5 zieht ein Fazit zu den derzeitigen Grundzügen von 6G.

2 Der 6G-Wettlauf: 6G-Initiativen

Obwohl sich 5G in vielen Ländern noch in der Markteinführungsphase der ersten Releases befindet,[2] sind bereits Forschungsgruppen weltweit aktiv, Grundlagen für die nächste, sechste Mobilfunkgeneration (6G) zu schaffen. Erste Ziele hat die ITU mit der Network 2030 Gruppe[3] definiert. Ebenfalls deutet sich bereits ein Wettrennen um die Führungsrolle bei der Entwicklung und Forschung zu 6G an. Eine Analyse von 20.000 Patentanmeldungen in Verbindung mit 6G-Technologien des Cyber Creative Instituts zeigt, dass chinesische Unternehmen mit 40,3 Prozent der Anmeldungen und Unternehmen aus den USA mit 35,2 Prozent der Anmeldungen bei der Entwicklung derzeit führend sind. Darauf folgen Japan mit 9,9 Prozent, Europa mit 8,9 Prozent und Südkorea mit 4,2 Prozent (siehe Abbildung 2-1). [4] Hierbei ist zu beachten, dass Patente einen positiven Einfluss auf das Wirtschaftswachstum des jeweils betrachteten Landes haben.[5] Zudem ist davon auszugehen, dass die Länder bzw. Unternehmen mit einer Vielzahl von Patentanmeldungen auch einen signifikanten Einfluss auf die konkrete Ausgestaltung der Standardisierung nehmen können. Patentanmeldungen sind zudem ein Indikator für die frühzeitige Bildung von Know-how-Pools in den Regionen.

Die Analysen des Cyber Creative Instituts und die im Rahmen dieses Diskussionsbeitrags durchgeführten Recherchen zeigen, dass die weltweit eingesetzten Forschungsmittel im Zusammenhang mit 6G sehr unterschiedlich ausfallen. Vergleichsweise hohe finanzielle Ressourcen für Forschung stehen in Asien zur Verfügung.

---

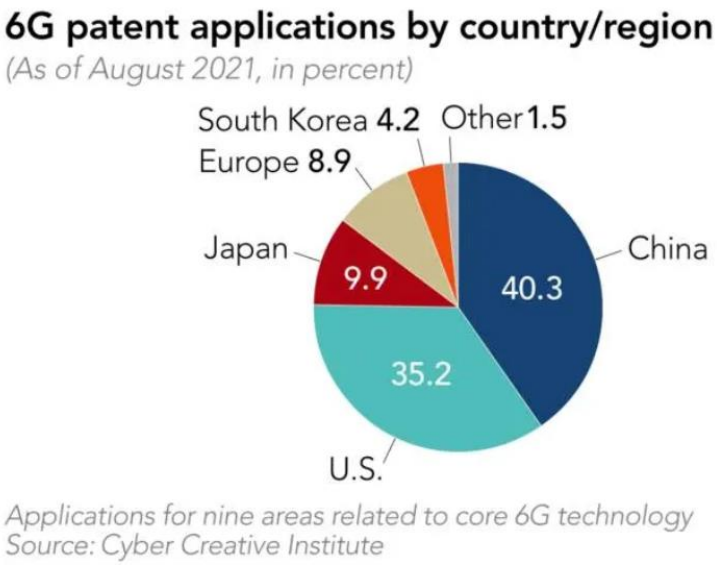
2 Vgl. https://5gobservatory.eu/, zuletzt abgerufen am 24.11.2021.

3 Siehe https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/net2030/Pages/default.aspx, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

4 Nikkei Asia: China accounts for 40% of 6G patent applications: Survey. Online abrufbar unter: https://asia.nikkei.com/Business/Telecommunication/China-accounts-for-40-of-6G-patent-applications-survey, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

5 Vgl. OECD (2005) und Atun et al. (2006). : Innovation Policies: Innovation in the Business Sector, Paris; Atun et al. (2006): Innovation,l Patents and Economic Growth, Imperial College London, Discussion Paper 5, https://www.researchgate.net/profile/Rifat-Atun/publication/23751118_INNOVATION_PATENTS_AND_ECONOMIC_GROWTH/links/09e4150b1ff5dbf7de000000/INNOVATION-PATENTS-AND-ECONOMIC-GROWTH.pdf, zuletzt abgerufen am 24.11.2021

Abbildung 2-1: 6G-Patenenanmeldungen in unterschiedlichen Ländern und Regionen (Stand August 2021)



Quelle: Cyber Creative Insitute und Nikkai Asia. Online abrufbar unter: https://asia.nikkei.com/Business/Telecommunication/China-accounts-for-40-of-6G-patent-applications-survey, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Einige markante 6G-Forschungsinitiativen werden in Tabelle 2-1 dargestellt. Die aus den Forschungsinitiativen erarbeiteten Weißpapiere, die wissenschaftliche Publikationen ergänzen, bilden die Grundlage für die in diesem Diskussionsbeitrag herausgearbeiteten Grundzüge von 6G.

Klare Unterschiede in den mit 6G verfolgten Zielsetzungen und Visionen sind aktuell in den verschiedenen Projekten und Initiativen nicht erkennbar. Es besteht implizit ein gewisser Konsens über die konkrete Ausgestaltung der Technologie, denn es werden vergleichbare Anwendungsschwerpunkte („use cases“), technische Anforderungen und Nutzungsszenarien betrachtet und stellen den Ausgangspunkt von Forschungsarbeiten dar. Wie in der Vergangenheit bei Vorgängertechnologien (3G, 4G, 5G) wird auch die Bereitstellung zusätzlicher Frequenzen für 6G thematisiert. Auffällig ist, dass ökologische und soziale Aspekte in fast alle Forschungsaktivitäten einfließen.

Unterschiede sind jedoch bereits heute in der Art und Weise der Entwicklungsprozesse zu beobachten. Während in den USA besonders stark im privaten Sektor geforscht wird, bestehen in der EU eher Private Public Partnerships. Die 6G-Forschung in China hingegen, auch wenn nur wenig transparent, scheint eher vom öffentlichen Sektor getrieben zu sein.

Tabelle 2-1: Ausgewählte 6G-Flagschiffprojekte nach Regionen

Land/Region	6G-Flagschiff-Initiative	Beschreibung
Europa	Hexa-X	Hexa-X ist ein EU-finanziertes Forschungsprojekt (Horizont 2020). Das Konsortium besteht aus 25 Organisationen aus 9 Ländern und Hexa-X ist die erste offizielle branchenweite Forschungsinitiative, die die 6G-Forschung fördern und vorantreiben sowie die Führungsposition Europas im 6G-Zeitalter stärken soll.
USA	Next G Alliance	Von ATIS initiierte Initiative. 43 Gründer und Mitglieder, darunter einige Tech-Giganten wie Google, Apple, Microsoft und Facebook. Das selbsternannte Ziel ist die führende Rolle der nordamerikanischen Mobilfunktechnologie in den nächsten zehn Jahren durch privatwirtschaftliche Anstrengungen zu stärken.
China	China's 6G promotion group	Anfang Juni 2021 veröffentlichte ein von der chinesischen Regierung unterstütztes Industriegremium ein Weißbuch zur 6G-Technologie. Weitere Initiativen durch private Unternehmen (ZTE, Huawei, etc.)
Japan	Beyond 5G Promotion Strategy	Durch das Kommunikationsministerium aufgesetzte 6G-Initiative. Eines der Ziele ist es der Anteil relevanter Technologiepatente im Zusammenhang mit 6G zu erhöhen auf mindestens 10 %. Weitere Initiativen durch bspw. Japans größter Mobilfunkanbieter NTT DOCOMO.
Südkorea	6G Strategie	Vom Ministerium für Wissenschaft und IKT (MSICT) initiiertes Programm. Private Unternehmen wie Samsung und LG forschen ihrerseits bereits zu 6G. Korea plant als erstes Land ein 6G-Pilotprojekt im Jahr 2026.

Quelle: WIK. Für eine detaillierte Übersicht, siehe Anhang.

3 Vertikale Treiber bei der Entwicklung von 6G

Bei der Entwicklung gibt es im Wesentlichen drei Treiber oder Forschungsschwerpunkte: (1) Anwendungsprofile und Anwendungsbereiche, (2) Netzwerkarchitektur sowie (2) Frequenznutzung, die als Säulen in Abbildung 1-2 dargestellt sind. In diesem Kapitel werden diese Treiber näher betrachtet.

3.1 Anwendungsprofile und Anwendungsbereiche

Marktexperten, die im Rahmen dieser Studie befragt wurden, gehen davon aus, dass 6G keine Revolution sondern eine Evolution darstellen wird. Insoweit wird 6G den Weg fortsetzen, der sich mit 5G und den diesbezüglichen Anwendungen eröffnet hat. Somit ist bei der weiteren Analyse zunächst 5G der Ausgangspunkt.

3.1.1 Anwendungsprofile

Die technischen Eckdaten von 5G sind so ausgestaltet, dass mit dieser Mobilfunkgeneration Projektionen über das Wachstum im mobilen Datenverkehr umgesetzt werden können. ARIB, die japanische Rundfunk-Standardisierungsorganisation, ermittelte beispielsweise einen mobilen Datenzuwachs um den Faktor 1000 zwischen den Jahren 2010 (Start von 4G) und 2020 bis 2025 (Start von 5G).[6] Zum Datenwachstum trägt auch eine immer stärker auftretende Vernetzung von Dingen bei. Insoweit wurde und wird in der Standardisierung von 5G insbesondere die Vernetzung von Maschinen und Sensoren, d. h. die M2M-Vernetzung beziehungsweise das IoT in den Fokus gerückt. 5G nutzt Spektren, welche existierende LTE-Frequenzbereiche sowie neue, darüber liegende Frequenzen abdecken (600 MHz bis 6 GHz), kombiniert mit einem Frequenzbereich, der im Millimeterwellenbereich liegt (24 GHz bis 86 GHz), um Eigenschaften wie geringe Latenz, hohe Datenraten, hohe Mobilität und hohe Gerätedichte zu gewährleisten.

Die für den Mobilfunksektor zuständige Arbeitsgruppe der ITU, die ITU-R,[7] hat im Jahr 2015 die folgenden drei Anwendungsprofile für die Jahre 2020 und darüber hinaus in einer Empfehlung definiert, die durch den Einsatz von 5G NR (New Radio)[8] Technologien erfüllt werden sollen: (1) Enhanced Mobile Broadband (eMBB), (2) Massive Machine-type Communication (mMTC) und (3) Ultra-Reliable and Low Latency Communication (URLLC).[9]

---

6 Die Autoren gingen dabei jeweils von einer Wachstumsrate von 2,1 beziehungsweise von 1,5 pro Jahr aus (ARIB, 2014). In Deutschland lag die Wachstumsrate mobilen Datenverkehrs im Zeitraum von 2010 bis 2020 zwischen 1,71 und 1,38 (im Mittel 1,52), sodass eine Vertausendfachung des mobilen Datenverkehrs im Vergleich zu 2010 im Jahr 2026 stattfinden würde, unter der Annahme gleichbleibender Wachstumsraten (Wachstumsrate von 1,52 pro Jahr). Eigene Berechnungen, vgl. Bundesnetzagentur (2011, S. 56) und Bundesnetzagentur (2020, S. 42).

7 Bei der Entwicklung von Funkschnittstellenstandards für die mobile Kommunikation spielt die ITU und dessen Arbeitsgruppe ITU Radiocommunication Sector (ITU-R) eine entscheidende Rolle. Das Normengerüst für International Mobile Telecommunications (IMT), das unter anderem IMT-2000 und IMT-Advanced umfasst, umspannt die 3G- und 4G-Ökosystem. Die Mobilfunkgeneration für 5G-Netzwerke wurde 2015 mit dem Normengerüst IMT-2020 entwickelt. ITU (2020), S. 7. Ein Normengerüst zu 6G-Netzwerken gibt es noch nicht, allerdings hat sich innerhalb der ITU-R bereits eine Arbeitsgruppe gebildet, die sich mit „IMT for 2030 and beyond“ befasst. Eine erste Veröffentlichung zu „IMT-2030“ wird für das Jahr 2023 erwartet. Akyildiz et al. (2020).

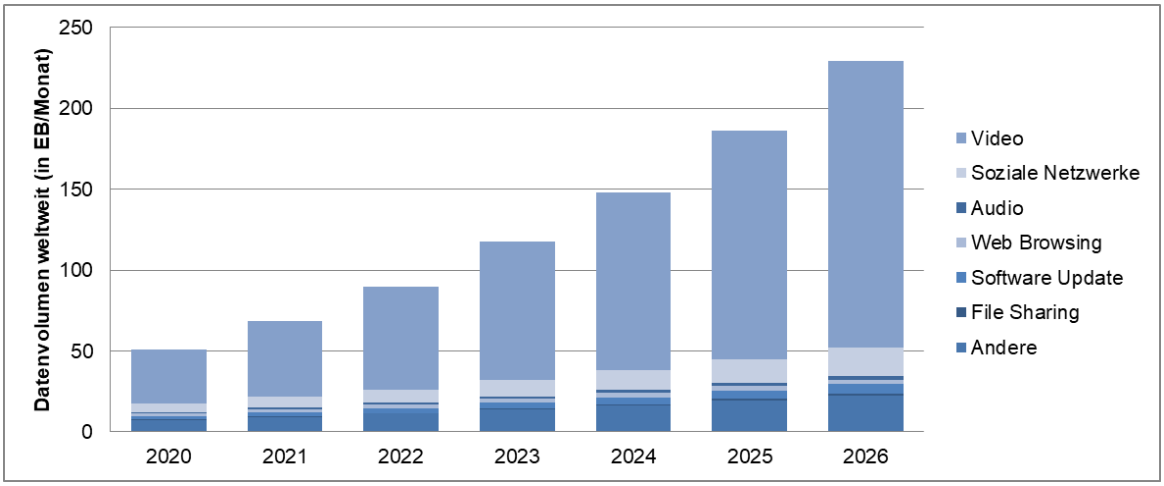
8 Auf Basis der IMT-Normenwerke werden die Standardisierungen der Telekommunikationstechnologien vom „3rd Generation Partnership Project“ (3GPP) entwickelt. Das Projekt, welches sich aus mehrere internationalen Standarisierungsorganisationen zusammensetzt, umfasst das Zugangsnetz (Radio Access) und das Kernnetzwerk (Core Network). Die Mobilfunk-Generationen („G“) werden seit der dritten Mobilfunkgeneration (3G) von 3GPP standardisiert. Siehe 3GGP (2020) – About 3GPP Home, https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp. Die jeweiligen Standardisierungen werden in Veröffentlichung (Releases) vorgenommen. In ihrem 15. Release befasste sich 3GPP mit 5G und definiert ein neues 5G-Kernnetzwerk und eine neue Funkzugangstechnologie, die als 5G New Radio (NR) bezeichnet wird. Es wird davon ausgegangen, dass sich die Veröffentlichung der 3GPP noch bis zum 18. Release (der 18. Release miteingeschlossen), vorrangig mit 5G beschäftigen wird. Akyildiz et al. (2020).

9 Siehe ITU-R (2015).

3.1.1.1 Enhanced Mobile Broadband (eMBB)

Das Wachstum des mobilen Datenvolumens ist besonders der Popularität von Video-Applikationen geschuldet, welche sich Schätzungen zufolge in den kommenden Jahren fortsetzen wird (siehe Abbildung 3-1).[10] eMBB soll diesen gewaltigen Anstieg an Datenraten sowie hohe Gerätedichten und sehr hohen Verkehrskapazitäten für Hotspots bewältigen. Ebenso soll eMBB geographisch fast überall und mit einer hohen Mobilitätsgeschwindigkeit verfügbar sein.[11]

Abbildung 3-1: Prognostiziertes weltweites monatliches mobiles Datenvolumen bis 2026



Quelle: WIK basierend auf Ericsson Mobility Visualizer (Stand November 2020). 1 Exabyte (EB) entspricht 10^{18} Bytes.

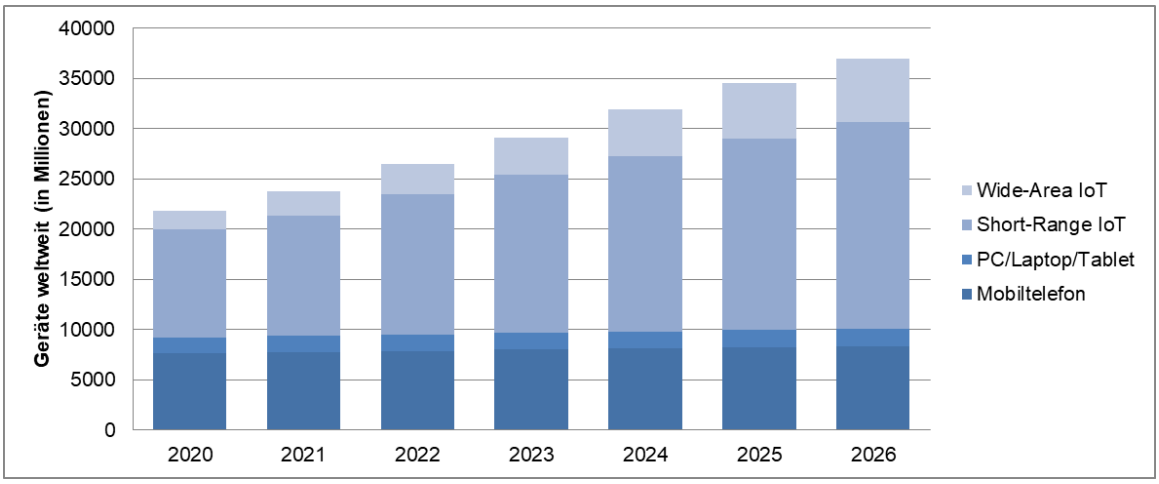
3.1.1.2 Massive Machine-Type Communications (mMTC)

Nicht nur die Datenmengen bei Massenmarktanwendungen werden voraussichtlich weiter steigen, auch die Anzahl der Geräte, die untereinander vernetzt sind, nimmt weiter zu. mMTC besteht vor allem aus breit angelegten Anwendungsfällen, bei denen eine große Anzahl von Geräten mit geringer Komplexität und niedrigen Kosten verbunden wird, die eine lange Akkulaufzeit und einen relativ geringen Durchsatz haben.[12] Typische Anwendungen für mMTC sind Sensornetze, vernetzte Maschinen, Wearables oder autonome, vernetzte Robotertechnik. Für das Jahr 2026 werden 38 Milliarden verbundene Geräte prognostiziert, von denen gerade einmal 8,3 Milliarden Geräte Mobiltelefo-

10 Ericsson Mobility Report – Visualizer (2020). Online abrufbar unter: https://www.ericsson.com/en/mobility-report/mobility-visualizer?f=9&ft=2&r=1&t=11,12,13,14,15,16,17&s=4&u=3&y=2020,2026&c=1, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
11 ITU-R (2015), S. 11f.
12 Ericsson (2020a), S. 4.

ne sein werden (21,6 Prozent).[13] Der Großteil, 20,6 Milliarden (53,9 Prozent), der verbunden Geräte werden Short-Range-IoT-Geräte sein (siehe Abbildung 3-2). Für IoT-Anwendungen ist ein geringer Stromverbrauch essentiell. Die übertragenen Datenraten (im Uplink- und Downlink) sind in der Regel im Vergleich zu Massenmarktanwendungen sehr gering.

Abbildung 3-2: Prognose für weltweites Wachstum verbundener Endgeräte



wik

Quelle: WIK basierend auf Ericsson Mobility Visualizer (Stand November 2020).

3.1.1.3 Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC)

Kritische Internet-der-Dinge-Anwendungen („critical IoT“) beziehungsweise URLLC sind vorgesehen für zeitkritische Anwendungen (sehr geringe Latenzzeiten) mit garantierter Datenübermittlung (hohe Zuverlässigkeit). Zu den typischen Anwendungsfällen zählen vernetztes Fahren oder vernetzte Prozesse im Bereich Industrie 4.0. Damit unterscheidet sich dieses Konzept deutlich von eMBB, wo Datenraten maximiert werden, jedoch keine Garantien, beispielsweise für die Latenz enthalten sind. URLLC bedient besonders den Markt von vertikalen Herstellern, welche sich in Echtzeit-Medien, Fernsteuerung, industrielle Steuerung und Automatisierung der Mobilität kategorisieren lassen.[14]

Von Seiten der ITU und der 3GPP wird weiterhin an der Standardisierung von 5G gearbeitet.[15] Die ITU-R wird voraussichtlich noch im Jahr 2021 einen Zeitplan für die zukünftigen Revisionen des IMT-2020-Normenwerks bereitstellen, um Verbesserungen

13 Ericsson Mobility Report – Visualizer (2020). Online abrufbar unter: https://www.ericsson.com/en/mobility-report/mobility-visualizer?f=9&ft=2&r=1&t=11,12,13,14,15,16,17&s=4&u=3&y=2020,2026&c=1, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
14 ITU-R (2015), S. 11 und Ericsson (2020a), S. 4.
15 Akyildiz et al. (2020).

des Standards vorzunehmen.[16] Das 3GPP wird mit Release 17 weitere Funktionalitäten von 5G standardisieren, die insbesondere für gewerbliche Anwender („verticals“) relevant sind (z. B. genaue Ortung von Dingen).[17] Der Inhalt für das 18. Release wurde noch nicht festgelegt, es wird aber davon ausgegangen, dass sich dieses ausschließlich weiterhin mit 5G-Spezialanwendungen befassen wird.[18] 5G ist somit noch längst nicht vollständig standardisiert, so dass bestimmte Anwendungen im Bereich URLLC oder mMTC erst in den nächsten Jahren am Markt verfügbar sein werden. Dies ist insoweit für 6G relevant, als dass der Erfolg von 6G im Markt maßgeblich von der Penetration von 5G-Anwendungen abhängen wird, die mit 6G im Sinne einer Evolution nochmals verbessert werden können.

3.1.2 Zielvorgaben für 6G

Eine Übersicht über die Schritte der Standardisierung von 5G und der Migration in Richtung 6G zeigt Abbildung 3-3. Die Forschungsinitiative EMPOWER[19] geht davon aus, dass sich ab Release 21, das für das Jahr 2027 erwartet wird, immer mehr der Weg zu 6G abzeichnen wird. Wesentliche Parameter für die Entwicklung werden dabei die Penetration von 5G-Anwendungen, die sich weiter entwickelnden technischen Anforderungen sowie allgemeine Innovationen (technologischer Fortschritt) sein.

Abbildung 3-3: Evolution von 5G aus Sicht von 3GGP Releases

5G		5G Kurzfristige Evolution		5G Mittelfristige Evolution		5G Langfristige Evolution → 6G?		
Rel. 15	**Rel. 16**	**Rel. 17**	**Rel. 18**	**Rel. 19**	**Rel. 20**	**Rel. 21**	**Rel. 22**	**Rel. 23**
• Lizensiertes und nicht lizensiertes Spektrum unter 52,6 GHz für 5G NR • 5G NR basierte V2X • URLLC Verbesserungen • Einführung 5G Campus Netze und Private Netzwerke		• 5G NR Spektrum zwischen 52,6 GHz und 250 GHz • Verbesserung 5G Campusnetze, Einführung von NR-Light • 5G Integrated Access and Backhaul (IAB) Verbesserungen • Einführung Nicht-terrestrische-Netzwerke • RAN Datensammlung für KI/ML		• 5G NR Spektrum zwischen 250 GHz und 500 GHz • Fusion von Sensorik und Kommunikation • Drohnen als User Equipment, Basisstationen und Small-cells • In-band full duplexing • Drahtlose Fusion mit KI/ML in C-Plane und U-Plane upper Layers		• 5G NR Spektrum zwischen 500 GHz und 1 THz • Batterielose Geräte; Versorgung durch Energy und Frequency Harvesting • KI/ML in allen Netzwerkebene, inkl. Physical Layer • Fusion von Kommunikation, Sensorik, Bildgebung und Radar • Kognitiv integrierter Zugang über alle heterogene Technologien hinweg (e.g. Evolution von NR, W-Lan und Li-Fi)		

Quelle: WIK basierend auf Mourad et al. (2020), S. 9.

16 ITU News (02.02.2021) “Beyond 5G: Whats next for IMT?” https://www.itu.int/en/myitu/News/2021/02/02/09/20/Beyond-5G-IMT-2020-update-new-Recommendation, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

17 Vgl. 3GPP Pressemitteilung (14.12.2020): Release 17 timeline agreed (online abrufbar unter https://www.3gpp.org/news-events/2145-rel-17_newtimeline, zuletzt abgerufen am 03.12.2021).

18 Akyildiz et al. (2020), S. 134024.

19 Siehe Mourad et al. (2020).

Die kurzen und mittelfristigen Ziele, die in Abbildung 3-3 abgebildet werden, werden von den Autoren der Studie[20] primär aus Studien zu zukünftigen Wireless-Standards abgeleitet, vor allem 3GPP und IEEE 802. Insgesamt wird von Marktteilnehmern und Wissenschaftlern davon ausgegangen, dass auf dem Weg zu 6G von der Mehrzahl der Stakeholder das Ziel verfolgt wird, die technische Leistungseigenschaften des Mobilfunks zu verbessern (z. B. Datengeschwindigkeiten im Up- und Downlink, Latenzen, Verlässlichkeit) sowie die Energieeffizienz zu optimieren. Ziel ist es also, Mobilfunknetze noch stärker zum Enabler für digitale, vernetzte Anwendungen werden zu lassen. Darüber hinaus wird der Trend gesehen, dass Mobilfunknetze Daten für Anwendungen im Bereich der Künstlichen Intelligenz bereitstellen bzw. auch durch diese selbst optimiert werden. Für die längerfristige Entwicklung von 5G bis hin zu 6G gehen die Trends in Richtung revolutionärer Technologien, deren Reifegrad derzeit nur schwer vorhersehbar ist. Diese Trends umfassen (a) das Design revolutionärer Funksende-Empfänger, die extreme Anforderungen unterstützen, wie zum Beispiel TBit/s-Datenraten, Sub-ms-Latenzzeit und Sub-mWatt-Leistung; und (b) die Integration verschiedener drahtloser Subsysteme miteinander, wie zum Beispiel lizenzierte und unlizenzierte, terrestrische und nicht terrestrische, Kommunikation und Nichtkommunikation (Sensorik, Radar, Bildgebung).[21]

In der nachfolgenden Tabelle 3-1 werden die IMT-2020 Zielvorgaben mit unterschiedlichen 6G-Visionen verglichen. Konkrete Anforderungen von ITU-R für 6G wurden noch nicht formuliert.

20 Mourad et al. (2020).
21 Mourad et al. (2020), S. 7ff.

Tabelle 3-1: Vergleich von Leistungsindikatoren von 5G NR und Prognosen zu 6G von NTT DOCOMO, EMPOWER und 6G Summit 2020

Leistungsfähigkeit*	Beschreibung*	Anwendungsprofil	IMT-2020 Zielvorgaben (5G NR)[22]	NTT DOCOMO's 6G Vision White Paper[23]	EMPOWER 6G Visionen[24]	6G Summit 2020 – White Paper BB Connectivity in 6G[25]
Downlink Spitzenrate	Minimale Maximum Datenrate, die die Technologie unterstützen muss	eMBB	20 GBit/s	**Mehr als 100 GBit/s**	**Einige 100 GBit/s**	**1 TBit/s**
Uplink Spitzenrate	Minimale Maximum Datenrate, die die Technologie unterstützen muss	eMBB	10 GBit/s			
Downlink (Benutzererfahrung)	Datenrate in dichter städtischer Testumgebung 95 % der Zeit	eMBB	100 MBit/s		**Mehr als 1 GBit/s**	**1 GBit/s**
Uplink (Benutzererfahrung)	Datenrate in dichter städtischer Testumgebung 95 % der Zeit	eMBB	50 MBit/s		**Mehr als 1 GBit/s**	
Latenz (Nutzereben)	Beitrag des Funknetzes zur Paketlaufzeit	eMBB/ URLLC	4 ms (eMBB) / 1 ms (URLLC)	**Unter 1 ms**	**Unter 0,1 ms**	**0,1 ms**
Mobilität	Maximale Geschwindigkeit für Handoff und QoS-Anforderungen	eMBB/URLLC	500 km/h		**Bis zu 1000 km/h**	**1000 km/h**
Dichte verbundener Geräte	Gesamtzahl der Geräte pro Flächeneinheit	mMTC	10^6 Geräte/km^2	**10^7 Geräte/km^2**	**Bis zu 10^7 Geräte/km^2**	**10^7 Geräte /km^2**
Energieeffizienz	Gesendete/empfangene Daten pro Energieverbrauchseinheit (nach Gerät oder Netzwerk)	eMBB	Qualitativ: hoch	**Qualitativ: extrem hoch, Geräte frei von Batterieladungen**	**Bis zu 1000×5G NR**	**1 Tbit/J**
Verlässlichkeit	Wahrscheinlichkeit, eine bestimme Datenmenge innerhalb einer vorgegebenen Zeit zu übertragen	URLLC	1-10^{-5} (32 Bytes in 1 ms)	**Mehr als 1-10^{-8}**	**Bis 1-10^{-8}**	**1-10^{-9}**
Kapazität Flächenverkehr	Gesamtverkehr im Versorgungsgebiet	eMBB	10 MBit/s/m^2			**1 GBit/s/m^2**
Spitzenrate Downlink Spektrum-effizienz	Durchsatz pro Einheit Funkbandbreite und pro Netzwerkzelle	eMBB	30 Bit/s/Hz			**60 Bit/s/Hz**

Quelle: WIK. Für Einzelnachweise, siehe Fußnoten. Hinweis: *Leistungsfähigkeit, Leistungsbeschreibung und Nutzerszenarien wurden in IMT-2020 definiert (ITU-R, 2015).

22 Definiert in ITU-R (2015).
23 NTT DOCOMO (2021).
24 EMPOWER (2020).
25 Rajatheva et al. (2020).

Neben den in Tabelle 3-1 dargestellten technikzentrierten Eckdaten oder Leistungskennziffern sind auch soziale Themen in einer großen Anzahl der 6G-Roadmaps und Zielvorgaben enthalten. Zahlreiche Forschungsgemeinschaften, wie zum Beispiel 5G IA, 6G Flagship, NTT DOCOMO oder Empower haben eine umfassendere Sicht auf die neue Mobilfunktechnologie.[26]

Ein starker Fokus liegt auf dem Thema Energieverbrauch und Nachhaltigkeit in einer sehr stark vernetzen Gesellschaft (siehe auch Kapitel 4.3). Niedrigenergienetze und Netzwerke für industrielle Niedrigenergie-Anwendungen spielen dabei eine besondere Rolle. Aus dem Blickwinkel Nachhaltigkeit wird die Forderung abgeleitet, dass in absoluten Zahlen die Summe aller 6G-Infrastrukturen nicht mehr Energie verbrauchen sollte, als die Summe der 4G-Infrastrukturen, die Kommunikationseffizienz diesbezüglich also weiterhin signifikant gesteigert wird.[27]

Mit der zunehmenden Vernetzung und der Verarbeitung von Daten stellt sich die Frage nach dem Ort der Datenverarbeitung. Die entsprechenden Stichworte lauten hier Cloud-Computing, (Mobile-)Edge-Computing oder Far-Edge-Computing. Sofern die drahtlosen Telekommunikationsnetze immer kostengünstiger und leistungsfähiger werden, desto wirtschaftlicher könnte es für Anwendungen sein, die Datenverarbeitung in der Cloud zentralisiert vorzunehmen. Sobald aber Anwendungen immer mehr ein Echtzeiterfordernis haben und dann noch in der Fläche verteilt sind, setzen sie eine dezentrale Datenverarbeitung beispielsweise mittels einer Edge-Cloud-Architektur voraus. Je nach technischen Anforderungen der Anwendungen, den Kosten der Datenübertragung und der jeweils relevanten IT-Architektur werden 6G-Netze eine wesentliche Rolle bei der Vernetzung und Datenübertragung spielen.

Ein weiterer Aspekt, der bereits in der Vision von 6G betrachtet wird, besteht im Zugang der Bevölkerung zu modernen funkgestützten Kommunikationsnetzen. Aktuell verfügen 3,5 Milliarden Menschen über keinen drahtlosen Zugang zum Internet (davon 90 Millionen in Europa).[28] Forscher fordern daher für 6G preiswertere Netzwerkkomponenten und Geräte, welche unter anderem durch eine diversifizierte Lieferkette bereitgestellt werden sollen.[29] „5G ist für die Industrie, 6G soll für den Menschen sein“ – Diese Prämisse wird von zahlreichen Forschungsgruppen und politischen Akteuren verkündet.[30] Dabei ist eine menschzentrierte Lösung gemeint, die Vertrauen, Datenschutz und Datenkontrolle der Nutzer herausstellt.

Sicherheitsthemen spielen vor dem Hintergrund von immer mehr Cyber-Attacken in einer immer stärker vernetzten Gesellschaft und Wirtschaft eine zunehmend wichtigere Rolle, zumal 5G als eine Schlüsseltechnologie bei der Vernetzung von Dingen, also der weiteren Digitalisierung in Wirtschaft und Gesellschaft angesehen wird. Datensicherheit

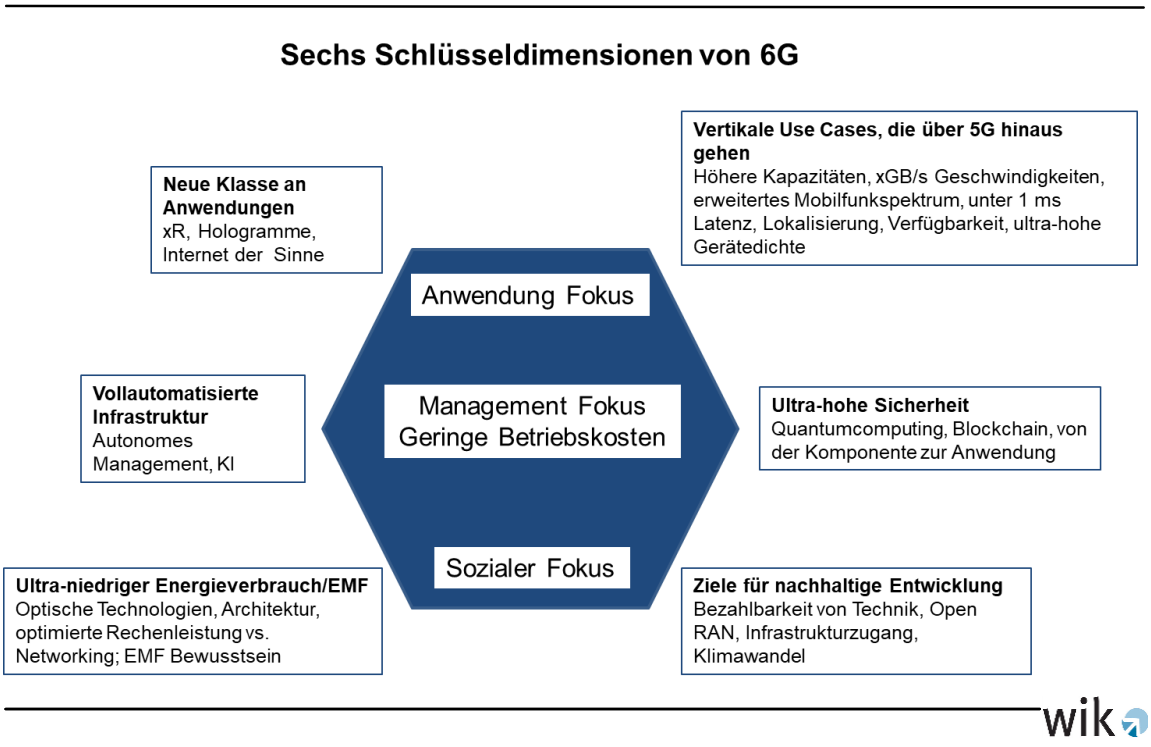
26 Siehe, z. B. 5G IA (2021), , 6G Flagship (2019) oder EMPOWER (2020), NTT Docomo (2021)
27 5G IA (2021), S. 12.
28 Broadband Commission for Sustainable Development (ITU, UNESCO) (2020), S. 63.
29 5G IA (2021), S. 1.
30 Siehe, z. B. 6G Flagship (2019), S. 4.

ist somit nicht mehr nur eine Herausforderung von Anwendern in kritischen Infrastrukturen.

Neben wirtschaftlichen, technischen und gesellschaftspolitischen Aspekten wird die Entwicklung von 6G auch durch Überlegungen bzw. Einschätzungen zu gesundheitlichen Risiken begleitet werden. Gesundheitliche Aspekte spielen insbesondere bei der Analyse von neu zum Einsatz kommenden Frequenzen eine Rolle. Insbesondere wird der Frage nachgegangen, inwiefern elektromagnetische Belastung vermieden werden kann.[31]

Zusammenfassend lassen sich die Zielsetzungen für 6G in sechs Dimensionen auf den drei Ebenen Anwendungen, Management und Soziales unterteilen, welche in Abbildung 3-4 dargestellt werden.

Abbildung 3-4: Sechs Schlüsseldimensionen von 6G



Quelle: WIK basierend auf Bernand Barani (Europäische Kommission), Konferenzpräsentation, The European 5G Conference, 23. Februar 2021.

3.1.3 Anwendungsbereiche von 6G

Wissenschaftler und Vertreter der Industrie erwarten, dass 6G Anwendungen unterstützen wird, die bereits zuvor kurz- bis mittelfristig über 5G-Netze realisiert werden. 6G wird, wie bereits oben ausgeführt, die technische Leistungsfähigkeit im Vergleich zu 5G

31 Hexa-X (2021a), S. 20f.

nochmals erhöhen, aber zudem auch völlig neue Anwendung bedienen können.[32] Tabelle 3-2 gibt eine Übersicht über einzelne Anwendungsbereiche.

Tabelle 3-2: Kurzübersicht Anwendungsbereiche 6G

Anwendungsbereiche	Kurzbeschreibung
Multisensorische erweiterte Realität	Kommunikation, welche sehr hohe Datenraten und sehr niedrige Latenzzeiten fordert
xHaul mit extremen Kapazitäten	6G als Backhaul-Infrastruktur
Erweiternder Hotspot	6G als Hotspots
Kurzstrecken Gerät-zu-Gerät Kommunikation	symmetrische hochbitratige Punkt-zu-Punkt-Verbindungen
Industrielle Automation und Robotik	Kommunikation mit ultrahoher Zuverlässigkeit und extrem niedrigen Latenzzeiten
Autonome Mobilität	Kommunikation mit hoher Zuverlässigkeit und niedrigen Latenzzeiten bei sehr hohen Bewegungsgeschwindigkeiten
Konnektivität in abgelegenen Gebieten	6G-Entwicklung mit Rücksicht auf Kosteneffiziente, um Implementierungen zu ermöglichen, die die gesamte Weltbevölkerung mit Breitband versorgen
Sensorik, Bildgebung und Positionierung	Wellenlängen im Millimeterwellen und Terahertz-Bereich werden massives räumliches Multiplexing in der Hub- und Backhaul-Kommunikation ermöglichen, sowie genaue Abtastung, Bildgebung, Spektroskopie und andere Anwendungen.

Quelle: WIK. Einzelnachweise in Fußnoten der folgenden Unterkapitel.

3.1.3.1 Multisensorische erweiterte Realität

Multimedia, VR und AR werden weiterhin die Nachfrage nach hohen Übertragungskapazitäten in den Telekommunikationsnetzen antreiben. Um multisensorische Eingabeerfassungen gekoppelt mit Benutzerinteraktion in Echtzeit anbieten zu können, sind sehr hohe Datenraten pro Benutzer im GBit/s-Bereich und sehr niedrige Latenzzeiten erforderlich. Während beispielsweise für Videokonferenzen lediglich nur 2 MBit/s Downloadraten benötigt werden, verlangen aktuelle 360°-Videos mit 4K-Auflösungen 10 bis 50 MBit/s Downloadraten.[33] Die nächste Generation von 360°-Videos mit 8K-Auflösungen, 90 Bildern pro Sekunde und mehr, High-Dynamic-Range-Bildern (HDR) und Stereoskopie (räumlicher Eindruck von Tiefe) benötigen 50 bis 200 MBit/s im Download. Darüber hinaus werden für sogenannte 6-DoF-Videos, also Videos in denen

32 Vgl. Mourad et al. (2020), S. 2.
33 Qualcomm (2018) S. 10.

sich der Betrachter in sechs Freiheitsgraden bewegen kann, 200 bis 5000 MBit/s benötigt.[34]

Remote-Verbindungen und Remote-Bedienungen durch holografische Kommunikation, zusammen mit allen menschlichen sensorischen Eingabeinformationen („Internet of Senses"), werden die Anforderungen an Downlink- und Uplink-Kapazitäten und Latenzen ganz wesentlich determinieren. Mehrere Kameras zum Filmen aus verschiedenen Ansichten für holografische Kommunikation erfordern Datenraten im Bereich von Terabit(s) pro Sekunde.[35]

3.1.3.2 xHaul mit extremen Kapazitäten

Dieser Anwendungsfall bezieht sich auf eine feste symmetrische Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Diese kann nur durch eine Kombination aus hoher Bandbreite und hoher spektraler Effizienz ermöglicht werden. Die angestrebte ultradichte Netzwerktopologie in städtischen Gebieten mit extremen Kapazitäts- und Latenzanforderungen macht glasfaserbasiertes Backhauling[36] wünschenswert, ist aber aufgrund der begrenzten Glasfasernetzpenetration und der damit verbundenen Ausbaukosten kompliziert. Daher wird eine drahtlose Infrastruktur als flexible Ergänzung zum optischen Glasfasereinsatz benötigt, sowohl im Innen- als auch im Außenbereich, um Engpässe beim Backhaul (oder xHaul) zu vermeiden. Ultrahochgeschwindigkeit ist erforderlich, da der Backhaul die Datenraten vieler Benutzergeräte aggregiert. Der xHaul kann auch einen effizienten Zugriff auf Rechenressourcen am Edge oder in der Cloud bieten.[37]

3.1.3.3 Erweiternder Hotspot

Ein erweiternder Hotspot beinhaltet einen hochbitratigen Downlink vom Access Point (AP) zu mehreren Benutzergeräten, wobei eine kurze Abdeckung und eine geringe Komplexität des Empfängers erforderlich sind. Vorgesehene Anwendungen sind Hotspots, die Hochgeschwindigkeitsdaten für anspruchsvolle Anwendungen wie hochauflösendes Videostreaming und erweitertes Wireless LAN (WLAN) liefern.[38]

3.1.3.4 Kurzstrecken-Gerät-zu-Gerät-Kommunikation

Hier wird eine symmetrische, hochbitratige Punkt-zu-Punkt-Verbindung mit sehr strengen Energie- und Komplexitätsbeschränkungen betrachtet. Der Anwendungsfall konzentriert sich auf den Datenaustausch zwischen Benutzergeräten, die sich innerhalb einer kurzen Entfernung befinden, mit begrenzter Beteiligung der Netzwerkinfrastruktur.

---

34 Qualcomm (2018) S. 10.
35 Calvanese Strinati et al. (2019), S. 3.
36 Das Backhaul-Netz ist für die Verkehrsaggregation und den Transport zwischen Zugangsnetz und Kernnetz zuständig. Siehe auch WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 478.
37 Rajatheva et al. (2020), S. 5.
38 Rajatheva et al. (2020), S. 6.

Dieser Anwendungsfall umfasst u. a. auch Inter-/Intra-Chip-Kommunikation und drahtlose Verbindungen.[39]

3.1.3.5 Industrielle Automation und Robotik

Das Konzept von Industrie 4.0 sieht eine digitale Transformation von Fertigungsindustrien und -prozessen durch cyberphysische Systeme, (IoT)-Netzwerke, Cloud-Computing und KI vor. Um eine hochpräzise Fertigung zu erreichen, werden automatische Steuerungssysteme und Kommunikationstechnologien in den industriellen Prozessen eingesetzt. In der Kommunikation werden ultrahohe Zuverlässigkeit[40] in der Größenordnung von $1\text{-}10^{-9}$ und extrem niedrige Latenzzeiten um 0,1 bis 1 ms Round-Trip-Zeit erwartet, ebenso wie Echtzeit-Datentransfer mit Jitter im Mikrosekundenbereich in industriellen Steuerungsnetzen.[41] Während 5G erste Umsetzungen von Industrie-4.0-Konzepten ermöglicht, wird erwartet, dass 6G noch mehr auf die spezifischen Anforderungen im industriellen Kontext ausgerichtet ist.

3.1.3.6 Autonome Mobilität

Die mit 5G eingeführten intelligenten Verkehrstechnologien sollen weiter in Richtung vollständig autonomer Systeme verbessert werden, die einen sichereren und effizienteren Transport, ein effizientes Verkehrsmanagement und ein verbessertes Benutzererlebnis bieten. Vernetzte autonome Fahrzeuge erfordern eine Zuverlässigkeit von über $1\text{-}10^{-7}$ und eine Latenzzeit von unter 1 ms, selbst in Szenarien mit sehr hoher Mobilität von bis zu 1000 km/h.[42] Darüber hinaus sind höhere Datenraten erforderlich, da die Anzahl der Sensoren in den Fahrzeugen steigen wird, die zur Unterstützung des autonomen Fahrens benötigt werden. Andere autonome Mobilitätslösungen wie Drohnen-Liefersysteme und Drohnenschwärme entwickeln sich ebenfalls in verschiedenen Anwendungsbereichen wie zum Beispiel Logistik, Bauwesen, Notfallhilfe oder Militär und erfordern eine verbesserte Kapazität und Abdeckung.[43]

3.1.3.7 Konnektivität in abgelegenen Gebieten

Die Hälfte der Weltbevölkerung hat immer noch keinen grundlegenden Zugang zu Breitbandanschlüssen.[44] Die Kombination aus aktuellen Technologien und Geschäftsmodellen hat es nicht geschafft, große Teile der Welt zu erreichen. Um diese digitale Kluft zu verringern besteht ein Hauptziel von 6G darin, 10 Mbit/s in jedem besiedelten Gebiet der Welt zu garantieren, wobei eine Kombination aus boden- und weltraumge-

39 Rajatheva et al. (2020), S. 6.
40 Wahrscheinlichkeit, eine bestimme Datenmenge innerhalb einer vorgegebenen Zeit zu übertragen.
41 Calvanese Strinati et al. (2019), S. 4.
42 Vgl. Calvanese Strinati et al. (2019), S. 4 und Giordani et al. (2020), S. 3.
43 Giordani et al. (2020), S. 3.
44 Broadband Commission for Sustainable Development (ITU, UNESCO) (2020), S. 63.

stützten Netzwerkkomponenten zum Einsatz kommen soll. Wichtig ist, dass dies nicht nur theoretisch von der Technologie unterstützt wird, sondern dass 6G auf eine ausreichend kosteneffiziente Weise entwickelt wird, um Implementierungen zu realisieren, die die gesamte Weltbevölkerung mit Breitband versorgen.[45]

3.1.3.8 Sensorik, Bildgebung und Positionierung

Höhere Frequenzen, größere Bandbreiten und massive Antennen-Arrays werden nicht nur Verbesserungen in den bisherigen Anwendungsbereichen eMBB, URLLC und mMTC bringen, sondern auch vollständig neue Nutzungsszenarien erschließen. Die kurzen Wellenlängen im Millimeterwellen- und (Sub-)Terahertz-Bereich werden massives räumliches Multiplexing in der Hub- und Backhaul-Kommunikation ermöglichen, sowie genaue Abtastung, Bildgebung, Spektroskopie und andere Anwendungen.[46]

Tabelle 3-3: Anwendungsbeispiele für Sensorik, Bildgebung und Positionierung

Anwendungsbereich	Beispiele
Sensorik	Luftqualitätsmessungen, persönliches Gesundheitsüberwachungssystem, Steuerung über Gestik, Sprengstofferkennung und Gas-Sensorik
Bildgebung	Sehen im Dunkeln, Radar mit HD-Videoauflösung, Körperscanner
Positionierung	Zentimetergenaue Positionsbestimmung

Quelle: WIK. Einzelnachweise in Fußnoten der folgenden Unterkapitel.

Sensoranwendungen können sowohl die weitaus größeren Kanalbandbreiten bei über 100 GHz als auch die frequenzselektiven Resonanzen und die Absorption verschiedener Materialien ausnutzen. Die Fähigkeit, Richtantennen mit hohem Antennengewinn[47] in einem kleinen physikalischen Formfaktor zu implementieren, ermöglicht auch Sensoranwendungen, die sehr zielgerichtet sind. Durch Strahlabtastung („beam scanning“) wird es möglich sein, Bilder von physischen Räumen zu erstellen, realisiert durch die systematische Überwachung der empfangenen Signalsignaturen in einer Vielzahl von verschiedenen Winkeln. Es wird möglich sein, die Beschaffenheit eines Raums, eines Büros oder einer komplexen Umgebung in wenigen Sekunden zu messen.[48] Da bestimmte Materialien und Gase eine Schwingungsabsorption (zum Beispiel Resonanzen) bei bestimmten Frequenzen im Terahertz-Band aufweisen, ist es auch möglich, das

45 Rajatheva et al. (2020), S. 6.
46 Rappaport et al. (2019), S. 78733.
47 Der Antennengewinn ist das Produkt aus Richtfaktor und Wirkungsgrad einer Antenne. Typische Richtantennen sind Parabolantennen, in denen Verbindungen in der Hauptrichtung z. B. auch bei größeren Entfernungen möglich sind. In anderen Richtungen als der Hauptrichtung wird der Empfang stark unterdrückt.
48 Rappaport et al. (2019), S. 78733

Vorhandensein bestimmter Gegenstände mit Hilfe der Frequenzscanning-Spektroskopie zu erkennen. Die Präsenz bestimmter Chemikalien oder Allergene in Lebensmitteln, Getränken oder der Luft können auf der Grundlage von Spektroskopie erkannt werden, die in Smartphones für 6G und darüber hinaus aktiviert werden könnte.[49]

Neben Spektroskopie wird die Nutzung von Terahertz-Frequenzen neue Sensoranwendungen ermöglichen, wie zum Beispiel Miniradare für die Gestenerkennung und berührungslose Smartphones, Terahertz-Sicherheits-Körperscans, Luftqualitätserkennung und persönliche Gesundheitsüberwachungssysteme.[50]

3.2 Netzwerkarchitektur

Die drahtlosen Netze der nächsten Generation werden aus einer großen Anzahl verbundener Geräte bestehen und mit den Basisstationen (BS) und Zugangspunkten (AP) zu einer massiven maschinengestützten Kommunikation (mMTC) führen. Mehrere BS und APs können ein oder mehrere Geräte gleichzeitig bedienen, um eine koordinierte Mehrpunktübertragung zu bilden[51]. Die riesigen Datenmengen, die von einer massiven Anzahl an Geräten erzeugt werden, erfordern sehr leistungsfähige Verarbeitungseinheiten und robuste Backhauling-Verbindungen. Die zentralen Verarbeitungseinheiten können Machine Learning (ML)- und KI-Algorithmen verwenden und die Backhauling-Verbindungen können glasfaserbasierte Kommunikation nutzen. Zu erwarten ist, dass 6G die architektonischen Überlegungen und Trends, die mit 5G eingeführt wurden und teilweise schon zum Einsatz kommen, weiterentwickeln und nutzen wird. Hervorzuheben sind in diesem Zusammenhang:

i) unterschiedliche Typen von Funkzugangsnetzen (RAN) für eine möglichst flexible und dynamische Architektur,

ii) die Nutzung von Cloud-Computing, Edge- und Far-Edge-Computing für die optimale Datenverarbeitung,

iii) die Einbeziehung von KI- und ML-Modellen auf allen Ebenen, vom Endgerät über Zugangsnetz bis hin zum Kernnetz sowie für Sicherheitsaspekte, und

iv) die Einbeziehung nichtterrestrischer Netzwerke um eine Breitband-Konnektivität „für alle“ zu ermöglichen.

Diese durch 5G eingeführten Trends können als Revolution gegenüber vorangegangenen Mobilfunktechnologien gesehen werden. Die Netzinfrastruktur von 6G wird gegenüber 5G somit keine Revolution darstellen sondern eher eine Evolution der bereits eingeführten Trends.

49 Rappaport et al. (2019), S. 78733.
50 Rappaport et al. (2019), S. 78733.
51 Al-Eryani und Hossain (2019), S.2.

3.2.1 Unterschiedliche Funkzugangsnetze (RAN)

Parallel mit der Einführung von 5G in die Bestandsinfrastrukturen der Mobilfunknetzbetreiber wird die bisherige Netzarchitektur in Frage gestellt. Entwicklungen im Bereich der Virtualisierung, Zentralisierung, Network-Slicing, RAN „functional splits“ und Open RAN beschreiben technische Optionen, die Bestandsinfrastrukturen verändern können. Selbst wenn diese Trends sich heute nur partiell oder noch gar nicht durchgesetzt haben, so werden sie als Grundvoraussetzung für die Einführung von 6G angesehen.

Im Folgenden wird ein Überblick über einige Technologie-Trends gegeben, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in künftigen 6G-Netzen zum Tragen kommen werden.

3.2.1.1 Centralized RAN (C-RAN)

Mobilfunknetzbetreiber beabsichtigen RAN-Steuerungsfunktionen zu zentralisieren, um die Effizienz zu steigern, den Energieverbrauch und die damit verbundenen CO2-Emissionen zu senken und die Kosten pro GB zu reduzieren. Die Zentralisierung ermöglicht die Aufteilung der Kosten für Wartung und Stromverbrauch auf mehrere, insgesamt aber eine geringere Anzahl digitaler Verarbeitungseinheiten (Server). Darüber hinaus können die Basisbandressourcen im Pool durch einen Virtualisierungsprozess (virtuelle BBUs[52] (Baseband Units)) auf die Basisstationen nach deren Rechenbedarf verteilt werden.

In der C-RAN-Architektur sind die BBUs nicht nur von den Remote Radio Heads[53] (RRHs) getrennt, sondern befinden sich in einer zentralen Einheit, dem BBU-Pool, der mehrere virtuelle BBUs aufnehmen kann, wie in Abbildung 3-5 dargestellt. Auf diese Weise können die Kosten der Unterbringung der Systeme und deren Energieverbrauch erheblich reduziert werden. Darüber hinaus stellt eine zentralisierte Einheit einen gemeinsamen Kommunikationskanal zwischen den BBUs zur Verfügung. Dieser kann genutzt werden, um eine koordinierte Verarbeitung durchzuführen. Ein weiterer Schritt ist die Implementierung eines virtualisierten BBU-Pools, bestehend aus Universalprozessoren für die Basisbandverarbeitung. Universalprozessoren können dynamisch verschiedenen RRHs zugeordnet werden. Dies ermöglicht einen Lastausgleich und eine effiziente Ressourcenauslastung.[54]

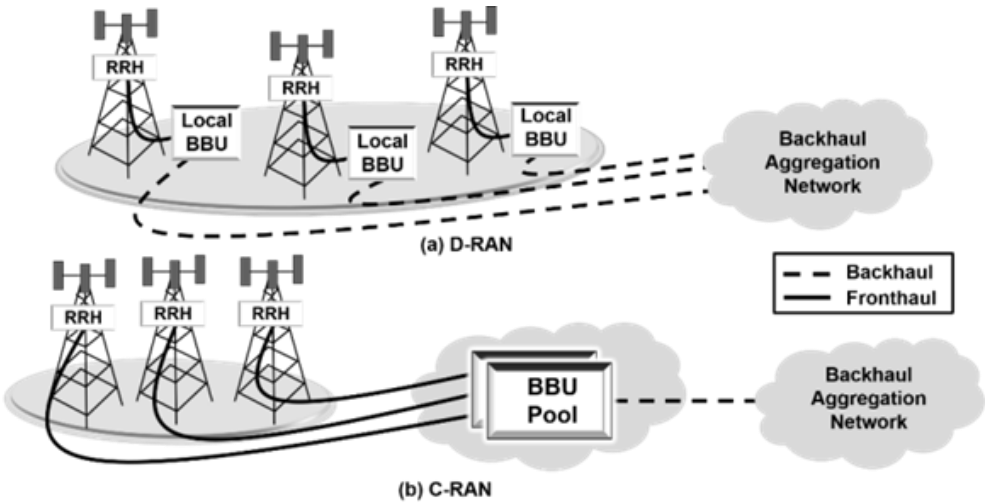
---

52 BBU (Baseband Unit, auch als Digital Unit (DU) bezeichnet), die ein digitalisiertes Baseband-Radio Frequenz-Signal verarbeitet

53 Der RRH (Remote Radio Head, auch RRU, Remote Radio Unit), erzeugt das analoge Radio-Frequenz-Signal (RF-Signal) aus dem Basisbandsignal und leitet dieses an die Antenne weiter (senden) bzw. digitalisiert das Radio-Frequenz-Empfangssignal und leitet dies an die Basisstation weiter (empfangen) (Shehata et al. 2018, S. 1).

54 Shehata et al. 2018, S. 1f.

Abbildung 3-5: Decentralized versus Centralized RAN



Quelle: Shetata et al. (2018).

3.2.1.2 Open RAN

Open RAN ist ein Konzept, die eine Interoperabilität offener Hardware, offener Software und offener Schnittstellen umfasst.[55] Durch die Trennung von Software und Hardware kann die RAN-Software auf jeder herkömmlichen standardisierten Hardware-Plattform (sog. commercial off-the-shelf - COTS Hardware) laufen. Somit wird beim Netzaufbau die RAN-Funktionalität von der Hardware getrennt und eine offene Schnittstelle geschaffen, beispielsweise für RAN-Ausrüstung/ RAN-Komponenten.

In einem herkömmlichen RAN geht die Hardware mit der Software Ausrüstung einher. Das bedeutet, dass ein Mobilfunknetzbetreiber die gesamte Einheit austauschen muss wenn er von Hersteller A auf Hersteller B wechseln will. Mit Hilfe eines offenen RAN können Mobilfunknetzbetreiber Software und Hardware Komponenten jeweils getrennt ersetzen. Die Software für eine Open RAN Plattform kann auf einem offenem Quellcode oder dem Code einzelner Unternehmen basieren, die zu ihrer Entwicklung beigetragen haben. Die offene Softwareplattform kann für die Realisierung aller RAN-Funktionen verwendet werden.

Das offene RAN ermöglicht ein Multivendor-Ökosystem. Dieses Ökosystem könnte somit Innovationen gedeihen lassen. Dies ermöglicht den Übergang von kostspieligen, proprietären Lösungen zu COTS-basierten und offenen, softwarebasierten Lösungen sowie die Schaffung einer breiteren, offenen Anbieterkette.[56]

55 Siehe auch WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 478.
56 Zum Beispiel arbeiten bereits heute schon Chipset-Hersteller wie Marvel, Qualcomm und Xilinx an Chipset-Plattformen für mMIMO Antennen (ABI Research, 2021, S.6).

3.2.1.3 Virtual Radio Access Network (vRAN)

Da sich die 5G-Designprinzipien auf einen softwaregesteuerten Ansatz konzentrieren, besteht das Ziel darin, die zentralisierten und disaggregierten Funktionen zu virtualisieren und sie auf COTS-Serverplattformen mit Standardbetriebssystemen auszuführen.

Die Virtualisierung beinhaltet die Migration von speziell angefertigten Netzwerkknoten zu Netzwerkfunktionen, die in einer Software implementiert sind und auf einer generischen Hardware-Rechenplattform laufen. Nach Auffassung von Ericsson begann die Virtualisierung für Anbieter von Kommunikationsdiensten mit dem Kernnetz und später mit Cloud-Technologien und hat sich rasant weiterentwickelt.[57] Ebenso geht Ericsson davon aus, dass im RAN-Bereich COTS-Hardware das Potenzial hat, Innovationen in einer Reihe von Software-Ökosystemen zu ermöglichen[58]. Obwohl die RAN-Funktionen auf einem COTS-Server virtualisiert sind, ist die Schnittstelle zwischen BBU und RRH nicht offen, so dass die Software eines beliebigen Anbieters nicht mit der der RRH arbeiten kann. Virtualisiertes RAN (vRAN) besteht aus einem Funkgerät von Anbieter A und Software von Anbieter A, die auf einer COTS-BBU läuft. Ein Betreiber kann die Software von Anbieter B nicht auf derselben COTS-BBU einsetzen, es sei denn, die Schnittstelle zum Funkgerät von Anbieter A ist offen. Somit lässt sich vRAN deutlich von Open RAN abgrenzen.[59]

3.2.2 Cloud-, Edge- und Far-Edge-Computing

Die Verbreitung von 5G-Netzen geht mit einem Trend der Cloudifizierung einher – ein Trend, der sich mit 6G weiter fortsetzen wird.[60] Cloudifizierung bedeutet die Umstellung von Netzsystemen (Operational Technology, OT) auf softwarebasierte, cloudnative Funktionen und Lösungen, um von Skaleneffekten und bewährten Tools und Prozessen aus der IT und der Cloud zu profitieren. Diese Konvergenz von IT- und OT-Systemen bedeutet, dass beide Systeme auf einer einzigen Plattform laufen können, was Kosten reduziert und mehr Flexibilität für Upgrades schafft.[61]

Neben der Verlagerung von Prozessen in externe, zentrale Cloudserver, die nicht unmittelbar in der Nähe der Endnutzer sein müssen, sind ebenso Trends des Edge- und

---

57 Ericsson (2020b), eine Übersetzung.
58 Ericsson (2020b), eine Übersetzung.
59 Moniem-Tech (2020) - What is the difference between vRAN and Open RAN? Online abrufbar unter: https://moniem-tech.com/2020/10/25/what-is-the-difference-between-vran-and-open-ran/, zuletzt abgerufen am 21.10.2021.
60 Siehe, z. B. die Verschiebung des 5G-Kernnetzes von AT&T auf Microsoft's Azure Cloud Plattform, und somit der zukünftige Netzwerkverkehr auf der externen Cloud-Plattform verwaltet wird (https://news.microsoft.com/2021/06/30/att-to-run-its-mobility-network-on-microsofts-azure-for-operators-cloud-delivering-cost-efficient-5g-services-at-scale/, zuletzt abgerufen am 02.12.2021). Ebenso besteht eine Partnerschaft zwischen der Vodafone Group und Google Cloud Platform, worin Vodafone ihr SAP-Environment, alle Big-Data-Prozesse sowie alle Geschäftsanalytik-Prozesse auf der Plattform des Hyperscalers laufen lässt (https://www.vodafone.com/news/press-release/vodafone-google-cloud-industry-first-global-data-platform, zuletzt abgerufen am 02.12.201).
61 ABI Research (2021), S. 3.

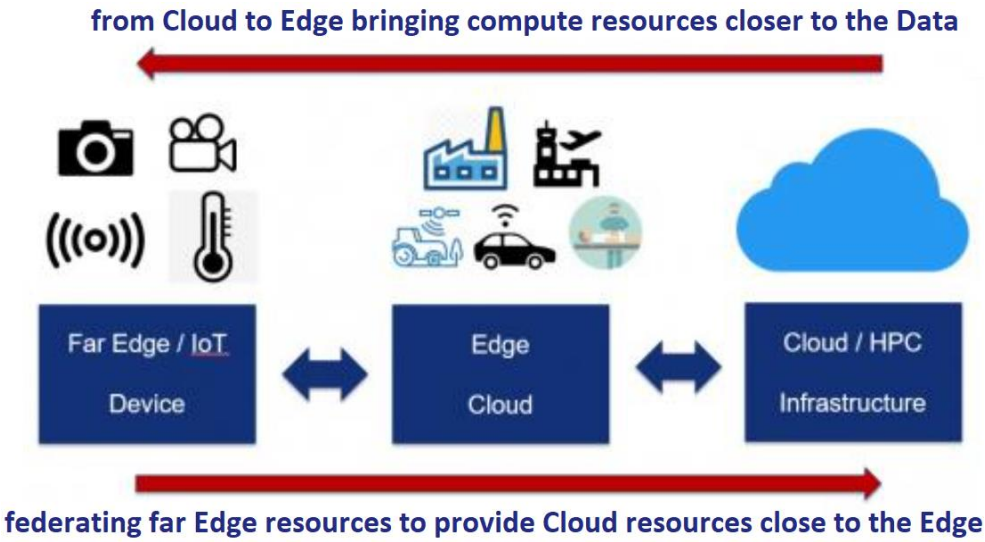
Far-Edge-Computing im Mobilfunkmarkt beobachtbar.[62] Dabei handelt es sich um die Verlagerung von Rechenleistung näher zum Endnutzer und unterstützt niedrige Latenzen.

Die Entwicklung und Bedeutung des Edge-Computing wird durch verschiedene Faktoren wie IoT, Industrie 4.0, Smart Cities und neue KI-/ML-basierte verteilte Anwendungen vorangetrieben. Gleichzeitig bietet die Zunahme der Rechenressourcen am Netzwerkrand die Möglichkeit, solche Anwendungsfälle zu unterstützen. Auf der einen Seite können durch Edge-Computing Verringerung von Latenzzeiten und die Verbesserung der Reaktionsfähigkeit sowie die Verringerung des Datenflusses zwischen Benutzer- oder IoT-Geräten und zentralen Cloud-Computing-Ressourcen erzielt werden. Auf der anderen Seite können durch die Verlagerung der Rechenleistung an den Rand des Netzwerkes besonders IoT-Geräte selbst einfacher und kleiner werden und somit kostengünstiger und energieeffizienter sein.

Während beim Edge-Computing das IoT-Gerät selbst kaum Rechenleistung erbringen muss, da diese in unmittelbarer Nähe des Gerätes geleistet wird, bezeichnet Far-Edge-Computing den Umstand, wenn das Gerät selbst die Rechenleistung erbringt (siehe Abbildung 3-6).

62 Siehe, z. B. T-Systems Edge-Computing-Lösungen für 5G-Campusnetze (https://www.t-systems.com/de/de/referenzen/connectivity/5-g-campus-netzwerk-osram, zuletzt abgerufen am 02.12.2021). Siehe ebenso die Partnerschaft zwischen Verizon US und Amazon Web Service, mit der eine gemeinsame Edge-Server-Lösung auf den Markt gebracht wird, und somit Rechenleistung und Datenspeicherung an den Rand des Netzwerkes gebracht werden (https://www.verizon.com/about/news/verizon-private-mobile-edge-computing-enterprise-aws-outposts und https://aws.amazon.com/de/blogs/industries/aws-and-verizon-expand-5g-collaboration-with-private-mec-solution/, zuletzt abgerufen am 02.12.2021.)

Abbildung 3-6: Next Generation IoT



Quelle: Europäische Kommission, The next Generation of IoT (2021). Online abrufbar unter: https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/next-generation-internet-thingshttps://moniem-tech.com/2020/10/25/what-is-the-difference-between-vran-and-open-ran/, zuletzt abgerufen am 21.10.2021.

Diese Entwicklung hat zwar schon bei früheren Mobilfunknetzgenerationen begonnen, doch für 6G-Netze werden Edge-Computing und „allgegenwärtiges" Computing an Bedeutung gewinnen. Forscher gehen davon aus, dass ein Übergang der gesamten Telekommunikationsarchitektur zu einer verteilten (mikro-)dienstbasierten Architektur stattfinden muss, um zum Beispiel 6G-Versprechen wie „Zero Delay" nachzukommen.[63]

Wie auch Open RAN die Wertschöpfungskette im Mobilfunkmarkt für Chiphersteller öffnet, können durch den Trend der Cloudifizierung vor allem Cloud-Anbieter in den Markt einsteigen. Besonders Hyperscaler sind diesbezüglich gut aufgestellt.[64]

3.2.3 Einbeziehung von KI- und ML-Modellen

Künstliche Intelligenz wird weithin als eine wichtige bahnbrechende Technologie angesehen, die sich auf die Entwicklung von 5G und 6G auswirken wird.[65] KI wird bereits heute beim Funkressourcen- und Mobilitätsmanagement sowie beim Netzwerkmanagement und der Orchestrierung im Kernnetz der Mobilfunkbetreiber zentralisiert angewendet. Neben diesem zentralisierten Ansatz, der auf großen Daten basiert, wird bei 6G zusätzlich ein verteilter Ansatz erwartet, der auf kleinen Datenmengen basiert. Die

63 5G IA (2021), S.16.
64 Vgl. ABI Research (2021), S. 9 und Fußnoten 60 und 62.
65 Vgl. Empower (2020), S. 5. oder Ali et al. (2020). S. 7.

KI-Dienste werden allgegenwärtig sein, vom Kernnetz und Zugangsnetz bis hin zu den Endgeräten.[66]

Modelle des maschinellen Lernens (ML) als Unterkategorie von KI sind Computersysteme, die dazu dienen, die Eigenschaften eines Systems zu erlernen, die nicht durch ein explizites mathematisches Modell vorhergesagt werden können. In der Anwendungs- und Transportschicht kann ML ein intelligentes IoT ermöglichen, zum Beispiel für XR und holografische Anwendungen, autonomes Fahren oder in Robotik-Anwendungen. In der Sicherungsschicht (Media-Access-Control-Schicht) können durch ML Vorhersagen zur Ressourcenallokation getroffen und somit das Netzwerk optimiert werden. Ebenso gehen Forscher davon aus, dass ML für die Erkennung und Prävention von Sicherheitsrisiken eingesetzt werden wird.[67]

3.2.4 Nichtterrestrische Netzwerke

Um Breitband-Konnektivität „für alle“ ermöglichen zu können, werden nichtterrestrische Netzwerke (NTN) möglicherweise eine wichtige Rolle in der globalen Kommunikationsinfrastruktur spielen, besonders an Orten, die über kein terrestrisches Netzwerk verfügen. NTN-Technologie soll dabei nativ in das Netzwerk eingebunden sein.[68] Dabei befinden sich High-Altitude Platfom Stations (HAPS) circa 20 km über der Erde in der Stratosphäre, Geosynchronous-Earth-Orbiting (GEO)-Satelliten etwa 36.000 km, Medium Earth Orbit (MEO)-Satelliten ca. 10.000 km und Low-Earth Orbit (LEO)-Satelliten 300 bis 2.000 km über der Erde.[69]

Die Verwirklichung der NTN-Technologie erfordert die Berücksichtigung neuer Faktoren, die bei terrestrischen Netzen nicht gegeben sind, wie zum Beispiel die Unterstützung beweglicher Zellen, große Zellengrößen von Hunderten von Kilometern, lange Ausbreitungsverzögerungen, große Dopplerverschiebung aufgrund der hohen Geschwindigkeit der NTN-Komponenten und große Pfadverluste. Weitere, noch unbekannte Faktoren können ebenso Herausforderungen darstellen, da die Mobilfunkindustrie sich noch in der Anfangsphase der Entwicklung von Technologien zur Unterstützung von NTN befindet.[70]

---

66 Ali et al. (2020), S. 9.
67 Ali et al. (2020), S. 9.
68 Mit der Aufname der ETSI DECT-2020 New Radio Spezifikation in die Familie der 5G-Standards durch die ITU-R wurde eine erste Non-Cellular-5G-Technologie in den Standard aufgenommen. Diese Spezifikation beschreibt ein dezentrales Mesh-Netzwerk, welches besonders im IoT-Kontext geeignet ist, aber möglicherweise auch eine native Einbindung von NTN-Technologie in der Zukunft ermöglichen wird (https://www.etsi.org/newsroom/press-releases/1988-2021-10-world-s-first-non-cellular-5g-technology-etsi-dect-2020-gets-itu-r-approval-setting-example-of-new-era-connectivity, zuletzt abgerufen am 02.12.2021).
69 Siehe WIK (2021), S. 2 f. https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2021/Kurzstudie_HAPS_deutsch.pdf und ESA – Types of orbits (https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits, zuletzt abgerufen am 02.12.2021).
70 Samsung (2020), S.30.

Wie auch mit Open RAN und der Cloudifizierung von Netzwerkfunktionen, unterstützt durch die Vervollkommnung von SDN und NFV, neue Unternehmen Eingang in den Telekommunikationsmarkt finden werden und somit in den Wettbewerb mit traditionellen Telekommunikationsequipment-Hersteller gehen, werden NTN-Technologien ebenso Treiber für neue Marktteilnehmer sein.[71]

3.3 Frequenznutzung

Einer der wichtigsten Hebel für massive Verbesserungen bei Durchsatz und Kapazität ist die Verfügbarkeit von mehr Spektrum. Heute stehen im weltweiten unlizenzierten drahtlosen Millimeterwellenband (von insgesamt 60 GHz) 7 GHz Bandbreite zur Verfügung, bei der Datenraten in der Größenordnung von 100 Gbit/s derzeit mit keinem bekannten digitalen Modulationsverfahren oder Transceiver-Komponenten realisiert werden können.[72] Daher ist eine zunehmende Forschungsaktivität bei extrem hohen Frequenzen über 100 GHz zu beobachten, die oft als Sub-Terahertz- und Terahertz-Spektrum bezeichnet werden.[73]

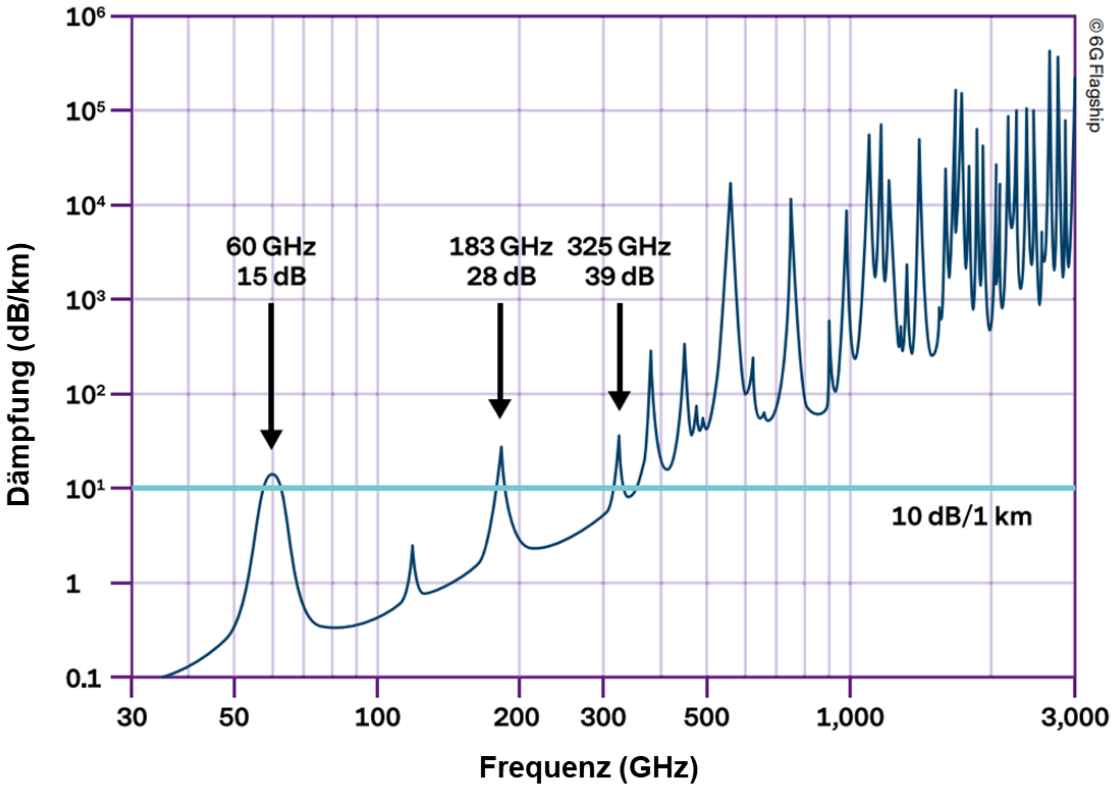
In der aktuellen Forschung[74] wird der Bereich zwischen 100 und 300 GHz dabei mit besonderem Interesse betrachtet, welcher formal betrachtet im Sub-Terahertz-Bereich bzw. oberen Millimeterwellenbereich liegt.[75] Drahtlostechnologien, die einen unteren Millimeterwellen-Bereich umfassen, sind nicht in der Lage, TBit/s-Verbindungen zu unterstützen. Einerseits werden fortschrittliche digitale Modulationen, zum Beispiel Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) und ausgeklügelte Kommunikationsschemata, zum Beispiel sehr groß angelegte Multiple-Input-Multiple-Output-Systeme (MIMO), eingesetzt, um eine sehr hohe spektrale Effizienz bei Frequenzen unter 5 GHz zu erreichen. Allerdings begrenzt die Knappheit der verfügbaren Bandbreite die erreichbaren Datenraten in diesem Bereich.[76]

Die Nutzung höherer Frequenzen birgt jedoch ebenso Nachteile. Allgemein steigt die Resonanzabsorption der Atmosphäre mit höheren Frequenzen, das heißt die Schwingungsenergie der Signalquelle wird von in der Atmosphäre befindlichen Gasen übernommen. Dadurch nimmt die Abdeckung ab (siehe Abbildung 3-7). Ab einer Dämpfung von 10 dB/km ist eine kabellose Kommunikation mit einer Kilometer-Reichweite nur noch schwer zu realisieren. Bei gewissen Frequenzen absorbieren frei fliegende Moleküle besonders stark. Zum Beispiel sorgt Wasserdampf in der Atmosphäre dafür, dass Frequenzen im K-Band (18-27 GHz) in regenreichen Gebieten kaum für die Signal-

71 Siehe z. B. Unternehmen wie Starlink, einer Division von SpaceX (https://www.starlink.com/satellites, zuletzt abgerufen am 02.12.2021) oder OneWeb (https://oneweb.net/company, zuletzt abgerufen am 02.12.2021).
72 Kürner und Priebe (2014), S. 53.
73 Terahertz-Wellen liegen per Definition zwischen 300 GHz bis 3 THz, in der Literatur wird daher „Sub-Terahertz“ benutzt, um das Spektrum zwischen 100 GHz bis 300 GHz zu beschreiben. Rappaport et al. (2019), S. 78731.
74 Vgl. Pärssinen et al. (2020) und Rajatheva et al. (2020), S. 10.
75 Rappaport et al. (2019), S. 78731.
76 Pärssinen et al. (2020), S. 9f.

übermittlung genutzt werden (z. B. für Funkverbindungen, Rundfunk oder Ortung). Die Absorptionslinien von Sauerstoff und Wasser liegen bei 22,235 GHz (H_2O), 60 GHz (O_2), 118,75 GHz (O_2), 183,31 GHz (H_2O) und 325,153 GHz (H_2O). Bei anderen Frequenzen hingegen gibt es keine signifikanten Störfaktoren, sodass zwischen 121 GHz und 154 GHz über eine Distanz von über 8 km und zwischen 192 GHz und 296 GHz über eine Distanz von 2 km kabellose Kommunikation realisierbar ist (Dämpfung von unter 10 dB), wenn es nicht regnet. Daraus ergeben sich einige geeignete Kandidaten im Frequenzbereich für die Nutzung zukünftiger Mobilfunktechnologien.[77]

Abbildung 3-7: Resonanzabsorption in der Atmosphäre



wik

Quelle: Pärssinen (2020), S. 10. Kalkulationen basieren darauf, wenn es nicht regnet.

Neben diesen Signalstörungen leiden Sub-Terahertz-Systeme auch an Phasenrauschen („phase noise“) und Trägerfrequenz-Offset („carrier frequency offset“)[78], die auf die geringe Leistung von Hochfrequenzsendern zurückzuführen sind, da diese, verglichen mit Niedrigfrequenzsendern, weniger zuverlässig und weniger robust sind. Um diese Einschränkungen zu überwinden, müssen neue Geräteimplementierungen sowie

77 Pärssinen et al. (2020), S. 9f.
78 Der Trägerfrequenz-Offset bezieht sich auf die Abweichung zwischen der Frequenz des empfangenen Signals und der Frequenz des lokalen Oszillators am Empfänger (Zaidi et al., 2018, S. 186).

Signalverarbeitungs- und Kommunikationslösungen entwickelt werden. So können beispielsweise optimierte Modulations- und Demodulationsverfahren verwendet werden, um eine gewisse Robustheit gegenüber Störsignalen zu erreichen. Auch die Entwicklung von Algorithmen zur Interferenzunterdrückung ist ein aktuelles Forschungsthema, um die Auswirkungen von Trägerfrequenz-Offset zu mildern. Ebenso ist die Bereitstellung hoher Leistung (und relativ hoher Effizienz) mit aktueller Halbleitertechnologien im Physical Layer nicht möglich und somit noch ein offenes Forschungsthema. MIMO-Systeme mit Energiedetektionsempfängern können zum Beispiel eine wertvolle Lösung darstellen, um Sub-Terahertz-Kommunikation mit hoher spektraler Effizienz bei geringem Stromverbrauch und weniger komplexer Hardware zu ermöglichen.[79]

Darüber hinaus beschäftigt sich die Forschung auch mit Frequenzen, die über 300 GHz hinaus gehen (Infrarot-Spektrum) und somit mit *echten* Terahertz-Frequenzen, die ebenso für eine neue Mobilfunktechnologie verwendet werden können. Diese stellen derzeit die Forschung jedoch vor noch größeren Herausforderungen.

Obwohl die Charakteristika der Sub-Terahertz- und Terahertz-Systeme aktuell noch zahlreiche Schwierigkeiten auf allen verschiedenen Dimensionen darstellen, haben Forscher begonnen, sich mit diesen Herausforderungen auseinanderzusetzen, um diese Frequenzbereiche für Mobilfunk nutzbar, leistungsstark und effizient zu machen.

Für bestimmte, sehr spezifische 6G-Anwendungsfälle werden diese sehr hohen Frequenzen notwendig sein, obgleich auch die bisher genutzten Mobilfunkfrequenzen bei 6G mit hoher Wahrscheinlichkeit weiterhin genutzt werden.

3.4 Zwischenfazit vertikale Treiber

Der aktuelle Mobilfunkstandard 5G bietet neben sehr hohen Geschwindigkeiten und Übertragungsraten die Basis für das „Internet der Dinge“ (IoT). Dabei wird 5G ein Ökosystem für technische und unternehmerische Innovationen schaffen, das vertikale Märkte wie Automobil, Energie, Landwirtschaft, öffentliche Verwaltung, Gesundheitswesen, Fertigung, öffentliche Verkehrsmittel und vieles mehr umfasst. 6G wird diese vertikalen Anwendungsfälle und -bereiche weiter vertiefen und Anforderungen an die Kommunikationstechnik erfüllen, die selbst 5G nicht bereitstellen kann und die schon heute und in der Zukunft gefordert werden.

Darüber hinaus wird 6G eine neue Klasse an Anwendungen bieten, zum Beispiel neben VR/AR/xR holografische Kommunikation und das „Internet der Sinne“ („Internet of Senses“).[80] Der Einsatz von Sub-Terahertz- und Terahertz-Frequenzen wird außerdem

79 Rajatheva et al. (2020), S. 26.
80 In Anlehnung an Internet der Dinge, vgl. Zhang et al. (2019), S. 3 und https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/consumerlab/reports/10-hot-consumer-trends-2030, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

neue Anwendungsbereiche für die Sensorik, Bildgebung und Positionierung ermöglichen und das Funknetzwerk selbst zum Sensor machen.

Neben den für die Kommunikationstechnik üblichen Leistungsmerkmalen wie Up- und Download-Geschwindigkeit, Latenz, Verlässlichkeit oder Kapazität, die mit 6G gegenüber 5G weiter verbessert werden sollen und damit die Konnektivität für Anwender und Produktivität der Gesamtwirtschaft steigern können, sieht die Forschungsgemeinschaft in ihren Visionen für 6G die neue Mobilfunkgeneration noch umfangreicher. Das heißt, bei der Entwicklung von 6G wird gesondert auf den gesamten Energieverbrauch sowie auf ökologische Nachhaltigkeit geachtet. Ebenso ist auch ein kosteneffizientes Design im Fokus, um eine gesellschaftliche Teilhabe global gewährleisten zu können.

Netzwerke der Zukunft werden intelligenter sein. Unterstützt durch KI, beziehungsweise ML, werden sie selbstlernend sein und kontextabhängig agieren können. Intelligente Antennen und Edge-Computing, die bereits in 5G-Mobilfunknetzen zum Einsatz kommen, werden in zukünftigen Standardisierungen von 6G-Netzen eine noch größere Rolle spielen.

Der Trend von Open RAN und Cloudifizierung wird sich mit 6G fortsetzten. Ebenso wird eine native Einbindung von nichtterrestrischer Netzwerktechnologie wie auch Open RAN und Cloudifizierung die Wertschöpfungskette in 6G-Netzwerken weiter öffnen. Chiphersteller, Cloud-Anbieter und Raumfahrtunternehmen werden als Partner und Wettbewerber traditioneller Mobilfunkequipment-Hersteller und Mobilfunknetzbetreiber in den Mobilfunkmarkt eintreten oder sind es bereits.

Für die Umsetzung kommender 6G-Anforderungen wird besonders die Erschließung neuer Frequenzbänder im Sub-Terahertz-Regime notwendig, da in diesem Bereich verfügbare Frequenzen liegen, mit denen ein höherer Datendurchsatz erreicht werden kann.

4 Horizontale Treiber bei der Entwicklung von 6G

In diesem Kapitel werden die in Abbildung 1-2 beschrieben horizontalen Treiber betrachtet, die Einfluss auf die Entwicklung von 6G nehmen.

4.1 Regulatorische Aspekte

Regulatorische Aspekte im weitesten Sinne finden sich in allen drei vertikalen Themenbereichen wieder. Dies betrifft die Rahmenbedingungen von 6G gestützten Anwendungen (z. B. technisch-regulatorische Anforderungen beim vernetzten Fahren) genauso wie die Rahmenbedingungen beim Einsatz von KI.

Im engeren Sinne sind hiermit jedoch vor allem frequenzregulatorische Themen gemeint. Bereits in der Vergangenheit wurden mit neuen Mobilfunktechnologien dem Markt auch neue Frequenzbereiche zur Verfügung gestellt. Darüber hinaus besteht beispielsweise in Deutschland die Möglichkeit, Frequenznutzungsrechte für lokale Campusnetze zu beantragen. Die somit geänderten Rahmenbedingungen verdeutlichen, dass Mobilfunktechnologien zunehmend eine größere Bedeutung in Wertschöpfungsprozessen erhalten.

Angesichts der Bedeutung von regulatorischen Rahmenbedingungen, die wie bei lokalen Frequenznutzungsrechte neue Märkte initiieren können, ist es überraschend, dass das Themengebiet der Regulierung im Rahmen der 6G-Initiativen nur vereinzelt aufgegriffen wird.

4.1.1 Frequenzregulierung

Die Gruppe für Frequenzpolitik (RSPG) hebt im Zusammenhang mit der künftigen Frequenznutzung für 6G einen harmonisierten europäischen Ansatz hervor, sowie eine flexible Nutzung neuer Frequenzbereiche im (Sub-)Terahertz-Bereich zur Unterstützung von Fixed Wireless Access (FWA) und Wireless Backhauling.[81] Wenn neue Frequenzbänder wie die Millimeterwellen- und Terahertz-Wellenbänder zu den bestehenden Frequenzbändern hinzukommen, werden im Vergleich zu anderen, bereits für Mobilfunk verfügbaren Frequenzen, sehr breite Frequenzbänder genutzt werden können. Dabei können neue Regelungen für die Frequenzzuteilung eine Chance bieten, um auch die Voraussetzungen für neue Marktteilnehmer im Markt neben den bestehenden Netzbetreibern zu berücksichtigen.[82] Die RSPG identifizierte im Rahmen ihrer Umfrage im Jahr 2020 eine erhöhte Nachfrage nach mm-Wellen von Seiten der Industrie.[83] Auch 5G Americas plädiert im Rahmen ihrer 6G-Initiative für mehr Flexibilität bei der Frequenznutzung und fordert einen Zugang und die kommerzielle Nutzung von exklusiven Lizenzen.[84]

Auf nationaler Ebene stellen sich zunächst Zuteilungsfragen. Welcher Versuchsfunk kann zur Verfügung gestellt werden? Reicht eine Allgemeinzuteilung oder ist eine Einzelzuteilung erforderlich? Sind Änderungen im Frequenzplan und Frequenzverordnung notwendig?[85]

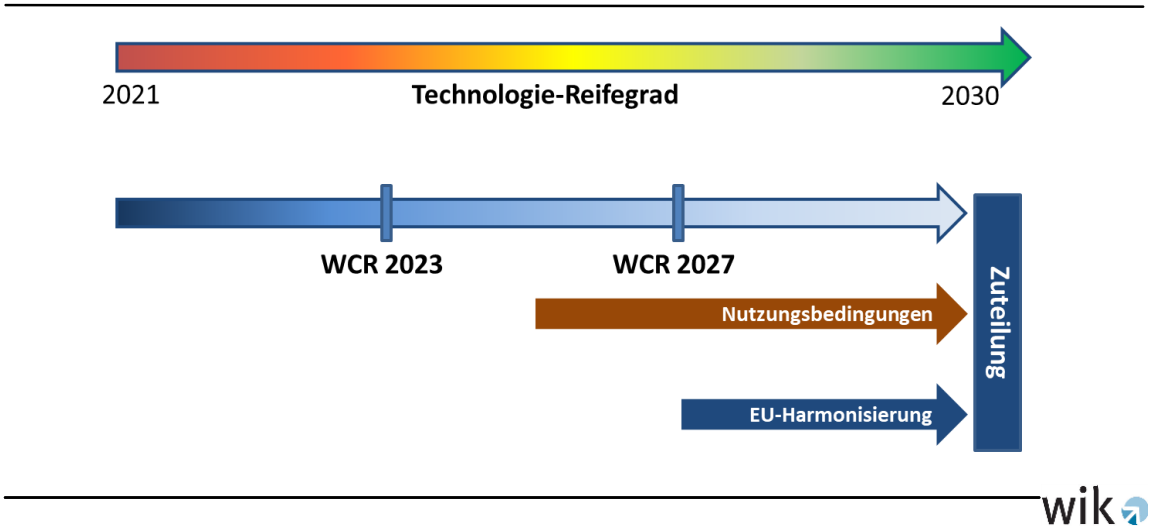
Konkrete Handlungsempfehlungen werden mit der World Radiocommunication Conferences (WRC) im Jahr 2023 erwartet, wenn entsprechende Frequenzen zugewiesen

81 RSPG (2021).
82 The 5G Infrastructure Association (2021), S. 35f.
83 RSPG (2021)
84 "*North American regulators can continue to work with the mobile wireless networking industry to identify opportunities to attain technology leadership while balancing regulation. Streamlining cell cite processes, Private Public Partnerships and opening up access to more commercial use of exclusive use licensed spectrum, are examples regulator and industry opportunities."* 5G Americas (2020), S. 47.
85 Kühn (2021), Präsentation im Rahmen der Medienakademie Roundtable Reihe zum Thema *„Hexa-X: Mit 6G weiter als bis zum Ende der Fahnenstange"* vom 28.7.2021.

werden und sich ein stabiler Technologiestand abzeichnet. Dann sollten Nutzungsbedingungen definiert und auf EU-Ebene Regelungen für eine harmonisierte Nutzung geschaffen werden, um nachfolgend die Zuteilung und effiziente Nutzung der Frequenzen zu ermöglichen (siehe Abbildung 4-1).

Bereits vorab fordert die japanische 6G-Initiative Regelungen für eine zeitlich befristete Nutzung des Hochfrequenzspektrums (Terahertz-Bänder) für Forschung und Entwicklung.[86] Sofern bestimmte Bedingungen erfüllt werden, könnten damit einhergehend Genehmigungsverfahren für die experimentelle Nutzung erleichtert werden.

Abbildung 4-1: Zeithorizont Frequenzregulierung



Quelle: WIK.

4.1.2 Erweiterte Regulierungsfelder bei 6G

Auf Basis der erwarteten Anwendungsbereiche von 6G und der Einbeziehung neuer Marktteilnehmer könnte laut europäischer 6G-Initiative eine Erweiterung des bisherigen Regulierungsrahmens notwendig sein, da sich der bisherige Mobilfunk-Regulierungsrahmen ausschließlich auf Mobilfunknetzbetreiber beziehen.[87] Zudem ist zu erwarten, dass die Komplexität von 6G-Netzen exponentiell zunehmen wird, wodurch sich neue Herausforderungen für die Sicherheit, die Identitätsüberprüfung, Datenanalyse und weiteren ergeben werden. Möglicherweise könnte ein solches Ökosystem einen gemeinsamen Zertifizierungsprozess erfordern. Sicherheitsaspekte werden allein schon aufgrund der Nutzung von KI verstärkt im Fokus stehen. Darüber hinaus könnte die Nutzung von KI-basierten Diensten in 6G-Netzen eine Regulierung auf der Grundlage ethischer Grundsätze erforderlich machen.[88]

86 Japanese Ministry of Internal Affairs (2020), S. 4.
87 5G IA, (2021), S. 35.
88 5G IA, (2021), S. 35.

Zusätzlich, wie auch bei 5G, müssen elektromagnetische Strahlungen der 6G-Frequenzen auf deren Unbedenklichkeit geprüft und entsprechend der Öffentlichkeit kommuniziert werden. Dies gilt gerade im Hinblick auf neue, höhere Frequenzen und eine mögliche weitergehende Verdichtung von Mobilfunknetzen.

4.2 Digitale Souveränität und Sicherheit

Mobilfunktechnologien sind zunehmend zentrale Schlüsseltechnologien bei der fortschreitenden Digitalisierung. Die in Kapitel 3 genannten Anwendungen verdeutlichen die mit 6G möglichen Innovationen. Den positiven Effekten der Digitalisierung (oder Vernetzung) stehen aber auch die Risiken, beispielsweise von verstärkten Cyber-Attacken, gegenüber. Ebenso kann durch Lock-in-Effekte die Abhängigkeit von einzelnen Herstellern ansteigen. Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wird in einzelnen Mitgliedstaaten das Ziel verfolgt, die digitale Souveränität zu stärken.

In der bisherigen öffentlichen Debatte um digitale Souveränität stand der fortlaufende Rollout der 5G-Technologie im Vordergrund.[89] Am 26. März 2019 forderte der Europäische Rat einen koordinierten Ansatz für die Cybersicherheit von 5G-Netzen. Er stellte fest, dass 5G-Netze im Vergleich zu bestehenden Mobilfunktechnologien ausgeprägte Sicherheitsrisiken aufweise.[90] Daraufhin mussten die Mitgliedsstaaten nationale Risikobewertungen durchführen, was schließlich dazu führte, dass in einigen Ländern die chinesischen Hersteller Huawei und ZTE beim 5G-Rollout ausgeschlossen wurden. Die jeweiligen politischen Entscheidungsträger und Regulierungsbehörden begründen dieses Vorgehen mit Sicherheits- und Abhängigkeitsbedenken.[91]

Eine Vergleichsstudie, basierend auf veröffentlichten Positionen, Stellungnahmen und Berichten auf EU-Ebene und der Ebene der Mitgliedsstaaten, stellt fest, dass digitale Souveränität kein einheitliches Konzept innerhalb der EU ist. Politische Entscheidungsträger innerhalb der EU verwenden den Begriff zum Teil unterschiedlich und schreiben digitaler Souveränität unterschiedliche Gründe und Ziele zu. Die ständig wachsende Bedeutung digitaler Infrastruktur auf der einen Seite und Mangel an Kontrolle über Daten auf individueller und kollektiver Ebene auf der anderen Seite lösen Bedenken bei politischen Entscheidungsträgern innerhalb der EU aus. Dies geschieht vor dem Hintergrund der Dominanz außereuropäischer Unternehmen im Technologiesektor, das heißt bei Internetplattformen, Datenzentren und Infrastrukturen.

In diesem Zusammenhang wird immer wieder auf den niedrigen Marktanteil der Halbleiterproduktion in Europa (5 Prozent Anteil am Weltmarkt im Jahr 2017)[92] und der Herstellung von elektronischem Telekommunikationsequipment (4 Prozent Anteil am Welt-

89 Baischew et al. (2020), S. 25ff.
90 Siehe EU Empfehlung 2019/534.
91 Baischew et al. (2020), S. 25ff.
92 Decision Etudes & Conseil (2020), S. 109.

markt im Jahr 2017)[93] verwiesen. Mit zunehmender Virtualisierung der Netzwerkinfrastruktur und dem vermehrten Einsatz von KI wird im Zusammenhang mit Digitaler Souveränität außerdem auf den geringen Anteil europäischer Cloud-Anbieter innerhalb Europas verwiesen (16 Prozent Marktanteil in Europa im Jahr 2021)[94]. Somit kann der Wunsch nach digitaler Souveränität als Streben nach mehr Eigenständigkeit und Selbstbestimmung in der digitalen Welt verstanden werden.[95]

Digitale Souveränität in Deutschland wurde unter anderem in „Leitplanken Digitaler Souveränität" der Fokusgruppe „Digitale Souveränität" des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Jahr 2015 definiert. Souveränität wird hier definiert als die Fähigkeit zum selbstbestimmtem Handeln und Entscheiden, ohne sich ausschließlich auf die eigenen Ressourcen verlassen zu müssen.[96]

Grundvoraussetzung für digitale Infrastrukturen sei eine „vertrauenswürdige Technologie", so die Fokusgruppe „Digitale Souveränität" des BMWi in einem späteren Positionspapier. Alle aktiven Komponenten innerhalb digitaler (Mobilfunk-)Netze müssen ein „Höchstmaß an Vertrauenswürdigkeit" aufweisen, wobei sichergestellt werden muss, dass „Daten den richtigen Weg nehmen, den beabsichtigen Empfänger erreichen, nicht abgehört und nicht manipuliert werden".[97]

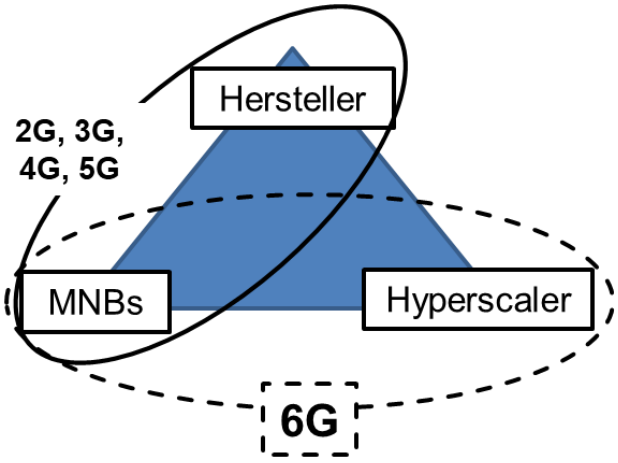
Der 6G-Rollout wird die Abhängigkeit der Wirtschaft und der Gesellschaften von IT und Netzwerken weiter vertiefen. Die Rolle der IT und der Mobilfunknetze für die nationale Sicherheit wird also weiter zunehmen. Dies ist eine Fortsetzung dessen, was mit dem 5G-Rollout zu beobachten ist.

Eine Veränderung der Abhängigkeiten von Mobilfunknetzbetreibern gegenüber Herstellern könnte sich jedoch mit den neuen Ansätzen der Virtualisierung der Netzwerkarchitektur sowie dem vermehrten Einsatz von KI und ML auf allen Netzwerkebenen, wie sie in Kapitel 3.2 beschrieben werden, ergeben. So könnte sich die besonders im Zuge des 5G-Rollouts diskutierte Herstellerabhängigkeit zu einer Abhängigkeit der Mobilfunknetzbetreiber gegenüber Anbietern von Rechenzentren beziehungsweise Hyperscalern[98] verlagern (siehe Abbildung 4-2).

---

93 Decision Etudes & Conseil (2020), S. 109.
94 Synergy Research Group (2021) – European Cloud Providers Double in Size but Lose Market Share. Online verfügbar unter: https://www.srgresearch.com/articles/european-cloud-providers-double-in-size-but-lose-market-share, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
95 Baischew et al. (2020), S. 5f.
96 BMWi (2015), S. 1f.
97 BMWi (2018), S. 5.
98 Bei Hyperscalern handelt es sich um große Cloud-Anbieter wie Amazon Web Services (AWS), Microsoft Azure oder Google Cloud Platform welche standarisierte Plattformen zur Verfügung stellen, und dadurch eine skalierbare Architektur besitzen.

Abbildung 4-2: Mögliche Verlagerung der Abhängigkeit von Mobilfunknetzbetreibern durch neue Netzwerkarchitekturansätze



Quelle: WIK.

4.2.1 Digitale Souveränität als Forschungsgegenstand

Digitale Souveränität wird explizit als Forschungsgegenstand in einigen europäischen Initiativen genannt.

Das Hexa-X-Weißpapier hebt im Kontext von „Technology sovereignty, supply chain resilience, cyber security and national security arguments" hervor, dass eine europäische Forschungsagenda Einfluss auf die Standardisierung neuer Technologien haben muss, mit besonderem Fokus auf Privatsphäre und Nachhaltigkeit. Ebenso wird weiterhin für offene Kollaborationen und vorwettbewerblichem gemeinsamen Forschen geworben.[99]

Im Weißpapier der 5G IA wird beschrieben: „A central key is […] to develop secure infrastructures such as 6G and to secure European sovereignty in critical technologies and systems in next decades". Es wird darin außerdem hervorgehoben, europäische Wertevorstellungen für Gesellschaft und Umwelt global zu bewerben.[100]

Die deutsche 6G-Initiative 6GEM betont in einem für diese Studie geführten Expertengespräch, dass digitale Souveränität ein allgemein formuliertes Ziel im Zusammenhang mit den 6G-Förderaktivitäten ist. In Europa und Deutschland sollen 6G-Forschungsaktivitäten von deutschen bzw. europäischen Partnern unterstützt und ent-

99 Hexa-X (2021a), S. 19.
100 5G IA (2021), S. 6.

wickelt werden. Inwiefern sich am Ende der deutsche bzw. europäische Technologiestandard bei 6G durchsetzt bleibt abzuwarten.

4.2.2 Sicherheitsrelevante Aspekte von 6G

6G wird den Trend zu mehr verbundenen Geräten, Sensoren und autonomen Fahr- und Flugzeugen und zu entsprechend mehr Datentransfer fortsetzen. Diese Zunahme an Daten ermöglicht die Erstellung von lokal optimierten oder individuell personalisierten Diensten (Smart Services) auf der Grundlage persönlicher Präferenzen sowie Informationen über weitere Netzwerke von Nutzern und Anbietern. Die Vorteile sind erhöhte Effizienz, erhöhte Effektivität und erhöhte Personalisierung für individuelle Bedürfnisse.[101]

Wie diese Daten verwendet werden, von wem und für welche Zwecke schafft jedoch ebenso Risiken und Bedenken. Regulatorische Anforderungen wie die Datenschutz-Grundverordnung der EU zwingt Service- und Telekommunikationsanbieter, solche Fragen zu beachten. Jedoch, einzelne Daten aus unterschiedlichen Quellen vom selben Individuum könnten individuell betrachtet wenig aussagen und somit nicht unter regulatorische Anforderungen fallen, obgleich sie verknüpft einen hohen Grad an persönlicher Information liefern.[102]

Auf Individuum-Level können vor allem Wearables und Gesundheitssensoren sehr sensible Daten generieren. Da 6G gerade in den Bereichen Sensorik, Bildgebung und Positionsbestimmung neue Anwendungsfelder erschließen könnte, und falls der generelle Trend zu mehr Sensoren in der Gesundheitsüberwachung fortgesetzt wird, bedeutet dies sogleich ein höheres Potential von Datenmissbrauch durch Unbefugte. Das 6G-Netzwerk selbst, welches unter anderem kritische Infrastruktur unterstützen und autonome Fahr- und Flugzeuge ermöglichen wird, muss ebenso ein hohes Maß an Resilienz aufweisen.

5G stellt einen bedeutenden architektonischen Wendepunkt dar, der zu einer stärkeren softwarebasierten Architektur, einem disaggregierten System und insgesamt offeneren Systemen führt. Mobilfunkbetreiber tendieren dazu, ihre Plattformen umzubauen [103] und setzen dabei bereits jetzt neuartige Sicherheitsfunktionen ein.[104] Dabei kann Sicherheit in folgende Bereiche unterteilt werden: Architektur- und Luftschnittstellensicherheit, Plattform- und Anwendungssicherheit sowie „Security by Design“[105]. Letzteres beschreibt einen Entwicklungsansatz, bei dem ab Beginn der Entwurfsphase alle Sicherheitseigenschaften eines Systems systematisch beachtet werden.[106]

---

101 Ylianttila (2020), S. 27.
102 Ylianttila (2020), S. 27.
103 Siehe Kapitel 3.2.2.
104 Accenture (2021), S. 12.
105 6G Symposium (2021): 6G Built with Security by Design?
106 Vgl. Porambage et al. (2021).

Eine verteilte Architektur kann sicherstellen, dass nicht alle Informationen (und nicht alle Risiken) auf einige wenige Parteien konzentriert werden. Gleichzeitig erhöht sich durch die Anzahl von Schnittstellen die potentielle Angriffsfläche für Cyber-Angriffe. Es wird deshalb von entscheidender Bedeutung sein, die Integrität des gesamten Systems einschließlich der RAN- und Kernkomponenten zu gewährleisten.

Die Ausfallsicherheit des Netzes, die dazu beiträgt, dass das Netz bei Störungen oder in schwierigen Situationen ein akzeptables Niveau an Diensten bereitstellen und aufrechterhalten kann, muss aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden. Anwendungen, die sowohl für ihre Konnektivität als auch für ihre Ende-zu-Ende-Kommunikation Ausfallsicherheit erfordern, müssen unterstützt werden. Es müssen neue und effiziente Sicherheits- und Schutzsysteme entwickelt werden, zum Beispiel eine Anwendung von KI zur Vorhersage von Problemen und zur Entdeckung und automatischen Behebung von Angriffen, die entweder durch klassische oder KI-basierte Ansätze verursacht werden. Nicht zuletzt können Resilienz und sicherheitsgestützte Vertrauenswürdigkeit nur dann vollständig verwirklicht werden, wenn sie sowohl in die entsprechenden Software- als auch in die Hardware-Implementierungen der Netzwerktechnologie eingebettet sind.[107]

4.3 Energie- und umweltpolitische Aspekte

Treiber hinter 6G sind auch sogenannte Megatrends, das heißt Trends die für das kommende Jahrzehnt besonders relevant sein werden, wie zum Beispiel eine weiterwachsende globale Bevölkerung, Klimawandel, Umweltverschmutzung oder ein globaler Wettbewerb um Ressourcen. Auf diese Megatrends antworteten die Vereinten Nationen mit der Formulierung von 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung (Agenda 2030), die 2016 mit einer Laufzeit von 15 Jahren in Kraft traten.[108] Forschungsgruppen[109] sind davon überzeigt, dass Konnektivität ein Schlüssel für die Erfüllung dieser Ziele ist. Sie gehen dabei davon aus, dass Mobilfunk einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Agenda 2030 leisten kann, indem er Infrastruktur und Zugang zu digitalen Diensten bietet, die wiederum zu Wachstum, Effizienzsteigerung und Nachhaltigkeit führen. Ein Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastung kann durch die Weiterentwicklung der Technologien für 6G geleistet werden, indem der Energieverbrauch zukünftiger Mobilfunknetze reduziert wird und 6G-Geräte und -Sensoren in verschieden Branchen und Sektoren zum Einsatz kommen, die keine oder kaum Energie verbrauchen.

Somit wird moderne IKT nicht nur entwickelt, um steigende Nachfragen nach Bandbreite weiter befriedigen zu können, sondern spezifisch auch, um neue innovative Anwendungen zu ermöglichen, die unter anderem auch zur Bekämpfung des Klimawandels

107 Hexa-x (2021b), S. 25.
108 Siehe Vereinte Nationen (2015) und https://sdgs.un.org/goals, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
109 Siehe, z. B. Hexa-X (2021a) oder Matinmikko-Blue et al. (2020).

und von Umweltschäden beitragen. Die Europäische Kommission und die Mitgliedstaaten haben erkannt, dass digitale Lösungen, die durch Glasfasernetze und moderne drahtlose Technologien ermöglicht werden, die Dekarbonisierung von Sektoren unterstützen und folglich den ökologischen Fußabdruck von Waren und Dienstleistungen verringern können.[110] Auf europäischer Ebene legen Verhaltenskodices (Codes of Conducts)[111] die Anforderungen an Energieeffizienz fest. In Anlehnung an die EU-Strategie für nachhaltige Entwicklung wird außerdem an einer gemeinsamen Methodik zur Messung des ökologischen Fußabdrucks von Produkten gearbeitet.[112] Auch die Europäische Regulierungsbehörde RSPG hat eine Untergruppe zur Unterstützung von Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels ins Leben gerufen.[113] Von Juni 2021 bis Ende August 2021 führte die RSPG eine öffentliche Anhörung durch bezüglich ihrer Stellungnahme zur Rolle der Frequenzpolitik bei der Bekämpfung des Klimawandels. Das Ergebnis der Anhörung war eine Analyse zahlreicher Sektoren und Anwendungsfälle, in denen Digitalisierung im allgemeinen und Mobilfunk im speziellen CO_2-Einsparungen bewirken können.[114]

Darüber hinaus werden Anstrengungen unternommen, die Umweltauswirkungen der Telekommunikationstechnologien selbst zu reduzieren und Standardisierungsgremien und Anbieter konzentrieren sich stark auf die Entwicklung neuer, energieeffizienterer Technologien.

Vor diesem Hintergrund findet auch die akademische und politische Debatte rund um 6G statt. Das Nutzen höherer Frequenzbänder setzt eine Verdichtung der Mobilfunknetze und somit eine Erhöhung von Basisstationen und Antennen voraus. Die sehr hohen Leistungsanforderungen für eMBB, mMTC und URLLC fordern voraussichtlich mehr anstatt weniger Energieeinsatz.[115] Der Ausbau der entsprechenden Infrastrukturen sowie der Austausch bestehender Netzwerkelemente sowie zusätzliches Hardwareequipment werden somit nicht ohne Umweltauswirkungen bleiben.

---

110 Im Jahr 2019 hat die Europäische Kommission eine Mitteilung über den Europäischen Green Deal angenommen. In der Mitteilung wird das Engagement der Kommission bei der Bewältigung der Klima- und Umweltherausforderungen dargelegt. Im Mittelpunkt steht das Ziel, die Treibhausgasemissionen der EU um mindestens 50 Prozent im Vergleich zum Jahr 1990 zu senken. Siehe https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

111 Die Teilnahme an einem Code of Conduct ist freiwillig, jedoch verpflichten sich die Unternehmen durch ihre Teilnahme an bestimmten Bedingungen wie zum Beispiel der Einhaltung bestimmter Energieeffizienzkriterien oder der Veröffentlichung des eigenen Energiekonsums. Für den IKT-Sektor gibt es den Code of Conduct for ICT (siehe https://e3p.jrc.ec.europa.eu/communities/ict-code-conduct, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.), den Broadband Communication Equipment Code of Conduct (siehe https://e3p.jrc.ec.europa.eu/communities/ict-code-conduct-energy-consumption-broadband-communication-equipment, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.) und den Data Centres Code of Conduct (siehe https://ec.europa.eu/jrc/en/energy-efficiency/code-conduct/datacentres, zuletzt abgerufen am 20.09.2021).

112 Siehe Europäische Kommission – Sustainable Development – Single Market for Green Products: https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/policy_footprint.htm, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

113 Siehe RSGP: https://rspg-spectrum.eu/2020/12/questionnaire-of-the-sub-group-on-role-of-rsp-to-help-combat-climate-change/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

114 Siehe https://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2021/06/RSPG21-026final_RSPG_Report_on_Climate_Change.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

115 6G Flagship (2019).

Energieeffizienz spielt schon zu Beginn der Arbeit an der neuen Mobilfunktechnologie eine wichtige Rolle und wird oft selbst als Zielvorgabe für 6G genannt.[116] Ferner wird gefordert, dass, in absoluten Zahlen, der Energieverbrauch der 6G-Infrastrukturen auf das Niveau von 4G zurückkehren muss.[117]

Tabelle 4-1: Nachhaltigkeit und IKT

	IKT für mehr Nachhaltigkeit	Nachhaltige IKT
Reduktion von Emissionen und Ressourcen-verbrauch	• Ermöglichung von Emissionseinsparungen • Ermöglichung von Effizienzsteigerungen	• Durchbrechung der „Energiekurve“ • Kreislaufwirtschaft

Quelle: WIK basierend auf 5G IA (2021), S. 11. Durchbrechung der „Energiekurve“ bezeichnet das Stoppen des Trends ansteigenden, totalen Energiekonsums, z. B. im Mobilfunksektor, trotz steigenden Datenverkehres.

4.3.1 IKT für mehr Nachhaltigkeit

Das Smarter2030-Projekt der Global Enabling Sustainability Initiative (GeSI)[118] identifiziert digitale Technologien, die repräsentativ für die Art und Weise sind, wie sich digitale Leistungsfähigkeit mittelfristig entwickeln wird. In ihrem Bericht weist die GeSI darauf hin, wie durch den Einsatz dieser Technologien Emissionen eingespart werden, besonders durch Überwachung und Nachverfolgung zur Daten- und Erkenntnisgewinnung, durch die Analyse und Optimierung von Energie- und Ressourcenverbrauch sowie durch die Automation von Prozessen und den Nutzen von AR als Brücke zwischen physischer und digitaler Welt.[119] Mit Blick auf 6G können diese Anwendungen weiter vertieft werden und neue Dimensionen annehmen.[120]

In Deutschland soll gerade im Kontext der Industrie 4.0 die Digitalisierung einen wesentlichen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit leisten, da durch Sensoren und smarte Maschinen der Energiebedarf reduziert werden kann und intelligente Logistik die Transportwege verkürzt.[121] 5G-Campusnetze sorgen innerhalb der Fabriken für eine skalierbare und sichere Konnektivität. Dieser Trend wird sich aller Voraussicht nach mit der zukünftigen Mobilfunktechnologie fortsetzen.

---

116 Siehe Zielvorgaben für 6G in Kapitel 3.1.2.
117 5G IA (2021), S. 12.
118 Die GeSI beschreibt sich selbst als eine führende Quelle für unparteiische Informationen, Ressourcen und bewährte Praktiken zur Erreichung einer integrierten sozialen und ökologischen Nachhaltigkeit durch IKT (https://gesi.org/mission-and-vision, zuletzt abgerufen am 03.12.2021).
119 GeSI (2019), S. 11.
120 Siehe Kapitel **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**.
121 BMWi (2020).

Billigere und ressourcenschonendere Sensoren, basierend auf 6G, könnten weitere Energieeinsparpotenziale ausnutzen. Ebenso könnten, unterstützt mit 6G, immer sichere VR-, AR- und Hologramm-Anwendungen Fernarbeit und Telepräsenz einfacher machen, um gerade im Verkehrssektor weitere CO_2-Einsparungen zu ermöglichen.[122] Durch Einsatz von 6G in der Industrie könnte Produktivität und Effizienz gesteigert werden, was wiederum Energie- und CO_2-Einsparungen bedeuten kann. Somit wird auch 6G als Hebel zu Einsparungen in anderen Sektoren gesehen.

Ferner soll auch der IKT-Sektor eine wichtige Rolle bei der Erfüllung der 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung (Agenda 2030) spielen. Die ITU und deren Mitglieder haben eigens dafür die Connect 2030 Agenda aufgestellt, um ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeit zu fördern.[123]

4.3.2 Nachhaltige IKT

Neben dem IKT-Sektor als „enabler“ von Effizienzsteigerungen und Ressourceneinsparungen in diversen Sektoren der Volkswirtschaft ist noch der eigene Ressourcenverbrauch zu betrachten. Einer Berechnung zufolge steht der IKT Sektor für circa 4 Prozent der gesamten Treibhausgasemissionen.[124] Obwohl ein steigender Bandbreitenbedarf im Laufe der Zeit einen höheren Gesamtenergieverbrauch erwarten lässt, haben einige Studien ergeben, dass der Energieverbrauch der elektronischen Kommunikation in absoluten Zahlen nicht gestiegen ist, da moderne Technologien mit energieeffizienteren Lösungen kompensiert werden und der geringere Energieverbrauch der Endnutzergeräte dem insgesamt höheren Energieverbrauch durch Nutzung entgegenwirkt.

Eine andere Sicht wird unter anderem vom Think-Tank „Shift Project“ vertreten. Dieser warnt in einem Bericht[125] aus dem Jahr 2019 vor der großen Unsicherheit über weltweite, systemische Effekte, die der derzeitige digitale Wandel hat. Obwohl die Autoren der Ansicht sind, dass der digitale Wandel bei angemessener Regulierung dazu beitragen kann, den Energie- und Rohstoffverbrauch in bestimmten Sektoren zu senken, geben sie zu bedenken, dass die Expansion digitaler Technologien über alle Sektoren hinweg, schädliche Auswirkungen auf die Umwelt haben könnte.

Somit soll mit zukünftigen Mobilfunkgenerationen ein „Durchbrechen der Energiekurve“[126] verfolgt werden und Kreislaufwirtschaft stärker in den Vordergrund rücken.

---

122 Vgl. 6G Anwendungsbereiche in Kapitel 3.1.3.
123 ITU Connect 2030, online abrufbar unter https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/connect-2030-agenda.aspx, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
124 Shift project (2019), S. 4.
125 Shift project (2019).
126 Siehe Hinweis zu Tabelle 4-1.

4.3.2.1 Nachhaltigkeit im Rahmen der 6G-Initiativen

Die europäische 6G-Initiative 5G IA sieht die Verringerung des Energiebedarfs als eines der wichtigsten Merkmale von 6G an. Insbesondere vor dem Wissen, dass eine 6G-Welt mit einer Verdichtung der Funkzugangsnetze, einer massenhaften Einführung von Edge- und Cloud-Komponenten sowie einer massiven Zunahme von Sensoren einhergeht, die zu einem erheblichen Anstieg des Energieverbrauchs führen wird, fordert die Initiative die Entwicklung intelligenter Lösungen. 6G sollte noch stärker als energieoptimiertes System konzipiert werden und den Anstieg des Energieverbrauchs bei zunehmendem Kommunikationsverkehr unterdrücken. Die Initiative spricht in diesem Zusammenhang von „breaking the energy curve“. Öffentliche und private Forschungs- und Entwicklungs-Investitionen sollten sich auf 6G-Schlüsseltechnologien konzentrieren und unter anderem durch die Integration von KI zur Optimierung der Energieeffizienz und einer verbesserten Energiebilanz beitragen.[127]

Die 6G-Inititative 6GEM aus Deutschland geht von der Entwicklung immer energieeffizienteren Kommunikationstechnologien aus, womit die Energieeffizienz als eines der Leistungsziele während der 6G-Technologieentwicklung gesehen werden kann.[128]

Die japanische 6G-Initiative verweist auf die Energieeinsparung durch den Einsatz von Photonik-Netzwerken.[129] Ihren Schätzungen zufolge wird der IT-bezogene Energieverbrauch im Jahr 2030 36-mal höher liegen als 2020, jedoch mittels Einsatzes von Photonik-Netzwerken könnte der zukünftige Energieverbrauch stattdessen ein Hundertstel im Vergleich zu heute betragen. Samsung beabsichtigt, die Energieeffizienz sowohl von Endgeräten als auch Netzwerken zu verdoppeln und setzt in dem Zusammenhang insbesondere auf KI.[130]

5G Americas verweist in ihrem Weißpapier auf die Energieeffizienz im Zusammenhang mit neuen technologischen Anforderungen.[131] Demnach könnten einige künftige Dienste, wie zum Beispiel IoT in großem Maßstab, den Betrieb von Geräten mit extrem niedrigem Stromverbrauch erfordern oder es wird Geräte geben, die nie aufgeladen werden müssen (zum Beispiel indem sie Energie aus ihrer Umgebung aufnehmen, siehe Kapitel 4.3.2.2). Solche Geräte müssen über neue Möglichkeiten verfügen, mit dem Netz zu interagieren und dabei möglichst wenig Energie zu verbrauchen. Neben dem Stromverbrauch können auch andere Ressourcen wie Arbeitsspeicher, Rechenleistung und Speicherplatz im Gerät sehr begrenzt sein, die dann Änderungen an bisher verwendeten Verfahren und Protokollen erforderlich machen.

---

127 5G IA (2021), S. 11f.
128 Siehe http://www.6gem.de/de/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
129 MIAC Japan (2020), S. 2.
130 Samsung (2020), S. 18 ff.
131 5G Americas (2020), S. 30.

4.3.2.2 Effizientere Funknetze

In Bezug auf das Kernnetz hängt der Stromverbrauch der Netzausrüstung derzeit hauptsächlich von der Anzahl der aktiven Geräte ab und der Stromverbrauch dieser Geräte hängt kaum von der tatsächlichen Verkehrslast in allen Netzsegmenten ab. Daher konzentrieren sich aktuelle Energiesparansätze hauptsächlich auf die Ausnutzung der Verkehrsdynamik, um unnötige Ressourcen zu deaktivieren. Sie lassen sich in drei Gruppen einteilen: 1) dynamisches Traffic-Engineering, 2) Proxying/Virtualisierung und 3) Ratenanpassung.[132] Neue, grundlegendere Ansätze sind jedoch ergänzend innerhalb des 5G- und 6G-Horizonts anwendbar. Dazu gehören eine energieeffiziente Architektur sowie die Entwicklung energieeffizienterer Geräte mit verschiedenen Betriebsmodi mit kurzen Aktivierungszeiten, Rekonfigurationen bei Ausfällen, intelligenten Stufen der Überprovisionierung und optischem Bypassing.[133]

Für ein effizienteres Energie-/Leistungsmanagement werden KI-Techniken (ML und Deep Learning) zur Vereinfachung des traditionellen mathematischen Iterationsprozesses und zur Vorhersage künftiger Netzwerkänderungen eingesetzt. Da die zukünftigen Netzwerkdienste unterschiedliche Anforderungen haben und nicht nur einen hohen Durchsatz, können traditionelle mathematische Modelle, die auf die Verbesserung des Bit-pro-Joule-Verhältnisses abzielen, nicht auf zukünftige komplexe Szenarien angewendet werden. Um ein automatisches Netzwerkmanagement für das grüne Zeitalter zu realisieren, sehen Forscher KI als die vielversprechendste Lösung.[134] Durch einen komplementären Einsatz von Satelliten und UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) könnten außerdem abgelegene Gebiete energie- und ressourceneffizient versorgt werden.[135]

Neben energieeffizienter Netzwerkarchitektur könnte Energiegewinnung durch Solarpanels, Windturbinen und Vibrationswandler für die Stromversorgung von Netzwerkelementen und Endgeräten genutzt werden. Außerdem könnten zusätzlich zu diesen sogenannten Energy-Harvesting-Generatoren auch Radiofrequenzen selbst zur Stromerzeugung genutzt werden.[136] Neben simultaner Datenübertragung, Sensorik und Energieübertragung könnten ebenso Störsignale („interference signal“) zur Stromerzeugung genutzt werden. Ähnlich wie beim Radio Frequency Harvesting wird erwartet, dass Intelligent Reflecting Surface (IRS) in großem Umfang eingesetzt wird, um das verschwendete Signal zu den Empfängern zu reflektieren und so das Verhältnis von Signal zu Interferenz und Rauschen (SINR) zu erhöhen.[137]

---

132 Siehe Idzikowski et al. (2016).
133 Siehe IEEE CTN (2021), online abrufbar unter https://www.comsoc.org/publications/ctn/balancing-explosive-growth-dramatic-energy-efficiency-improvements-necessity-green, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
134 Siehe Mao et al. (2021).
135 Siehe auch Kapitel 3.2.3 und 3.2.4.
136 Siehe Chu et al. (2019).
137 Siehe Hashida (2020).

4.4 Zwischenfazit horizontale Treiber

Neben leistungsstarken und neuartigen Anwendungsbereichen, einer neuen und intelligenten Netzwerkarchitektur und der Nutzung hoher Frequenzen werden die Themenbereiche regulatorische Aspekte, Digitale Souveränität und Sicherheit sowie energie- und umweltpolitische Aspekte eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des neuen Mobilfunkstandards einnehmen.

Hinsichtlich der Frequenzregulierung werden konkrete Handlungsempfehlungen frühestens möglich, wenn Frequenzen im Rahmen der World Radiocommunication Conference (WRC) im Jahr 2023 zugewiesen werden und sich ein stabiler Technologiestand abzeichnet. Um eine möglichst effiziente Zuteilung und Nutzung von Frequenzen zu ermöglichen, sollten Nutzungsbedingungen definiert und auf EU-Ebene Harmonisierungsvoraussetzungen geschaffen werden. Erweiterte Regulierungsfelder bei 6G könnten durch den vermehrten Einsatz von KI in allen Ebenen der Netzwerkinfrastruktur sowie Endgeräten entstehen. Im Hinblick auf Strahlenbelastungen neuer, höherer Frequenzen und der Verdichtung der Telekommunikationsnetzwerke wird die Prüfung der Unbedenklichkeit und deren Kommunikation an die Öffentlichkeit weiterhin ebenso einen regulatorischen Aspekt ausmachen.

Vor dem Hintergrund steigender Abhängigkeit von nichteuropäischen Herstellern und Anbietern spielt besonders in Europa Digitale Souveränität eine wichtige Rolle bei der Entwicklung eines neuen Mobilfunkstandards.

In Europa und darüber hinaus werden Fragen über Sicherheit und Vertrauen thematisiert. Mit der Expansion vertikaler Anwendungen werden neue Stakeholder sowie eine große Anzahl neuer Entwickler und Hersteller von unterschiedlichen Netzwerkkomponenten auftreten. Mit steigender Anzahl verbundener Geräte, gesteigerter Übertragung aller und vor allem auch sensibler Daten und mit der Verlagerung kritischer Anwendungen in Funknetze, müssen höhere Sicherheits- und Datenschutzanforderungen an die Mobilfunknetze gestellt werden. Daher sprechen viele Forschungsgruppen davon, dass in die Funktionalität der neuen Mobilfunkgeneration „Vertrauen eingebettet“ sein muss.[138]

Kritischer Treiber hinter 6G sind auch sogenannte Megatrends, das heißt Trends, die für das kommende Jahrzehnt besonders relevant sein werden, wie zum Beispiel eine weiterwachsende globale Bevölkerung, Klimawandel, Umweltverschmutzung oder ein globaler Wettbewerb um Ressourcen. Auf diese Megatrends antworteten die Vereinten Nationen mit der Formulierung von 17 Zielen für eine nachhaltige Entwicklung (Agenda 2030), die 2016 mit einer Laufzeit von 15 Jahren in Kraft traten.[139] Forschungsgruppen[140] sind davon überzeigt, dass Konnektivität ein Schlüssel für die Erfüllung dieser

138 Siehe z. B. Ylianttila et al. (2020), S. 9ff oder 5G IA (2021), S. 4. Für eine Definition vertrauenswürdiger Netzinfrastrukturen, siehe z. B. ITU-T (2017), S. 1.
139 Siehe Vereinte Nationen (2015) und https://sdgs.un.org/goals, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
140 Siehe, z. B. Hexa-X (2021a) oder Matinmikko-Blue et al. (2020).

Ziele ist. Sie gehen dabei davon aus, dass Mobilfunk einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Agenda 2030 leisten kann, indem es Infrastruktur und Zugang zu digitalen Diensten bietet, die wiederum zu Wachstum, Effizienzsteigerung und Nachhaltigkeit führen. Ein Beitrag zur Reduzierung der Umweltbelastung kann durch die Weiterentwicklung der Technologien für 6G geleistet werden, indem der Energieverbrauch zukünftiger Mobilfunknetze reduziert wird und 6G-Geräte und -Sensoren in verschiedenen Branchen und Sektoren zum Einsatz kommen, die keine oder kaum Energie verbrauchen.[141]

5 Fazit

Die Entwicklung neuer Mobilfunkgenerationen dauerte in der Vergangenheit circa zehn Jahre. Daher wird bereits jetzt an der neuen Mobilfunkgeneration gearbeitet. Dabei handelt es sich zurzeit noch um Grundlagenforschung, die Entwicklung einer 6G-Vision und die Formulierung neuer Zielvorgaben. Ein kommerzieller Rollout wird für die 2030er Jahre angestrebt.

Neben den bereits in 5G formulierten Zielvorgaben geringer Latenz, hoher Verlässlichkeit, hohem Durchsatz sowie einer hohen Anzahl an verbunden Geräten, welche sich mit 6G noch einmal verbessern sollen, werden auch Zielvorgaben für Energieeffizienz, Nachhaltigkeit, Kosteneffizient sowie Datenschutz, Vertrauen und Privatsphäre formuliert.

Die Treiber hinter der neuen Mobilfunktechnologie sind der Technologie-Push, der aus dem Einsatz von KI und ML im Kern- und Zugangsnetz, neuen Spektrumstechnologien, neuer Sensorik, einer dezentralen und spezialisierten Architektur und neuen Sicherheitsverfahren besteht, sowie ein gesellschaftliches Verlangen nach Nachhaltigkeit, Inklusion und Vertrauen. Neben diesen zwei Kräften ist für europäische politische Entscheidungsträger und Forschungsgruppen der Wunsch nach mehr technologischer bzw. digitaler Souveränität ein dritter Treiber hinter der Entwicklung einer neuen Mobilfunkgeneration.

Die anfangs beschriebenen drei Säulen von 6G – Anwendungen, Architektur und Frequenzen – werden verbunden durch Themen der Regulierung, digitalen Souveränität und Sicherheit sowie Energie und Umwelt.

Besonders im Hinblick auf neuartige Netzwerkinfrastrukturen könnte eine Öffnung der Wertschöpfungskette, die mit 5G bereits begonnen hat, mit 6G weiter voranschreiten. Chiphersteller, Cloud-Anbieter und Raumfahrtunternehmen werden als Partner und Wettbewerber traditioneller Telekommunikationsequipment-Hersteller und Mobilfunknetzbetreiber in den Mobilfunkmarkt eintreten und diesen nachhaltig verändern. Insoweit hat 6G das Potential, die bestehende Marktstruktur, die maßgeblich von den Mobilfunknetzbetreibern und wenigen Netzwerkherstellern geprägt ist, zu verändern.

141 Matinmikko-Blue et al. (2020) S. 25ff.

Anhang

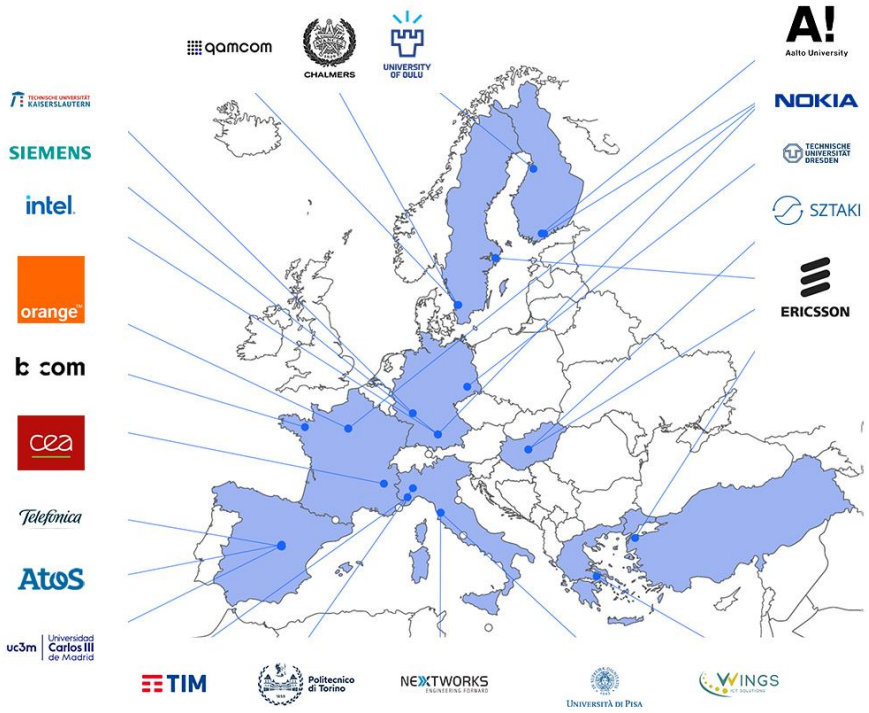
Detaillierte Übersicht über 6G-Forschungsinitiativen weltweit

Europäische 6G-Initiativen

Finanziert über das EU-Forschungsrahmenprogramm Horizont 2020 leitet Nokia die europäische 6G-Flaggschiffinitiative Hexa-X. Zusammen mit 24 weiteren Organisationen (siehe Abbildung 0-1) arbeitet Nokia seit Januar 2021 an der Ausarbeitung des 6G-Standards.[142] Die technische Leitung von Hexa-X übernimmt der schwedische Netzausrüster Ericsson, zudem sind die Mobilfunkbetreiber Telefónica und Orange, der französische IT-Dienstleister Atos, Siemens sowie Intel dabei. Deutschland ist mit der Technischen Universität Dresden und der Technischen Universität Kaiserslautern vertreten.[143] Teilnehmer der Hexa-X-Initiative haben einen wesentlichen Beitrag bei der Veröffentlichung der Europäischen Vision für 6G gehabt, welche in der Veröffentlichung des Weißbuches „European Vision for the 6G Network Ecosystem“ durch die 5G Infrastructure Association (5G IA[144]) im Juni 2021 resultierte.[145] Die Hexa-X-Initiative läuft von Januar 2021 bis Juni 2023 und ist mit einem EU-Beitrag in Höhe von knapp 12 Millionen Euro ausgestattet.[146]

142 Aus 9 Ländern: Finnland, Schweden, Deutschland, Frankreich, Italien, Spanien, Griechenland, Türkei und Ungarn.
143 Siehe https://hexa-x.eu/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
144 5G IA vertritt die private Seite im Rahmen des 5G Public Private Partnership (5G PPP) Programms, welche das 5G-Kooperationsforschungsprogramm ist, das im Rahmen des Programms Horizont 2020 der Europäischen Kommission organisiert wird. Die Europäische Kommission vertritt die öffentliche Seite.
145 Siehe 5G IA (2020).
146 Siehe https://cordis.europa.eu/project/id/101015956/de, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Abbildung 0-1: Hexa-X-Konsortium



wik

Quelle: https://hexa-x.eu/consortium/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Weitere Initiativen:

- Die Universität von Oulu (Finnland), eines der Mitglieder des oben genannten europäischen Hexa-X-Programms, hatte bereits im Jahr 2018 ein eigenes 6G Programm aufgelegt (6G Flagship).[147] Die Experten von 6G Flagship entwickeln insbesondere grundlegende 6G-Technologiekomponenten in unterschiedlichen Forschungsbereichen – drahtlose Konnektivität, Geräte- und Schaltungstechnologien, intelligentes Computing und nachhaltige, auf den Menschen ausgerichtete Dienste und Anwendungen.[148] Seit ihrer Gründung hat die 6G-Inititative mehr als ein Dutzend Weißpapiere veröffentlicht, unter anderem das Weißpapier zu Broadband Connectivity in 6G, welches im Zuge des 6G Wireless Summit 2020 entstanden ist und Visionen zu möglichen Leistungsmerkmalen von 6G aufzeigt. Das Papier besteht aus einer Zusammenstellung von Ideen verschiedener Akteure des 6G Wireless Summit und wurde von insgesamt 18 Autoren aus Akademie, Forschungszentren, Industrie und Standardisierungsgesellschaften er-

147 Siehe https://www.oulu.fi/6gflagship/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
148 Siehe https://www.eucnc.eu/wp-content/uploads/2021/06/About_6G_Flagship.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

stellt und setzt auf vorangegangene Arbeit des 6G-Flagship-Programms der Universität Oulu, Finnland, auf.[149]

- Die europäisch-amerikanische Initiative Empower[150] hat sich im Rahmen des Horizont 2020 Forschungsrahmenprogramms mit dem Thema 6G auseinandergesetzt und im Juni 2020 das Weißbuch „*Future trends analysis for Advance Wireless Platforms*“ veröffentlicht.[151] Der Fokus der Studie liegt zum einen auf der Analyse und Identifizierung von technologischen Trends in Richtung 6G und zum anderen auf der Diskussion über die Notwendigkeit einer gemeinsamen Referenzarchitektur, um die Wiederholbarkeit von Experimenten und die Wiederverwendung von Softwaretools zu fördern. Diese beiden Aspekte werden auch in Zukunft Gegenstand intensiver Diskussionen zwischen Forschern aus den USA und der EU sein. Die Empower-Initiative läuft seit November 2018 noch bis April 2022 und wurde mit einer EU-Finanzierung von knapp 2 Millionen Euro ausgestattet.[152]

- In Deutschland arbeiten seit August 2021 insgesamt rund 50 Forscherinnen und Forscher in vier Hubs im Rahmen der 6G-Forschungsinitiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF), welche über Fördermittel von bis zu 250 Millionen Euro verfügt. Weitere Maßnahmen der 6G-Initiative sind geplant. Dabei sollen technische Grundlagen für 6G und dessen Anwendungen erforscht werden, auch vor dem Hintergrund der Kontrolle über die im Netz übertragenen Daten und um technologisch souverän und nicht in Abhängigkeit von anderen zu kommen, heißt es von Seiten des BMBF.[153]

- Thinknet 6G, gefördert vom bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, soll ein Ökosystem aus Vertretern aus Industrie, Forschungseinrichtungen und Verbänden in Bayern schaffen.

149 Siehe Rajatheva et al. (2020).
150 EMPOWER zielt darauf ab, die gemeinsame Entwicklung von Mobilfunkplattformen zwischen der EU und den USA zu beschleunigen, die auf Konnektivitäten nach 5G ausgerichtet sind. Siehe https://www.advancedwireless.eu/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
151 Siehe Empower (2020).
152 Siehe https://cordis.europa.eu/project/id/824994, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
153 BMBF (2021). Pressemitteilung: 140/2021 „Karliczek: Wir wollen bei 6G an der Spitze sein“. Online abrufbar unter https://www.bmbf.de/de/karliczek-wir-wollen-bei-6g-an-der-spitze-sein-14820.html, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Tabelle 0-1: Deutsche 6G-Initiativen, Stand August 2021

Forschungshub	Kurzbeschreibung
Open6GHub	Forschungshub des BMBF: Deutsches Forschungszentrum für KI. Ziel ist ein ressourcenschonendes und energieeffizientes 6G-System mit Fokus auf Schutz der persönlichen Daten und hoher Verfügbarkeit, umgesetzt mit KI-basierten Diensten; Entwicklung von Anwendungsfeldern welche hohe Sicherheit und Qualität voraussetzen (z. B. hochvernetzte Produktion, Mobilitätsszenarien oder personalisierte Medizin).[154]
6G-RIC	„6G Research and Innovation Cluster"; Forschungshub des BMBF; Konsortium bestehend aus elf deutschen Universitäten und fünf außeruniversitären Forschungseinrichtungen; beschäftigt sich mit Grundlagenforschung bis hin zur Umsetzung mit den Forschungsfeldern Mobilfunk, KI und optische Datenübertragung und Datenkompression.[155]
6GEM	Forschungshub des BMBF; 6GEM-Konsortium vereint in Nordrhein-Westfalen Wissenschaft und Mobilfunkexpertise auf Netzwerk-, Material-, Komponenten-/Mikrochip- und Modulebene. Verfolgt ganzheitlichen Ansatz von der Produktion über die Logistik bis hin zum Menschen mit Fokus auf Selbstbestimmung, Privatsphäre und Sicherheit in Zeiten des Klimawandels. Sieben Testfelder verteilt auf digitalen Operationssaal, Smart Hospital, Rettungsrobotik-Zentrum, Logistikzentren und Straßenverkehrsszenarien, um in großem Umfang Patente zu generieren.[156]
6G-Life	Forschungshub des BMBF; Forschung an Nachhaltigkeit, „Post-Shannon Theorie" und der Entkopplung von Datenvolumen und Energieverbrauch; Schaffung neuer Konzepte für Sicherheit (Quantum-Kommunikation, Post-quantum-Sicherheit), Resilienz und Latenz; Ziel: Gründung mehrerer Startups.[157]
Thinknet 6G	Technologie-Cluster für Bayern, gefördert vom bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. Sechs technologische Bereiche: KI-/ML-native Kommunikation, neue Frequenzspektren, Netzwerk als Sensor, Netzwerkadaption, extreme und energieeffiziente Konnektivität sowie Sicherheit, Privatsphäre und Vertrauen.[158]

Quelle: WIK.

US-amerikanische 6G-Initiativen

Im Juli 2020 veröffentlichte die Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS) einen Aufruf zum Handeln („Call to Action") um die 6G-Führerschaft der USA zu

154 Siehe https://www.dfki.de/web/news/detail/News/open6ghub-foerderung-bmbf/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
155 Siehe https://newsletter.fraunhofer.de/-viewonline2/17386/609/5/6RFhct0v/mzvrdxN1Vm/1, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
156 Siehe http://www.6gem.de/de/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
157 Siehe https://6g-life.de, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
158 Siehe https://www.bayern-innovativ.de/netzwerke-und-thinknet/uebersicht-digitalisierung/thinknet-6g/seite/thinknet-6g, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

fördern.[159] In diesem Zusammenhang gründete ATIS die „Next G Alliance“, eine Initiative die sich mit der Entwicklung eines neuen 6G-Mobilfunkstandards beschäftigt. Ziel der Initiative ist es nach eigenen Angaben „die führende Rolle der nordamerikanischen Mobilfunktechnologie in den nächsten zehn Jahren durch privatwirtschaftliche Anstrengungen zu stärken“.[160] Der Schwerpunkt liegt auf der Kommerzialisierung der Technologie. Ziel der Initiative ist es die globale Führungsrolle Nordamerikas bei der 6G-Entwicklung zu fördern sowie ein nordamerikanisches Modell voranzutreiben, das die Entwicklung über den gesamten Lebenszyklus eines 6G-Mobilfunkstandards von der Forschung bis zur Realisierung fördert und auf die Kommerzialisierungsergebnisse abgestimmt ist.[161] Die Initiative finanziert sich über private Mitgliedschaften.[162] Der Gruppe gehören derzeit 43 Gründer und Mitglieder an, darunter einige Tech-Giganten wie Google, Apple, Microsoft, Facebook und die meisten der großen Mobilfunkanbieter in den USA und Kanada.[163]

Weitere Initiativen:

- Eine weitere Gruppe die sich mit der Entwicklung von 6G beschäftigt, ist 5G Americas, ein Fachverband der Mobilfunkindustrie, welche im Jahr 2002 zunächst unter dem Namen 3G Americas gegründet wurde.[164] 5G Americas arbeitet mit Regierungsbehörden, Regulierungsbehörden, Organisationen für technische Standards und anderen globalen Mobilfunkorganisationen zusammen, um Interoperabilität und Konvergenz zu fördern. Im Dezember 2020 veröffentlicht 5G Americas das Weißbuch „Mobile Communications Beyond 2020 – The Evolution of 5G Towards Next G”.[165] Die Hauptthemen des Weißbuchs sind: i) ein Überblick über die Aktivitäten, die sowohl in Nordamerika als auch weltweit über 5G hinausgehen; ii) die Analyse wie sich die Kommunikation über die 2020er Jahre hinaus verändern wird, einschließlich verschiedener Anwendungsfälle sowie iii) wie Nordamerika eine Technologieführerschaft bei zukünftigen Kommunikationsstandards aufbauen und erhalten kann.

Chinesische 6G-Initiativen

China hat im Juli 2019 angekündigt, mit der Erforschung und Entwicklung eines 6G-Netzes für mobiles Internet zu beginnen. Anfang Juni 2021 veröffentlichte ein von der

---

159 Siehe ATIS (2020).
160 Siehe https://nextgalliance.org/about/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
161 Siehe https://nextgalliance.org/about/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
162 Full Member (20.000 USD/Jahr), Contributing Member (2.500 bis 10.000 USD/Jahr), Strategic Member (kein Beitrag).Siehe https://nextgalliance.org/about/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
163 Siehe https://www.6gworld.com/exclusives/6g-gains-momentum-with-initiatives-launched-across-the-world/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
164 Im Jahr 2010 wurde der Name zunächst in 4G Americas umgewandelt, im Jahr 2016 in 5G Americas. Siehe https://www.globenewswire.com/news-release/2016/02/12/1145359/0/en/4G-Americas-Evolves-Name-to-5G-Americas.html, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
165 Siehe https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2020/12/Future-Networks-2020-InDesign-PDF.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

chinesischen Regierung unterstütztes Industriegremium ein Weißbuch zur 6G-Technologie.[166] Darin werden Anwendungen und potenzielle Schlüsseltechnologien für die nächste Generation der Mobilfunktechnologie vorgestellt. Das Weißbuch bietet eine allgemeine Vision und befasst sich unter anderem mit acht Geschäftsmodell-Szenarien, darunter immersive Cloud-XR, holografische Kommunikation, sensorische Vernetzung, intelligente interaktive Kommunikation, Digitale Twins und globale Abdeckung sowie zehn potenzielle Schlüsseltechnologien und Ansichten zur Entwicklung des Sektors. Abbildung 0-2 listet die wichtigsten Beitragenden auf, darunter überwiegend chinesische Unternehmen und Forschungseinrichtungen und einige wenige ausländische Unternehmen wie Nokia, Ericsson und Samsung.

Abbildung 0-2: Beitragende White Paper on 6G Vision and Candidate Technologies

wik

Quelle: China Academy of Information and Communications Technology (CAICT)'s IMT-2030 6G promotion group (2021).

Weitere Initiativen:

- Im November 2019 gründete China Unicom eine Forschungsgruppe (*Millimeter Wave Terahertz Joint Innovation Center*), die sich auf Terahertz-Kommunikation konzentriert.[167]
- Im Mai 2020 verkündete ZTE eine 6G-Partnerschaft mit China Unicom zur Erforschung dreidimensionaler Konnektivität, Terahertz-Kommunikation und die Integration von Kommunikations- und Sensortechnologie.[168]

166 Siehe http://www.caict.ac.cn/english/news/202106/P020210608349616163475.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

167 https://www.lightreading.com/asia-pacific/china-unicom-gets-cracking-on-6g-terahertz-/d/d-id/755846, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

- Im November 2020 berichtete die BBC, dass China den weltweit ersten 6G-Satelliten in den Orbit geschickt hat.[169] Dieser sollte laut Angaben der staatlichen chinesischen Zeitung Global Times die Terahertz-Kommunikationstechnologie im Weltraum überprüfen.[170]

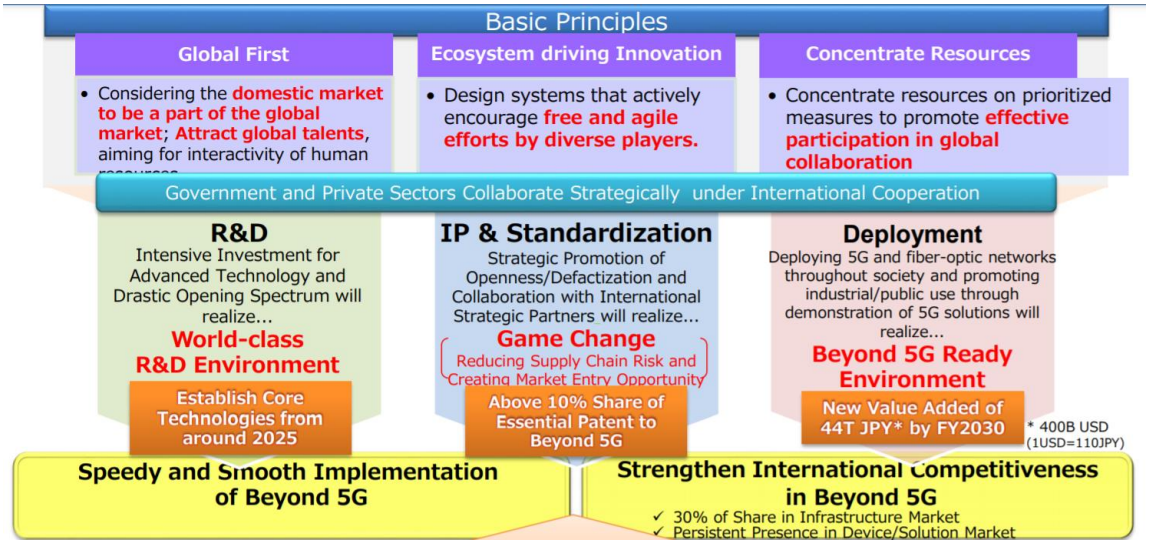
Japanische 6G-Initiativen

Im Januar 2020 kündigte die japanische Regierung Pläne zur Entwicklung einer umfassenden 6G-Strategie an.[171] Ein 6G-Gremium, bestehend aus Vertretern der Privatwirtschaft und universitärer Forschungsgruppen, wurde eingerichtet, um Technologieentwicklungen und Anwendungsfälle zu analysieren. Im April 2020 stellte das japanische Kommunikationsministerium im Rahmen von dessen „Beyond 5G"-Strategie ehrgeizige Ziele vor, die darauf abzielen, einen weltweiten Marktanteil von 30 Prozent für Basisstationen und andere Infrastrukturen zu erobern, statt wie bisher nur zwei Prozent.[172] Im Juni 2020 veröffentlichte das Ministerium eine „Beyond 5G Promotion Strategy".[173] Forschung und Entwicklung, Standardisierung von geistigem Eigentum und die 5G-Verbreitungsstrategie bilden die drei Säulen dieser Strategie. Die Forschung und Entwicklung, die in den nächsten fünf Jahren durchgeführt werden soll, zielt darauf ab, die grundlegenden Technologien zu entwickeln. Hierfür wird die Regierung 30 Milliarden Yen (232 Millionen Euro) für das National Institute of Information and Communications Technology (NICT) bereitstellen. Die Forschung und Entwicklung wird in den nächsten fünf Jahren auf der Grundlage eines Budgets von 100 Milliarden Yen (etwa 772 Millionen Euro) durchgeführt.[174] Insbesondere bei der Standardisierung von geistigem Eigentum sieht Japan Nachholbedarf. Während bei der 5G-Technologie japanische Firmen nur über einen kleinen Anteil der weltweiten Patente verfügen, peilt das Ministerium für nachfolgende Mobilfunkstandards einen Anteil von zehn Prozent an (siehe Abbildung 0-3).[175]

---

168 https://www.capacitymedia.com/articles/3825565/zte-and-china-unicom-announce-6g-collaboration, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
169 https://www.bbc.com/news/av/world-asia-china-54852131, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
170 https://twitter.com/globaltimesnews/status/1324597840291790849?lang=de, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
171 https://www.rcrwireless.com/20200122/5g/japan-announces-plans-kick-off-6g-research-report, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
172 https://www.japantimes.co.jp/2021/02/24/special-supplements/racing-full-speed-ahead-toward-digitalized-japan/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
173 https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/eng/presentation/pdf/Beyond_5G_Promotion_Strategy.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
174 https://www.japantimes.co.jp/2021/02/24/special-supplements/racing-full-speed-ahead-toward-digitalized-japan/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
175 https://www.japantimes.co.jp/2021/02/24/special-supplements/racing-full-speed-ahead-toward-digitalized-japan/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Abbildung 0-3: Beyond 5G Promotion Strategy Japan



Quelle: Ministry of Internal Affairs and Communication, Japan (2020): https://www.soumu.go.jp/main_sosiki/joho_tsusin/eng/presentation/pdf/Beyond_5G_Promotion_Strategy.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Weitere Initiative:

- Japans größter Mobilfunkanbieter NTT DOCOMO veröffentlichte Anfang 2020 das Weißpapier „5G Evolution and 6G“.[176] Im Februar 2021 erfolgte die Publikation der letzten Fassung (Version 3.0).[177] Darin strebt NTT DOCOMO die Realisierung technologischer Fortschritte in mehreren Bereichen an, darunter insbesondere die gleichzeitige Umsetzung mehrerer wichtiger Kommunikationsanforderungen wie ultraschnelle Verbindungen mit hoher Kapazität und geringer Latenzzeit, aber auch Pionierarbeit bei der Erschließung neuer Frequenzbänder, einschließlich Terahertz-Frequenzen und die Bereitstellung von extrem energiesparender und kostengünstiger Kommunikation.

Südkoreanische 6G-Initiativen

Im August 2020 kündigte der südkoreanische Premierminister Chung Sye-kyun Investitionen in Höhe von 220 Milliarden Won (circa 160 Millionen Euro) für die 6G-Forschung

176 https://www.nttdocomo.co.jp/english/info/media_center/pr/2020/0124_00.html, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
177 NTT DOCOMO (2021).

und -Entwicklung bis 2025 an.[178] Das Ziel des MSIT (Ministry of Science and ICT) sieht eine Kommerzialisierung von 6G ab 2028 vor, Pilotprojekte sollen ab 2026 laufen.[179]

Abbildung 0-4: Koreanischer Zeitplan für 6G

Quelle: https://www.6gworld.com/exclusives/korea-lays-out-plan-to-become-the-first-country-to-launch-6g/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Im Juni 2021 hat das MSIT im Anschluss an den koreanisch-amerikanischen Gipfel (Mai 2021) ein öffentlich-privates „6G-Strategietreffen" abgehalten.[180] Zu den wichtigsten Merkmalen des 6G-F&E-Umsetzungsplans gehören unter anderem Forschung im Bereich des Einsatzes von LEO-Satelliten (Low Earth Orbit) und Ultrapräzisionsnetzwerken sowie die Entwicklung einer Zugangstechnologie für Satelliten- und Bodennetze.[181]

Weitere Initiativen:

- Im Januar 2019 richtete das Unternehmen LG zusammen mit dem KAIST (Korean Advanced Institute of Science and Technology) ein 6G-Forschungszentrum ein.[182]

- Samsung hat 2019 ein neues Forschungszentrum (Advanced Communication Research Center) errichtet, welches sich mit der Entwicklung von 6G beschäftigt. Im Juli 2020 veröffentlichte Samsung ein Weißbuch mit dem Titel „The Next Hyper-Connected Experience for All".[183]

178 https://koreajoongangdaily.joins.com/2020/08/17/business/tech/6G-5G-Samsung-Electronics/20200817181900296.html, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
179 https://koreajoongangdaily.joins.com/2020/08/17/business/tech/6G-5G-Samsung-Electronics/20200817181900296.html, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
180 https://ciotechasia.com/korea-gets-ready-for-6g-with-the-us/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
181 https://ciotechasia.com/korea-gets-ready-for-6g-with-the-us/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
182 https://www.zdnet.com/article/lg-sets-up-6g-research-centre-at-kaist/, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.
183 https://cdn.codeground.org/nsr/downloads/researchareas/6G%20Vision.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Literatur

3GPP (2018). Technical Specification Group Radio Access Network - Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (Release 15), Tech. Rep. 38.913 Version 15.0.0.

3GPP (2020). 3GPP Work Plan (reduced) review at Plenary #87e. Dokumentennummer SP-200222 - 3GPP TSG SA#87e, 17.-20. März 2020, e-meeting.

5G IA (2021). European Vision for the 6G Network Ecosystem. Online abrufbar unter https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2021/06/WhitePaper-6G-Europe.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

6G Flagship (2019). Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence. 6G Research Vision 1 - September 2019. Online abrufbar unter http://jultika.oulu.fi/files/isbn9789526223544.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

ABI Research (2021). 6G Supply Chain Implications. Online abrufbar unter https://www.6gworld.com/6g-supply-chain-implications/, zuletzt abgerufem am 29.11.2021.

Aggrawal, H., Chen, P., Assefzadeh, M., Jamali, B. und Babakhani, A. (2016). Gone in a Picosecond: Techniques for the Generation and Detection of Picosecond Pulses and Their Applications. IEEE Microwave Magazine, 17(12): 24-38.

Akhtar, M.W., Hassan, S.A., Ghaffar, R. et al. (2020). The shift to 6G communications: vision and requirements. Hum. Cent. Comput. Inf. Sci., 10(53): 1-27.

Akyildiz, I.F., Kak, A. und Nie, S. (2020). 6G and Beyond: The Future of Wireless Communications Systems. IEEE Access, 8: 133995-134030.

Al-Eryani Y. und Hossain , E. (2019). The D-OMA method for massive multiple access in 6G: Performance, security, and challenges. IEEE Vehicular Technology Magazine, 14(3).

Ali, S., Saad, W., und Steinbach, D. (Eds.). (2020). White Paper on Machine Learning in 6G Wireless Communication Networks. 6G Research Visions, No. 7. University of Oulu, Finland.

Andrae, A.S.G. und Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. Challenges, 6: 117-157.

ARIB 2020 and Beyond Ad Hoc Group (2014). Mobile Communications Systems for 2020 and beyond. Weißpapier. Online abrufbar unter https://www.arib.or.jp/image/iinkai/adwics/02-00_2020bah/20bah-wp-100.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

ATIS (2020). Promoting U.S. Leadership on the Path to 6G. Online abrufbar unter https://www.atis.org/wp-content/uploads/2020/07/Promoting-US-Leadership-on-Path-to-6G.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Atun et al. (2006): Innovation, Patents and Economic Growth. Imperial College London, Discussion Paper 5. Online abrufbar unter https://www.researchgate.net/profile/Rifat-Atun/publication/23751118_INNOVATION_PATENTS_AND_ECONOMIC_GROWTH/links/09e4150b1ff5dbf7de000000/INNOVATION-PATENTS-AND-ECONOMIC-GROWTH.pdf, zuletzt abgerufen am 24.11.2021

Baischew, D., Kroon, P., Lucidi, S., Märkel, C. und Sörries, B. (2020). Digital Sovereignty in Europe - a first benchmark. WIK-Consult Bericht. Online abrufbar unter https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2021/Digital_Sovereignty_Report.pdf, zuletzt abgerufen am 06.12.2021.

BMWi (2015). Leitplanken Digitaler Souveränität. Positionspapier der Fokusgruppe "Digitale Souveränität" beim Nationalen IT Gipfel 2015 Berlin. Online abrufbar unter https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Downloads/it-gipfel-2015-leitplanken-digitaler-souveraenitaet.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

BMWi (2020). Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten. Online abrufbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-nachhaltige-produktion.pdf?__blob=publicationFile&v=10, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Broadband Commission for Sustainable Development (ITU, UNESCO) (2020). State of Broadband Report 2019 [Online]. Online abrufbar unter: https://www.itu.int/dms_pub/itu-s/opb/pol/S-POL-BROADBAND.23-2021-PDF-E.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Bundesnetzagentur (2011). Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2010/2011. Online abrufbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Taetigkeitsberichte/2011/TaetigkeitsberichtTK20102011pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Bundesnetzagentur (2019). Tätigkeitsbericht Telekommunikation 2018/2019. Online abrufbar unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Taetigkeitsberichte/2019/TK_20182019.pdf?__blob=publicationFile&v=9, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Calvanese Strinati, E., Barbarossa, S., Gonzalez-Jimenez, J. L., Ktenas, D., Cassiau, N., Maret, L. und Dehos, C. (2019). 6G: The next frontier: From holographic messaging to artificial intelligence using subterahertz and visiblelight communication. IEEE Vehicular Technology Magazine, 14(3): 42–50.

Carbone, P., Dán, G., Gross, J., Göransson, B. und Petrova, M. (2021). NeuroRAN: Rethinking Virtualization for AI-native Radio Access Networks in 6G. Arbeitspapier. Online abrufbar unter https://arxiv.org/pdf/2104.08111.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Chu, M., Li, H., Liao, X., und Cui, S. (2019). Reinforcement Learning-Based Multiaccess Control and Battery Prediction With Energy Harvesting in IoT Systems. IEEE Internet of Things Journal, 6: 2009–2020.

EMPOWER (2019). Empowering Transatlantic Platforms for Advance Wireless Research. Weißpapier. Online abrufbar unter https://www.advancedwireless.eu/wp-content/uploads/Deliverables/EMPOWER%20White%20Paper_v1_0.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

EMPOWER (2020). Future Trends Analysis for Advanced Wireless Platforms. Weißpapier. Online abrufbar unter https://www.advancedwireless.eu/wp-content/uploads/Deliverables/EMPOWER%20White%20Paper2_v1_0.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Ericsson (2020). 5G wireless access: An overview. Online abrufbar unter https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-wireless-access-an-overview, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Europäische Kommission (2021). Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency, JRC Technical Report.

Europäische Kommission (2021). ICT Code of Conduct. Online abrufbar unter https://e3p.jrc.ec.europa.eu/communities/ict-code-conduct, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

GeSi (2015) - GeSI Mobile Carbon Impact. How mobile communications technology is enabling carbon emissions reduction. Online abrufbar unter https://prod-drupal-files.storage.googleapis.com/documents/resource/public/Mobile%20Carbon%20Impact%20-%20REPORT.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

GeSI (2019). Digital with Purpose: Delivering a SMARTer2030. Summary Report. Online abrufbar unter https://gesi.org/research/download/36, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Giordani, M., Polese, M., Mezzavilla, M., Rangan, S. und Zorzi, M. (2020). Toward 6G networks: Use cases and technologies. IEEE Communications Magazine, 58(3): 55–61.

Hashida, H., Kawamoto, Y. und Kato N. (2020). Intelligent Reflecting Surface Placement Optimization in Air-Ground Communication Networks Toward 6G. IEEE Wireless Communications, 27(6): 1–6.

Hexa-X (2021a). 6G Vision, use cases and key societal values. Deliverable D1.1. Online abrufbar unter https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2021/02/Hexa-X_D1.1.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Hexa-X (2021b). 6G Vision, use cases and key societal values. Deliverable D1.2. Online abrufbar unter https://hexa-x.eu/wp-content/uploads/2021/05/Hexa-X_D1.2.pdf, zuletzt abgerufen am 29.11.2021.

Huawei (2019). 5G Power Whitepaper. Online abrufbar unter https://carrier.huawei.com/~/media/CNBG/Downloads/Spotlight/5g/5G-Power-White-Paper-en.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Idzikowski, F., Chiaraviglio, L., Cianfrani, A., López Vizcaíno, J., Polverini, M. und Ye, Y. (2016). A Survey on Energy-Aware Design and Operation of Core Networks. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 18(2): 1453 – 1499.

IEA (2017). Digitalization& Energy. Online abrufbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/b1e6600c-4e40-4d9c-809d-1d1724c763d5/DigitalizationandEnergy3.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

ITU (2015). Nomenclature of the frequency and wavelengh bandsused in telecommunications. Recommendation ITU-R V.431-8.

ITU (2020). ITU-R Radiocommunication - Study Group. ITU-R Study Group Booklet. Genf: ITU.

ITU-R (2015). IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. Recommendation ITU-R M.2083-0 (09/2015).

ITU-T (2017). Overview of trust provisioning in information and communication technology infrastructures and services. Series Y. Y.3052.

Kanhere, O., Ju, S., Xing,Y. und Rappaport, T. S. (2019). Map assisted millimeter wave localization for accurate position location. Submitted to IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM): 1–6.

Kar, B., Wu, E. H. und Lin, Y. (2018). Energy Cost Optimization in Dynamic Placement of Virtualized Network Function Chains. IEEE Transac tions on Network and Service Management, 15(1): 372–386.

Kürner, T. und Priebe, S. (2014). Towards THz Communications - Status in Research, Standardization and Regulation. Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 35: 53–62.

Latva-aho, M. und Leppänen, K. (Eds.) (2019). Key Drivers and Research Challenges for 6G Ubiquitous Wireless Intelligence. Weißpapier. 6G Research Visions, No.1. Univeristy of Oulu, Finland.

Lin, Y., Chu, E.T.-H., Lai, Y. und Huang, T. (2015). Time-and-Energy-Aware Computation Offloading in Handheld Devices to Coprocessors and Clouds. IEEE Systems Journal, 9(2): 393–405.

Lin, Y.,Lai, Y., Huang, J. und Chien, H. (2018) Three-Tier Capacity and Traffic Allocation for Core, Edges, and Devices for Mobile Edge Computing, IEEE Transactions on Network and Service Management, 15(3): 923–933.

Malmodin, J. und Lundén, D. (2018) The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. Sustainability. 2018; 10(9): 3027.

Mao B., Tang, F., Kawamoto, Y. und Kato, N. (2021). AI based Service Management for 6G Green Communications. Working Paper. Online abrufbar unter https://arxiv.org/pdf/2101.01588.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Matinmikko-Blue, M., Aalto, S., Asghar, M. I., Berndt, H., et al. (Eds.). (2020). Whitepaper on 6G Drivers and the UN SDGs. 6G Research Visions, No. 2. University of Oulu, Finland.

Ministerium für Verkehr und Kommunikation, Finnland (2020). The ICT sector, climate and the environment. Interim report of the working group preparing a climate and environmental strategy for the ICT sector in Finland. Publications of the Ministry of Transport and Communications 2020:14. Online abrufbar unter https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/162473/LVM_2020_14.pdf?sequence=1&isAllowed=y, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Mourad, A., Yang, R., Lehne, PH. und De La Olivia, A. (2020). A Baseline Roadmap for Advanced Wireless Research Beyond 5G. Electronics, 9(2): 351.

NTT DOCOMO (2020). 5G Evolution and 6G. Weißpapier. Online abrufbar unter https://www.nttdocomo.co.jp/english/binary/pdf/corporate/technology/whitepaper_6g/DOCOMO_6G_White_PaperEN_20200124.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

OECD (2005). Innovation Policies: Innovation in the Business Sector, Paris;

Pärssinen, A., Alouini, M., Berg, M., Kuerner, T., Kyösti, P., Leinonen, M. E., Matinmikko-Blue, M., McCune, E., Pfeiffer, U., und Wambacq, P. (Eds.) (2020). Whitepaper on RF Enabling 6G – Opportunities and Challenges from Technology to Spectrum. 6G Research Visions, No. 13. University of Oulu.

Plückebaum, T. Wernick, C. (2021). Die Rolle von HAPS für die Breitbandversorgung im ländlichen Raum. WIK Kurzstudie. Bad Honnef: Mai 2021. Online abrufbar unter https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2021/Kurzstudie_HAPS_deutsch.pdf, zuletzt abgerufen am 06.12.2021.

Porambage, P., Gür, G., Osorio, D. Liyanage, M. (2021). The Roadmap to 6G Security and Privacy. IEEE Open Journal of the Communications Society, 2: 1094-1122.

Qualcomm (2018). VR and AR pushing connectivity limits. Online abrufbar unter https://www.qualcomm.com/media/documents/files/vr-and-ar-pushing-connectivity-limits.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Rajatheva, N., Atzeni, I., Björnson, E., et al. (2020). Whitepaper on Broadband Connectivity in 6G. Compilation of ideas from the 6G Wireless Summit 2020. Online abrufbar unter https://arxiv.org/pdf/2004.14247.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Rappaport, T. S. et al. (2019). Wireless Communications and Applications Above 100 GHz: Opportunities and Challenges for 6G and Beyond. IEEE Access, 7: 78729-78757.

RSPG (2021). Additional spectrum needs and guidance on the fast rollout of future wireless broadband networks. Dokumentnummer RSPG21-008 FINAL. Online abrufbar unter https://rspg-spectrum.eu/wp-content/uploads/2021/02/RSPG21-008final_Draft_RSPG_Opinion_on_Additional_Spectrum_Needs.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Shehata, M., Elbanna, A., Musumeci, F. und Tornatore, M. (2018). Multiplexing gain and processing savings of 5G radio-access-network functional splits. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2(4): 982-991.

Shehata, M., Elbanna, A., Musumeci, F. and Tornatore, M. (2018). Multiplexing Gain and Processing Savings of 5G Radio-Access-Network Functional Splits. IEEE Transactions on Green Communications and Networking, 2(4); 982-991.

Sörries, B., Plückebaum, T., Elbanna, A. und Wissner, M. (2021). Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen. WIK Diskssionsbeitrag

The Shift Project (2019). Lean ICT - Towards Digital Sovriety. Report of the Working Group directed by Huges Ferreboeuf for the Think Tank the Shift Project. Online abrufbar unter https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf, zuletzt abgerufen am 20.09.2021.

Vereinte Nationen (2015). Transformation unserer Welt: die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Resolution der Generalversammlung vom 12. Oktober 2015. Dokumentnummer A/Res/70/1.

Wang H. und Rappaport, T. S. (2005). A parametric formulation of the UTD diffraction coefficient for real-time propagation prediction modeling. IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., 4: 253–257.

Ylianttila, M., Kantola, R., Gurtov, A., Mucchi, L., und Oppermann I., (Eds.) (2020). 6G Whitepaper: Research Challenges For Trust, Security And Privacy. 6G Research Visions, No. 9. University of Oulu, Finland.

Zaidi, A., Athley, F., Medbo, F., Gustavsson, U., Durisi, G. und Chen, X. (2018). Chapter 6 - NR Waveform, in 5G Physical Layer, Academic Press, ISBN 9780128145784.

Zhang, Z., Xiao, Y., Ma, Z., Xiao, M., Ding, Z., Lei, X., Karagiannidis, G. und Fan, P. (2019). 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. IEEE Vehicular Technology Magazine, 14: 28-41.

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

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 Zustelllogistik, 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

Nr. 452: Bernd Sörries, Lorenz Nett:

Frequenzmanagement: 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, Dezember 2019

Nr. 453: Martin Lundborg, Christian Märkel, Lisa Schrade-Grytsenko, Peter Stamm:

Künstliche Intelligenz im Telekommunikationssektor – Bedeutung, Entwicklungsperspektiven und regulatorische Implikationen, Dezember 2019

Nr. 454: Fabian Eltges, Petra Junk:

Entwicklungstrends im Markt für Zeitungen und Zeitschriften, Dezember 2019

Nr. 455: Christin Gries, Julian Knips, Christian Wernick:

Mobilfunkgestützte M2M-Kommunikation in Deutschland – zukünftige Marktentwicklung und Nummerierungsbedarf, Dezember 2019

Nr. 456: Menessa Ricarda Braun, Christian Wernick, Thomas Plückebaum, Martin Ockenfels:

Parallele Glasfaserausbauten auf Basis von Mitverlegung und Mitnutzung gemäß DigiNetzG als Möglichkeiten zur Schaffung von Infrastrukturwettbewerb, Dezember 2019

Nr. 457: Thomas Plückebaum, Martin Ockenfels:

Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze, Februar 2020

Nr. 458: Andrea Liebe, Jonathan Lennartz, René Arnold:

Strategische Ausrichtung bedeutender Anbieter von Internetplattformen, Februar 2020

Nr. 459: Sebastian Tenbrock, Julian Knips, Christian Wernick:

Status quo der Abschaltung der Kupfernetzinfrastruktur in der EU, März 2020

Nr. 460: Stefano Lucidi, Martin Ockenfels, Bernd Sörries:

Anhaltspunkte für die Replizierbarkeit von NGA-Anschlüssen im Rahmen des Art. 61 Abs. 3 EKEK, März 2020

Nr. 461: Fabian Eltges, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückebaum, Desislava Sabeva:

SDN/NFV und ihre Auswirkungen auf die Kosten von Mobilfunk und Festnetz im regulatorischen Kontext, März 2020

Nr. 462: Lukas Wiewiorra, Andrea Liebe, Serpil Taş

Die wettbewerbliche Bedeutung von Single-Sign-On- bzw. Login-Diensten

und ihre Relevanz für datenbasierte Geschäftsmodelle sowie den Datenschutz, Juni 2020

Nr. 463: Bernd Sörries, Lorenz Nett, Matthias Wissner

Die Negativauktion als ein Instrument zur Versorgung weißer Flecken mit Mobilfunkdiensten, Dezember 2020

Nr. 464: Sebastian Tenbrock, Christian Wernick:

Incumbents als Nachfrager von Vorleistungen auf FTTB/H-Netzen, Dezember 2020

Nr. 465: Marcus Stronzik, Gonzalo Zuloaga:

Empirische Untersuchung der FTTB/H-Ausbauaktivität im europäischen Vergleich, Dezember 2020

Nr. 466: Antonia Niederprüm mit Unterstützung von Gonzalo Zuloaga und Willem van Lienden:

Verbundproduktion im Zustellmarkt: Briefnetze mit Paketen oder Paketnetze mit Briefen?, Dezember 2020

Nr. 467: Serpil Taş, Lukas Wiewiorra (in Zusammenarbeit mit dem Weizenbaum-Institut):

Multihoming bei Plattformdiensten – Eine nachfrageseitige Betrachtung, Dezember 2020

Nr. 468: Menessa Ricarda Braun, Julian Knips, Christian Wernick:

Die Angebotsentwicklung auf dem deutschen Mobilfunkmarkt 2017-2020, Dezember 2020

Nr. 469: Isabel Gull, Lisa Schrade-Grytsenko, Martin Lundborg:

Cloud-Lösungen und KI-as-a-Service – Aktuelle und potenzielle Anwendungsszenarien und Marktentwicklungen, Dezember 2020

Nr. 470: Bernd Sörries, Matthias Franken, Dajan Baischew, Stefano Lucidi:

Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkabdeckung in der EU, Dezember 2020

Nr. 471: Julian Knips, Christin Gries, Christian Wernick:

Consumer-IoT in Deutschland – Anwendungsbereiche und möglicher Regelungsbedarf, Dezember 2020

Nr. 472: Saskja Schäfer, Ahmed Elbanna, Werner Neu, Thomas Plückebaum:

Mögliche Einsparungspotentiale beim Ausbau von 5G durch Infrastructure Sharing, Dezember 2020

Nr. 473: Gabriele Kulenkampff, Martin Ockenfels, Konrad Zoz, Gonzalo Zuloaga:

Kosten von Breitband-Zugangsnetzen, Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus – bottom-up Modellierung und statistische Analyse –, Dezember 2020

Nr. 474: Lorenz Nett, Bernd Sörries:

Ausgestaltung und Umsetzung eines Universaldienstregimes (insbesondere mit Blick auf die Realisierung einer Versorgung mit schnellem Internet) in anderen Ländern, November 2021

Nr. 475: Christin-Isabel Gries, Martin Lundborg, Peter Stamm:

Digitale Arbeitswelten im Mittelstand - Auswertung von Studien zu Arbeit 4.0, November 2021

Nr. 476: Menessa Ricarda Braun, Julian Knips, Christian Wernick:

Analyse der Angebotsentwicklung für leitungsgebundene Breitbanddienste für Privatkunden im deutschen Festnetzmarkt von 2017-2020, Dezember 2021

Nr. 477: Christian Märkel, Marcus Stronzik, Martin Simons, Matthias Wissner, Martin Lundborg:

Einsatz von Blockchain in KMU: Chancen & Hemmnisse, Dezember 2021

Nr. 478: Matthias Wissner, Ahmed Elbanna, Bernd Sörries, Thomas Plückebaum:

Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, Dezember 2021

Nr. 479: Dajan Baischew, Ahmed Elbnna, Stefano Lucidi, Bernd Sörries, Thomas Plückebaum:

Die Grundzüge von 6G, Dezember 2021

ISSN 1865-8997