

ALLES VERNETZT, ALLES MÖGLICH

Wirtschaftliche Chancen für Industrie und
Mittelstand in Deutschland durch
6G-Mobilfunk in Zeiten sich ändernder
geopolitischer Rahmenbedingungen

Studie der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
und der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung mbH
Mai 2025



VDI|VDE|IT

GLIS

SPECIALISTS IN
EMPIRICAL ECONOMIC
RESEARCH

Inhalt

Executive Summary – die 6 wichtigsten Erkenntnisse	03
1. Einleitung	07
2. Der Weg zum 6G-Standard	10
2.1 Wo stehen wir mit 5G?	10
2.2 6G – Fähigkeiten und Anwendungsszenarien	11
2.3 Zeitplan der Standardisierung	15
2.4 Internationale 6G-Programme	15
2.5 Zukunftsanwendungen	16
2.5.1 Vernetzte Fabrik	16
2.5.2 Gesundheitsversorgung	17
2.5.3 Vernetztes Fahren	17
2.5.4 Missionskritische Anwendungen	18
3. Der Blick nach vorne: Die Bedeutung von 6G für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Transformation	20
3.1 Telekommunikationsnetze: Die mobile Infrastruktur der Informationsgesellschaft	21
3.2 Kosten, Investitionen und wirtschaftliche Tragfähigkeit	22
3.3 6G als Strukturhebel: Welche Branchen profitieren?	23
3.4 Auswirkungen auf Unternehmensstrukturen und Arbeitsmärkte	25
3.5 Gesellschaftliche und regionale Transformationspotenziale	26
4. Digitale Souveränität in Zeiten geopolitischer Herausforderungen	31

Executive Summary – die 6 wichtigsten Erkenntnisse



6G – die **ZUKUNFT DES MOBILFUNKS** beginnt heute

Im März 2025 fiel in Südkorea der internationale Startschuss für die Standardisierung der 6. Generation des Mobilfunks – 6G. Parallel dazu wurden im März die Ergebnisse einer öffentlichen Konsultation zum aktuellen Stand der Nutzung von 5G in der deutschen Industrie veröffentlicht. Die Potenziale von Mobilfunktechnologien werden aktuell in der Fachöffentlichkeit lebhaft diskutiert. Die für diese Studie befragten Fachleute betonen, dass die wirtschaftliche Wirksamkeit von 6G stark von der tatsächlichen Umsetzung abhängt. Entscheidend ist, dass die Technologie praxistauglich, wirtschaftlich tragfähig und regulatorisch eingebettet eingeführt werde. Ohne entsprechende Geschäftsmodelle, Kostensicherheit und Anwendungsunterstützung bestehe die Gefahr, dass das volle Potenzial nicht ausgeschöpft werde – wie es bereits bei 5G in Teilen zu beobachten ist.



6G wird das verbindende **NETZWERK DER DIGITALEN TRANSFORMATION**

Während bei 5G die industrielle Nutzung im Vordergrund steht, wird mit 6G, das ab dem Jahr 2030 eingeführt werden soll, eine umfassende Mensch-Maschine-Kollaboration und Service-Integration möglich. 6G wird damit das verbindende Netzwerk der digitalen Transformation in den wesentlichen Wirtschaftszweigen Deutschlands. Auch zukünftige 6G-Campusnetze – lokal begrenzte Mobilfunknetze beispielsweise in Werkshallen oder an Produktionsstandorten – sollen die Versprechen der Vergangenheit endlich einlösen, neue Anwendungen

ermöglichen und bedarfsoptimierte, kostengünstige und interoperable Lösungen bieten. Innovative kleine und mittlere Unternehmen können dabei einen starken Beitrag leisten und für Herstellerdiversität sowie gesunden Wettbewerb sorgen. 6G wird nicht nur eine neue Breitbandinfrastruktur, sondern eine Serviceplattform für Dienste mit Künstlicher Intelligenz (KI) bieten und Infrastrukturentwicklung dort antreiben, wo Automatisierung, Prozessintegration und datengestützte Steuerung bislang durch mangelnde Konnektivität begrenzt waren.

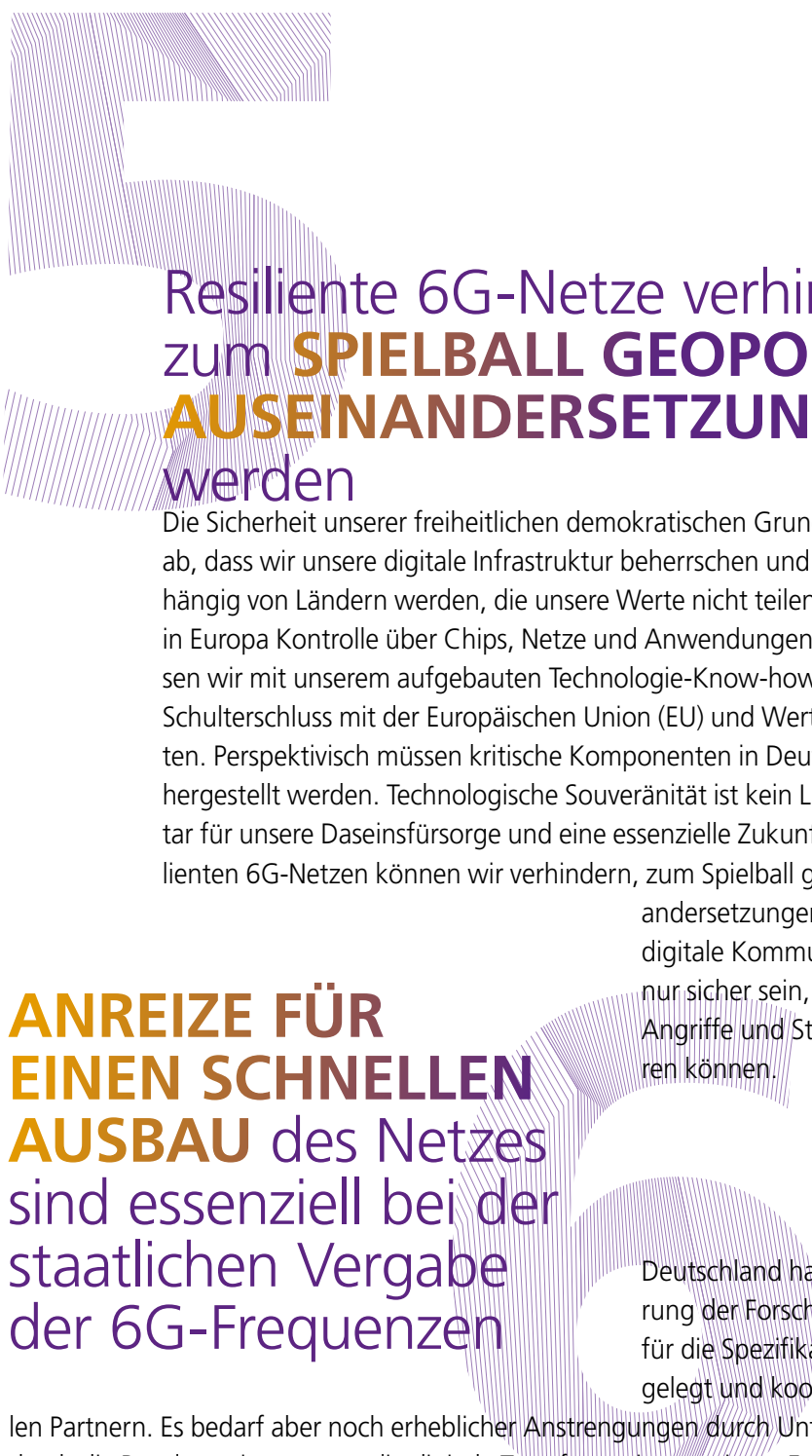
6G federt **MIT KÜNSTLICHER INTELLIGENZ UND ROBOTIK** den Fachkräftemangel durch smarte Automatisierung ab

Die vorliegende Untersuchung zeigt, dass 6G im Zusammenwirken mit Künstlicher Intelligenz und Robotik den Fachkräftemangel durch smarte Automatisierung abfedern kann und zu einem nachhaltigen Strukturwandel beiträgt.

6G kann daher als Strukturhebel verstanden werden. Der Einsatz von 6G für kooperative autonome Systeme eröffnet Chancen für die deutsche Wirtschaft, beispielsweise für den Einsatz von Lastfahrzeugen in industriellen Hallen oder für den automatisierten Betrieb von Arbeitsgeräten in der Landwirtschaft. Darüber hinaus profitiert von der Entwicklung der zugrundeliegenden Technologien in Deutschland maßgeblich auch die Automobilbranche und die gesamte Zulieferungskette. Dies bedeutet jedoch keine Bedrohung für die Arbeitnehmer, sondern ist eine notwendige Reaktion auf demografische und strukturelle Herausforderungen. Es werden also keine Arbeitsplätze ersetzt, sondern bestehende Engpässe kompensiert und die Produktivität gesteigert. Insbesondere in der alternden Gesellschaft Deutschlands mit schrumpfender Erwerbsbevölkerung ist diese Form der technologischen Unterstützung zentral, um Versorgungsqualität, Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftliche Resilienz aufrechtzuerhalten. Insbesondere auch im Osten Deutschlands liegen Innovationspotenziale in der Softwareentwicklung, dem Handwerk, der Gesundheitsversorgung, der Chipfertigung und der Landwirtschaft. Das Handwerk, die Gesundheitsversorgung und die Landwirtschaft profitieren vor allem von der allgegenwärtigen Vernetzung und den smarten Systemen, die Aufgaben übernehmen können, für die heutzutage die Fachkräfte fehlen.

6G wird zum Instrument für **GESELLSCHAFTLICHE TEILHABE**, Daseinsvorsorge und regionale Entwicklung

Technologische Teilhabe ist zunehmend eine Voraussetzung für gesellschaftliche Teilhabe – etwa bei Zugang zu Informationen, Mobilität, Gesundheit oder Bildung. 6G wird daher nicht nur infrastrukturelle Grundlage für wirtschaftliche Anwendungen, sondern auch ein Instrument für gesellschaftliche Teilhabe, Daseinsvorsorge und regionale Entwicklung. Digitale Angebote und Leistungen können mit 6G mittels nicht-terrestrischen Netzen (unter anderem Drohnen und Satelliten) auch in bisher unterversorgte Regionen gebracht werden. Ärztinnen und Ärzte können damit leichter aus der Ferne Untersuchungen durchführen. 6G ermöglicht Anwendungen, die zum Beispiel auch Pflegenotstände lindern. Für die digitale Gesellschaft wird 6G zum Nervensystem. In ostdeutschen Regionen – etwa in der Chipfertigung (Dresden), Softwareentwicklung (Berlin) oder der experimentellen Landwirtschaft (Sachsen) – könnten sich laut Einschätzung einiger interviewter Fachleute regionale Innovationscluster herausbilden, die von der Technologie überdurchschnittlich profitieren.



Resiliente 6G-Netze verhindern, zum **SPIELBALL GEOPOLITISCHER AUSEINANDERSETZUNGEN** zu werden

Die Sicherheit unserer freiheitlichen demokratischen Grundordnung hängt davon ab, dass wir unsere digitale Infrastruktur beherrschen und technologisch unabhängig von Ländern werden, die unsere Werte nicht teilen. Deshalb müssen wir in Europa Kontrolle über Chips, Netze und Anwendungen erlangen. Dazu müssen wir mit unserem aufgebauten Technologie-Know-how den 6G-Standard im Schulterschluss mit der Europäischen Union (EU) und Wertepartnern mitgestalten. Perspektivisch müssen kritische Komponenten in Deutschland und der EU hergestellt werden. Technologische Souveränität ist kein Luxus, sondern elementar für unsere Daseinsfürsorge und eine essenzielle Zukunftsinvestition. Mit resilienten 6G-Netzen können wir verhindern, zum Spielball geopolitischer Auseinandersetzungen zu werden.

Unsere digitale Kommunikation muss nicht nur sicher sein, sondern auch auf Angriffe und Störungen reagieren können.

ANREIZE FÜR EINEN SCHNELLEN AUSBAU des Netzes sind essenziell bei der staatlichen Vergabe der 6G-Frequenzen

Deutschland hat durch seine umfangreiche Förderung der Forschung an 6G wichtige Grundlagen für die Spezifikation und zukünftige Umsetzung gelegt und kooperiert dabei mit internationalen Partnern.

Es bedarf aber noch erheblicher Anstrengungen durch Unternehmen und Unterstützung durch die Bundesregierung, um die digitale Transformation zu einem Erfolg für Deutschland zu machen. Die zukünftige staatliche Vergabe der Frequenzen für 6G sollte passende Regelungen und Anreize für einen erfolgreichen und schnellen Ausbau der zukünftigen Netze bieten. Auch müssen unbedingt zusätzliche Frequenzen für den Mobilfunk frei werden, um das volle Potenzial der Technologie nutzen zu können. 6G bietet Deutschland die Chance auf eine resiliente, souverän genutzte digitale Infrastruktur als Grundlage für wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit und zur Meisterung wichtiger gesellschaftlicher Herausforderungen.

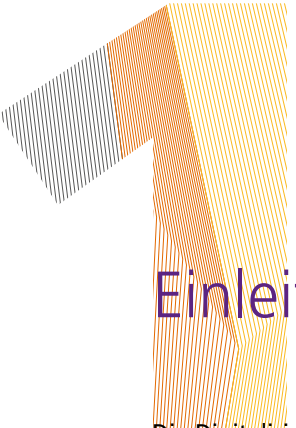


Ohne europäische Kontrolle über Chips, Netze und Anwendungen riskieren wir, dass 6G zur Infrastruktur fremder Interessen wird. Technologische Souveränität heißt, dass wir selbst gestalten und im Zweifel auch unabhängig handeln können. Dazu brauchen wir nicht nur gute Ideen, sondern auch Fertigungskompetenz vor Ort.«

PROFESSOR SLAWOMIR STANCZAK

Leiter der Abteilung Drahtlose Kommunikation und Netze
am Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik,
Heinrich-Hertz-Institut (HHI)





Einleitung

Die Digitalisierung bietet umfassende und nicht selten bahnbrechende Chancen für die Wirtschaft. Dies zeigt sich beispielsweise an der immer stärkeren Integration von Künstlicher Intelligenz (KI) in den Arbeitsalltag oder die Flexibilisierung von Dienstleistungsangeboten. Die Automatisierung von Geschäftsprozessen ist nicht mehr nur für Großunternehmen relevant, sondern sie findet auch in immer mehr kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) Anwendung.¹ Die Verfügbarkeit von Daten zur richtigen Zeit am richtigen Ort ist damit eine wichtige Grundlage der Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft. Als Rückgrat der Vernetzung sind daher resiliente Kommunikationsnetze und insbesondere leistungsfähige Mobilfunknetze entscheidend, damit auch deutsche KMU auf dem globalen Markt bestehen können. Die Bedeutung mobiler Kommunikation zeigt sich in ihrem Beitrag zur Wirtschaftsleistung. Im Jahr 2023 machten mobile Technologien und Dienste 5,4 Prozent des globalen Bruttoinlandsproduktes (BIP) aus; ein Anteil, der 5,7 Billionen US-Dollar an Wertschöpfung und rund 35 Millionen Arbeitsplätzen entspricht.²

Diese hohe Bedeutung der Kommunikationsinfrastruktur lässt sie jedoch zunehmend zum Ziel von staatlichen oder nicht-staatlichen Angriffen werden. In einer hybriden

Kriegsführung werden oftmals Cyberangriffe mit physischen Attacken auf Infrastrukturen kombiniert und der Ursprung der Angriffe mittels unterschiedlicher Taktiken verschleiert. Die Ziele der Angreifenden sind dabei vielfältig, sei es Kommunikation zu verhindern, übertragene Daten abzufangen oder abzuhören oder Ransomware zu platzieren.

In der jüngeren Vergangenheit finden sich zahlreiche Beispiele für Angriffe auf deutsche und europäische Kommunikationsnetze.

→ **2022: Angriff auf GSM-R-Netz** der Bundesbahn und damit verbunden mehrstündiger Ausfall des Zugverkehrs in Norddeutschland³

→ **2024: Angriffe auf Unterseekabel** in Ostsee⁴ und im Roten Meer⁵

In der Vergangenheit lag der Fokus oftmals noch auf physischer Zerstörung von Übertragungskabeln und Fasern, aktuell rücken der Mobilfunk und sogar die Satellitennetze immer stärker in den Blick von Angreifern. Die massiven Auswirkungen eines Angriffs auf die Mobilfunknetze zeigten sich nicht zuletzt in der Ukraine, als im Zuge eines

1 Lembke, Gerald (2024): Automatisierung von Geschäftsprozessen durch KI (2). Mittelstand BVMV online vom 01.04.2024. Online unter www.bvmv.de/de/internet-und-digitalisierung/news/automatisierung-von-gesch%C3%A4ftsprozessen-durch-ki-ein-umfassender-guide-f%C3%BCr-kmu

2 GSMA Intelligence (2024): The Mobile Economy 2024. Online unter www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2024/02/260224-The-Mobile-Economy-2024.pdf

3 DER SPIEGEL (online) (2024): Verkehrsminister Wissing spricht von „vorsätzlicher Tat“. Spiegel online vom 08.10.2022. Online unter www.spiegel.de/panorama/volker-wissing-spricht-von-vorsatzlicher-tat-liger-tat-bei-der-sabotage-am-netz-der-deutschen-bahn-a-9ccdc9b3-53fa-4d8b-959b-a2184c90842c

4 Wäschenbach, Julia (2024): Finnland glaubt nicht an einen Unfall. Tagesschau online vom 26.12.2024. Online unter www.tagesschau.de/ausland/europa/finnland-schaeden-unterseekabel-100.html

5 Alvares de Souza Soares, Philipp (2024): Seekabel im Roten Meer durchtrennt – Bedrohung für das Internet in Europa wächst. Handelsblatt online vom 07.03.2024. Online unter www.handelsblatt.com/technik/it-internet/seekabel-im-roten-meer-durchtrennt-bedrohung-fuer-das-internet-in-europa-waechst-01/100020900.html

Hackerangriffs auf den Mobilfunkbetreiber Kyivstar für weite Teile der Bevölkerung mehrere Tage kein Mobilfunk verfügbar war.⁶ Die immer komplexeren Architekturen der Kommunikationsnetze sind zwar zwingend notwendig, um mit den rasant steigenden Anforderungen Schritt halten zu können, sie bieten jedoch auch das Potenzial für neue Angriffsvektoren.

Der Einfluss von resilienten Kommunikationsnetzen geht weit über den Austausch von Daten hinaus. Die wechselseitige Abhängigkeit zwischen Kommunikationsnetzen und Stromnetzen nimmt insgesamt weiter zu. Bereits heute werden Satellitennetze zur Überwachung von Windkraftanlagen eingesetzt, wie sich an einem Ausfall der Datenübertragung in Folge eines Cyberangriffs zeigte, der bereits im Jahr 2022 zu einem Ausfall von mehreren tausend Windkraftanlagen führte.⁷ Übertragungsnetzbetreiber bedienen sich eigener gehärteter Kommunikationsnetze, um Höchstspannungs- oder Verteilnetze abgesichert zu steuern.⁸ Die Erzeugung erneuerbarer Energieträger wird hingegen auch aufgrund des dezentralen Charakters oft über Funkverbindungen gesteuert. Kommt es zum Ausfall der Kommunikationsnetze, droht auch die Stromversorgung auszufallen und im schlimmsten Fall ein großflächiger Blackout und der Zusammenbruch von Lieferketten oder Produktionsprozessen.

Das Potenzial von Kommunikationsnetzen der nächsten Generation für den Mittelstand ist enorm. Damit dieses jedoch auch gehoben werden kann, müssen Sicherheit und Resilienz entscheidende Paradigmen bei der Erforschung von 6G sein. In den folgenden Abschnitten wird zunächst ein allgemeiner Überblick über die internationale 6G-Entwicklung geboten. Nachfolgend wird der Blick auf die Bedeutung von 6G für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Transformation gerichtet. Abschließend wird die Notwendigkeit digitaler Souveränität in Zeiten geopolitischer Herausforderungen diskutiert. Für die vorliegende Studie hat das Autorenteam verschiedene Fachleute aus Theorie und Praxis interviewt. Ihre Expertise ist in die verschiedenen Kapitel eingeflossen und einzelne Perspektiven finden sich in Form eines direkten Zitats im Verlauf der Studie wieder.

6 DER SPIEGEL (online) (2023): Einer der schwersten Hacks des Krieges macht der Ukraine zu schaffen. Spiegel online vom 14.12.2023. Online unter www.spiegel.de/netzwelt/web/kyivstar-einer-der-schwersten-hacks-des-krieges-macht-der-ukraine-zu-schaffen-a-2799898e-e788-459a-ba66-495cdb9041e0

7 Stock, Oliver (2022): Seit Kriegsausbruch: Hacker legen deutsche Windkraftwerke massenweise lahm. Markt und Mittelstand online vom 04.05.2022. Online unter www.marktundmittelstand.de/zukunftsmaerkte/seit-kriegsausbruch-hacker-legen-deutsche-windkraftwerke-massenweise-lahm

8 Schuster, Sigurd / Düser, Michael / Herr, Christine / Ostertag, Manuel / Steinke, Florian / Tusch, Jürgen (2024): Mehr Resilienz für die Strom- und Kommunikationsnetze in Deutschland. Wie gehen wir mit den zunehmenden gegenseitigen Abhängigkeiten um? VDE Impulspapier. Offenbach am Main: Eigendruck Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.



Die Kombination aus 6G und KI wird zum Gamechanger – nicht nur für Industrie, sondern auch für Pflege und Handwerk. Intelligente Systeme können Aufgaben übernehmen, für die heute schlicht die Menschen fehlen. Wer 6G clever nutzt, gleicht demografische Lücken durch digitale Effizienz aus.«

THOMAS HÖSCHELE

Geschäftsführer (CEO), CampusGenius GmbH



Der Weg zum 6G-Standard



2.1 Wo stehen wir mit 5G?

5G ist die fünfte Generation des Standards für Mobilfunktechnik, der international eingesetzt wird. Er soll gegenüber seinem Vorgänger höhere Übertragungsgeschwindigkeiten, geringere Verzögerungen (sogenannte Latenzen) sowie mehr gleichzeitige Verbindungen ermöglichen und dabei zuverlässiger und energieeffizienter sein. Der erste Schritt, der den Wechsel von 4G zu 5G markierte und technische Grundlagen festlegte, war das im Jahr 2018 erschienene Release 15 des internationalen Standardisierungsgremiums 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Dieses Release beinhaltet jedoch noch die Nutzung des alten Kernnetzes von 4G und umfasste nicht den vollen Leistungsumfang von 5G. Seitdem wurde der Standard in den Releases 16 bis 18 kontinuierlich weiterentwickelt. Die zukünftigen Releases 19 und 20 sollen den Standard in Richtung 6G weiterentwickeln. 5G umfasst zum ersten Mal auch den Einsatz von Frequenzen über 24 GHz, die als „mmWave“ bezeichnet werden, deren Einsatz sich jedoch aufgrund der geringen Reichweite auf ausgewählte Anwendungen beschränkt. Auch werden die Grundlagen

für KI-getriebene Designs, Verbesserungen durch nicht-terrestrische Netze und die direkte Kommunikation zwischen Endgeräten in nicht-lizenzierten Spektren gelegt.

Die Markteinführung der Netze und Geräte begann weltweit im Jahr 2019 und dauert weiterhin an, wobei aktuell in vielen Ländern ländliche Regionen erschlossen werden. Um die regulatorischen Grundlagen für den Einsatz von 5G zu legen, hat die Bundesnetzagentur (BNetzA) 2019 die wichtigsten 5G-Frequenzen an die drei großen öffentlichen Mobilfunkanbieter (Deutsche Telekom, Vodafone, Telefónica) sowie an den Telekommunikationsanbieter 1&1 versteigert. Aufgrund der hohen Investitionskosten hat die Einführung von 5G gezeigt, dass Kooperationsmodelle zum Aufbau und zur gemeinsamen Nutzung der Infrastruktur relevant sind, um am Markt erfolgreich zu sein.

Für Endkunden war die Einführung von 5G davon geprägt, dass zunächst nur wenige und teure Endgeräte verfügbar waren. Zusätzlich wurde der tatsächliche Mehrwert

der neuen Technologie häufig nicht unmittelbar ersichtlich, was auch darauf zurückzuführen ist, dass sich 5G im ersten Release 15 noch nicht deutlich von 4G unterschied. In der ersten Phase des 5G-Aufbaus hat sich auch gezeigt, dass andere Regionen – insbesondere ostasiatische Länder – prioritär mit modernsten 5G-Netzkomponenten versorgt wurden und in Europa ein zeitlicher Verzug bestand. Gemäß Bundesnetzagentur (BNetzA) werden 92 Prozent der Fläche der Bundesrepublik durch mindestens einen Netzbetreiber mit 5G versorgt (Stand April 2024), bei 5G SA (Stand Alone: vollständige und eigenständige Netzinfrastruktur mit höheren Datenübertragungsraten und geringeren Latenzzeiten) sind es 90 Prozent. Allerdings ist die Nutzung von 5G noch geringer, als es die Abdeckung erwarten lässt. Laut Umfrage des Vergleichsportals Verivox vom Februar 2024 haben 45,1 Prozent der Smartphone-Nutzer:innen auch 5G genutzt. Nichtsdestotrotz ist mit einem zunehmenden Anstieg der 5G-Nutzung im Konsumenten-Markt zu rechnen, zumal die drei großen Netzbetreiber Deutsche Telekom, Telefónica und Vodafone 5G in ihre Kernmarken integriert haben. Angesichts der Erwartung, dass sich der mobile Datenverkehr weltweit bis zum Jahr 2030 vervierfachen soll, kann von einer damit verbundenen Marktdurchdringung von 5G im Konsumentenmarkt ausgegangen werden.⁹

Neben öffentlichen Netzen eröffnet 5G Unternehmen und anderen Organisationen die Möglichkeit maßgeschneiderte, sichere und optimierte private Funknetze auf ihrem Gelände einzusetzen (sogenannte Campusnetze). Dafür müssen in Deutschland bei der BNetzA Frequenzen im reservierten Bereich 3,7 bis 3,8 GHz beantragt werden. Stand März 2025 hat die BNetzA 462 Frequenzzuteilungen für solche Campusnetze ermöglicht. Deutschland war durch frühzeitige Regulierung und die Umsetzung von Pilotprojekten internationaler Vorreiter bei der Nutzung von Campusnetzen, insbesondere im Bereich Industrie 4.0, in dem vernetzte und digitale Produktionsprozesse eine wichtige Rolle spielen. Dennoch bleibt die Nutzung laut einer aktuellen, öffentlichen Konsultation des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) hinter den Erwartungen zurück.¹⁰ Das wird unter anderem darauf zurückgeführt, dass kompatible Endgeräte spät verfügbar gewesen seien, Anwendungen mit niedriger Latenz noch nicht ausreichend unterstützt worden seien und die technischen Fähigkeiten für aktuelle Einsatzszenarien noch nicht benötigt worden seien. Dennoch wird eine um 15 bis 30 Prozent höhere Nachfrage für die kommenden Jahre erwartet. Die steigende Nachfrage wird durch zu

erwartbar sinkende Preise und steigende Ausrüsterdiversität für Campusnetze begleitet. Ein wesentlicher Akteur bei der privaten Nutzung von 5G ist die internationale Initiative 5G-ACIA (5G Alliance for Connected Industries and Automation), die sich auf die Bereiche Fertigung und Produktion fokussiert. Die 5G-ACIA mit Sitz Frankfurt am Main ist aus der Förderinitiative „Industrielle Kommunikation der Zukunft“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) hervorgegangen und unterstreicht die treibende Rolle Deutschlands.

Parallel zur Einführung von 5G gewann das Konzept Open RAN an Unterstützung. So bezeichnet man die Architektur eines Funkzugangsnetzes, das – anders als klassische, monolithische Systeme – aus voneinander getrennten Hardware- und Softwarekomponenten besteht, die über offene Schnittstellen miteinander interagieren. Damit soll es möglich sein, dass Komponenten unterschiedlicher Hersteller interoperabel und flexibel zusammengeschaltet werden können. Perspektivisch kann so ein reichhaltiges Ökosystem an Technologieanbietern entstehen, das aufgrund des offenen Wettbewerbes günstige, maßgeschneiderte und updatebare Lösungen hervorbringt. Wesentlich für die Entwicklung entsprechender Standards ist die internationale O-RAN-Alliance. In den vergangenen Jahren hat die US-Regierung das Thema Open RAN massiv unterstützt. In Deutschland fördert das BMDV seit dem Jahr 2021 das von der Deutschen Telekom geleitete i14yLab und weitere Projekte zu „Innovativen Netztechnologien“. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unterstützte mit dem Projekt „CampusOS“ den Aufbau eines Ökosystems für 5G-Campusnetze auf Basis offener, modularer und interoperabler Funktechnologien.

2.2 6G – Fähigkeiten und Anwendungsszenarien

6G wird demnach sechs neue Fähigkeiten mitbringen. (1) Zuerst ist die Netzabdeckung zu nennen, die bisher nur über Regulierungsbehörden vorgegeben wurde. Mit 6G wird sie eine elementare Fähigkeit. (2) Hinsichtlich der Nachhaltigkeit ist das Ziel, bei der Netzinfrastruktur als auch bei den Endgeräten den Ausstoß von Treibhausgasen und andere schädliche Auswirkungen auf die Umwelt zu minimieren. (3) Auch sollen sensorische Fähigkeiten hinzukommen, die mit Hilfe des Funksignals Objekterkennung, Lokalisierung, Bildgebung und Kartografierung ermöglichen. (4) Zudem soll die Funkschnittstelle möglichst viel

9 GSMA Intelligence (2024): The Mobile Economy 2024. Online unter www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2024/02/260224-The-Mobile-Economy-2024.pdf

10 Bundesministerium für Digitales und Verkehr (2025): Auswertung der Konsultation „5G für die Wirtschaft: Wie verhelfen wir Schlüsseltechnologien wie 5G/6G in vertikalen Industrien zum Durchbruch?“. Online unter www.bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/auswertung-konsultation-5g-fuer-die-wirtschaft.pdf?__blob=publicationFile

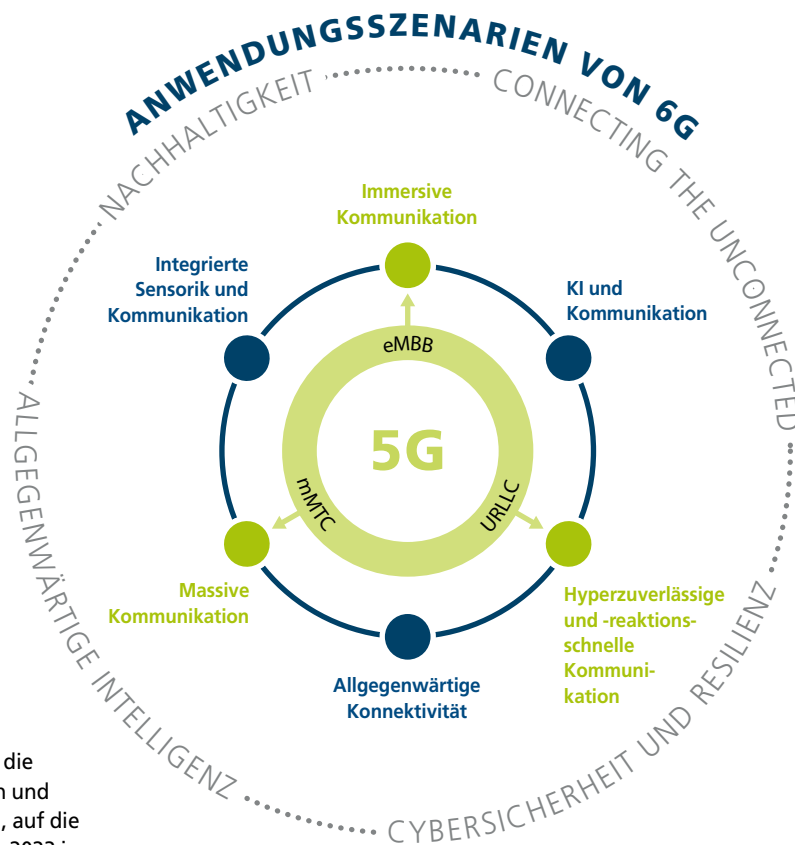


Abbildung 1 illustriert die Anwendungsszenarien und die neuen Fähigkeiten, auf die man sich im November 2023 im Funkkommunikationssektor der Internationalen Fernmeldeunion (ITU-R) geeinigt hat. Für die Spezifikation von 6G wurden damit die Leitplanken vorgegeben.



Interoperabilität durch hohe Transparenz der modularen Funktionen bieten. (5) Ein entscheidender Faktor sollen die KI-nativen Fähigkeiten sein, die Anwendungen wie verteilte Datenverarbeitung, verteiltes Lernen, Computing, KI-Modell-Ausführung und Inferenzanalysen ermöglichen. (6) Die sechste neue Fähigkeit ist die Positionierung, die die genaue Standortbestimmung von verbundenen Geräten zulässt. Gegenüber 5G wird es Verbesserungen bezogen auf die Cybersicherheit, Resilienz, Zuverlässigkeit, Latenz, Mobilität, der Anzahl der verbundenen Geräte pro Fläche, Kapazität in der Fläche, spektraler Effizienz, erlebter Nutzerdatenrate und der Spitzendatenrate geben.

In Abbildung 1 wird die Erweiterung der Anwendungsszenarien dargestellt. Bei 5G sind es weiterentwickelte Breitbandfähigkeiten (eMBB), ultra-zuverlässige niedrig-latente Kommunikation (URLLC) und massive maschinen-spezifische Kommunikation (mMTC). Bei 6G werden sechs Anwendungsszenarien definiert:

- **Immersive Kommunikation** bietet ein detailreiches und interaktives Videoerlebnis. Eine Interaktion über Maschinenschnittstellen ist möglich. Eine Anwendung wird in der Kommunikation für Extended-Reality (XR), Telepräsenz unter Einbindung verschiedener Sinneswahrnehmungen oder holographischer Kommunikation liegen.
- **Hyperzuverlässige und -reaktionsschnelle Kommunikation** soll in industriellen Umgebungen dazu beitragen, die vollständige Automatisierung, Regelung und Steuerung zu verbessern. Konkrete Anwendungen liegen zusätzlich in der Notfallversorgung, Telemedizin und intelligenten Stromnetzen (sogenannte „Smart Grids“).
- **Allgegenwärtige Vernetzung** soll dazu beitragen, die digitale Teilhabe in abgelegenen oder ländlichen Gebieten zu stärken, die bisher nicht oder mangelhafte Breit-

bandversorgung erfahren haben. Technologisch eignen sich zur Umsetzung der allgegenwärtigen Vernetzung nicht-terrestrische Netze (Details hierzu in der Infobox).

- **Massive Kommunikation** unterstützt die Verbindung von vielen Geräten oder Sensoren in der Fläche. Anwendungen findet man in der Umweltüberwachung, in Smart Cities, in der Logistik, Gesundheitsversorgung oder Transportwirtschaft.
- **Künstliche Intelligenz und Kommunikation** wird bei 6G als allgegenwärtige native KI-Architektur zusammengeführt. Diese Architektur bietet eine verteilte Dateninfrastruktur, autonomen Betrieb und Netzwerkfunktionen und stellt als Dienste über „AI as a Service“ bereit. Auch werden Rechenressourcen für Anwendungen mit 6G erwartet. Davon profitieren das vernetzte autonome Fahren, die autonome Kollaboration zwischen Maschinen, die Generierung von und Vorhersagen zu cyberphysischen Zwillingen sowie die Auslagerung von komplexen Berechnungen zwischen den Geräten und dem Netz.
- **Integrierte Sensorik und Kommunikation** wird ermöglichen, dass das Netz auch sensorische Fähigkeiten erhält, um Objekte zu erkennen, Bewegungen zu verfolgen, Aktivitäten zu erkennen und die Umwelt zu überwachen. Die sensorischen Fähigkeiten können auch zur Generierung und Aktualisierung von cyberphysischen Zwillingen dienen (Details hierzu in der Infobox).

Die Vorgaben der ITU-R zu den Fähigkeiten und Zielleistungsparametern sind die Grundlage für die Entwicklung der Spezifikation von 6G. Wie bei den drei jüngsten vorherigen Mobilfunkgenerationen ist die 3GPP das maßgebliche internationale Standardisierungsgremium für die Spezifikation.

Gut zu wissen: Aussichtsreiche 6G-Technologien

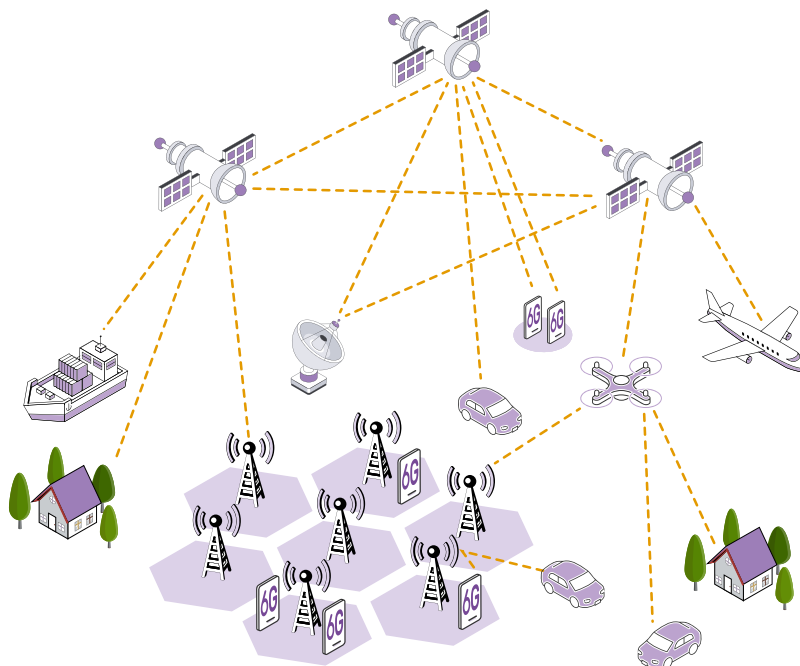
Nicht-terrestrische Netze

oder auch zuweilen 3D-Netze genannt, die insbesondere Satelliten, Drohnen und unbemannte Luftfahrzeuge umfassen, bieten eine Lösung zum Erreichen der allgegenwärtigen Vernetzung. Darüber hinaus können sie in Störszenarien der zivilen Sicherheit wichtige Beiträge liefern. Mögliche Ausfälle des terrestrischen (bodengebundenen) Mobilfunks in Katastrophenlagen, wie Stromausfall, Fluten, Erdbeben, Sabotage oder Kriegseinwirkungen, können in einer stark vernetzten Gesellschaft zu Desinformation, Panik und bedrohlichen Versorgungslücken führen. Die Notwendigkeit von resilienten Mobilfunknetzen wird in diesem Zusammenhang klar. Der Funkzugang erfolgt bei 3D-Netzen über Netzelemente im Luftraum oder im Weltraum. Satelliten sind geeignet um große Flächen, wie beispielsweise ganz Deutschland, abzudecken. Drohnen mit Verbrennungsantrieb können Gebiete von mehreren Quadratkilometern für mehrere Stunden abdecken. Ballone, Fesseldrohnen und Drohnen können schnell zum Einsatz kommen und kleinere Gebiete mit Mobilfunk für Zivilpersonen oder Einsatzkräfte versorgen.

Mit der integrierten Sensorik und Kommunikation (ISAC)

kann das Mobilfunknetz mehr als nur Kommunikationsinfrastruktur sein. Konkret heißt dies, dass die Hardware und die Signalverarbeitung im selben Funkspektrum zur Datenübertragung als auch zur sensorischen Erfassung der Umwelt genutzt werden. Die mittels ISAC erfassten Umgebungsdaten können sowohl unabhängig als auch in Kombination mit Daten anderer Sensorsysteme zusammengeführt werden, um eine detailliertere Erfassung der Umgebung zu erreichen oder die Genauigkeit einer Lokalisierung zu erhöhen. Mit ISAC ist neben einer drastisch erhöhten Genauigkeit auch die Lokalisierung von Objekten möglich, welche nicht mit dem Netz verbunden sind. Aufgrund des sich daraus ergebenden Potenzials zur Nachverfolgung von Personen müssen jedoch Fragen des Datenschutzes und der Privatsphäre gelöst werden. ISAC-Systeme müssen auch einen klaren Mehrwert gegenüber etablierten Sensorsystemen hinsichtlich ihrer Leistung und Kosten aufzeigen.

6G führt zu nahtloser Abdeckung durch 3D-Netze



2.3 Zeitplan der Standardisierung

Die Spezifikation von 6G wird in der 3GPP vorangetrieben, welches eine weltweite Kooperation der regionalen Standardisierungsorganisationen ARIB, ETSI, ATIS, TTA, TTC, CCSA und TSDSI ist. In der ersten Studienphase wurden bis März 2025 die relevanten Anwendungsfälle von 6G identifiziert. Aus den Anwendungsfällen werden die technischen Anforderungen an die zukünftige Spezifikation abgeleitet. Mit dem 6G-Workshop vom 11. bis 12. März 2025 in Incheon (Südkorea) wurde der Startschuss für die Standardisierung von 6G gelegt. Ziel des Workshops war es, ein gemeinsames Verständnis für die Vision und die Prioritäten der 6G-Spezifikation zu erlangen. Eine abschließende Einigung wurde nicht getroffen.¹¹ Weiterführende Gespräche folgen in der ab Juni 2025 stattfindenden zweiten Studienphase, in der Dienste, Architektur, Funkzugangsschnittstelle und das Kernnetz von 6G betrachtet werden. Die Spezifikation der Mobilfunkstandards ab 4G erfolgte in Versionsschritten, sogenannten Releases. Auch wenn die Mobilfunkgenerationen technisch in sich geschlossen sind, werden die Releases weiter hochgezählt. So findet die Studienphase zu 6G in Release 20 statt, in der auch die letzten Spezifikationen von 5G (Advanced) beschlossen wird. Mit dem Abschluss der 6G-Studienphase, die etwa im Juni 2026 erwartet wird, beginnt die tatsächliche (Detail-)Spezifikation von 6G. Mit der ersten 6G-Spezifikation im Release 21 ist ab März 2029 zu rechnen. Nach erfolgreicher Evaluation und Prüfung durch die ITU-R wird die Spezifikation von den regionalen Partnerorganisationen der 3GPP als internationaler Standard übernommen. Mit einer Markteinführung von 6G ist also um das Jahr 2030 zu rechnen. Entscheidend für die Einführung von 6G werden zudem die Ergebnisse der Weltfunkkonferenz 2027 in Dubai (Vereinigte Arabische Emirate) sein. Dort wird beschlossen, welche neuen Funkfrequenzen für 6G nutzbar werden. 6G wird dann in weiteren Releases auspezifiziert. In der Vergangenheit sind rund 18 Monate zwischen den Releases vergangen. Wahrscheinlich wird sich dieser Zyklus auf 24 Monate verlängern.

2.4 Internationale 6G-Programme

Unternehmen und Länder der Welt stehen im Wettbewerb, um die nächste Generation von Mobilfunknetzen/-technologien zu gestalten und zu errichten. Der Wettbewerb um 6G ergibt sich aus dem Ansporn, die Technologieführerschaft und somit eine starke Ausgangsposition im Markthochlauf zu erringen. In Europa geht es neben wirtschaftlichen Interessen auch um die digitale und technologische

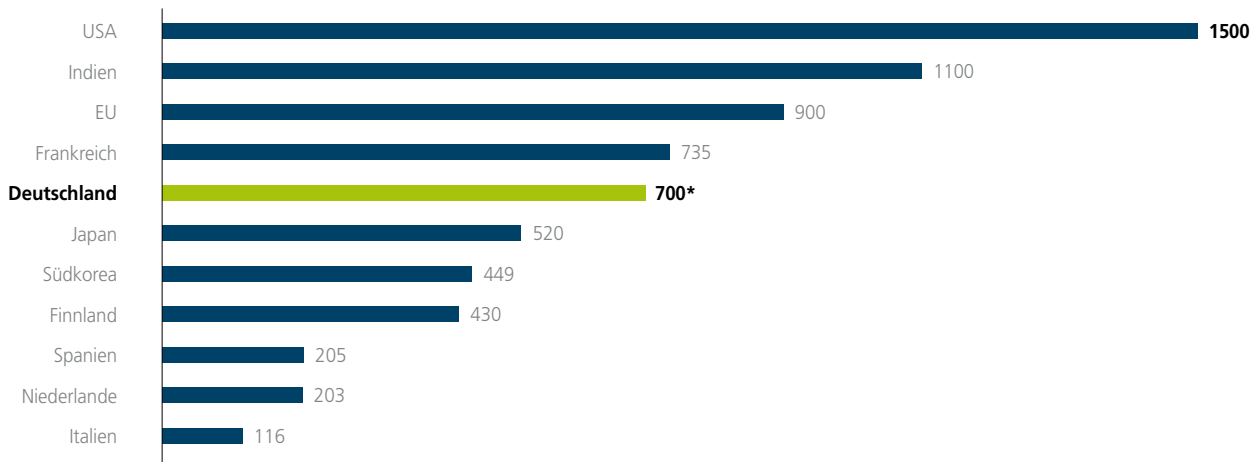
Souveränität der EU im Rahmen ihrer Digitalen Dekade. Die EU unterstützt mit dem kollaborativen Forschungsprogramm Smart Networks and Services Joint Undertaking (SNS JU) die Erforschung von 6G mit 900 Millionen Euro von 2021 bis 2027. Auch Mitgliedstaaten wie die Niederlande (203 Mio. Euro), Spanien (205 Mio. Euro), Italien (116 Mio. Euro), Frankreich (735 Mio. Euro), Finnland (381 Mio. Euro, 2018 bis 2026) und Deutschland (700 Mio. Euro bis 2025 – zusätzliche Mittel bis 2029 aufgrund Regierungsbildung noch ungewiss) haben zusätzlich eigene Forschungs- und Innovationsprogramme gestartet (Abbildung 2). Die nationalen Programme greifen die Anforderungen der ansässigen Branchenstruktur auf und entwickeln 6G-Technologien auf Basis der vorhandenen Technologieunternehmen und Netzbetreiber.

Asiatische Vorreiter der 5G-Umsetzung sind auch bei der Entwicklung von 6G sehr aktiv. So hat Südkorea im Februar 2023 seine „K-Network 2030“ Strategie mit dem Ziel veröffentlicht, die beste 6G-Technologie der Welt zu schaffen. Das koreanische Ministerium für Wissenschaft und IKT stellt dafür ca. 388 Millionen Euro bereit. In Chinas 14. Fünfjahresplan (2021 bis 2025) ist die Stärkung der Forschung zu 6G ein wichtiges Ziel. Chinas „IMT-2030 (6G) Promotion Group“ ist die zentrale Plattform, die die Förderung von 6G und internationale Kooperation vorantreibt. Es gab zwar öffentliche Förderaufrufe zur Erforschung, es wurden jedoch keine Informationen zu den bereitgestellten Mitteln kundgegeben. Wesentliche Investitionen in die 6G-Forschung werden von chinesischen Unternehmen selbst getragen. In Japan wurde der Weg hin zu 6G im Juni 2020 durch die „Beyond 5G Promotion Strategy“ geebnet, um die Wettbewerbsfähigkeit in dem Technologiesektor wiederherzustellen. Für diesen Zweck stellte das japanische Ministerium für Inneres und Kommunikation rund 498 Millionen Euro bereit. Koordiniert werden die japanischen Aktivitäten durch das „Beyond 5G Promotion Consortium“, das Vertreter japanischer Unternehmen, Universitäten und Forschungseinrichtungen zusammenbringt. Indien hat mit seiner „Bharat 6G Vision“ im März 2023 seine Ambitionen verkündet, beim Design, der Entwicklung und dem Ausbau von 6G-Netztechnologien bis zum Jahr 2030 maßgebliche Beiträge zu liefern. Zum Aufbau von Indiens 6G-Ökosystem sollen innerhalb von 10 Jahren etwa 1,06 Milliarden Euro investiert werden.

Die US-Regierung hat strategische Allianzen mit Partnern aus Europa, Indien, Südkorea, Japan und dem Vereinigten Königreich geschlossen. Die „Next G Alliance“ treibt die Entwicklung von 6G-Technologien in Nordamerika voran. Die Bemühungen werden im Wesentlichen durch

11 Leiter der technischen Spezifikationsgruppe der 3GPP (2025): Chair's summary of the 3GPP Workshop vom 11.03.2025.
Online unter www.3gpp.org/ftp/workshop/2025-03-10_3GPP_6G_WS/Docs/6GWS-250244.zip

Abbildung 2: Zur Verfügung gestellte Mittel zur Erforschung und Entwicklung von 5G- und 6G-Technologien im Zeitraum von 2021 bis 2027 (in Mio. Euro)



* Aufgrund einer neuen Regierungsbildung liegen die Zahlen nur bis 2025 vor

die Unternehmen getragen. Mitglieder sind Organisationen und Experten aus der Industrie, der Regierung und der Forschung mit Bezug zu 6G. Insgesamt stellt die US-Regierung 1,5 Milliarden US-Dollar, um 5G und 6G-Technologien mit dem Ziel zu entwickeln, eigene Netzkomponenten bzw. Komponenten von vertrauenswürdigen Partnern in den Mobilfunknetzen einsetzen zu können.

In Deutschland gliedern sich die Projekte im Wesentlichen in drei Arten. Es gibt das Schirmprojekt „Plattform für zukünftige Kommunikationstechnologien und 6G“ (6G-Plattform), welches wissenschaftliche Beiträge generiert, aber auch wissenschaftlich-organisatorisch die existierenden Prozesse zur erfolgreichen Umsetzung des deutschen 6G-Programms unterstützt. Die zweite Art von Projekten sind die 6G-Forschungs-Hubs. Sie bringen herausragende Fähigkeiten der anerkanntesten Universitäten und Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der 6G-Forschung zusammen und sollen die Innovationspipeline gefüllt halten. Die dritte Art von Projekten stellen 28 Industrieprojekte und Projekte zu Hochgeschwindigkeitsnetzen für Hyperkonnektivität dar. Die industriegeführten Verbünde sollen dafür sorgen, dass die Forschung zu grundlegenden Technologien perspektivisch in die wirtschaftliche Umsetzung geführt wird. Es gibt aktuell Kooperationsvereinbarungen mit dem europäischen SNS JU und dem japanischen 6G-Programm. Darüber hinaus gibt es europäische Kooperationen zur Automatisierung von glasfaserbasierten Kommunikationsnetzen und zu nachhalti-

gen Technologien für fortschrittliche, widerstandsfähige und energieeffiziente Netze. Verglichen mit den internationalen Programmen hat Deutschland hohe Investitionen in die Förderung der 6G-Forschung getätigt, wichtige Ergebnisse in die Flaggschiffprojekte der europäischen SNS JU einbringen können und internationale Kooperationen angestoßen. Deutschland ist bisher gut in der 6G-Forschung aufgestellt. Die Finanzierung für eine weiterführende Förderung im Zeitraum zwischen 2026 bis 2030 muss durch die Bundesregierung noch geklärt werden.

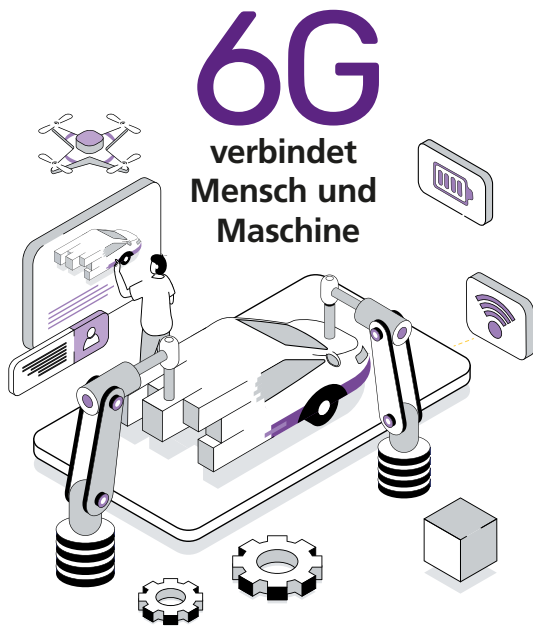
2.5 Zukunftsanwendungen

Auch wenn bereits zahlreiche Anwendungsfälle¹² für 6G identifiziert wurden, werden im Folgenden nur die wesentlichen Anwendungsbereiche vernetzte Fabrik, Gesundheitsversorgung, vernetztes Fahren und missionskritische Anwendungen beschrieben.

2.5.1 Vernetzte Fabrik

Die Integration von digitalen Technologien und intelligenter Vernetzung in Fertigungsprozessen und Industrieanlagen wird oft als vierte industrielle Revolution bezeichnet. Der zugehörige Begriff der Industrie 4.0 wurde entscheidend in Deutschland geprägt. Die Vorteile einer vernetzten Fabrik sind vielfältig. Einfache Beispiele reichen von der

12 Franchi, Norman / Dressler, Falko / Ergenç, Doğanalp, / Guter, Paulus / Lassen, Vincent / Lübke, Maximilian / Veihelmann, Tobias (Hrsg.) (2024): German perspective on 6G – Use Cases, Technical Building Blocks and Requirements. Insights by the 6G Platform Germany. White Paper, FAU Studien aus der Elektrotechnik 28, Erlangen: FAU University Press



Verfolgung von Warenflüssen innerhalb einer Prozesskette bis zur Fernsteuerung einzelner Anlagen. 6G wird mit der Möglichkeit zur Übertragung von hochaufgelösten Sensordaten und der Kommunikation mit minimaler Latenz dazu beitragen, diese Anwendungen noch leistungsfähiger zu gestalten. Die Verbindung von nahezu latenzfreier Kommunikation und Sensorik ermöglicht es beispielsweise, stationären Produktionsrobotern und mobilen Transporteinheiten autonom zu kooperieren und so flexibel Prozesse ausführen und die menschlichen Arbeitskräfte entlasten zu können. Darüber hinaus kann 6G jedoch auch gänzlich neue Technologien nutzen und als Plattform für die Integration von KI und cyberphysischen Zwillingen die Smarte Fabrik auf eine neue Stufe heben und das Verschmelzen der digitalen und der physischen Welt ermöglichen.

6G bietet auch abseits großer Fabriken Chancen für die Wirtschaft. Mit der Integration von Satelliten und mobilen unbemannten Drohnen in 3D-Netze wird die lückenlose Abdeckung mit hochratigem Mobilfunk zum Standard. Logistikunternehmen profitieren von einem nahtlosen „Handover“ zwischen terrestrischen und nicht-terrestrischen Netzen und können so durchgängig die Qualität ihrer Güter von den lokalen Netzen der Produktionsstätte, über den Mobilfunk entlang des Lieferwegs bis zur Kommunikationsinfrastruktur des Endkunden gewährleisten.

2.5.2 Gesundheitsversorgung

Die Gesundheitsversorgung steht durch demografische und strukturelle Veränderungen vor großen Herausforderungen. Die überalterte Bevölkerung erfordert eine komplexe medizinische Versorgung. Insbesondere im ländlichen Raum sinkt jedoch die Anzahl der Krankenhäuser. Dieses Problem wird durch den sich verschärfenden Fachkräftemangel im Gesundheitswesen weiter verstärkt. Um die medizinische Versorgung auf höchstem Niveau unabhängig vom Wohnort innerhalb Deutschlands zu gewährleisten, braucht es innovative Lösungen, wie sie moderne Kommunikationstechnologien, beispielsweise durch Telemedizin und KI-gestützte Diagnosen, ermöglichen.

Obwohl in den vergangenen Jahren signifikante Fortschritte im Bereich der Telemedizin erzielt wurden, stehen diese im Alltag nur sehr eingeschränkt zur Verfügung. Es besteht ein Bedarf an robuster, latenzarmer und verlässlicher Kommunikationsinfrastruktur als Grundlage für den flächendeckenden Einsatz dieser Innovationen. Die bestehende Infrastruktur ist beispielsweise weder auf die Echtzeiterfassung und Verarbeitung von großen Mengen von Sensordaten noch auf eine native Integration von KI ausgelegt. Die immersive Kommunikation, die allgegenwärtige Konnektivität und die sensorischen Fähigkeiten des Netzes werden für Innovationen im medizinischen Sektor sorgen.

Zum Beispiel wird die Versorgung durch spezialisierte Fachkräfte im ländlichen Raum durch den Einsatz von sogenannten Extended-Reality-Anwendungen (XR) ermöglicht, die die reale Welt mit virtuellen Elementen kombinieren. Außerdem wird die gesamte Versorgungskette vom Unfallort über den Transport im Rettungswagen, die Behandlung im Krankenhaus und die ambulante Nachsorge durch die Verwendung kontaktloser Sensorik, Echtzeitdatenübertragung und KI-gestützter Diagnostik maßgeblich verbessert.

2.5.3 Vernetztes Fahren

Im Mobilitätssektor sorgt die Vernetzung einzelner Verkehrsteilnehmender für mehr Sicherheit. Um Kollisionen und Unfälle zu vermeiden, müssen die Verkehrsteilnehmenden ihre Umgebung präzise und kontinuierlich erfassen. Zwar verfügen immer mehr Fahrzeuge über fortschrittliche Sensorik, jedoch erfolgt die Erfassung der Umgebung in der Regel entkoppelt von anderen Verkehrsteilnehmenden und nicht vernetzt, was zwangsläufig zu einer eingeschränkten Erkennung der Umgebung führt.

Im öffentlichen Raum kann durch die Vernetzung der Verkehrsinfrastruktur und -teilnehmenden der Verkehrsfluss effizienter mit integrierter Sensorik und Kommuni-

kation (ISAC) gestaltet werden. Für autonome Fahrzeuge und Transportplattformen kann in industriellen Umgebungen, in denen vermehrt 5G-Campusnetze eingesetzt werden, unter anderem die Navigation in Gebäuden verbessert werden. Je nach Ausprägung der Integration von Kommunikationssystemen und Sensorik können hierbei Sensorsysteme verschiedener Fahrzeuge im Sinne des vernetzten Fahrens miteinander Sensordaten austauschen und gemeinsam ein viel genaueres Abbild der Umgebung generieren als ein Einzelfahrzeug. Außerdem führt die Nutzung von ein und demselben Funkkanal sowohl zur Übertragung von Daten als auch zur Umgebungswahrnehmung zu einer effizienteren Nutzung des knappen Funkspektrums.

Der Einsatz von 6G für kooperative autonome Systeme eröffnet Chancen für die deutsche Wirtschaft, beispielsweise für den Einsatz von Lastfahrzeugen in industriellen Hallen oder für den automatisierten Betrieb von Arbeitsgeräten in der Landwirtschaft. In der Logistikbranche ist durch den Einsatz von kooperativen autonomen Systemen eine Steigerung der Effizienz und somit der Wirtschaftlichkeit der Unternehmen zu erwarten. Darüber hinaus profitiert von der Entwicklung der zugrundeliegenden Technologien in Deutschland maßgeblich auch die Automobilbranche und die gesamte Zulieferungskette.

2.5.4 Missionskritische Anwendungen

Als missionskritische Anwendungen werden hochleistungsfähige, belastbare und sichere mobile Breitbandkommunikationsdienste für kritische Einsätze bezeichnet. Beispielsweise können solche Funksysteme für die Koordination von Einsätzen bei der Polizei, der Feuerwehr, den Rettungsdiensten und dem Katastrophenschutz genutzt werden. Neben dem veralteten analogen Funksystem wird in Deutschland seit den 1990er-Jahren auch der digitale Bündelfunk TETRA (Terrestrial Trunked Radio) für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben eingesetzt, welcher Sprach- und Datenverbindungen verschlüsselt. Aufgrund beschränkter Bandbreiten stehen jedoch nur geringe Datenraten zur Verfügung. Der Bedarf an

Informationsaustausch der Einsatzkräfte ist in den vergangenen Jahren aber gestiegen. Daher wird derzeit an standardisierten Lösungen gearbeitet, sogenannte MCS-Funktionen, die Dienstleistungen mit hoher Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Sicherheit über 4G-, 5G- und zukünftig 6G-Netze zur Verfügung stellen und Schnittstellen zu drahtlosen WiFi-Netzwerken, Einsatzleitstellen und TETRA-Netzen anbieten werden

Hierdurch werden Lösungen realisierbar, welche verschiedene Gruppen von Einsatzkräften unterstützen sowie koordinieren können und insbesondere eine flächendeckende Versorgung garantieren können. Bei unterbrochener Netzverbindung werden einzelne Basisstationen autark arbeiten können. Bei einer zerstörten Infrastruktur wird der dynamische Aufbau von mobilen Basisstationen möglich. Der Einsatz von Drohnen kann hierbei schnell größere Einsatzgebiete abdecken. Die Nutzung von Satelliten kann einzelne Basisstationen oder Endgeräte mit den getrennten Netzen verbinden. Redundante 6G-Netze werden den sicheren ferngesteuerten oder automatischen Flug von Drohnen zum Einsatzort erlauben, sodass sich die Einsatzleitung noch vor dem Eintreffen der Hilfskräfte einen Überblick über die Vor-Ort-Situation verschaffen kann und die Einsatzkräfte noch während der Hinfahrt mit ausgearbeiteten Einsatzkarten versorgen kann. In sicherheitskritischen Umgebungen könnten beispielsweise mit ISAC Drohnen detektiert und verfolgt werden. Beispielsweise können mit den Kameras der Drohnen und dezentraler Datenverarbeitung (sogenanntes „Edge-Computing“) verletzte Personen und Brandnester automatisiert bei Großbränden ausfindig gemacht werden. Durch echtzeitfähige Daten- und Bildübertragungen in 6G können auf Smartphones, auf XR-/VR-Brillen oder in Schutzmasken Orientierungshinweise eingeblendet werden, um schnelle und sichere Rettungsmaßnahmen zu ermöglichen.

6G wird zum Erreichen dieser Ziele insbesondere die Interoperabilität zwischen verschiedenen Funksystemen, die Integration von KI, das Verbinden unterschiedlicher Anwendungen und die nahtlosen Übergänge zu Satellitenverbindungen unterstützen.



6G wird zur Plattform für neue digitale Geschäftsmodelle – wer heute schon Netze versteht, wird morgen Dienste verkaufen, die es bisher nicht gab. Die Chancen liegen nicht nur in der Infrastruktur, sondern in den Anwendungen, die daraus entstehen. Kommunikation wird zur Plattformökonomie – und das verändert ganze Wertschöpfungsketten. Das bedeutet auch: Die Regeln der klassischen Telko-Welt werden drastisch erweitert.«

NIELS KÖNIG

Abteilungsleiter Produktionsmesstechnik,
Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT)



Der Blick nach vorne: Die Bedeutung von 6G für die gesellschaftliche und wirtschaftliche Transformation



Im Jahr 2021 veröffentlichte das BMBF die Förderrichtlinie „6G-Industrieprojekte zur Erforschung von ganzheitlichen Systemen und Teiltechnologien für den Mobilfunk der 6. Generation“. Darin heißt es einleitend: „Es ist [...] ein strategisches Ziel für Deutschland, Schlüsseltechnologien im Mobilfunk selbst mitgestalten zu können. Damit wird die Grundlage geschaffen, dass die in Europa verwendeten Netzwerktechnologien den Handlungsgrundsätzen der europäischen Politik für einen offenen Digitalraum entsprechen und die sogenannten „Values by Design“ in die Systeme mit eingehen. Im Zentrum dieser zu berücksichtigenden Werte stehen die Würde des Menschen und dessen Selbstbestimmung, Privatheit und Sicherheit in einer gefestigten Demokratie sowie Gerechtigkeit, Solidarität

und Nachhaltigkeit. Diese Werte sind an das Kernprinzip von Artikel 25 der Datenschutz-Grundverordnung angeknüpft, der „Data Protection by Design“ als Verordnung festlegt. Neben der maßgeblichen Gestaltung von zukünftigen Kommunikationstechnologien ist ein weiteres wichtiges Ziel, wesentliche und insbesondere (sicherheits-)kritische Systeme bzw. Systemkomponenten deutscher und europäischer Lieferanten in zukünftigen Kommunikationsnetzwerken einsetzen zu können. Durch die Umsetzung beider Ziele wird ein wichtiger Beitrag für die technologische Souveränität für die digitale Transformation geleistet. Deutschland hat in den vergangenen Jahren bereits die Forschung zu innovativen Kommunikationstechnologien und 5G vorangetrieben. Die Entwicklung von 5G konnte

im Bereich Industrie 4.0 maßgeblich durch Deutschland gestaltet werden.“¹³

Vor dem Hintergrund des skizzierten politischen Dreiklangs aus Selbstbestimmung, Privatheit und Sicherheit ist es notwendig, die gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Wirkungen von 6G zu diskutieren, wobei der Blick zwangsläufig in die Zukunft gerichtet ist und somit auf Einschätzungen und Plausibilisierungen beruht. Die Ausgangslage der Betrachtung bildet die Entwicklung von Telekommunikationsnetzen als mobile Infrastruktur und Erfahrungswerte aus der 5G-Implementierung, die auf die zukünftige Einführung von 6G projiziert werden. Die Autoren dieser Studie danken an dieser Stelle den interviewten Expertinnen und Experten für ihre wertvollen Beiträge, die es erlauben, die Zukunft von 6G strukturiert zu skizzieren.

Zur Quantifizierung der zu erwartenden ökonomischen Auswirkungen von 6G wurden von der Gesellschaft für wirtschaftliche Strukturforchung mbH (GWS) quantitative Szenario-Analysen mit dem Modellsystem INFORGE¹⁴ durchgeführt. Das INFORGE-Modell ist ein nach Wirtschaftszweigen, Produktionsbereichen und Gütergruppen tief disaggregiertes ökonometrisches Prognose- und Simulationsmodell für Deutschland, welches mit dem eigenständigen Welthandelsmodell der GWS verknüpft ist. Mit dem Modell wird in der Basisprojektion ein auf der Empirie basiertes Konzept verfolgt: Es werden nur bislang nachweisbare Verhaltensweisen in die Zukunft projiziert. In der Vergangenheit nicht feststellbare Verhaltensänderungen sind somit nicht Teil der Basisprojektion,¹⁵ sodass mit zusätzlichen Annahmen/Input-Größen abweichende Effekte gegenüber der Basisprojektion ermittelt und quantifiziert werden können. In der Szenario-Analyse wurden folgende Annahmen gesetzt: Zwischen 2025 und 2035 wird in das 6G-Netz investiert. Ab 2035 findet 6G in der Produktion Anwendung und führt einerseits zu Arbeitsproduktivitätsgewinnen und andererseits zu höheren Löhnen für hochqualifizierte Fachkräfte. Die Ergebnisse vergleichen jeweils eine Projektion mit Annahmen zum 6G-Ausbau mit der Basisprojektion ohne 6G-Einführung (Referenzszenario).

3.1 Telekommunikationsnetze: Die mobile Infrastruktur der Informationsgesellschaft

Die sechste Mobilfunkgeneration (6G) wird von den interviewten Expert:innen nicht allein als inkrementelle Fortsetzung der bisherigen Entwicklungslinie betrachtet, sondern zunehmend als infrastrukturelle Schlüsseltechnologie verstanden, die weit über klassische Telekommunikationsanwendungen hinausweist. Anders als bei früheren Generationswechseln liege der Fokus bei 6G weniger auf physikalischen Fortschritten, wie etwa neuen Übertragungsverfahren, sondern vielmehr auf konzeptionellen Innovationen. So sei 6G nicht als Revolution, sondern als gezielte Evolution der bestehenden Mobilfunktechnologien zu verstehen, die strukturelle Defizite von 5G adressiert und das System in seiner Nutzbarkeit und Integration deutlich verbessert. Dies deckt sich mit der Einschätzung von im 5G/6G-Kontext tätigen Technologieanbietern: „Die Herausforderung dabei ist, Mobilfunkkommunikation, Sensorik und Rechenleistung nahtlos miteinander weiterzuentwickeln und zu integrieren.“¹⁶

Die im Rahmen dieser Studie interviewten Expert:innen verwiesen in diesem Zusammenhang auf Schwächen der 5G-Implementierung, die sich bislang in hohen Investitionskosten, geringer Ausfallsicherheit und eingeschränkter Integration anderer Kommunikationstechnologien niederschlägt. 6G solle diese Defizite gezielt angehen und insbesondere dort Verbesserungen erzielen, wo 5G noch nicht die in es gesetzten Erwartungen erfüllt habe. Aus Sicht einzelner Befragter sei 5G vor allem im Bereich privater (Campus-)Netze noch nicht über ein experimentelles Stadium in Pilotprojekten hinausgekommen. 6G werde hier als Chance gesehen, einen „Turnaround“ einzuleiten – insbesondere dann, wenn es gelinge, aus den mit 5G gewonnenen Erfahrungen zu lernen und die Anwendungshürden konsequent abzubauen.

Über die reine Netzwerktechnologie hinaus werde 6G zunehmend als Querschnittsinfrastruktur verstanden. Die Technologie diene nicht mehr allein der Datenübertragung, sondern bilde zugleich die Basis für zentrale digitale Schlüsseltechnologien wie Künstliche Intelligenz, Edge Computing oder verteilte Sensornetze. In den Interviews

13 Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021): Richtlinie zur Förderung der „6G-Industrieprojekte zur Erforschung von ganzheitlichen Systemen und Teiltechnologien für den Mobilfunk der 6. Generation“ im Forschungsprogramm für Kommunikationssysteme „Souverän. Digital. Vernetzt.“. Bundesanzeiger vom 13.09.2021. Online unter www.bmbf.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/2021/09/2021-09-13-Bekanntmachung-6G.html

14 Ahlert, Gerd / Distelkamp, Martin / Lutz, Christian / Meyer, Bernd / Mönnig, Anke / Wolter, Marc Ingo (2009): Das IAB/INFORGE-Modell. In: Schnur, Peter und Zika, Gerd (Hrsg.) (2009): Das IAB/INFORGE-Modell: Ein sektorales makroökonomisches Projektions- und Simulationsmodell zur Vorausschätzung des längerfristigen Arbeitskräftebedarfs, IAB-Bibliothek 318, Bielefeld: W. Bertelsmann Verlag: S. 15-135

15 Zika, Gerd / Hummel, Markus / Wolter, Marc Ingo / Maier, Tobias (Hrsg.) (2023): Das QuBe-Projekt: Modelle, Module, Methoden, IAB-Bibliothek 374, Bielefeld: wbv Publikationen

16 Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG (2024): 6G: Manchmal braucht es einen 6. Sinn, damit Ideen Wirklichkeit werden. Warum die Zukunft der Mobilfunk-Kommunikation bereits begonnen hat. Rhode & Schwarz online vom 13.05.2024. Online unter www.rohde-schwarz.com/de/unternehmen/magazine/6g-vision-or-reality/6g-vision-oder-wirklichkeit_255445.html

wurde insbesondere betont, dass KI-Systeme auf große Mengen hochverfügbarer, mobiler und sicherer Daten angewiesen seien – und dass diese nur über leistungsfähige Netzwerktechnologien bereitgestellt werden könnten. 6G werde daher nicht nur als Kommunikationsstandard, sondern als integrative Plattform zur Vernetzung heterogener Systeme beschrieben.

Die strategische Bedeutung von 6G für die gesellschaftliche Digitalisierung wurde ebenfalls hervorgehoben. In Bereichen wie Industrie, Gesundheitsversorgung oder Mobilität kann 6G zukünftig die notwendige Infrastruktur bieten, um Automatisierung, Robotik oder Fernsteuerung (zum Beispiel bei Teleoperationen) zuverlässig zu ermöglichen. Insbesondere vor dem Hintergrund des demografisch bedingten Fachkräftemangels wird 6G als entscheidende Voraussetzung betrachtet, um Prozesse zu automatisieren und zugleich eine hochwertige Versorgung sicherzustellen – etwa im Gesundheitssektor oder in der Pflege. Insbesondere mit Blick auf die Daseinsvorsorge können 6G-Technologien durch „Fixed Wireless Access“ eine wichtige Alternative zum aufwendigen Glasfaserausbau darstellen. Damit gewinne die Technologie auch im Hinblick auf digitale Teilhabe und gleichwertige Lebensverhältnisse erheblich an Relevanz.

Insgesamt zeichnen die Expert:innen das Bild einer Infrastrukturtechnologie, die nicht nur schneller, sondern vor allem flexibler, robuster und integrationsfähiger ist als ihre Vorgänger. Das zentrale Ziel muss demnach sein, 6G zu einem praxistauglichen, wirtschaftlich tragfähigen und technologisch souveränen Grundpfeiler digitaler Wertschöpfung zu machen.

3.2 Kosten, Investitionen und wirtschaftliche Tragfähigkeit

Aus den zurückliegenden Erfahrungen lässt sich ableiten, dass auch Investitionen in 5G-Technologien mit Blick auf das voraussichtlich ab 2030 verfügbare 6G sehr wohl noch Zukunftsinvestitionen sind. Industrie, Logistik und Bergbau sind gegenwärtig die größten Anwender von 5G. Hohe Bandbreite und niedrige Latenz ermöglichen es den Unternehmen, über private Campusnetze Anwendungen der Robotik und KI zu unterstützen. 5G erleichtert dabei auch die Einbindung von KI am Rand (Edge) derartiger

Netze. Auch in Sektoren wie Bildung, Gesundheitswesen und bei Notdiensten wächst die Nachfrage nach privaten Netzen, da mehr Unternehmen digitale Transformationsprojekte durchführen, KI implementieren und veraltete Netze ersetzen.¹⁷

Vor diesem Hintergrund kommt der ökonomischen Tragfähigkeit von 6G eine große Bedeutung zu; sie war ein wiederkehrendes Thema in den Interviews und wurde differenziert betrachtet. Zwar herrschte grundsätzlich Einigkeit darüber, dass 6G langfristig produktive und wirtschaftliche Effekte entfalten wird – etwa durch Prozessoptimierung, Automatisierung oder neue Geschäftsmodelle – doch sind dafür erhebliche Investitionen nötig. Die damit verknüpften Kosten und Aufwände stellen sowohl Netzbetreiber als auch Unternehmen und die öffentliche Hand vor Herausforderungen.

Ein zentrales Problem ist laut mehreren Expert:innen, dass die Mobilfunkbranche bereits durch 5G unter erheblichem Investitionsdruck steht. Die Mobilfunkanbieter tragen nicht nur die Kosten für die Frequenzversteigerungen von rund 6,6 Milliarden Euro, sondern auch die Kosten des Technikaufbaus. Mit den Frequenzversteigerungen gingen Auflagen für die Versorgung auch in ländlichen Regionen einher. Im Jahr 2024 urteilte das Verwaltungsgericht Köln, dass die im Rahmen des Verfahrens von der BNetzA vorgegebenen Regeln rechtswidrig seien.¹⁸ Im März änderte die BNetzA daraufhin die Auflagen (im Rahmen der Verlängerung von Frequenznutzungsrechten) und konkretisierte die Anforderungen an Verhandlungen über die Mitnutzung von Frequenzen, die die großen Mobilfunknetzbetreiber mit Diensteanbietern und virtuellen Netzbetreibern führen müssen (Verhandlungsgebot).¹⁹ Die hohen Spektrumskosten, kombiniert mit zurückhaltender Nachfrage in der Breite, hätten in vielen Fällen zu einer Überforderung kleiner und mittlerer Betreiber geführt. Auch auf Anwenderseite werde der Mehrwert häufig nicht als ausreichend konkret oder monetarisierbar wahrgenommen. Dies habe – so die Einschätzung – dazu geführt, dass sich viele Unternehmen mit großflächigen Investitionen in 5G-Netze bislang zurückhalten. In diesem Kontext wurde 6G als Möglichkeit beschrieben, bessere Anreize zu schaffen; etwa durch niedrigere Eintrittsbarrieren, modularere Angebote oder neue Betreibermodelle.

17 Werner, Rolf (2024): Fünf Jahre 5G: Immer noch viel Potenzial für die Industrie. Produktion online vom 20.08.2024.

Online unter www.produktion.de/technik/digitalisierung/fuenf-jahre-5g-immer-noch-viel-potenzial-fuer-die-industrie-256.html

18 Die Präsidentin des Verwaltungsgerichts Köln (2024): VG Köln: Entscheidung der Bundesnetzagentur über die Vergabe- und Auktionsregeln für die im Jahr 2019 durchgeführte Versteigerung der 5G-Mobilfunkfrequenzen ist rechtswidrig.

Online unter www.vg-koeln.nrw.de/behoerde/presse/Pressemitteilungen/Archiv/2024/17_27082024/index.php

19 Bundesnetzagentur (2025): Bundesnetzagentur verlängert Mobilfunkfrequenzen unter Auflagen.

Online unter www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2025/20250324_Frequenzen.html

Insbesondere im Bereich der Campusnetze wurde wiederholt auf hohe Anfangsinvestitionen hingewiesen. Zwar sind mittlerweile auch kompaktere, kostengünstigere Lösungen am Markt, doch bewegten sich viele Setups – je nach Umfang und Komplexität – weiterhin im sechsstelligen Bereich. Einige Interviewpartner:innen betonten, dass die Kosten-Nutzen-Struktur oft falsch eingeschätzt werde, da die langfristigen Einsparpotenziale durch höhere Flexibilität, geringeren Verkabelungsaufwand oder effizientere Produktion nicht systematisch erfasst würden. Es sei daher zentral, dass verständliche Geschäftsideen entwickelt und kommuniziert werden.

Auch auf Netzbetreiberseite sei der Druck hoch. Die Margen von Netzausrüstern liegen laut Einschätzungen teils unter zehn Prozent, was neben der Innovationsfähigkeit auch die Wettbewerbsdynamik einschränkt. Die Abhängigkeit von wenigen großen Ausrüstern, kombiniert mit geopolitischen Restriktionen, erschwere zudem die Planbarkeit. Konzepte wie Open RAN oder softwarebasierte Netzarchitekturen könnten helfen, Kosten zu senken und die Abhängigkeit von proprietären Systemen zu reduzieren, jedoch seien diese in ihrer Marktreife und Skalierung noch begrenzt.

Was die öffentliche Infrastruktur betrifft, wurde mehrfach auf die Notwendigkeit passender Regulierung verwiesen. Der hohe Preis für Frequenzlizenzen bei 5G sei ein strukturelles Problem gewesen, da Mittel, die für Ausbau und Forschung hätten verwendet werden können, stattdessen in die Lizenzkosten geflossen sind. Für 6G solle die Lizenzvergabe stärker mit Verpflichtungen zur Netzabdeckung verknüpft werden, ohne jedoch kleine Betreiber zu überfordern. Besonders im ländlichen Raum sei ein gezielter Mitteleinsatz nötig, der sowohl Aufbauinvestitionen als auch langfristigen Betrieb absichere.

Ein weiterer Aspekt betrifft die Forschung und Entwicklung. Die Befragten waren sich einig, dass 6G ohne massive Investitionen in Grundlagen- und Anwendungsforschung nicht umsetzbar sei. Gleichzeitig bestehe die Gefahr, dass in Folge politischer Prioritätensetzung Fördermittel gekürzt würden und Projekte vorzeitig endeten. Dies betreffe besonders Start-ups und Hochschulen, die in frühen Phasen auf stabile öffentliche Finanzierung angewiesen seien. Ergänzend zu den im März 2025 für die vorliegende Studie geführten Interviews ist jedoch festzustellen, dass der aktuelle Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD (Anfang April 2025) sowie die beschlossenen Sondermittel für den Ausbau der Infrastruktur nahelegen, dass auch der Ausbau der Kommunikationsinfrastruktur von hoher politischer Bedeutung ist.

Positiv hervorgehoben wurde von den Expert:innen, dass sich bei 6G eine gewisse Lernkurve aus der 5G-Einführung

abzeichne. So sei bei vielen Herstellern und Netzbetreibern angekommen, dass ein „Technologiesprung alle zehn Jahre“ mit enormem Kapitalaufwand kaum noch vermittelbar sei. Daraus resultiere ein zunehmendes Interesse an modularen Upgrade-Strategien, softwarebasierten Erweiterungen und hardwareunabhängigen Innovationen – Ansätze, die potenziell zu einer Entzerrung der Investitionslast führen können. Insgesamt wird die wirtschaftliche Tragfähigkeit von 6G von den Expert:innen als eng verknüpft mit der politischen Rahmensetzung, der Marktstruktur und den realisierbaren Anwendungen eingeschätzt. 6G wird ökonomisch erfolgreich sein, wenn es gelingt, die Technologie alltagstauglich, kosteneffizient und skalierbar zu machen – und wenn zugleich die Wertschöpfung breit verteilt, interoperabel und sicher gestaltet werde.

In der modellbasierten Szenario-Analyse werden die Einschätzungen der Expert:innen über die Entwicklung des Bruttoinlandsproduktes (BIP) sowie des privaten und des Staatskonsums ausgeführt. Für die Jahre 2030 und 2035 ergeben sich gemäß den Annahmen und Einschätzungen Ausrüstungsinvestitionen und Bauinvestitionen für den Aufbau der 6G-Infrastruktur. Allerdings ist die Gesamtwirkung auf das Bruttoinlandsprodukt überschaubar, da in den Anfangsjahren weiterhin noch viele Komponenten und Investitionsbestandteile importiert werden müssen. Zugleich werden zusätzliche Arbeitskräfte benötigt, was die Knappheit auf dem Arbeitsmarkt verschärft und zu höheren Löhnen führt. Dadurch liegen die Produktionspreise höher als in der INFORGE-Basisprojektion (Referenzszenario), was in den Jahren 2025 bis 2030 zu einer Abschwächung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit und einem Rückgang der Exporte führt. Zum anderen ziehen auch die Konsumentenpreise an, sodass in dieser Phase auch der private Konsum zunächst schwächer ausfällt. In den Folgejahren (2040 bis 2050) überwiegen dann die positiven und Wachstumseffekte in allen hier betrachteten Kategorien; Verbunden mit dem Zuwachs an Exporten von 6G-Technologie (Implementierung einer wettbewerbsfähigen europäischen Industrie) nehmen die entsprechenden Importe ab.

3.3 6G als Strukturhebel: Welche Branchen profitieren?

Die Einführung von 6G wird von den befragten Expert:innen als bedeutender Impulsgeber für wirtschaftliche Innovation und sektorübergreifende Modernisierung eingeschätzt. Dabei wird betont, dass sich die ökonomische Wirkung nicht auf einzelne Branchen beschränken werde, sondern 6G als Querschnittstechnologie breite Transformationsprozesse anstoßen könne. Besonders im Fokus stehen Industriezweige, in denen Mobilität, Echtzeitfähigkeit und

Prozessautomatisierung zentrale Anforderungen darstellen – allen voran die Industrie, die Logistik, das Gesundheitswesen und zunehmend auch die Landwirtschaft.

In der industriellen Produktion und Logistik wird 6G als Schlüssel zur Umsetzung hochgradig automatisierter Prozesse gesehen. Durch die Fähigkeit, Maschinen, fahrerlose Transportsysteme (AGVs) oder Sensoren in Echtzeit zu vernetzen, eröffne die Technologie neue Effizienzpotenziale und ermöglicht den flexiblen Betrieb auch bei geringen Personalressourcen. Besonders für den deutschen Mittelstand – etwa im Maschinenbau oder in der Fertigung – könne 6G neue Anwendungsfelder erschließen, sofern die Kostenstruktur dies zulasse. Mehrere Interviewpartner:innen wiesen darauf hin, dass insbesondere mittelständische und kleinere Betriebe bislang kaum Zugang zu verlässlichen Mobilfunklösungen hätten. 6G müsse daher so gestaltet sein, dass es auch erschwinglich und skalierbar in kleineren Produktionsumgebungen zum Einsatz kommen könne.

Auch im Gesundheitsbereich werden erhebliche Potenziale gesehen. So werde die drahtlose Vernetzung medizinischer Geräte, Sensoren und Systeme insbesondere in Kliniken, Pflegeeinrichtungen und der ambulanten Versorgung eine zentrale Rolle spielen. Der gestiegene Dokumentationsaufwand, der Mangel an Pflegekräften und die wachsende Bedeutung digitaler Gesundheitsdienste machten es notwendig, Prozesse stärker zu automatisieren. In diesem Zusammenhang wurde betont, dass 6G nicht nur für die Kommunikation, sondern auch für die Echtzeitverarbeitung und Bereitstellung medizinischer Daten entscheidend sei. Die Technologie könne somit zur Funktionsfähigkeit kritischer Infrastrukturen beitragen; inwieweit sie als technologisches Rückgrat für die Telematikinfrastruktur genutzt werden kann, ist gegenwärtig noch nicht abzuschätzen.

Weitere Einsatzbereiche mit hoher Relevanz seien laut der Expert:innen die vernetzte Mobilität, die Agrartechnologie sowie smarte urbane Infrastrukturen (Smart Cities). In all diesen Feldern erlaube 6G eine enge Integration verteilter Systeme, eine präzise Steuerung in Echtzeit sowie das Einbinden datengetriebener Anwendungen. In ostdeutschen Regionen – etwa in der Chipfertigung (Dresden)²⁰, Softwareentwicklung (Berlin) oder der experimentellen Landwirtschaft (Sachsen) – könnten sich laut Einschätzung einiger Befragter regionale Innovationscluster herausbilden, die von der Technologie überdurchschnittlich profitieren.

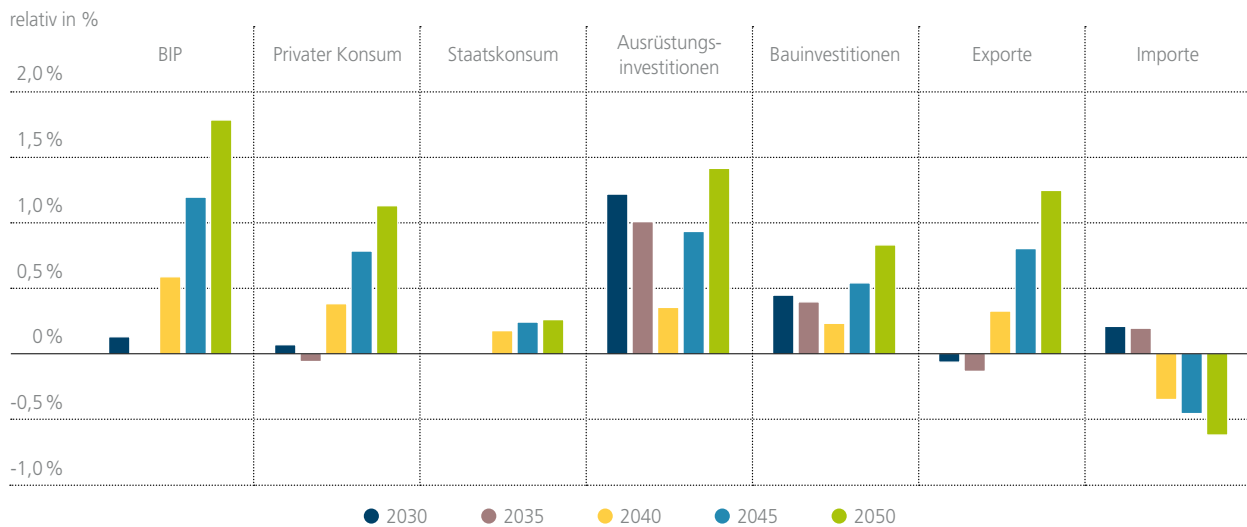
Darüber hinaus wird erwartet, dass mit der Einführung von 6G auch neue Dienstleistungs- und Geschäftsmodelle entstehen. Neben klassischen Netzbetreibern und Infrastrukturanbietern werde es zunehmend spezialisierte Anbieter für Netzbetrieb, Integration, Applikationsentwicklung oder Datenservices geben. Besonders im Bereich privater Netze (Campusnetze) eröffne sich ein Markt für neue Anbieter, die lokal angepasste Lösungen entwickeln und betreiben. Diese Entwicklung werde durch Trends wie offene Schnittstellen (APIs), softwaredefinierte Netzwerke und Edge-Komponenten zusätzlich begünstigt. Die Expert:innen betonten jedoch auch, dass die wirtschaftliche Wirksamkeit von 6G stark von der tatsächlichen Umsetzung abhängen werde. Entscheidend sei, dass die Technologie praxistauglich, wirtschaftlich tragfähig und regulatorisch eingebettet eingeführt werde. Ohne entsprechende Geschäftsmodelle, Kostensicherheit und Anwendungsunterstützung bestehe die Gefahr, dass das volle Potenzial nicht ausgeschöpft werde – wie es bereits bei 5G in Teilen zu beobachten sei.

In der Szenario-Analyse lässt sich das Potenzial von 6G in der INFORGE-Modellrechnung quantifizieren. Der Aufbau des 6G-Netzes sowie die Nutzung ab dem Jahr 2035 bringen Strukturveränderungen in der Produktion mit sich. Während der Investitions- und Ausbauphase fällt diese niedriger aus als in der späteren Umsetzungsphase. Durch die Investitionen in Ausrüstungen und Bauten gewinnt die Produktion im Verarbeitenden Gewerbe und im Baugewerbe 2035 an Bedeutung. Im Jahr 2050 können mit Ausnahme von Energieversorgung und Bergbau alle betrachteten Wirtschaftszweige ihre Produktion ausweiten und damit einen stärkeren Beitrag zum BIP verglichen mit der INFORGE-Basisprojektion (Referenzszenario) leisten (Abbildung 3). Der rückläufige Beitrag der Energieversorgung ist auf Effizienzgewinne in anderen Branchen zurückzuführen, die durch die Nutzung von 6G-Technologien entstehen können. Diese führen zu einer sinkenden Nachfrage nach Energie, wodurch die Produktion in der Energieversorgung unter dem Referenzniveau liegt.

Die Frage nach der Nachhaltigkeit digitaler Infrastrukturen gewinnt angesichts des wachsenden Datenverkehrs und der energiepolitischen Herausforderungen (Grüne Energie, Energiepreise) zunehmend an Bedeutung. In den Interviews wurde 6G vielfach als Chance beschrieben, energieeffizientere Netze zu entwickeln, zugleich jedoch auch vor voreiligen Annahmen gewarnt. Denn der technologische Fortschritt bringe nicht automatisch eine Reduktion des Energieverbrauchs mit sich – insbesondere dann nicht,

20 Bovenschulte Marc / Parton, Frederik / Bernardt, Florian (2024): Analyse und Prognose volkswirtschaftlicher und regionalökonomischer Wachstumseffekte des Halbleiterökosystems in Sachsen: Studien im Auftrag der Wirtschaftsförderung Sachsen GmbH.
Online unter www.gws-os.com/fileadmin/downloads/Studie_Effekte_Halbleiteroekosystem_Sachsen_iit_2024.pdf

Abbildung 3: Wirkung des 6G-Ausbaus auf die preisbereinigten Komponenten des Bruttoinlandsproduktes in Prozent, Szenarien-Vergleich (eigene Berechnung auf Basis des GWS-Modells INFORGE).



wenn er mit einer massiven Ausweitung der Nutzung einhergehe. Zudem wurde auf den sogenannten Rebound-Effekt hingewiesen: Höhere Energieeffizienz führe nicht zwangsläufig zu weniger Energieverbrauch, da gleichzeitig Datenvolumen, Nutzungsintensität und Gerätedichte steigen würden. Der zunehmende Einsatz KI-basierter Anwendungen, die hohe Rechenleistungen erfordern, sowie die steigende Zahl vernetzter Endgeräte (zum Beispiel Sensoren, Aktoren, Maschinen) könnten die energetischen Einsparungen im Netz sogar überkompensieren.

In Bezug auf die Bewertung konkreter Einsparpotenziale äußerten sich die interviewten Expert:innen zurückhaltend. Während einzelne Stimmen von möglichen Energieeinsparungen im Bereich von 10 bis 20 Prozent ausgingen, wurde in anderen Fällen auch eine Reduktion um bis zu 50 Prozent für denkbar gehalten – etwa durch neue Hardwarearchitekturen, den Verzicht auf überdimensionierte Software-Stacks oder durch effizientere Chipdesigns. Konsens herrschte jedoch darin, dass diese Werte stark vom jeweiligen Anwendungskontext abhängen und letztlich nur in der Gesamtbilanz aussagekräftig sind. Insgesamt wurde deutlich, dass 6G keine Garantie für Nachhaltigkeit darstellt, aber ein wichtiges Werkzeug sein kann, um energieeffiziente Digitalisierung zu ermöglichen – vorausgesetzt, technologische Innovation geht mit einem bewussten Umgang mit Ressourcen, klaren Steuerungsmechanismen und entsprechenden politischen Rahmenbedingungen einher.

3.4 Auswirkungen auf Unternehmensstrukturen und Arbeitsmärkte

Mit der Einführung von 6G werden nicht nur technologische Innovationen angestoßen, sondern auch tiefgreifende Veränderungen in betrieblichen Strukturen und Arbeitsprozessen erwartet. In den Interviews wurde deutlich, dass 6G in der infrastrukturellen Entwicklung insbesondere dort Wirkung entfaltet, wo Automatisierung, Prozessintegration und datengestützte Steuerung bislang durch mangelnde Konnektivität begrenzt waren. In diesem Zusammenhang sprechen die Expert:innen von einer schrittweisen Transformation hin zu stärker vernetzten, datengetriebenen Wertschöpfungsketten, die nicht nur neue technische Lösungen, sondern auch veränderte organisatorische Abläufe erfordern.

Ein zentrales Motiv der Befragten ist der erwartete Wandel in den Kompetenzprofilen innerhalb der Unternehmen. Während der Betrieb klassischer Telekommunikationsinfrastruktur bisher stark hardwarebasiert und spezialisierten Techniker:innen vorbehalten war, wird der Fokus künftig stärker auf Softwarekompetenzen, Systemintegration und datenorientierter Prozesssteuerung liegen. Einige Expert:innen betonten, dass sich diese Verschiebung bereits mit der Einführung privater 5G-Netze abzeichne, durch 6G jedoch weiter intensiviert werde. Der Betrieb und die Nutzung solcher Netze erfordere einerseits neue Formen der technischen Qualifikation, könne andererseits durch softwaregestützte Systeme und KI-basierte Assistenzlösungen aber so weit vereinfacht werden, dass auch nicht-spezialisierte IT-Administratoren mit ihnen arbeiten könnten.

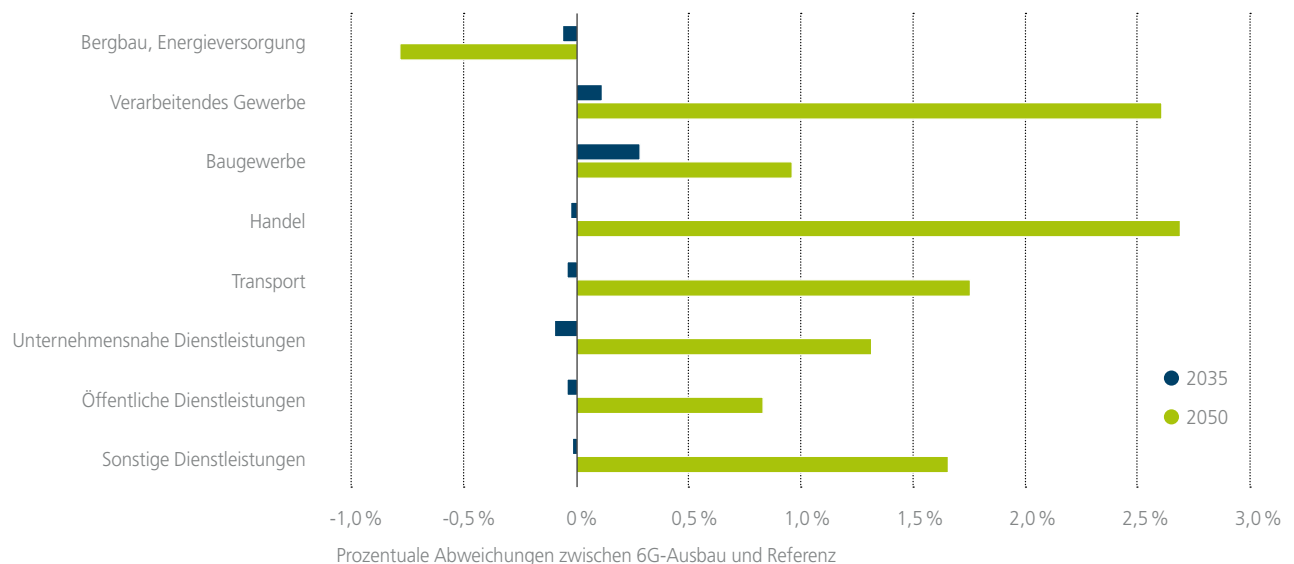
Gleichzeitig wird erwartet, dass 6G maßgeblich dazu beiträgt, Fachkräftemangel durch Automatisierung abzufedern. In vielen Sektoren – etwa im Gesundheitswesen, in der Produktion oder in der Pflege – fehlen bereits heute qualifizierte Arbeitskräfte. 6G ermögliche es, Arbeitsabläufe zu digitalisieren, Teleoperation zu realisieren oder Maschinen flexibler und intelligenter einzubinden. Einzelne Befragte wiesen darauf hin, dass gerade in ländlichen Regionen Expert:innen künftig per Remote-Verbindung Prozesse steuern oder Kolleg:innen vor Ort anleiten könnten. Dies könne dazu beitragen, auch weniger spezialisierte Beschäftigte produktiv in hochkomplexen Systemen einzusetzen. Tatsächlich handelt es sich bei diesen Beispielen um Nennungen, die auch schon zur Einführung von 5G angeführt wurden, bis heute jedoch noch nicht umfassend realisiert wurden.

Die gesamtgesellschaftlichen Auswirkungen dieser Entwicklung wurden überwiegend nicht als Arbeitsplatzbedrohung, sondern als notwendige Reaktion auf demografische und strukturelle Herausforderungen interpretiert. Dabei wird betont, dass 6G nicht in erster Linie Arbeitsplätze ersetze, sondern bestehende Engpässe kompensiere und die Produktivität steigern. Insbesondere in alternden Gesellschaften mit sinkender Erwerbsbevölkerung sei diese Form der technologischen Unterstützung zentral, um Versorgungsqualität, Wettbewerbsfähigkeit und wirtschaftliche Resilienz aufrechtzuerhalten. Zugleich wurden Herausforderungen auf der Bildungsebene benannt: Der Aufbau entsprechender Fachkompetenz im Bereich Netzwerktechnologie, Mobilfunkarchitektur und Systemintegration sei anspruchsvoll, verlange gezielte Ausbildungs- und Studienangebote und benötige eine strategische Nachwuchs-

förderung. Einzelne Stimmen äußerten Zweifel, dass die gegenwärtigen Bildungssysteme und Universitäten in der Lage seien, ausreichend qualifiziertes Personal in der benötigten Zahl bereitzustellen – insbesondere vor dem Hintergrund sinkender Studierendenzahlen in den Ingenieurwissenschaften.

Zusammenfassend wird 6G als Katalysator struktureller Verschiebungen in Unternehmen angesehen: von zentralisierten zu dezentralen Lösungen, von Hardwarebetrieb zu softwaregestützter Netzverwaltung und von lokal gebundener zu virtueller Wertschöpfung. Diese Veränderungen sind nicht losgelöst von anderen Technologien – insbesondere KI und Robotik – zu betrachten, sondern Teil eines systemischen Wandels, bei dem 6G die notwendige Infrastruktur für neue Formen des Arbeitens und Organisierens bereitstellt. In der Szenario-Analyse lässt sich das Potenzial von 6G für den Arbeitsmarkt in einer Modellrechnung quantifizieren. Dabei werden langfristig durch die gestiegene Arbeitsproduktivität neue Potenziale freigesetzt: Während für das Jahr 2035 kaum Änderungen zu erwarten sind, werden im Jahr 2050 durch den Ausbau des 6G-Netzes und die damit verbundenen automatisierten und effizienteren Arbeitsprozesse insgesamt 700.000 Erwerbstätige weniger benötigt (Abbildung 4). Diese Freistellungen entschärfen die Engpässe auf dem Arbeitsmarkt, sodass Beschäftigte prinzipiell mit entsprechenden Umschulungen und Weiterbildungen in anderen Bereichen eingesetzt werden können. Der Bedarf an Erwerbstätigen geht auf lange Sicht (bis zum Jahr 2050) am stärksten im Verarbeitenden Gewerbe und im Handel zurück. In den Branchen der unternehmensnahen Dienstleistungen werden hingegen gut 70.000 Erwerbstätige mehr benötigt.

Abbildung 4: Relative Veränderungen in der realen Produktion durch 6G-Ausbau im Vergleich zur Referenz (eigene Berechnung auf Basis des GWS-Modells INFORGE)



3.5 Gesellschaftliche und regionale Transformationspotenziale

Die gesellschaftlichen Potenziale von 6G gehen nach Einschätzung der befragten Expert:innen weit über technische Leistungssteigerungen hinaus. 6G werde nicht nur als infrastrukturelle Grundlage für wirtschaftliche Anwendungen verstanden, sondern auch als Instrument zur gesellschaftlichen Teilhabe, Daseinsvorsorge und regionalen Entwicklung. Insbesondere im Zusammenspiel mit Automatisierung, Künstlicher Intelligenz und verteilten Dateninfrastrukturen könne 6G einen Beitrag leisten, um bestehende Ungleichheiten im Zugang zu digitaler Infrastruktur und Dienstleistungen zu verringern.

Ein zentrales Transformationspotenzial sehen die Befragten in der Möglichkeit, digitale Angebote und Leistungen auch in bisher unterversorgte Regionen zu bringen. In diesem Zusammenhang wurde wiederholt auf die Bedeutung der „letzten Meile“ hingewiesen – also des Anschlusses ländlicher Räume und peripherer Gebiete an leistungsfähige digitale Netze. 6G könne hier durch flexible, drahtlose Infrastruktur – etwa mittels „Fixed Wireless Access“ auf höherem Niveau als 5G – eine Alternative zum teuren Glasfaserausbau darstellen. Diese Möglichkeit werde insbesondere dort relevant, wo bestehende Infrastrukturen fehlen oder wirtschaftlich schwer zu realisieren sind.

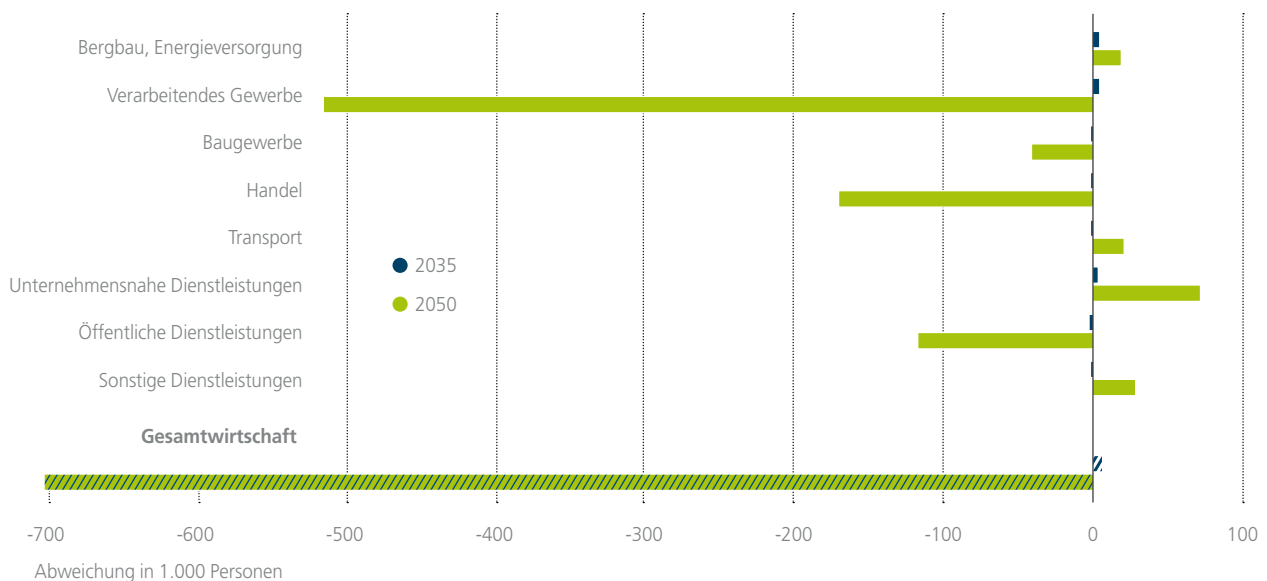
Im Kontext ostdeutscher Regionen betonten einzelne Expert:innen, dass gerade in strukturschwächeren Gebieten das geringere Maß an Pfadabhängigkeit auch als

Vorteil gedeutet werden könne. Während westdeutsche Industrieregionen oft mit der Integration bestehender, komplexer IT-Systeme beschäftigt seien, könnten kleinere, junge Betriebe (nicht nur) in Ostdeutschland auf der „grünen Wiese“ neue Prozesse von Anfang an digital aufsetzen. Dadurch entstehe ein gewisser Gestaltungsspielraum, der gezielt durch Förderung und Innovationspolitik genutzt werden könne. Regionen wie Dresden (Mikroelektronik), Berlin (Softwareentwicklung) oder Teile Sachsens (Landwirtschaft und Testfelder) wurden mehrfach als Orte mit überdurchschnittlichem 6G-Potenzial genannt – sowohl durch vorhandene Kompetenzen als auch durch aktive Forschungs- und Unternehmenslandschaften.

Gesellschaftliche Transformationspotenziale zeigen sich darüber hinaus in der Möglichkeit, neue Formen von Arbeit, Interaktion und Versorgung zu realisieren. So wurde die Aussicht auf Teleoperation – also das Fernsteuern von Maschinen oder Systemen – als ein Beispiel genannt, wie 6G helfen könne, Spezialist:innen auch über große Entfernungen hinweg produktiv einzubinden. In der medizinischen Versorgung etwa könnten Pflegekräfte vor Ort durch zugeschaltete Ärzt:innen angeleitet werden. Auch in der Industrie ließen sich komplexe Wartungs- oder Steuerungsprozesse künftig ortsunabhängig durchführen. Diese „Entkopplung von physischer Präsenz und digitaler Steuerung“ wurde als Möglichkeit gewertet, ländliche Räume attraktiver zu machen und Fachkräftemangel zumindest partiell zu kompensieren.

Neben dem medizinischen Sektor wurden auch Verwaltung, Bildung und Energieversorgung als Felder genannt,

Abbildung 5: Veränderungen in den Arbeitsbedarfen in Tsd. Personen, Szenarien-Vergleich (eigene Berechnung auf Basis des GWS-Modells INFORGE)



in denen 6G zur Transformation beitragen könne. Durch verlässliche, ausfallsichere und performante Netze könnten neue Formen digitaler Dienstleistungen etabliert werden – etwa für digitale Verwaltungsvorgänge, Smart Grids oder Fernunterricht. Gleichzeitig wurde betont, dass insbesondere die öffentliche Hand eine wichtige Rolle spiele, um diese Potenziale nicht nur technologisch, sondern auch strukturell nutzbar zu machen. Dies betreffe sowohl Investitionen als auch die regulatorische und organisatorische Einbettung digitaler Angebote.

Herausgehoben wurde schließlich, dass technologische Teilhabe zunehmend eine Voraussetzung für gesellschaftliche Teilhabe sei – etwa bei Zugang zu Informationen, Mobilität, Gesundheit oder Bildung. In diesem Sinne wurde 6G von mehreren Interviewpartner:innen als Infrastruktur für Inklusion und Gleichwertigkeit beschrieben, deren Wirkungspotenzial nicht nur an ökonomischen Maßstäben bemessen werden dürfe, sondern auch an ihrer Fähigkeit, bestehende Ungleichheiten zu adressieren.

In der Szenario-Analyse werden diese Entwicklungen in ihrer regionalen Verteilung modelliert und quantifiziert. Deutlich wird, dass vom 6G-Netzausbau und der damit verbundenen positiven realen Veränderung im BIP insbesondere westdeutsche Bundesländer profitieren: 50 Prozent der westdeutschen Bundesländer liegen oberhalb der Bundesveränderungen, während dies bei den ostdeutschen Bundesländern nur bei einem Drittel der Fall ist (Abbildung 6).

Der Aufbau des 6G-Netzes trägt auf dem Arbeitsmarkt zu einem Verlust an Industriearbeitsplätzen bei, da die Erwerbstätigkeit in Dienstleistungsbereichen anteilig hinzugewinnt und insbesondere das Verarbeitende Gewerbe an Bedeutung verliert (Abbildung 7). Diese Entwicklung gilt sowohl für westdeutsche als auch für ostdeutsche Bundesländer. Gleichzeitig ist im direkten Ost-West-Vergleich zu erkennen, dass die strukturellen Veränderungen auf dem Arbeitsmarkt im Westen stärker ausfallen als im Osten.

Abbildung 6: Prozentuale Veränderung im realen Bruttoinlandsprodukt 2050 nach Bundesländern, Szenarienvergleich (eigene Berechnung auf Basis des GWS-Modells INFORGE)

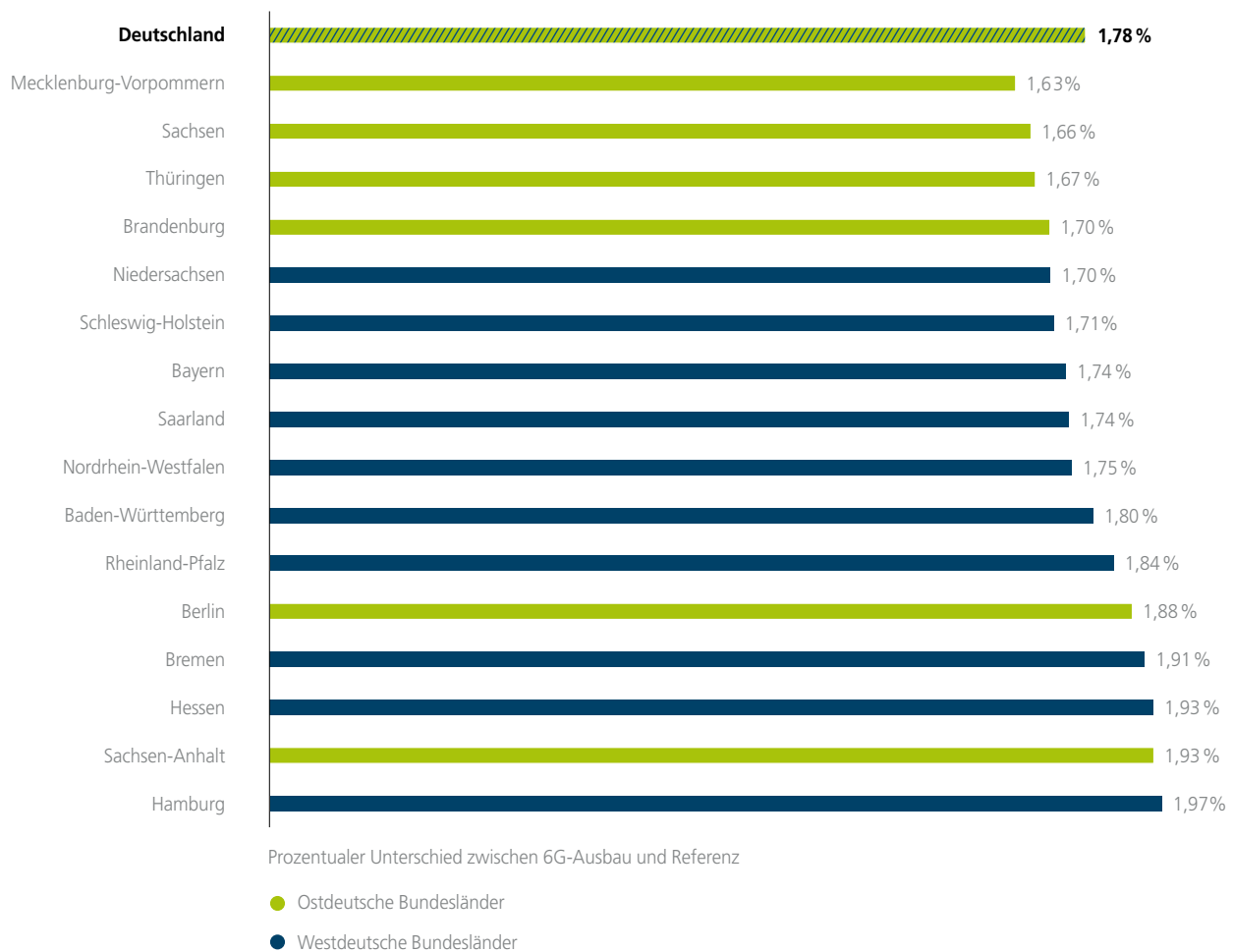
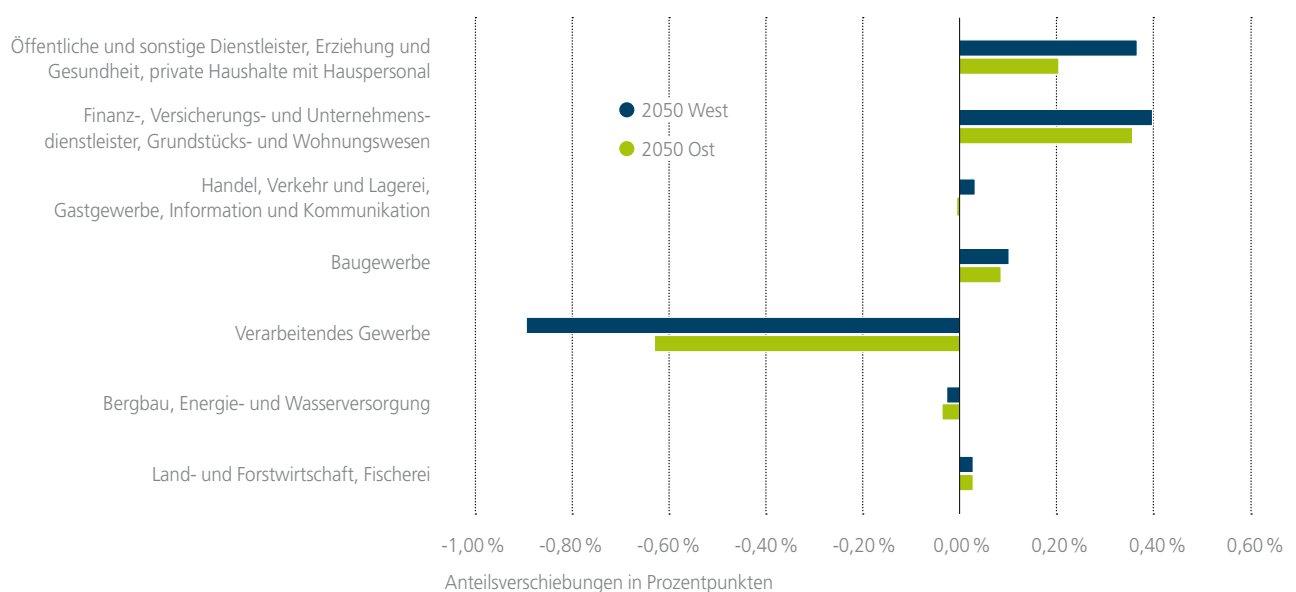


Abbildung 7: Verschiebungen auf dem Arbeitsmarkt bei der Erwerbstätigkeit nach Branchen und Bundesländern für das Jahr 2050 (in Prozentpunkten), Szenarienvergleich (eigene Berechnung auf Basis des GWS-Modells INFORGE)





6G muss günstiger, einfacher und vielfältiger werden – sonst bleibt es ein Spielplatz für Großkonzerne. Natürlich brauchen wir europäische Großkonzerne für einen souveränen Ausbau der Netze. Aber nur wenn der Mittelstand mitgenommen wird, entsteht Breitenwirkung. Technisch geht das – die Frage ist, ob wir es politisch und wirtschaftlich auch wollen.«

DR.-ING. MATHIAS BOHGE
Chief Executive Officer (CEO),
R3 Solutions GmbH



Digitale Souveränität in Zeiten geopolitischer Herausforderungen

Die Entwicklung von 5G/6G findet unter dem Eindruck eines sich immer stärker herausbildenden „Technology Race“ zwischen den USA und China statt. Auch wenn die Schärfe in diesem Wettbewerb um technologische Hegemonie in der zweiten Amtszeit von Donald Trump als US-Präsident sprunghaft zugenommen hat, kann sie doch auf eine längere Geschichte blicken. Die Konfrontation mit China wurde in der ersten Amtszeit von Trump als „De-Coupling“ offizielle Politik und anschließend von Joe Biden weitgehend unverändert fortgesetzt. In diese Zeitspanne fällt unter anderem der mit einer Gefahr für die nationale Sicherheit begründete Ausschluss der beiden chinesischen Netzwerkausrüster Huawei und ZTE beim Ausbau von Telekommunikationsinfrastruktur in den USA und den Partnerländern der „Five Eyes“-Nachrichtenallianz;²¹ im Jahr 2024 zog auch die Bundesregierung nach und verbannte Komponenten von Huawei und ZTE aus dem deutschen 5G-Netz.²²

Neben diesen unmittelbaren Maßnahmen machen die USA deutlich, dass sie willens sind, China den Zugang zu Schlüsseltechnologien zu verwehren, um die technologische Entwicklung im Reich der Mitte zu bremsen. In diesem Sinne ist auch das Dekret Joe Bidens vom Januar 2025 zu verstehen, mit dem der volle Zugang zu fortschrittlichster Chip-Technologie für KI-Anwendungen nur noch 19 Ländern gewährt wird – unter ihnen auch Deutschland.²³ In Zeiten regelbasierter Beziehungen und verlässlicher Allianzen wäre dies für Deutschland auch über den Status quo hinaus kein beunruhigendes Signal. Allerdings zeigt der im April 2025 vom Zaun gebrochene Handelskrieg und das Aufkündigen besagter Allianzen, dass keineswegs auszuschließen ist, dass der Bannstrahl technologischer Sanktionen auch

Europa treffen könnte. Und was für KI-Technologie gilt, kann grundsätzlich auch für Telekommunikationstechnologie gelten – der bisweilen drohende Unterton gegenüber der Ukraine zur Nutzung der Satellitenkommunikation von Starlink macht deutlich, wie prekär die Verhältnisse sind.²⁴

Doch auch die USA könnten die Auswirkungen ihres Handelns zu spüren bekommen. Als Reaktion auf die von den USA unter Biden und Trump verhängten Zölle hat China unter anderem eine Exportbeschränkung und teilweise sogar ein Exportverbot für Seltene Erden in Stellung gebracht. China beheimatet 70 Prozent der Produktion und 90 Prozent der Verarbeitung von Seltenen Erden. Die USA haben ihre eigene Produktion von Seltenen Erden seit dem Jahr 2010 zwar hochgefahren, aber es fehlt an ausreichenden Raffineriekapazitäten, sodass die Rohstoffe zur Aufbereitung nach China verschifft und re-importiert werden müssen. Im Ergebnis stammen 70 Prozent der US-Importe Seltener Erden aus China.²⁵ Diese Spannungen und daraus resultierende eingeschränkte Verfügbarkeiten der für den High-Tech-Bereich essenziellen Seltenen Erden kann auch den Ausbau der Telekommunikationsinfrastruktur und den Zugang zu Endgeräten beeinflussen – erst recht, wenn das Prinzip „America first“ konsequent durchgezogen wird.

Wie angespannt die Lage zwischen den USA und Europa ist, wird auch in einem weiteren Hochtechnologiebereich deutlich. Während Europa mehr Waren in die USA exportiert, als die USA nach Europa, verhält es sich bei IT-Dienstleistungen umgekehrt. Dementsprechend prüft die EU, ob es eine geeignete Gegenreaktion auf die Zölle sein kann, den Zugang der US-amerikanischen Big-Tech-Konzerne

21 Voelsen, Daniel (2019): 5G, Huawei und die Sicherheit unserer Kommunikationsnetze.

Handlungsoptionen für die deutsche Politik. In: SWP-Aktuell, 2019/A 05. Online unter www.swp-berlin.org/10.18449/2019A05/

22 Eckstein, Philipp (2024): Bund verbietet Huawei-Komponenten im 5G-Netz. Tagesschau online vom 11.07.2024.

Online unter www.tagesschau.de/inland/huawei-5g-verbieten-100.html

23 Tagesschau (2025): Verbündete ausgenommen: USA beschränken Ausfuhr von KI-Chips. Tagesschau online vom 13.01.2025.

Online unter www.tagesschau.de/wirtschaft/unternehmen/ki-chips-export-usa-nvidia-biden-100.html

24 Niesner, Lisi (2025): Europa sucht eine Alternative für Starlink in der Ukraine. Der Standard vom 06.04.2025.

Online unter www.derstandard.de/story/3000000264500/europa-sucht-eine-alternative-fuer-starlink-in-der-ukraine

25 Wübbeke, Jost (2025): Exportkontrollen auf Seltene Erden: Warum Deutschland vorerst aufatmen kann. Table.Briefings vom 07.04.2025.

Online unter www.table.media/china/standpunkt/exportkontrollen-auf-seltene-erden-warum-sie-die-usa-hart-treffen-und-deutschland-vorerst-aufatmen-kann/

zu beschränken; Europa ist für diese ein ausgesprochen lukrativer Markt.²⁶ Auch wenn zahllose und überlebenswichtige Dienste wie Büro-Software oder Cloud-Dienste in Europa von US-Unternehmen abhängen, stellt sich für diese die gegenwärtige Situation ebenfalls als sehr un bequem dar. Denn auch wenn die Tech-Riesen gern die europäische Regulierung abgeschwächt sehen wollen, dürften sie kaum anstreben, in ein mögliches transatlantisches Kreuzfeuer zu geraten. Sollte dies aufgrund politischer Vereinnahmung und Drohungen zu einem größeren technologischen Unabhängigkeitsstreben der EU und ihrer Mitgliedsstaaten führen, könnte das Geschäftsmodell von Firmen wie Google/Alphabet, Meta, Amazon oder Microsoft Schaden nehmen.

Schon jetzt schaut Europa aufgrund der Enthüllungen um den Whistleblower Edward Snowden und Fragen der Verlässlichkeit kritisch auf seine Abhängigkeit bei Cloud-Diensten, Plattformen und Satelliten-gestützten Services. So wird in einem Beitrag der Fachzeitschrift *Foreign Affairs* festgestellt: „[eigene Übersetzung] Europäische Politiker:innen, Akademiker:innen, Think Tanks und Unternehmen sind sich jedoch bereits einig, dass Europa seine eigenen Cloud-Ressourcen aufbauen muss, um die strategische Autonomie zu erlangen, die es braucht, um sich von der US-Technologie zu lösen. [...] Die großen Technologieunternehmen könnten bald feststellen, dass sie nicht nur niemals Zugang zum chinesischen Markt haben werden, sondern dass sie auch auf den europäischen Märkten zunehmend zur *Persona non grata* werden.“²⁷

Es gehört nicht viel Fantasie dazu, dass Europa mit Blick auf seine Kommunikationsinfrastrukturen nicht nur weiterhin chinesische Komponenten verbannt, sondern auch versuchen könnte, den Anteil an US-Technik zu minimieren. Dabei geht es kaum darum, dass die US-Technologie Not-ausschalter (sogenannte „Kill Switches“) enthält, die auf Knopfdruck die gesamte Kommunikation lahmlegen. Vielmehr dürfte ähnlich wie bei den Vorwürfen gegen Huawei die Befürchtung bestehen, dass (vertrauliche) Informationen, die über das 5G/6G-Netz ausgetauscht werden, direkt in den USA landen. Damit verändert sich der Blick auf das transatlantische Technologie-Szenario: Es ist nicht mehr nur eine wettbewerbliche Abhängigkeit, sondern zunehmend auch eine Frage der nationalen Sicherheit.

Eine auf Basis von Sicherheitserwägungen und geostrategischen Zielen herbeigeführte Reduktion der in Frage kommenden Technologieanbieter birgt allerdings das Risiko,

dass Oligopole entstehen (wenn beispielsweise in Europa nur noch Ericsson und Nokia miteinander konkurrieren) und es in der Folge zu Preissteigerungen und einer reduzierten Innovationsdynamik kommt. Eine Antwort darauf versuchen die Bemühungen um offene, interoperable 5G-/6G-Systeme, die als Open RAN bezeichnet werden, zu geben. Damit könnte das Entstehen und Erstarken eines Ökosystems von KMU einhergehen. Um zukünftige Unabhängigkeit im Bereich der zunehmend sicherheitsrelevanten Satellitenkommunikation zu erlangen, ist ein anderer Ansatz nötig. Unter dem Eindruck der russischen Invasion in der Ukraine hat sich im Jahr 2023 ein Konsortium formiert, das mit milliardenschwerer Unterstützung der EU das Satellitenkommunikationssystem IRIS entwickelt. Alle Facetten zukünftiger Kommunikationssysteme, die verstärkt mit Rechentechnik verwachsen, sind auf den Zugang zu Chips angewiesen.

Zwar verfügt Europa nach Meinung der interviewten Expert:innen über starke Kompetenzen im Chipdesign, doch seien Produktion und Skalierung bislang auf wenige internationale Anbieter konzentriert. Der Aufbau eigener Fertigungskapazitäten in Europa ist demnach trotz der hohen Kosten langfristig notwendig, um strategische Abhängigkeiten zu reduzieren. Dabei geht es nicht nur um die Endgeräte, sondern vor allem um Infrastrukturkomponenten wie Basisstationen, Antennen oder spezielle Kommunikationschips, bei denen europäische Hersteller eine größere Rolle spielen müssen.

Auch im Bereich Standardisierung ist ein Umdenken erforderlich. In der Vergangenheit sei es gelungen, globale Standards zu etablieren, die eine weitgehende Interoperabilität ermöglichten. Vor dem Hintergrund zunehmender wirtschaftspolitischer Spannungen – etwa durch Exportrestriktionen, Zölle oder Sicherheitsbedenken – bestehe jedoch die Gefahr einer Fragmentierung internationaler Standardsysteme. Einige Expert:innen äußerten die Sorge, dass nationale oder regionale Interessen künftig stärker auseinander driften könnten – was langfristig sowohl die Innovationsgeschwindigkeit als auch die wirtschaftliche Verwertbarkeit hemmen würde. Daher wurde die aktive Beteiligung Europas an internationalen Standardisierungsgremien als strategisch bedeutsam hervorgehoben.

Digitale Souveränität wurde in den Interviews jedoch nicht nur mit Lieferketten und Normung verbunden, sondern auch mit Sicherheits- und Datenschutzstandards. Insbesondere die europäischen Anforderungen an Privatheit,

26 Pflanzelt, Simon (2025): Kommt die Digitalsteuer für Tech-Giganten? ZDF Heute online vom 05.04.2025.
Online unter www.zdf.de/nachrichten/politik/deutschland/digitalsteuer-tech-giganten-usa-100.html

27 Farrell, Henry und Newman, Abraham (2025): The Brewing Transatlantic Tech War. How Silicon Valley Got Entangled in Geopolitics – and Lost. *Foreign Affairs* vom 03.04.2025. Online unter www.foreignaffairs.com/united-states/brewing-transatlantic-tech-war?s=EDZZ005ZX&utm_medium=newsletters&utm_source=fatoday&utm_campaign=The%20Brewing%20Transatlantic%20Tech%20War&utm_content=20250403&utm_term=EDZZ005ZX

Datensparsamkeit und dezentrale Kontrolle würden 6G maßgeblich prägen – und könnten zu einem Differenzierungsmerkmal europäischer Technologien gegenüber anderen Weltregionen werden. Insofern biete sich die Chance, „Privacy by Design“ und Sicherheitsarchitekturen frühzeitig in die technischen Spezifikationen von 6G zu integrieren. Herausgestellt wurde zudem die Bedeutung eines ausbalancierten Technologieaufbaus: Während vollständige Unabhängigkeit kaum realistisch sei, müsse Europa strategisch entscheiden, in welchen Bereichen Eigenentwicklung unerlässlich ist – und in welchen Kooperationen sinnvoll bleiben. In diesem Zusammenhang wurden auch flexible Strategien diskutiert, etwa resiliente Netzarchitekturen, die mit Komponenten unterschiedlicher Herkunft betrieben werden können, oder digitale Redundanzmodelle, die systemische Ausfälle verhindern.

Schließlich wurde die digitale Souveränität auch als eine Frage des politischen Willens und der Investitionsbereitschaft beschrieben. Nur wenn Unternehmen, Forschungseinrichtungen und öffentliche Akteure in der Lage und willens sind, langfristig zu planen, in Forschung und Entwicklung zu investieren und Personal auszubilden, könne Europa ganz im Sinne des Draghi-Berichts zur Zukunft der Wettbewerbsfähigkeit der EU²⁸ seine Rolle als Technologiestandort behaupten. Die aktuelle Förderpolitik – etwa im Bereich 6G-Forschung – wurde dabei als wichtiger Schritt gewertet, der allerdings durch stabile politische Rahmenbedingungen und industriepolitische Weitsicht abgesichert werden muss.

28 Draghi, Mario (ed.) (2024): The Future of European Competitiveness – A Competitiveness Strategy for Europe.

Bericht im Auftrag der Europäischen Kommission vom 09.09.2024. Online unter www.commission.europa.eu/topics/eu-competitiveness/draghi-report_en



Wer 6G denkt, muss Resilienz mitdenken – wir brauchen Netze, die auch dann funktionieren, wenn einzelne Hersteller oder Komponenten ausfallen. Technologische Unabhängigkeit ist kein Luxus mehr, sondern Teil der Daseinsvorsorge. 6G kann dabei zum Rückgrat kritischer Infrastrukturen werden.«

PROFESSOR WOLFGANG KELLERER

Leiter des Lehrstuhls für Kommunikationsnetze,
Technische Universität München



Herausgeber:

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Steinplatz 1 | 10623 Berlin
medien@vdivde-it.de
www.vdivde-it.de

Autoren:

Kai Börner, Jan Plassenberg, Markus Schürholz,
Britta Stöver, Julian Stubbe

Unter Mitarbeit von:

Marc Bovenschulte, Anna von Bülow, Tim Jacquemot,
Miruna Raceala-Motoc, Jonas Thiem, Frank Wegner

Bildnachweise:

Adobe Stock Seiten 10 (Mariia Korneeva) und 20 (kinwun)

Gestaltung:

twotype design, Hamburg

© VDI/VDE-IT 2025