



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Souverän. Digital. Vernetzt.

Forschungsprogramm
Kommunikationssysteme



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2	6	Forschung für die globale Zukunft gestalten	32
	Grafik: Vernetzung in Zahlen	6		6.1 Wissenschaftliche Kompetenzen fördern	33
2	Forschung zu Kommunikationssystemen strategisch fördern	8		6.2 Forschung und Wirtschaft zusammenbringen.....	34
3	Vernetzungstechnologien von morgen erforschen	12		6.3 Netzwerke und starke Akteure für künftige Kommunikationstechnologien aufbauen	35
	3.1 6G vorbereiten	13		6.4 Innovationskraft in Mittelstand und Industrie stärken	36
	3.2 Hightech für die Vernetzung.....	14		6.5 Kompetenzen international bündeln	36
	3.3 Neue Netzarchitekturen entwerfen.....	17		6.6 Forschungsergebnisse in die Anwendung transferieren.....	39
	3.4 Neue Technologiefelder erschließen.....	21	7	Rahmenbedingungen des Programms	40
4	Vernetzte Systeme ganzheitlich, sicher und nachhaltig entwickeln	22		7.1 Entstehung	40
	4.1 Anpassungsfähige, intelligente und sichere Vernetzungslösungen umsetzen	22		7.2 Einbindung des Programms	41
	4.2 Ressourceneffiziente Systeme erforschen	23		7.3 Erfolgskriterien, Wirtschaftlichkeit und Evaluation	42
	4.3 Widerstandsfähige und langlebige Kommunikationssysteme schaffen.....	24		Glossar	45
	4.4 Gesellschaftliche und wirtschaftliche Zusammenhänge erforschen	25		Impressum	49
5	Gemeinsam Lösungen für Anwendungen entwickeln	27			
	5.1 Leitbranchen in Deutschland voranbringen ...	27			
	5.2 Digitalen Alltag gestalten	28			
	5.3 Gemeinsame Standards vorbereiten.....	30			
	5.4 Europäische Technologieangebote schaffen ..	31			



1 Einleitung

Kommunikationssysteme sind das zentrale Nervensystem einer digitalen Wirtschaft und Gesellschaft. Sie liefern eine technologische Basis für die Digitalisierung und eröffnen gänzlich neue Möglichkeiten. Sie ermöglichen innovative Anwendungen in der Industrie und im Alltag und können das individuelle Wohlbefinden sowie die Gesundheit verbessern. Kommunikationstechnologie ist eine Schlüsseltechnologie der digital vernetzten Welt. Umso wichtiger ist es, dass Deutschland und Europa bei der Entwicklung von Technologien für moderne Kommunikationssysteme führend sind. Nur so wird es hierzulande den Menschen, den Unternehmen und dem Staat in Zukunft möglich sein, souverän zu handeln.

Ob auf dem Boden, zu Wasser oder in der Luft: Nahezu überall kann die digitale Vernetzung, die Erhebung und Übermittlung von Daten sowie deren smarte Analyse die Basis für Verbesserungen oder völlig neue Entwicklungen liefern. Schon heute ist unsere Welt deshalb voll von Sensoren und anderen vernetzten Gegenständen – bis zum Jahr 2024 sollen es weltweit rund 32 Milliarden sein.¹ Zunehmend werden nicht mehr nur Menschen über digitale Technik wie Smartphones, Tablets oder Fitnessarmbänder enger miteinander vernetzt. Auch Maschinen treten in einen immer stärkeren Austausch. Im Jahr 2024 soll es laut Prognosen mehr als doppelt so viele Verbindungen zwischen Maschinen geben wie noch im Jahr 2018, als es noch 6,1 Milliarden Geräte waren. Und der Anteil

der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation am weltweiten Datenverkehr wird sich in dieser Zeit ebenso mindestens verdoppeln. Wir erleben das „Internet der Dinge“ (engl. Internet of Things, IoT) – oder gar ein „Internet von Allem“. Kommunikationssysteme arbeiten permanent im Hintergrund und ermöglichen diese Allesvernetzung.

Die Schlüsselfunktion der Kommunikationstechnologie

Kommunikationstechnologien sind schon heute essenziell für unser Leben und werden es in Zukunft

1 Cisco Annual Internet Report (2018–2023), cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/air-highlights.html

noch stärker sein. Gigabit-Kommunikation über Glasfaser und Mobilfunk an jedem erdenklichen Ort wird selbstverständlich sein. Selbst an entlegenen Orten kann man mit satellitengebundenem Internet Daten mit der Welt austauschen. Die neuen Kommunikationstechnologien lassen die physische und die digitale Welt zunehmend miteinander verschmelzen und ermöglichen eine Fülle von Anwendungen und Innovationen. Kommunikationssysteme haben damit eine Schlüsselfunktion für unsere Wirtschaft und Gesellschaft. Sie sind zentral, um die großen Herausforderungen der Gegenwart und Zukunft wie Klimawandel, Globalisierung oder internationalen Wettbewerb meistern zu können.

Technologische Souveränität stärken

Umso wichtiger ist es, dass Deutschland und Europa diese essenziellen Technologien souverän beherrschen. Das Ziel ist technologische Souveränität. Unter dem Begriff versteht das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) den Anspruch und die Fähigkeit zur kooperativen (Mit-)Gestaltung von Schlüsseltechnologien und technologiebasierten Innovationen, inklusive der Fähigkeit, europäisch selbstbestimmt zu agieren.

Die sicherste Methode, um heute die Grundlagen für die technologische Souveränität von morgen zu legen, ist es, in Forschung und Ausbildung zu investieren.² Hier setzt das BMBF wichtige Akzente.

Um im Hinblick auf kommende Kommunikationstechnologien technologische Souveränität zu erreichen, sind große Anstrengungen in der Forschung und Entwicklung notwendig. Unsere Richtschnur muss sein, dass künftige Standards – zum Beispiel die nächste Mobilfunkgeneration 6G – maßgeblich von deutschen und europäischen Unternehmen getrieben werden und eine zukünftige Produktion in Europa vorbereitet wird. Hierfür bietet das BMBF mit diesem Forschungsprogramm den notwendigen Rahmen, sodass Deutschland und Europa die weitere Technologieentwicklung maßgeblich prägen können – ähnlich

wie dies im Zuge von 5G bereits mit den sogenannten Campusnetzen gelungen ist.

Große Herausforderungen für die Forschung

Die Schwerpunkte der Forschungsförderung liegen auf den in enger Abstimmung mit der Fachcommunity als am wichtigsten identifizierten Forschungsfeldern, die als Querschnittsthemen das Programm prägen: Resilienz, Kommunikationssicherheit und Energieeffizienz. Um die digitalisierte Gesellschaft der Zukunft zu gestalten, müssen Kommunikationsnetze mit exponentiell steigenden Datenmengen und zahlreichen unterschiedlichen, teils gegensätzlichen Anforderungen souverän umgehen können. Aufgabe für Forschung und Entwicklung ist es daher, Kommunikationssysteme zu entwickeln, die zuverlässig funktionieren, ein riesiges Datenaufkommen bewältigen und dabei eigenständig lernen und entscheiden. Unsere Netze können nicht länger nur Transportwege für die Datenflut sein – sie müssen intelligent werden. Dabei muss bei der Forschung und Technologieentwicklung stets im Blick bleiben, dass Kommunikationssysteme zuallererst einem Zweck dienen müssen: der Verbesserung des Lebens der Menschen. Deshalb müssen die Netze der Zukunft so entwickelt werden, dass Menschen voll und ganz darauf vertrauen können, dass ihre Daten geschützt bleiben. Eine menschenzentrierte und werteorientierte Gestaltung von Technologie im Sinne von „Value by Design“ verbunden mit einer qualitätsvollen Bürgerbeteiligung ist daher ein wichtiger Leitgedanke dieses Programms. Auch soziale Innovationen können zu diesem Ziel beitragen, indem zum Beispiel Ideen von Akteursgruppen aus der Mitte der Gesellschaft aufgegriffen und umgesetzt werden, um die vernetzte Gesellschaft zu gestalten. Im Zentrum stehen die Würde des Menschen und dessen Selbstbestimmung, Privatheit und Sicherheit in einer gefestigten Demokratie sowie Gerechtigkeit, Solidarität und Nachhaltigkeit.

Darüber hinaus ist es von zentraler Bedeutung, dass Forschung auch einen substanziellen Beitrag zur Be-

2 [forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/dateien/nachrichten/positionspapier_fachkreis-kommunikationstechnologien_technologische_souveraenitaet.pdf](https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/dateien/nachrichten/positionspapier_fachkreis-kommunikationstechnologien_technologische_souveraenitaet.pdf)

wältigung gesamtgesellschaftlicher Herausforderungen wie der Eindämmung des Klimawandels leistet. Häufig können Vernetzungslösungen in Kombination mit intelligenten Anwendungen die Basis für ökologische Verbesserungen sein. Doch die permanente Vernetzung und Datenübertragung sind sehr energie- und ressourcenintensive Prozesse. Darum sind Lösungen zu entwickeln, damit Kommunikationstechnologien in Zukunft energieeffizienter und nachhaltig arbeiten können.

Technologische und digitale Souveränität gewinnen

In der Softwaresteuerung und der leistungsfähigen Mikroelektronik werden technologische Weiterentwicklungen bei mobilen Kommunikationssystemen derzeit durch asiatische und amerikanische Unternehmen dominiert, ein Großteil der technologierelevanten Patente liegt dort. Es muss daher deutsches und europäisches Ziel sein – auf Basis noch bestehender europäischer Stärken – entstandene Abhängigkeiten zu verringern und technologische und digitale Souveränität zurückzuerlangen, dies auch mit Blick auf die Sicherheit der öffentlichen Kommunikationsnetze. Dafür gilt es, eigene Stärken zu nutzen und –



Technologische Souveränität

In einem Positionspapier* hat der Fachkreis Kommunikationstechnologien auf Anregung des BMBF die Dynamik auf dem Gebiet der Kommunikationssysteme im Hinblick auf technologische Souveränität eingehend untersucht. Dabei stellen die Expertinnen und Experten in Anlehnung an ein Positionspapier der Informationstechnischen Gesellschaft im VDE** fest, dass technologische Souveränität gemeinhin als die Fähigkeit eines Staates, einer Gesellschaft oder Volkswirtschaft verstanden wird, seine politischen oder gesellschaftlichen Prioritäten umsetzen zu können, ohne dabei durch die unzureichende oder fehlende Kontrolle über Technologien gehindert zu werden. Technologische Souveränität erfordert nach allgemeinem Verständnis keine Autarkie, wohl aber ein Verständnis des gesamten Entwicklungsprozesses sowie einen zuverlässigen Zugang zu Produkten.

Besondere Bedeutung hat die Frage der technologischen Souveränität im Bereich der Kommunikations-

technologien. Die COVID-19-Pandemie hat gezeigt, wie viele Dienste von stabilen Netzen abhängig sind und was sie für die Resilienz einer Gesellschaft bedeuten: Homeschooling, Lieferdienste, berührungsloses Bezahlen und vor allem der unverzichtbare Kontakt zu Verwandten und Bekannten wären ohne stabile Kommunikationsnetze unmöglich gewesen. Kommunikationsnetze sind aber weit darüber hinaus ein zentraler Innovationstreiber und wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Digitalisierung. Die Anwendungsfelder Industrie 4.0, mobile KI-Dienste und vernetztes Fahren, in Zukunft aber auch Tele- und Präzisionsmedizin sind Beispiele hierfür. Die Durchsetzung wesentlicher gesellschaftlicher Prioritäten wie Schutz der Privatsphäre und des geistigen Eigentums, Versorgungssicherheit, gleichwertige Lebensbedingungen auch im ländlichen Raum und Digitalisierung als Beitrag zur Erreichung unserer klimapolitischen Ziele setzt Kontrolle über Kommunikationstechnologien voraus.

* [forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/dateien/nachrichten/positionspapier_fachkreis-kommunikationstechnologien_technologische_souveraenitaet.pdf](https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/dateien/nachrichten/positionspapier_fachkreis-kommunikationstechnologien_technologische_souveraenitaet.pdf)

** VDE-ITG, Technologische Souveränität: Vorschlag einer Methodik und Handlungsempfehlungen, 2020, online



wo notwendig – wiederzubeleben oder neu zu schaffen. Das Konjunkturpaket der Bundesregierung hat eine finanzielle Grundlage geschaffen, um schnell aufzuholen. Es gibt uns die Möglichkeit, in Teilgebieten neue Wege zu gehen, um Deutschland und Europa an die Spitze der internationalen Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsaktivitäten zu setzen.

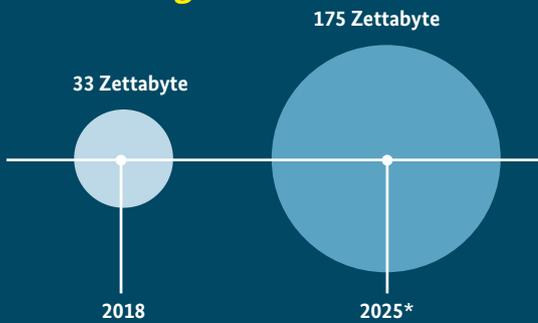
Das vorliegende Programm baut auf den Erfahrungen aus über einem Jahrzehnt Forschungsförderung des BMBF für Innovationen in Kommunikationssystemen auf. Von 2007 bis 2017 war Forschung zu solchen Systemen ein wichtiger Schwerpunkt innerhalb des Programms „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“. Der wachsenden Bedeutung der Schlüsseltechnologie

wird das eigenständige Forschungsprogramm „Souverän. Digital. Vernetzt.“ gerecht. Auf Basis des Programms beabsichtigt das BMBF, in den nächsten fünf Jahren mehr als 100 Millionen Euro zuzüglich weiterer Mittel aus dem Konjunktur- und Zukunftspaket in die Erforschung innovativer Kommunikationstechnologien wie 6G zu investieren – und damit in die zukünftige Souveränität Deutschlands und Europas auf diesem Gebiet.

VERNETZUNG IN ZAHLEN

Vernetzte Welt: Datenwachstum beschleunigt sich

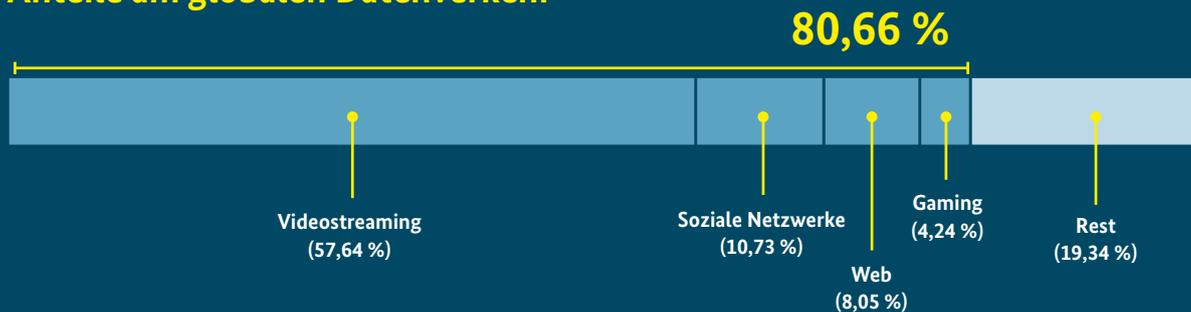
Jährlich generierte Datenmenge^a



175 Zettabytes sind
175.000.000.000.000 Gigabyte, also 175 Billionen GB

B	1 Byte	8 Bits
KB	1 Kilobyte	1.000 Byte (nach SI-Norm)
MB	1 Megabyte	1.000.000 Byte (1.000 KB)
GB	1 Gigabyte	1.000.000.000 Byte (1.000 MB)
TB	1 Terabyte	1.000.000.000.000 Byte (1.000 GB)
PB	1 Petabyte	1.000.000.000.000.000 Byte (1.000 TB)
EB	1 Exabyte	1.000.000.000.000.000.000 Byte (1.000 PB)
ZB	1 Zettabyte	1.000 EB

Anteile am globalen Datenverkehr^b



YouTube-Konsum^c

Jeden Tag schauen Menschen über

eine Milliarde Stunden

Videos.



Mehr als **70 %**
der Wiedergabezeit kommt von
mobilen Geräten.

Datenvolumen durch Online-Gaming^d



Instagram-Nutzung^e

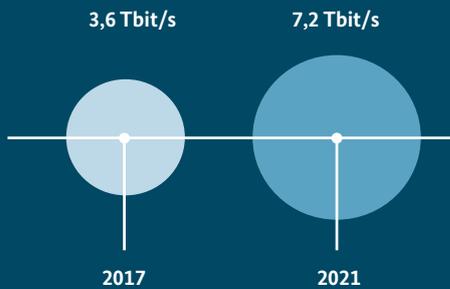


Mehr als
500 Millionen
Konten nutzen jeden Tag Instagram Stories.

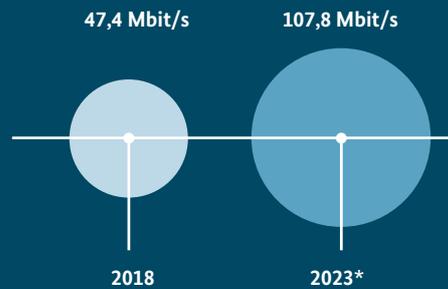
a IDC, nach Forbes: forbes.com/sites/tomcoughlin/2018/11/27/175-zettabytes-by-2025
 b Sandvine, The Global Internet Phenomena Report, sandvine.com/covid-internet-spotlight-report
 c Youtube, youtube.com/intl/en-GB/about/press
 d Cisco Systems, Cisco Visual Networking Index: Forecasts and Trends 2017-2022
 e facebook.com/business/marketing/instagram

Vernetztes Deutschland: Digital ist normal

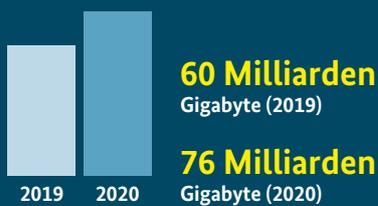
Durchschnittlicher Datendurchsatz am Internetknotenpunkt DE-CIX in Frankfurt am Main^f



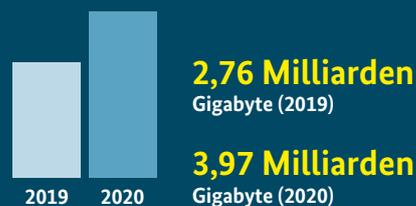
Durchschnittsgeschwindigkeit Festnetz^g



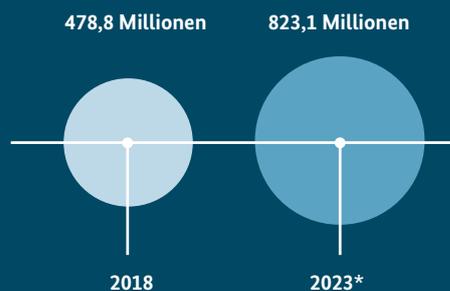
Festnetzbasierendes Datenvolumen pro Jahr^h



Datenvolumen im mobilen Breitband pro Jahr^h



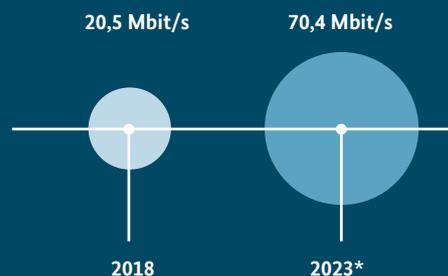
Vernetzte Geräte^g



Downloads von mobilen Apps^g



Durchschnittsgeschwindigkeit Mobilfunk^g



^f de-cix.net/de/locations/germany/frankfurt/statistics (Die Angaben beziehen sich auf Januar 2017 bzw. 2021.)

^g Cisco Annual Internet Report (2018–2023), cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/air-highlights.html

^h bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/20210519_Jahresbericht.html

* Prognose



2 Forschung zu Kommunikationssystemen strategisch fördern

Das Forschungsprogramm „Souverän. Digital. Vernetzt.“ fokussiert auf die für Deutschland relevantesten Forschungsfelder im Themengebiet, um die digitale Transformation zu gestalten und die technologische Souveränität in Kommunikations- und Vernetzungstechnologien zu stärken. Das Programm soll einen verlässlichen Rahmen für eine an konkreten gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bedarfen ausgerichtete Spitzenforschung schaffen.

Fortlaufender Strategieprozess

In die Entwicklung dieses Forschungsprogramms sind die relevanten Forschungs- und Entwicklungsergebnisse der bisherigen Innovationsförderung eingeflossen. Das Programm berücksichtigt beispielsweise systematisch die Ergebnisse der Evaluation des BMBF-Förderprogramms „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“. So trägt das Programm etwa der Tatsache Rechnung, dass Verbundprojekte – also

gemischte Forschungskonsortien aus Wissenschaft und Wirtschaft – auf dem Feld der Informations- und Kommunikationstechnologien die größte Innovationskraft entfalten. Zudem wurden im Rahmen der Evaluation kleine und mittlere Unternehmen (KMU), insbesondere aus Anwenderbranchen, als besonders wichtige Zielgruppe der Förderung identifiziert, weil für sie der Transfer von Forschung in die Anwendung besonders wichtig und ohne Förderung kaum zu stemmen ist. Auf Basis von Erkenntnissen wie diesen wurden konkrete Leitlinien für die Umsetzung der Forschungsförderung erarbeitet (siehe Kapitel 6).

Um Herausforderungen und Bedarfe frühzeitig zu erkennen, steht das BMBF in engem Austausch mit Expertinnen und Experten. Ein Fachkreis mit Vertreterinnen und Vertretern aus Forschungsinstituten, Universitäten und Unternehmen hat das BMBF bei der Entwicklung des Programms beraten und begleitet dessen kontinuierliche Weiterentwicklung. In mehreren Fach-Workshops wurden für dieses Programm die zentralen Herausforderungen im Forschungsfeld

identifiziert. Ausgewählte Aspekte wurden darüber hinaus in tiefgehenden Themenpapieren ausgearbeitet und systematisch erörtert. Diese Analysen sind gleichsam die Grundlage für Themenschwerpunkte in zukünftigen Förderrichtlinien. Dieses kooperative Vorgehen mit Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft sichert eine mit der Forschungscommunity koordinierte und transparente Themenentwicklung.

Ziel ist es, stets ein aktuelles, verlässliches und multiperspektivisches Bild des wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Forschungsbedarfs sowie des zu erwartenden Nutzens zu erhalten – und eine darauf zugeschnittene Forschungsförderung umzusetzen. Das Forschungsprogramm „Souverän. Digital. Vernetzt.“ wird diesem Anspruch gerecht und ist konsequent als lernendes Programm angelegt. Das BMBF kann so flexibel auf aktuelle forschungspolitische Entwicklungen und gesellschaftliche Bedarfe reagieren und kontinuierlich neue Themenfelder identifizieren und fördern.



Strategische Ziele

Technologische und digitale Souveränität sichern

Innovationen auf den Weg bringen

Vernetzte Gesellschaft gestalten

Digitalisierung nachhaltig realisieren

Wirtschaft in Deutschland digital stärken

Handlungsfelder

Vernetzungstechnologien von morgen erforschen

- 6G vorbereiten
- Hightech für die Vernetzung entwickeln
- Neue Netzwerkkonstrukturen entwerfen
- Neue Technologiefelder erschließen

Vernetzte Systeme ganzheitlich, sicher und nachhaltig entwickeln

- Anpassungsfähige, intelligente und sichere Vernetzungslösungen umsetzen
- Ressourceneffiziente Systeme erforschen
- Widerstandsfähige und langlebige Kommunikationssysteme schaffen
- Gesellschaftliche und wirtschaftliche Zusammenhänge erforschen

Gemeinsam Lösungen für Anwendungen entwickeln

- Leitbranchen in Deutschland voranbringen
- Digitalen Alltag gestalten
- Gemeinsame Standards vorbereiten
- Europäische Technologieangebote schaffen

Strategische Ziele

Das BMBF orientiert sich bei der Förderung von Forschung zu Kommunikationssystemen an folgenden **strategischen Zielen**:

- Technologische und digitale Souveränität sichern
- Innovationen auf den Weg bringen
- Vernetzte Gesellschaft gestalten
- Digitalisierung nachhaltig realisieren
- Wirtschaft in Deutschland digital stärken

Handlungsfelder

Aus diesen strategischen Zielen leiten sich drei **Handlungsfelder** ab, also die Gebiete, auf denen in den nächsten Jahren die aus strategischer Sicht relevantesten Herausforderungen für die Forschung zu Kommunikationssystemen liegen.

Umsetzung

Um die jeweiligen Handlungsfelder zu adressieren, orientiert sich das BMBF bei der konkreten Ausgestaltung von Fördermaßnahmen an den strategischen Zielen. Schwerpunkt der operativen Projekt-

Damit Deutschland und Europa technologisch souverän sein können, ist heute Forschung für die Vernetzungstechnologien von morgen notwendig. Dem künftigen Standard 6G, Hightechlösungen – etwa auf Basis von KI – sowie neuen Netzwerkarchitekturen und Technologiefeldern kommt dabei besondere Bedeutung zu.

→ Seite 12

Die Kommunikationsnetze der Zukunft müssen resilient sein – und mit Störeinflüssen selbstständig, schnell und effizient umgehen. Ebenso muss Netztechnologie überall und jederzeit den sicheren Transport von Daten gewährleisten. Angesichts des Klimawandels ist zudem ein effizienter Umgang mit Ressourcen wichtig.

→ Seite 22

Kommunikationssysteme der Zukunft müssen eng mit den Anforderungen bestimmter Anwendungen zusammengedacht werden. Leistungsfähige Vernetzungstechnologien bieten die Chance, die deutsche Wirtschaft weiter in Richtung Industrie 5.0 voranzubringen und sie sind die Basis, um das tägliche Leben der Menschen besser zu machen.

→ Seite 27

Umsetzung

Wissenschaftliche Kompetenzen fördern

Forschung und Wirtschaft zusammenbringen

Netzwerke und starke Akteure für künftige Kommunikationstechnologien aufbauen

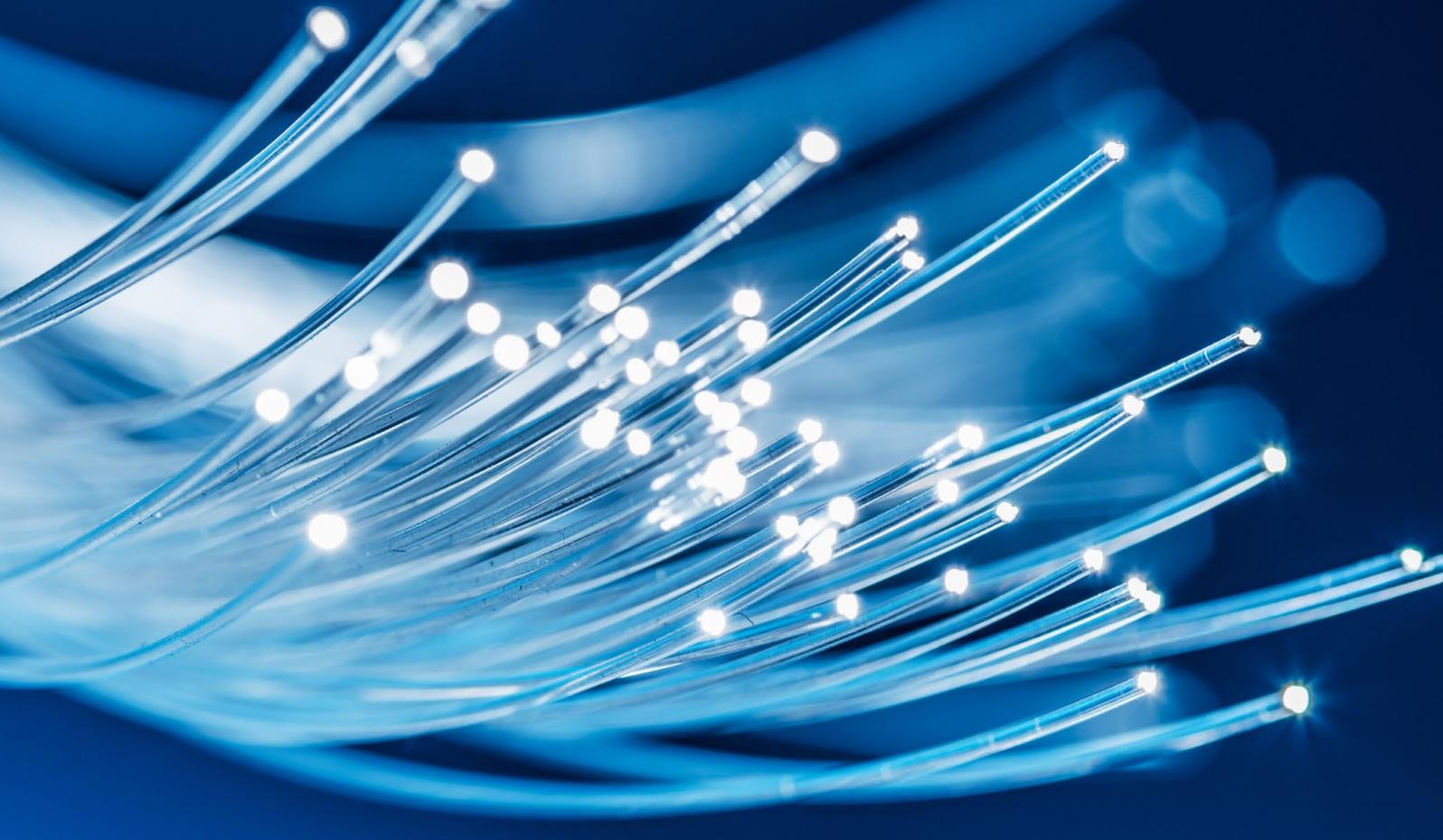
Innovationskraft in Mittelstand und Industrie stärken

Kompetenzen international bündeln

Forschungsergebnisse in die Anwendung transferieren

förderung ist, dass Innovationen aus der Forschung möglichst rasch den Weg in die Anwendung finden. Hierfür sind zum einen europäische Unternehmen mit FuE-Standorten hierzulande einzubeziehen. Zum anderen kommt es darauf an, eine starke Wissenschaft in einen engen Austausch mit der Wirtschaft zu bringen – insbesondere mit KMU. So soll Innovationsförderung die Basis schaffen für breit angelegte Innovationsökosysteme, getragen von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Solche Ökosysteme aufzubauen, mit notwendigen Infrastrukturen auszustatten, national und international – insbesondere in Europa – zu vernetzen,

langfristig zu betreiben und stetig weiterzuentwickeln – ist der beste Weg zur technologischen Souveränität. Der Erfolg der Ökosysteme und somit der Maßnahmen wird sich im wachsenden Anteil der Netzkomponenten europäischer Herkunft in der deutschen Netzinfrastruktur widerspiegeln. Ein weiterer Erfolgsindikator wird die Etablierung strategischer internationaler Kooperationen bei großen Forschungsprogrammen zum Beispiel bei 6G sein. Eine sachgerechte Kombination aus qualitativen und quantitativen Indikatoren wird zur Erfolgskontrolle herangezogen (siehe Kapitel 7.3).



3 Vernetzungstechnologien von morgen erforschen

In der Zukunft bewegen sich Bürgerinnen und Bürger souverän in einer hochvernetzten Welt. Sie werden dabei von Sensornetzen und autonomen Geräten unterstützt. Dadurch wird die Welt digital erfassbar und die Umgebung kann sich dynamisch an die Bedürfnisse der Bürgerinnen und Bürger anpassen. Der Schutz der personenbezogenen Daten und ihre Nutzung werden transparent und nutzerfreundlich sein. Assistenzsysteme werden sich vernetzen und autonom Informationen austauschen. Sollte das prognostizierte Wachstum anhalten, ist im Jahr 2030 mit über 50 Milliarden vernetzten Geräten im Internet der Dinge zu rechnen. Gleichzeitig steigt die Anforderung an das Leistungsniveau von funk- und kabelgebundenen Netzen: Der Zugriff auf Daten muss möglichst überall, zu jeder Zeit und in voller Bandbreite möglich sein – schnell, sicher, robust und energieeffizient. Die Herausforderung für künftige Kommunikationsstrukturen besteht darin, diese Infrastrukturressourcen intelligent und effizient zu steuern und

dabei Nachhaltigkeit sicherzustellen. Gerade sicherheitskritische Anwendungen wie beispielsweise das autonome Fahren werden enorm von zukünftigen leistungsfähigen und resilienten Vernetzungstechnologien profitieren, da auch bei eventuell auftretenden Störungen der Kommunikation noch ein unfallfreies Anhalten oder eine sichere Weiterfahrt gewährleistet sein muss.

Um die Informations- und Kommunikationstechnologien für diese Anforderungen der Zukunft fit zu machen, bedarf es innovativer Verfahren und Komponenten. Das BMBF setzt in der Innovationsförderung entsprechende Schwerpunkte, damit Forschung in Deutschland und Europa Know-how zu den Vernetzungstechnologien der Zukunft aufbauen und so die technologische Souveränität stärken kann.

3.1 6G vorbereiten

Digitale und technologische Souveränität hängt nicht zuletzt davon ab, ob deutsche und europäische Lieferanten wesentliche und kritische Systeme beziehungsweise Systemkomponenten für zukünftige Kommunikationsnetze zur Verfügung stellen können. Deutschland und Europa müssen 6G maßgeblich mitgestalten, frühzeitig technologische Grundlagen entwickeln und patentrechtlich schützen und somit das Fundament dafür legen, bei dieser Schlüsseltechnologie mit innovativen und international wettbewerbsfähigen Produkten wichtiger Akteur am globalen Markt zu werden. In den vergangenen Jahren hat Deutschland bereits die Forschung zu innovativen Kommunikationstechnologien und 5G vorangetrieben. Zur nachhaltigen Sicherung von Souveränität bedarf es aber noch weiterer Innovationsanstrengungen in Deutschland und Europa. Es gilt, die Grundlagen für ein ganzheitliches 6G-System zu schaffen. Dieses System muss verschiedene Technologieebenen abdecken – von der Netzebene bis hin zur Material-,

Komponenten-, Mikrochip- und Modulebene. Eine Konvergenz des Funkzugangsnetzes bis hin zum Weitverkehrsnetz soll dabei verstärkt werden. Um Bedarfe der digitalen Wirtschaft und Gesellschaft zu erfüllen, werden dabei stets Anwendungsszenarien mitbetrachtet. Das Ziel: in diesem Forschungsfeld an der Spitze der bereits anlaufenden internationalen Forschung zu agieren.

Mobilfunksysteme der sechsten Generation (6G)

Deutschland zielt darauf ab, die Mobilfunksysteme der kommenden sechsten Generation (6G) maßgeblich mitzugestalten, frühzeitig technologische Grundlagen zu entwickeln und somit das Fundament dafür zu legen, bei dieser Schlüsseltechnologie mit innovativen und international wettbewerbsfähigen Produkten wichtiger Akteur am globalen Markt zu werden. Ein wichtiger Aspekt bei der Erforschung der Grundlagen von 6G soll dabei darauf liegen, dass die Sicherheit ein integraler Bestandteil wird und dass das Gesamtsystem eine hohe Resilienz aufweist. Ergänzend werden durch die Förderung die Kompetenzen aufgebaut, um die zukünftigen 6G-Netze souverän und sicher betreiben zu können.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Konzepte für öffentliche und nichtöffentliche Mobilfunknetze, die speziell auf zentrale Industriezweige Deutschlands zugeschnitten sind sowie deren Evaluierung und Standardisierung
- Hochleistungsfähige Funkschnittstellen in Bezug auf Datenrate, Spektrumsnutzung, Zuverlässigkeit, Latenz und Energieverbrauch
- Resiliente, sichere und hochzuverlässige Kommunikationssysteme
- Konzepte für Flächenabdeckung durch ultra-breitbandige intelligente und aktiv anpassbare 6G-Antennensysteme für Gigahertz- und Terahertz-Frequenzbereiche
- Tiefe Integration von Technologien der Künstlichen Intelligenz (KI) zur Netzsteuerung und -optimierung sowie in Übertragungsverfahren und Signalverarbeitung
- Mobilfunknetze als Infrastruktur für mobile, netzunterstützte KI-Dienste
- Neue Netztopologien und Systemarchitekturen zur Umsetzung industrieller Anwendungsfälle
- Innovative Sharing-Konzepte zur effizienteren Nutzung des Spektrums
- Unterstützung von neuer, agiler Mensch-Maschine-Interaktion und von personenbezogenen telemedizinischen Anwendungen
- Nutzung von Quantentechnologien für die Verbesserung klassischer Kommunikationssysteme

- Flexible, modulare, skalierbare und programmierbare Infrastrukturen
- Optimierung der Ressourcen- und Energieeffizienz
- Individualisierung der Funkumgebung durch intelligente rekonfigurierbare Oberflächen
- Nutzbarmachung von höheren Frequenzen im Millimeterwellen- und Terahertzbereich, auch für den mobilen Funkzugang
- Optische Hochgeschwindigkeitsnetze und photonisch-elektronische Integration für Kommunikationssysteme
- Konzepte für hohe Lokalisierungsgenauigkeit im Zentimeterbereich und die sensorische Erfassung der Umwelt mittels Kommunikationstechnologien (zum Beispiel in der Produktion)

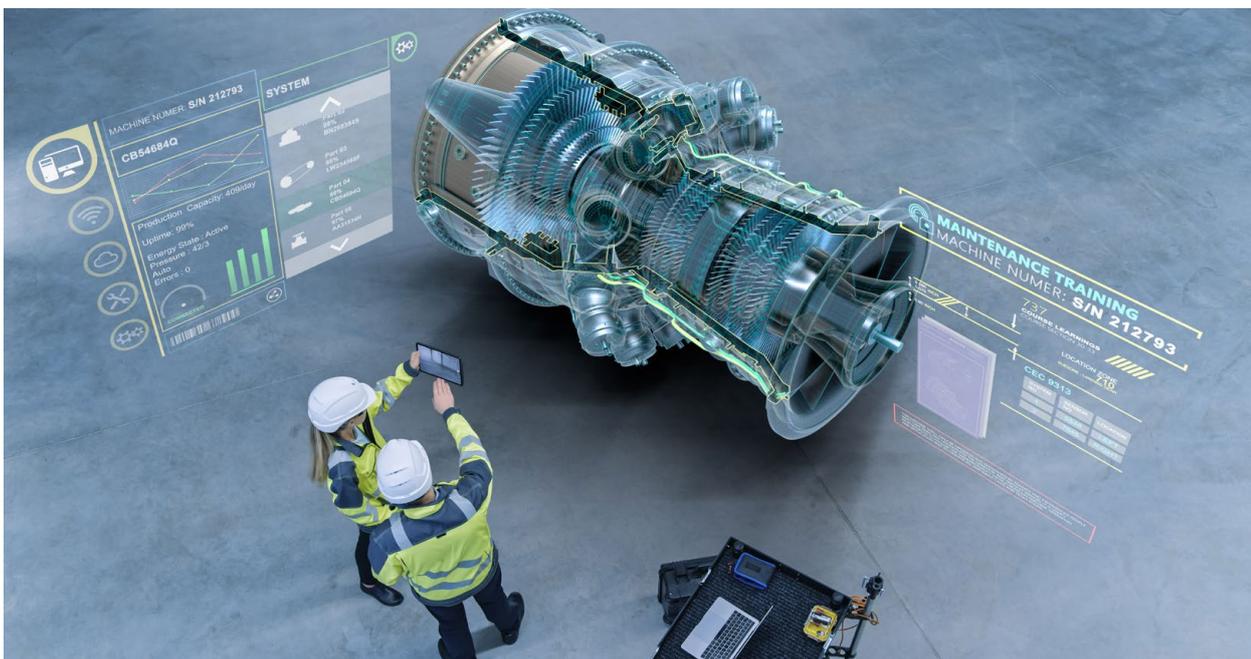
bar sein, damit Bürgerinnen und Bürger privat oder im Beruf überall und jederzeit digitale Anwendungen nutzen können. Menschen müssen sich mit Technik intuitiv und agil bewegen und mit ihrer Umwelt interagieren können. Hierfür bedarf es innovativer Konzepte zur Unterstützung kognitiver Fähigkeiten im Netz unter Anwendung von KI – auch unter Nutzung von zusätzlicher Sensorik. Voraussetzung dafür ist, dass Daten in Echtzeit übertragen und in besonders geschützten Rechenressourcen verarbeitet werden. Die sichere Interaktion von Mensch, Maschine, Netz und Umwelt auch in mobilen Szenarien erfordert deshalb ein neuartiges hochdynamisches Management der eingesetzten Ressourcen für Speicherung, Rechenleistung und Datenübertragung. Nur so können die Kommunikationssysteme der Zukunft ausreichend zuverlässig, sicher und schnell sein und für Bürgerinnen und Bürger sowie Unternehmen den besonderen Schutz hochsensibler persönlicher Daten sicherstellen.

3.2 Hightech für die Vernetzung

Die Vernetzungstechnologien von morgen müssen Mobilität zuverlässig unterstützen und überall verfü-

3.2.1 Selbstoptimierend: Künstliche Intelligenz in Kommunikationssystemen

Die umfassende Vernetzung im Internet der Dinge, das rasant steigende Datenvolumen und die immer höheren und diverseren Anforderungen neuer Anwendungen erfordern immer komplexere Netzwerktechnologien. Um in Zukunft eine weitreichende und jederzeit verfügbare Vernetzung zu gewährleisten,





gilt es, neue lernfähige Kommunikationssysteme zu entwickeln und zu erproben, die mit dem permanent steigenden Datenaufkommen und immer komplexeren Anforderungen neuer Anwendungen langfristig Schritt halten können. Grundlage hierfür ist eine intelligente Steuerung und Optimierung von Kommunikationssystemen und -netzen. Auf Basis leistungsfähiger Mikroelektronik hat sich KI bereits in vielen Bereichen zu einer Schlüsseltechnologie entwickelt und birgt das Potenzial, auch Kommunikationssysteme zu revolutionieren. KI erlaubt Kommunikationssystemen zu lernen, sich effizient und automatisch an besondere Situationen anzupassen und extreme Herausforderungen durch vorausschauende Maßnahmen zu meistern. Zusätzlich kann der Mensch bei der Optimierung und Steuerung von Netzen unterstützt und der Ressourceneinsatz effizienter gestaltet werden. Auch in der Datenübertragung selbst erlaubt KI neue Ansätze, um beispielsweise die Komplexität der Empfangsmodule zu reduzieren. Die Implementierung von KI in Netzen benötigt Rechenkapazitäten, die bedarfsgerecht und den besonderen Anforderungen der KI entsprechend bereitgestellt werden müssen. Mit KI in Netzen können darüber hinaus bei datenschutzkonformer Datenanalyse aus den wertvollen Netzdaten zusätzliche Kontextinformationen über die Umwelt generiert werden, die in der Verwertung Dienste und Anwendungen intelligenter machen. Hierbei kann die KI sogar auf dieselben Rechenressourcen wie die Netztechnik zurückgreifen, womit deren Einsatz effizienter wird.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Architektur und Strategien für eine ressourceneffiziente und dynamische Implementierung von KI und den dafür benötigten Ressourcen in Netzen sowie Vorbereitung der Standardisierung
- Konzepte und Implementierungsstrategien für intelligente Dienste und Anwendungen, die netzbasierte KI-Ressourcen nutzen, sowie die Vorbereitung der dazu benötigten Standardisierung
- Modelle und Verfahren zum KI-unterstützten Management, Betrieb und Entwurf von hochkomplexen Netzen unter Betrachtung von Ressourceneffizienz, Resilienz, Ressourcenmanagement und Routing
- Modelle und Verfahren zur optimalen Steuerung von hochkomplexen Netzen bei Mobilität unter Betrachtung von Bewegungsprädiktion und Kanalschätzung, beispielsweise für massive Multiple-Input-Multiple-Output(MIMO)-Antennensysteme
- Anwendungsbezogene Erforschung und Nutzbarmachung echtzeitfähiger und verteilter KI-Algorithmen für Kommunikationsgeräte unter Betrachtung von Algorithmenkomplexität, Ressourceneffizienz, Erkennungsrate und Trainingsdaten
- Modelle und Verfahren zur Erfassung und Synthese sowie Bereitstellung von Trainingsdaten für KI-basierte Kommunikationssysteme
- Explorative Nutzbarmachung der Zustandsinformationen aus der Netzinfrastruktur mittels datenschutzkonformer und privatsphärenfördernder Datenanalyse

3.2.2 Hochflexibel: Softwareisierung und Virtualisierung von Kommunikationsnetzen

Bereits heute spielen in modernen Kommunikationssystemen wie 5G Software und die Virtualisierung von Netzwerkfunktionen eine wichtige Rolle. Der Grund: Innovative softwarebasierte Technologien

machen Datenströme zentral steuerbar. Manuelle Eingriffe in einzelne Netzkomponenten sind nicht mehr notwendig. In diesen softwareisierten Netzen können mittels virtueller Softwareinstanzen auf derselben Hardware verschiedene Netzabschnitte – sogenannte Network-Slices – im Parallelbetrieb realisiert werden. Routerdienste verteilen in jedem Netzabschnitt große Datenmengen. Dieses Network-Slicing ermöglicht es, dass beispielsweise auf einer Netzebene hochauflösendes Videostreaming läuft und gleichzeitig, auf einer anderen Ebene, zuverlässige Kommunikation in Echtzeit zwischen kooperierenden Robotern stattfindet. So führen Softwareisierung und Virtualisierung zu einer neu gewonnenen Flexibilität und optimieren das Netzmanagement für den sich verändernden Datenverkehr in der digitalen Welt. Weitere Flexibilität und Innovationspotenziale können offene und disaggregierte Kommunikationssysteme bieten. Solche Systeme ermöglichen mithilfe definierter Schnittstellen eine Interoperabilität von Modulen und Subsystemen verschiedener Hersteller. Hierdurch kann Software weitgehend losgelöst von Hardware weiterentwickelt werden. Da Softwareentwicklung in der Regel deutlich dynamischer verläuft, verspricht dies eine erhebliche Beschleunigung der Innovationszyklen. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die Interoperabilität auch spezialisierte Lösungen von kleineren, innovativen Unternehmen in das Gesamtsystem integriert werden können. Dies gilt auch und insbesondere für energieeffiziente Hardwarekomponenten. Offene Schnittstellen ermöglichen zudem den Zugriff auf tiefer liegende Daten und begünstigen damit die Entwicklung neuer KI-Algorithmen im Netzbereich.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Verfahren und Modelle zur Komplexitätsreduktion trotz Softwareisierung und offener Schnittstellen
- Verfahren zur Steigerung der Effizienz der Virtualisierung im Bereich der Netzsteuerung
- Erforschung und Entwicklung von flexiblen Architekturen als Rahmen für intelligente Kommunikationsnetze, die die Konvergenz vom Funkzugangnetz bis zum Weitverkehrsnetz weiterführen

- Erforschung von Technologien und Systemansätzen, die flexible Netze mit hoher Effizienz paaren
- Architekturelle Fragen, ob und wie man Netzkomplexität und Intelligenz verteilt

3.2.3 Schnell, sicher, robust: Datenstrom in modernen Kommunikationsinfrastrukturen

Unser globaler Informationsraum, das World Wide Web, setzt auf fast 30 Jahre alte Konzepte, die bemerkenswert skalierbar sind. Die sich verändernden Anforderungen der Nutzerinnen und Nutzer an das Leistungsniveau in der digitalen Welt bringen die heutige Kommunikationsinfrastruktur allerdings an ihre Grenzen. Anwendungen, zum Beispiel aus dem



Bereich der Telepräsenz, die unsere Realität virtuell darstellen, unser Umfeld mit digitalen Mitteln anreichern oder eine Interaktion mit virtuellen oder entfernten Umgebungen zulassen, stellen hohe Anforderungen an die Netze. Eingesetzt werden solche Anwendungen etwa in der sogenannten Holomedizin: Durch die Technologie der Mixed Reality (MR) kann die reale Welt zunehmend durch Hologramme erweitert werden, die als dreidimensionale Objekte im Raum erscheinen und mit Nutzerinnen und Nutzern interagieren können. Für Medizinerinnen und Mediziner bietet dies viele Möglichkeiten, beispielsweise in der Diagnostik, bei operativen Eingriffen oder in der Versorgung von Patientinnen und Patienten. Nur mit einer schnellen, sicheren und robusten Kommunikation können diese Anwendungen Teil unserer wahrgenommenen Realität werden. Diese neuartigen

Anwendungen bedeuten extrem hohe und teils neue Anforderungen für die Kommunikationstechnik: Denn es sind gleichzeitig extreme Schnelligkeit, Sicherheit und Robustheit erforderlich. Diese motivieren bereits heute zu neuen – beispielsweise disruptiven – Ansätzen der Informationsübertragung.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Anwendungsgetriebene Analyse von neuen Informationsübertragungskonzepten wie semantischer Informationsübertragung, Post-Shannon-Konzepten und Quantentechnologie
- Innovative Verfahren für Netzaufbau und Datenübertragung, zum Beispiel Information-Centric Networking, Data-Oriented Network Architecture, Content-Centric Networking, semantische Informationsnetze
- Innovative Verfahren zum Routing, Caching und Replizieren von Inhalten in Netzen
- Konzepte und Verfahren zur In-Netz-Datenverarbeitung



3.3 Neue Netzarchitekturen entwerfen

Die Funktionsweise von Netzen ist durch ihren grundlegenden Aufbau, auch Architektur genannt, bestimmt. Wo früher nur lokale Netze in Gebäuden konzipiert werden mussten, werden heute weltumspannende Netzarchitekturen definiert. Die Digitalisierung im Internet der Dinge schreitet auf mehreren Ebenen voran. Dadurch finden sogar Kleinstmaschinen, wie Miniaturdrohnen, für verschiedene Anwendungsszenarien im industriellen Umfeld, aber auch im Smart Home Verwendung. Notwendige Datenverarbeitungen können Kleinstmaschinen selbst meist nicht übernehmen, weshalb eine Anbindung an ein Netz und dessen verteilte Rechenressourcen notwendig ist. Ein solches Netzarchitekturkonzept wird als Mobile Edge Computing bezeichnet. Es ermöglicht große technische, aber auch wirtschaftliche Mehrwerte im Zuge der digitalen Transformation.

Beispielsweise dient Mobile Edge Computing der Vernetzung von großen Maschinen und Anlagen: Koordinierung, Monitoring, Automatisierung und Fernsteuerung werden von jedem Ort der Welt aus möglich. Für jede Größendimension eines Netzes ist hier ein anderer Architekturansatz notwendig.

3.3.1 Urbane, infrastrukturfreie und Weitverkehrsnetze: Online bis in den kleinsten Winkel

Mit einer umfassenden Digitalisierung wird eine leistungsfähige Kommunikationsinfrastruktur zum entscheidenden Faktor für eine inklusive Gesellschaft und eine wettbewerbsfähige Wirtschaft. Sie muss nicht nur den wachsenden Anforderungen in Bezug auf weiterhin schnell steigende Datenvolumen, sondern auch hinsichtlich uneingeschränkter Verfügbar-

keit und Zuverlässigkeit gerecht werden. Zukünftige Kommunikationsinfrastruktur wird hochvolumige Vernetzung zwischen Industrieunternehmen und Rechenzentren garantieren und dabei höchsten Sicherheitsanforderungen genügen. Bürgerinnen und Bürger werden überall und immer digitale Dienste nutzen können. Auch Maschinen und Sensoren werden hochperformante Abdeckung in peripheren und ländlichen Gebieten, in jedem Winkel einer Fabrikhalle, in Fahrzeugen, Drohnen und Kellern vorfinden. Bei besonderen Ereignissen wie Großveranstaltungen von Kultur oder Sport wird situationsbedingt eine adäquate Verstärkung der Netze möglich werden. Diese innovativen Netzarchitekturen stellen gleichzeitig den Schutz persönlicher oder betrieblicher Daten sicher.





Wichtige Forschungsfelder sind:

- Massive Kapazitätssteigerung in optischen Transportsystemen beispielsweise durch fortschrittliche Verfahren, die alle verfügbaren Dimensionen (beispielsweise Raum, Zeit, Frequenz, Polarisation) optimal nutzen
- Nutzbarmachung von Miniaturisierung und optischer Systemintegration für leistungsfähige optische Transportsysteme
- Technologien zur optischen und zur digitalen Signalverarbeitung
- Hochperformante Vernetzung abseits leistungsfähiger Infrastruktur und infrastrukturlose Netzkonzepte
- Gerät-zu-Gerät-(Device-to-Device, D2D-) Kommunikation, Relay-Netze, durch Drohnen unterstützte mobile Netze, 3D-Netze
- Satellitenbasierte und stratosphärische Netzerweiterung sowie temporäre Kommunikationssysteme via High Altitude Pseudo-Satellite (HAPS), Drohne oder Flugzeug

- Dynamisch erweiterbare Netztopologien durch gemanagte, hochperformante Ad-hoc-Vernetzung via Gerät-zu-Gerät-Konnektivität
- Skalierbare, modulare und programmierbare Architekturen (auch für packet-optische Netze)
- Netzautomatisierung und -optimierung, insbesondere auf Basis von Netztelemetrie und KI
- Prädiktive Methoden für Netzbetrieb, -wartung, und Fehlerbehebung
- Campus-Netze, die auf die Bedürfnisse der Anwendungsszenarien flexibel zugeschnitten werden können

3.3.2 Nanonetze: Wenn Miniaturmaschinen miteinander sprechen

Heute noch Science-Fiction: Millionen von Nanobotschwärmen durch die Luft, durch Wasserwege, in unserem Körper und sogar innerhalb einzelner Zellen. Es entstehen Netze aus kleinen Miniaturmaschinen, die nur wenige hundert Nanometer groß sind, sei es biologisch als Zelle oder nicht biologisch, etwa als Nanosensor. Während die Entwicklung solcher komplexen Nanonetze³ aus vielen Nanomaschinen immer näher rückt, gerät besonders eine Frage ins Visier der Forschung: Wie würden solche Nanobots miteinander kommunizieren? Aufgrund ihrer Größe sind übliche Kommunikationsverfahren schwierig und ineffizient. Lösungsansätze finden sich in der Natur: Zellen kommunizieren durch die Freisetzung und Wahrnehmung von Signalmolekülen. Im Zentrum der Forschung stehen Methoden und Verfahren, die eine effiziente Kommunikation auf kleinstem Raum ermöglichen.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Erforschung der Übertragungskanäle im Sub-Mikro- und Nanometerbereich, Entwicklung von Kanalmodellen für molekulare Kommunikation

3 Richard Feynman, „There’s Plenty of Room at the Bottom“, 1959
 K. Eric Drexler: „Nanosystems: Molecular Machinery, Manufacturing, and Computation“, 1992

beziehungsweise elektromagnetische Kommunikation im Sub-Mikrometerbereich

- Sender- und Empfängerdesign für sowohl biologische als auch nicht biologische Nanomaschinen
- Heterointegrationstechnologien und Bauteilkonzepte für innovative Sender-, Empfänger-, Antennen- und Netzkomponenten, Nutzbarmachung weiterer Technologien aus der Mikroelektronik und Mikrosystemtechnik für Kommunikationssysteme
- Kommunikation mittels elektromagnetischer Wellen im Bereich von Nanometern (zwischen Nanomaschinen, Inter-Chip-kommunikation) durch Einsatz neuer Materialien wie beispielsweise Graphen

3.3.3 Lokale Hochleistungsnetze: Die Vision von kooperierenden Roboterschwärmen

Ob zu Hause, im Café oder im Unternehmen: Lokale Netze erlauben es uns, mit unserem Computer drahtlos und barrierefrei zu surfen, Daten auszutau-

schen und zu kommunizieren – überwiegend über Mobilfunk, WLAN-Verbindungen oder Bluetooth. In der digitalen Zukunft wird es noch komplexere lokale und latenzarme Netzkonstellationen geben, in denen ganze Roboterschwärme oder Drohnen drahtlos miteinander kommunizieren und gemeinsam Aufgaben übernehmen. Möglich machen dies Millionen von zusammenschalteten Sensoren. Effizienz bringen solche drahtlosen Hochleistungsnetze zum Beispiel für komplexe Produktions- und Logistikketten, wie etwa im Warenversand bei Paketdiensten. Und auch der Einsatz am Menschen über Sensoren am Körper, an Kleidern oder Fasern ist denkbar. Grundlage hierfür sind innovative Vernetzungslösungen für lokale Hochleistungsnetze, die neue mannigfaltige Anwendungen ermöglichen.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Latenzarme Hochleistungsnetze für komplexe Roboter mit einer großen Anzahl an Sensoren und Aktoren
- Die dynamische Koordination und die Kooperation beweglicher Geräteschwärme über agile,





skalierbare und sich selbst organisierende, drahtlose Kommunikationsnetze

- Verfahren zur hochpräzisen Lokalisierung im Raum und sensorischen Wahrnehmung der Umgebung mittels Komponenten des Kommunikationssystems
- Datenübertragung im sichtbaren Lichtspektrum (Visible Light Communication) und optische Drahtlosübertragung für die lokale Kommunikation
- Funkkommunikation in sehr hohen Frequenzen im Millimeterwellenspektrum und Terahertzbereich, Antennenaufbauten mit vielen Elementen und geeigneten 3D-Strahlenformungstechniken
- Softwaredefinierte Antennen, neue Hardware-Architekturen, analoge Signalverarbeitung, Hardware-Software-Co-Design
- Nutzung sicherer und hochzuverlässiger Funknetze für funktionale Sicherheit

3.4 Neue Technologiefelder erschließen

Heutige Kommunikationssysteme und Konzepte der Informationsübertragung beruhen immer noch auf Arbeiten des Mathematikers und Elektrotechnikers Claude Shannon, der seine Theorie zur Informationsübertragung Ende der 1940er-Jahre entwickelte. Explorative Untersuchungen für potenziell disruptive neue Kommunikationsarten, wie zum Beispiel die Post-Shannon- oder die Quantenkommunikation, zeigen Potenziale für zukünftige Kommunikationsnetze. Beispielsweise können diese Ansätze bei einer erfolgreichen Umsetzung der Forschung in künftigen 6G-Systemen integriert werden. Die Forschung zu disruptiven Ansätzen in der Kommunikationstechnologie bedarf der intensiven Unterstützung durch das BMBF. Denn das Risiko ist hoch, dass solche Konzepte in der Praxis letztlich nicht funktionieren. Doch es lohnt sich, dieses Risiko einzugehen: Denn es besteht für Deutschland durch diese Forschung auch die Chance, die Basis für Sprunginnovationen in der Zukunft zu legen, um so perspektivisch in der Spitze der internationalen Technologieentwicklung mitzuspielen.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Anwendungsgetriebene Analyse von neuen Informationsübertragungskonzepten wie semantischer Informationsübertragung, Post-Shannon-Konzepten und Quantentechnologie
- Innovative Modelle und Verfahren für die optimierte Übertragung und Speicherung von Daten über das Shannon-Prinzip hinaus, Integration von Quantentechnologie in Systemlösungen
- Explorative Untersuchungen zu völlig neuen, auch disruptiven Ansätzen für Mobilfunksysteme (zum Beispiel Post-Shannon, semantische und nutzungsbezogene Kommunikation)



4 Vernetzte Systeme ganzheitlich, sicher und nachhaltig entwickeln

Die heutige allumfassende Vernetzung und der permanente Datenaustausch sind aktuell noch sehr energie- und ressourcenintensiv. Dieser Trend wird sich mit der zunehmenden Anzahl vernetzter Geräte und neuen Diensten und Anwendungen noch verstärken. Das Ziel für die Entwicklung nachhaltiger Kommunikationstechnologien muss es daher sein, einen signifikanten Beitrag zum schonenden Umgang mit den vorhandenen Ressourcen zu leisten.

Doch nicht nur die Prinzipien der Nachhaltigkeit müssen Grundlage künftiger Kommunikationssysteme sein. Mit einer immer dichteren Vernetzung steigt auch unsere Abhängigkeit von Kommunikationssystemen. Ihre Ausfallsicherheit rückt in den Fokus. Egal ob autonome Fahrzeuge, vernetzte Industrieanlagen oder robotische Systeme: Soziale und kritische technische Infrastrukturen benötigen leistungsfähige und ausfallsichere Kommunikationssysteme. Bedroht ist die störungsfreie Kommunikation durch verschiedene Einwirkungen wie etwa Cyberangriffe, Naturkata-

strophen oder auch Bauarbeiten. Die Kommunikationsnetze der Zukunft müssen in der Lage sein, sich auf Störungen verschiedenster Art selbstständig, schnell und effizient einstellen zu können – kurz: Sie müssen resilient sein. Ebenso müssen die Systeme die Kommunikationssicherheit sowie die Vertrauenswürdigkeit der transportierten Informationen gewährleisten. So sichern sie nicht nur sensible Unternehmensdaten, sondern verhindern auch potenzielle Sabotagen in der Produktion und unterstützen die Wahrung der Privatheit von Bürgerinnen und Bürgern.

4.1 Anpassungsfähige, intelligente und sichere Vernetzungslösungen umsetzen

Gegenwärtig sind nach Schätzungen bereits 24 Milliarden Geräte im Internet der Dinge vernetzt. Analysten rechnen für 2024 mit rund 32 Milliarden und

damit mehr als doppelt so vielen vernetzten Geräten⁴. Mit Fortschritten auf Gebieten wie KI und Robotik werden Menschen in Zukunft in allen Lebensbereichen immer enger mit automatisierten Systemen zusammenarbeiten. Die sichere Vernetzung dieser Geräte ist deshalb essenziell für eine funktionierende digitale Gesellschaft. Viele dieser Geräte werden sehr einfache Sensoren und Aktoren sein, die ohne jegliche Eingabemöglichkeit und mit geringster Rechenleistung auskommen müssen. Herkömmliche Methoden für eine sichere Authentifizierung und Kommunikation greifen hier meist nicht. Um das Vertrauen in die immer stärker vernetzte digitale Gesellschaft zu sichern, müssen hierfür neue Verfahren entwickelt werden. Die Herausforderungen sind vielschichtig: Je nach Bedarf müssen die technischen Lösungen besonders sicher und latenzarm sowie zuverlässig oder effizient sein und von Grund auf in Kommunikationssysteme integriert werden. Die zukünftigen

Netze müssen zudem auch wandlungsfähige und intelligente Kommunikationsinfrastrukturen bieten, die angepasst an die örtlichen und zeitlichen Gegebenheiten sind.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Informationstheoretische Methoden und Verfahren zur sicheren Kommunikation auf der physikalischen Schicht unter Berücksichtigung neuer Kanalkodierungsverfahren sowie massiver Mehrantennensysteme und Millimeterwellen
- Methoden und Verfahren zur Sicherheit in heterogenen Netzen
- Identitäten für das Internet der Dinge (Identifikation ohne eine Public-Key-Infrastruktur)
- Methoden und Verfahren zum sicheren, verteilten und skalierbaren Transport sowie dementsprechender Verarbeitung und Speicherung von Informationen im Internet der Dinge, in Cloud- und Multi-Cloud-Szenarien
- Verfahren, die funktionale Sicherheit garantieren und dokumentieren

Forschung zur Sicherheit digitaler Systeme

Bei den meisten Datenübertragungen müssen für praktische Anwendungen einige oder alle Schutzziele der IT-Sicherheit (beziehungsweise Informationssicherheit), nämlich Integrität, Vertraulichkeit und Verfügbarkeit, berücksichtigt werden. IT-Sicherheit und IT-Sicherheitsforschung sind daher Querschnittsthemen, die bei einer ganzheitlichen Betrachtung von Kommunikationssystemen, den Prinzipien Security by Design, Security by Default folgend, bereits beim Entwurf berücksichtigt werden müssen – ebenso wie die Prinzipien Privacy by Design und Privacy by Default in Forschung und Produktentwicklung. Das vorliegende Forschungsprogramm steht damit im Einklang mit dem neuen Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit „Digital. Sicher. Souverän.“.

4.2 Ressourceneffiziente Systeme erforschen

Deutschland muss bis zum Jahr 2030 große Anstrengungen unternehmen, um seine Klimaziele zu erreichen. Digitale Technologien können hierbei einen signifikanten Beitrag leisten⁵. Kommunikationssysteme als Grundstein der Digitalisierung müssen entsprechend ausgerichtet sein. Ein zentraler Punkt für die Erforschung und Entwicklung künftiger Kommunikationssysteme ist daher die Energieeffizienz. Das Ziel ist es, die Gesamtenergiebilanz der Kommu-

⁴ Cisco Annual Internet Report (2018–2023), [cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/air-highlights.html](https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/executive-perspectives/annual-internet-report/air-highlights.html)

⁵ Bitkom-Studie „Klimaeffekte der Digitalisierung“ 2020

nikationsnetze zu senken, wobei der gesamte Lebenszyklus inklusive Recycling aller Netzkomponenten und Beiträge der Vernetzung zur Nachhaltigkeit und Energieeffizienz mitbilanziert werden müssen. Die Digitalisierung und Kommunikationsnetze als deren Voraussetzung werden signifikant zur Senkung des globalen Energieverbrauchs und zum nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen beitragen. Hierdurch können Innovationen der digitalen Gesellschaft auf einer nachhaltigen Grundlage entstehen.

Wichtige Forschungsthemen sind insbesondere:

- Methoden und Technologien der KI zum Energie- und Ressourcenmanagement komplexer Netze
- Komplexitätsreduktion trotz/durch softwareisierte und virtualisierte Kommunikationsnetze
- Erforschung von energie- und ressourceneffizienten Algorithmen für das Internet der Dinge, für Cloud- und Multi-Cloud-Szenarien
- Einsatz neuer Materialien für energieeffiziente Kommunikationssysteme, Nutzbarmachung energieeffizienter mikroelektronischer Komponenten und Entwurf energieeffizienter Module für Kommunikationssysteme im Hochfrequenzbereich
- Ganzheitliche Betrachtung nachhaltiger Netztechnologie unter Berücksichtigung der Datenspeicherung und Verarbeitung

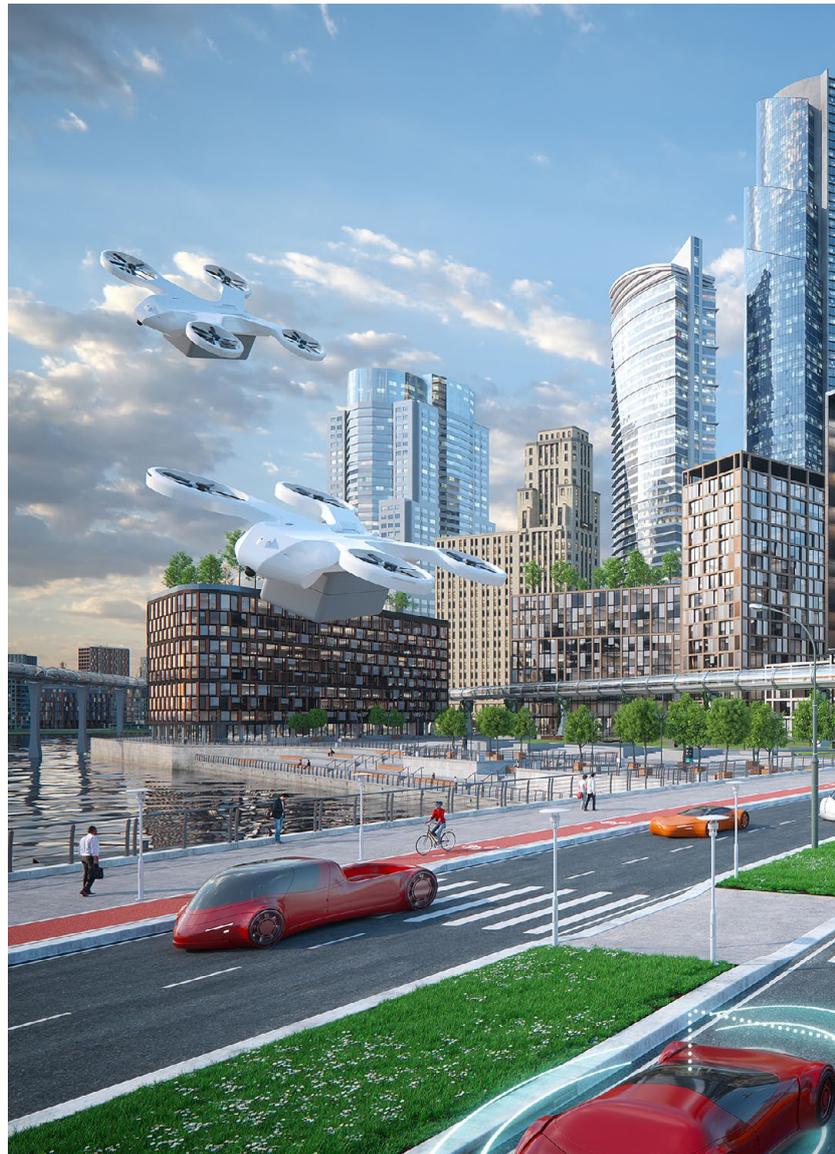
4.3 Widerstandsfähige und langlebige Kommunikationssysteme schaffen

Resiliente Kommunikationssysteme bieten einen sicheren und robusten Netzzugang. Sie bilden die Grundlage für zukünftige industrielle wie auch gesellschaftliche Anwendungen und müssen daher eine möglichst uneingeschränkte Servicequalität selbst bei unvorhergesehenen und unbekanntem Störungen

erlauben. Sie bringen die Intelligenz, Flexibilität und Reaktionsschnelligkeit mit, um Mensch und Maschine sicher und zuverlässig unter allen Umständen miteinander zu vernetzen.

Wichtige Forschungsthemen sind:

- Methoden und Technologien, um die Widerstandsfähigkeit von Kommunikationssystemen gegenüber widrigen Störereignissen oder aktiven Störern zu erreichen



- Netzmanagement mithilfe von KI, um Ausfallzeiten zu verhindern
- Methoden und Technologien zur Gewährleistung einer möglichst uneingeschränkten Servicequalität im Störfall, sodass die meisten Funktionen weiterhin ausgeführt werden können
- Methoden und Strategien, um die Auswirkungen von Fehlern in Kommunikationsnetzen zu vermindern und einen sicheren Betrieb zu gewährleisten

4.4 Gesellschaftliche und wirtschaftliche Zusammenhänge erforschen

Mit der zunehmenden Bedeutung der Kommunikationstechnik für Gesellschaft und Wirtschaft rücken bei der Entwicklung neuer Kommunikationsnetze nicht-technische Aspekte mit in den Fokus. Diese definieren Rahmenbedingungen, die es zu verstehen und berücksichtigen gilt. Die Technologie muss deshalb von Beginn an nutzerzentriert gestaltet und die Forschung an gesellschaftliche Bedarfe ausgerichtet werden.

Wichtige Forschungsfelder sind:

- Kommunikationsinfrastruktur als Voraussetzung für eine nachhaltige Digitalisierung
- Die Gesamtenergiebilanz einer nachhaltigen Digitalisierung (energie- und ressourceneffiziente Kommunikationsinfrastruktur und Energie- und Ressourceneffizienz durch Nachhaltigkeit durch Kommunikation)
- Kommunikationsinfrastruktur für eine inklusive Gesellschaft
- Sicherstellung von technologischer Souveränität, Privatheit und Datenschutz in einer Datenökonomie
- Spektrumsnutzungskonzepte und ihre Umsetzung



Resilienz

Netzresilienz bezeichnet die Widerstandsfähigkeit gegen externe und interne Störeinflüsse, die Regenerationsfähigkeit und Lernfähigkeit sowie die Sensitivität und Antizipationsfähigkeit der benötigten sicheren Kommunikationsinfrastruktur.



- Neuartige Anwendungen und zukünftiger Vernetzungsbedarf
- Deutschlands Rolle in der Standardisierung und ihre Stärkung
- Offene und innovationsgetriebene Ökosysteme für Produktentwicklung, Ausbau und Förderung der deutschen Industriebasis im Bereich der Kommunikationstechnologien und Anwenderindustrien
- Sicherstellung hochleistungsfähiger und wirtschaftlich sinnvoller Vernetzungslösungen für die Industrie

- Unterstützung des betrieblichen Datenschutzes und Schutz der deutschen Industrie-IP
- Kompetenz- und Innovationsnetzwerke zwischen Industrie und Forschungseinrichtungen
- Neue Konzepte für die Förderung der Technikakzeptanz, -folgenabschätzung und -mitgestaltung durch die Beteiligung und Information der Öffentlichkeit



5 Gemeinsam Lösungen für Anwendungen entwickeln

In vielen Branchen wie Automatisierungsindustrie, Logistik oder Medizintechnik bringt die intelligente Vernetzung zahlreiche Vorteile, um Prozesse, Produkte und Dienstleistungen zu verbessern oder gänzlich neue zu entwickeln. Moderne Kommunikationssysteme bilden die Basis für diese Vernetzung – und zwar in allen Anwendungsfeldern und Lebensbereichen. Schon heute wird die Landwirtschaft zu Smart Farming, Gesundheit zu E-Health und das eigene Zuhause zum Smart Home. Dabei stets im Hintergrund: Kommunikationssysteme, die Informationen zwischen Maschinen übertragen, Sensoren miteinander vernetzen oder die schnelle Verarbeitung und Auswertung von Daten ermöglichen.

Damit Vernetzungslösungen auch über Landesgrenzen hinweg funktionieren, sind internationale Standards eine wichtige Voraussetzung. Es kommt deshalb darauf an, die Vorbereitung von Standards wie 6G frühzeitig mitzugestalten. Nur so lässt sich gewährleisten, dass wir in zukünftigen Kommunikations-

netzen wesentliche, insbesondere kritische Systeme und Systemkomponenten von vertrauenswürdigen deutschen und europäischen Lieferanten einsetzen können. Dies ist unerlässlich, um technologische Souveränität zu erlangen und zu wahren. Wichtig bei der Definition der Standards ist es, Anforderungen künftiger Anwendungen bereits heute einzubeziehen, um in Zukunft einen maximalen Nutzen aus den Vernetzungslösungen ziehen zu können. Hierfür müssen Wissenschaft und Anwender aus der Wirtschaft aktiv in der Forschung zusammenarbeiten.

5.1 Leitbranchen in Deutschland voranbringen

Moderne Kommunikationssysteme ermöglichen Unternehmen in vielfältigen Sektoren wie Bauwirtschaft, Landwirtschaft, Logistik oder Produktion erhebliche Effizienzsteigerungen und erhöhen die

Innovationskraft. Teilkomponenten der Arbeitsprozesse werden über Sensoren messbar und über Kommunikationssysteme durch verteilte Rechenressourcen einfacher nachvollziehbar und steuerbar. Für Unternehmen in allen Wirtschaftsbereichen bieten sich dank intelligenter Informations- und Kommunikationstechnik Chancen, die Effizienz der Arbeitsprozesse enorm zu steigern und so die Wertschöpfung zu beflügeln. Moderne Kommunikationssysteme ermöglichen es auch, dass Menschen schneller, bequemer und nachhaltiger von A nach B kommen. Zukünftige Mobilitätsangebote, wie etwa Ride-Sharing-Dienste, setzen auf datenintensive Anwendungen und vernetzte, fahrerlose Transportsysteme. Dabei werden die Fahrzeuge nicht nur selbstständig fahren oder fliegen. Sie werden wie auch beim Platooning kooperative Manöver durchführen können und dabei selbstständig den Verkehrsfluss optimieren. Für den Straßenverkehr bedeutet dies einen geringeren Kraftstoffverbrauch und reduzierte Emissionen bei höherer Verkehrssicherheit und optimaler Auslastung der Straßeninfrastruktur.

Wichtige Forschungsthemen sind:

- Reaktionsschnelle, sichere und zuverlässige Vernetzungstechnologien, um zeitkritische Situationen bei Aufeinandertreffen von Mensch und Maschine beherrschbar zu machen
- Kommunikationsinfrastruktur, die für sicherheitsrelevante Aspekte zu jeder Zeit verfügbar ist, gegebenenfalls durch Aufbauen eigener lokaler Infrastruktur oder Direktkommunikation zwischen Geräten
- Kommunikationstechnologien zur Lokalisierung, damit auch auf schwierigem Terrain präzise navigiert werden kann
- Ansätze, mit denen die Verwaltung von Netzen mittels KI optimal auf den (Daten-)Verkehr abgestimmt werden kann und mögliche Sicherheitsprobleme detektiert werden können
- Echtzeitfähige und sichere Vernetzung für autonome Systeme, die flexibel und kooperativ komplexe Aufgaben erfüllen

- Einfache und sichere Integration bestehender Unternehmensnetze und -anlagen in zukünftige Netze und deren Verwaltung
- Energieeffiziente und nachhaltige Kommunikationstechnologien, die lange Wartungszyklen ermöglichen und zugleich die Datenübertragung kostengünstig gestalten

5.2 Digitalen Alltag gestalten

Von Smart Home bis Smart Country: Unser künftiger Lebensraum wird von intelligenten Sensoren, Automaten und Systemen geprägt sein. Das Leben der Bürgerinnen und Bürger in der hochvernetzten,



intelligenten Gesellschaft wird in hohem Maße durch Assistenzsysteme begleitet, die für mehr Sicherheit und Komfort sorgen. Hierbei wird der Mensch aber immer die Kontrolle über seine Umgebung und seine Daten behalten. Auch die Verwaltungsprozesse unseres Staates werden digitalisiert, um sie schlanker und effizienter zu gestalten – und um Beteiligungsmöglichkeiten für Bürgerinnen und Bürger zu stärken. Darüber hinaus profitieren Menschen von der digitalen Medizin, auch oft als E-Health bezeichnet, von besseren Diagnosen und individuelleren Behandlungen. Informations- und Kommunikationstechnologien unterstützen im Gesundheitswesen an zahlreichen Stellen – zum Beispiel bei der Vorbeugung, Diagnose, Behandlung, Monitoring und Verwaltung. So verlagert sich die Verarbeitung von Gesundheitsdaten künftig von den vernetzten medizinischen Geräten immer mehr in die Cloud mit

dem Ziel, die Datenflut zu bewältigen und komplexe Zusammenhänge erkennbar zu machen. Auch können medizinische Eingriffe in Zukunft dank Telerobotik in mobilen Operationssälen direkt am Unfallort aus der Ferne durchgeführt werden, wenn kein medizinisches Personal vor Ort verfügbar ist und die Situation ein schnelles Eingreifen erfordert, wie zum Beispiel in ländlichen Gebieten. Die angemessene Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern soll dazu beitragen, eine menschenzentrierte und wertorientierte Gestaltung der Technologie zu erreichen.

Wichtige Forschungsthemen sind:

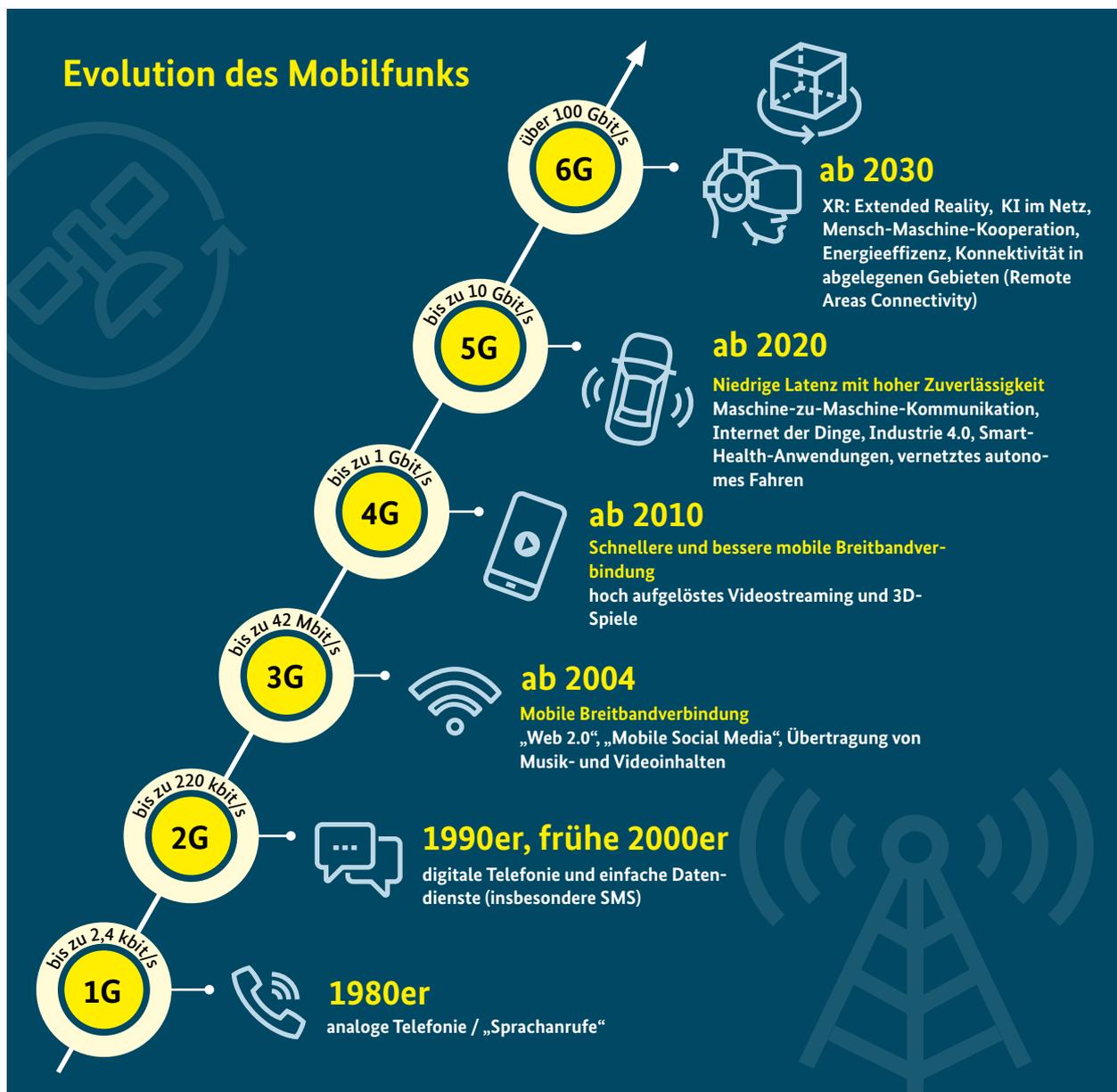
- Entwicklung von Lösungen, um Kommunikationsinfrastrukturen in Smart City beziehungsweise Smart Country sicher und beherrschbar zu machen und so die technologische Souveränität zu unterstützen
- Entwicklung von sicheren Vernetzungstechnologien für das digitale Zuhause, für das digitale (Zusammen-)Arbeiten und für eine agilere und intuitivere Kommunikation des Menschen mit seiner Umgebung
- Zuverlässige und benutzerfreundliche Konzepte zur Sicherstellung der Interoperabilität technischer Systeme, um Lösungen kombinieren zu können und Lock-in-Effekte zu vermeiden
- Kommunikationslösungen, die eine für Nutzende transparente, zuverlässige Übertragung und Verarbeitung sicherheitskritischer und personenbezogener Informationen gewährleisten
- Maßgeschneiderte und sichere Kommunikationssysteme für die Verwendung am und im Körper, etwa durch Orientierung an biochemischen Kommunikationsprinzipien
- Für medizinische Eingriffe per Teleroboter optimierte Kommunikationssysteme, die durch geringste Verzögerungen, hohe Bandbreite und hohe Zuverlässigkeit hochpräzise Interaktionen ermöglichen und gleichzeitig Kommunikationssicherheit für personenbezogene Daten gewährleisten



5.3 Gemeinsame Standards vorbereiten

Einen wesentlichen Beitrag zur technologischen Souveränität leistet die Etablierung von Standards. Sie dienen dem erfolgreichen Transfer von Technologie in die Anwendung, also in Produkte und Dienstleistungen mit zuvor formulierten Eigenschaften. Standardisierung ist allgemein die Vereinheitlichung von Produkten, Bauteilen oder Verfahren auf eine oder wenige Varianten. Die vernetzte Welt bringt die

Notwendigkeit mit sich, Kommunikationssysteme zu standardisieren, um eine nahtlose Vernetzung über Landesgrenzen hinweg zu ermöglichen. Es ist unabdingbar, dass Deutschland und Europa internationale Normungs- und Standardisierungsaktivitäten mitbestimmen. Deutschland und Europa haben mit ihrer starken industriellen Basis und zahlreichen innovativen KMU das Potenzial, voranzugehen und weltweite Standards zu setzen. Das BMBF unterstützt innerhalb von Fördermaßnahmen aktiv die Vorbereitung von Standards.



5.4 Europäische Technologieangebote schaffen

Im Bereich der Kommunikationstechnik gibt es Chancen, aber auch Herausforderungen. Deutschland und Europa sind im Bereich der Forschung und Entwicklung zu künftigen Kommunikationssystemen gut aufgestellt, insbesondere mit zwei europäischen Mobilfunkausrüstern, die große FuE-Standorte hierzulande betreiben, und einer starken FuE-Basis im Bereich der optischen Nachrichtentechnik und der Sensorik. Die Industriebasis im Bereich der Anwender ist hervorragend. Zusätzlich haben sich diese Akteure auch dank früherer BMBF-Maßnahmen und ihrer Arbeit in Industrieforen schon früh sehr gut vernetzen können. Dennoch wird im geopolitischen Kontext die Frage der technologischen Souveränität in der Kommunikationstechnik unmittelbar relevant, sodass Maßnahmen zu ihrer Stärkung notwendig sind.⁶

Die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas hängt maßgeblich von der erfolgreichen Gestaltung der digitalen Transformation ab. Die Corona-Pandemie hat den digitalen Wandel beschleunigt

und die Notwendigkeit einer performanten Netzinfrastruktur unterstrichen. Die hohe Relevanz, Schlüsseltechnologien wie Kommunikationssysteme selbst mitgestalten zu können, ist umso deutlicher geworden. Konkret müssen die in Europa verwendeten Netzwerktechnologien Handlungsgrundsätzen der europäischen Politik für einen offenen Digitalraum entsprechen, damit die sogenannten „Values by Design“ in die Systeme eingehen. Im Zentrum dieser berücksichtigten Werte stehen die Würde des Menschen und dessen Selbstbestimmung, Privatheit und Sicherheit in einer gefestigten Demokratie sowie Gerechtigkeit, Solidarität und Nachhaltigkeit. Zusätzlich wird gerade bei der Entwicklung internationaler Standards die Berücksichtigung europäischer Grundsätze gefördert und erwartet. Verankert sind diese Prinzipien zum Beispiel im EU Green Deal und den UN-Nachhaltigkeitszielen.



6 forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/dateien/nachrichten/positionspapier_fachkreis-kommunikationstechnologien_technologische_souveraenitaet.pdf



6 Forschung für die globale Zukunft gestalten

Die Handlungsbedarfe adressiert das Programm mit bewährten und innovativen Werkzeugen. Insbesondere bei strategischen Themen wie 6G werden neue, maßgeschneiderte Förderinstrumente wie die geplanten 6G-Hubs geschaffen. Ein Forschungsprogramm muss sich den rasanten technischen Entwicklungen immer wieder aufs Neue anpassen. Nur auf diese Art kann Forschung dem gesellschaftlichen Wandel und der temporeichen und innovationsgetriebenen Digitalisierung wirksam gerecht werden. Denn in dieser dynamischen Situation verändern sich auch die Bedarfe und Ansprüche an Technik sehr schnell. Es kommt darauf an, diese Anforderungen in engem Austausch mit den relevanten Stakeholdern kontinuierlich zu erkennen und mit Forschung und Fördermaßnahmen passgenau anzugehen. Das vorliegende Forschungsprogramm zu Kommunikationssystemen ist folglich als lernendes Programm ausgelegt. Dies umfasst einen kontinuierlichen Dialog mit allen zentralen Zielgruppen – von der Forschungscommunity über Akteure aus Wirtschaft und Politik bis hin zu Bürgerinnen und Bürgern, den späteren Nutzerinnen und Nutzern

der digitalen Technologien. Durch geeignete Formate werden Wissenstransfer und Partizipation unterstützt. So können kontinuierlich und bedarfsgerecht Fokusthemen ebenso wie Förderinstrumente angepasst oder neu geschaffen werden.

Die operative Forschungsförderung auf Basis dieses Programms wird neben der gezielten Stärkung der Innovationskraft der deutschen Wissenschaft und Wirtschaft auf strategisch ausgerichtete, länderübergreifende Kooperationen setzen – insbesondere im europäischen Forschungsraum. Denn Deutschland wird es auf dem Gebiet der Vernetzungstechnologien für sich alleine schwer haben, sich im globalen Wettbewerb durchzusetzen. Der Markt ist geprägt von größtenteils nach Asien verlagerten Wertschöpfungsketten und großen Technologieriesen aus den USA und China, die über enorme Finanzmittel verfügen. Deshalb kommt es darauf an, die europäischen Kompetenzen in den Vernetzungstechnologien optimal zu bündeln.

6.1 Wissenschaftliche Kompetenzen fördern

Investitionen in die Köpfe von morgen sind Investitionen in unsere Zukunft. Für die Entwicklung neuer Technologien und für die Verwirklichung der technologischen Souveränität sind gut ausgebildete Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das A und O. Mithilfe der Fördermaßnahmen stimuliert das BMBF den Austausch zwischen Forschungseinrichtungen und innovativen Unternehmen. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, die in Verbundprojekten Know-how aufbauen und anschließend aus den Forschungseinrichtungen in die Wirtschaft wechseln, tragen zum Wissenstransfer in die Anwendung bei. Der interdisziplinäre Wissensaustausch in den Verbundprojekten trägt ebenfalls dazu bei, dass Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler in den Forschungseinrichtungen durch die Verbundprojekte enorme Kompetenzen aufbauen und die Exzellenz ihrer Einrichtungen steigern. Das BMBF intensiviert mithilfe der Verbundprojektförderung den Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft und unterstützt die Schaffung eines vitalen Innovationsökosystems.

Chancen für wissenschaftlichen Nachwuchs ausbauen

Um in Deutschland leistungsfähige und sichere Kommunikationssysteme auf höchstem technologischen Niveau anbieten und in der zukünftigen digitalen

Infrastruktur ausbauen zu können, müssen vorhandene Innovationspotenziale konsequent genutzt werden. Die wichtigste Ressource hierfür sind exzellent ausgebildete Menschen. In Deutschland wird der Bedarf an qualifizierten wissenschaftlichen Nachwuchskräften in der Kommunikationstechnik deshalb immer weiter zunehmen. Die vom BMBF geförderte Forschung zu Kommunikationssystemen will den Herausforderungen des globalen Wettbewerbs in Wissenschaft und Wirtschaft gerecht werden und legt deshalb hohen Wert auf die Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Entsprechende Initiativen sollen durch das Programm gestärkt werden. Dabei wird das BMBF auch Anreize für die Gründung junger, innovativer Unternehmen setzen. Forschungsprojekte und Forschungsnetzwerke ermöglichen dem wissenschaftlichen Nachwuchs, mit anerkannten Expertinnen und Experten zu diskutieren und Netzwerke mit etablierten Forschenden aufzubauen.

Neue Schwerpunkte dynamisch entwickeln

Durch den stärkeren Einfluss von Software in heutigen Kommunikationssystemen beschleunigen sich auch deren Innovationszyklen. Dies erfordert, dass sich die förderpolitischen Maßnahmen an dieser Dynamik ausrichten und potenziell disruptive Ansätze in explorativen Forschungsvorhaben berücksichtigen. Zur wirksamen Ausgestaltung der förderpolitischen Maßnahmen steht das BMBF kontinuierlich in einem intensiven Austausch mit Fachexpertinnen und Fachexperten. Anhand der konsolidierten Rückmel-



dungen der Fachcommunity werden die relevanten Forschungsfelder identifiziert und vorausschauend in Fördermaßnahmen aufgegriffen, um Impulse bei der internationalen Spitzenforschung zu setzen.

6.2 Forschung und Wirtschaft zusammenbringen

Unternehmen müssen am Markt befindliche Technologien kontinuierlich weiterentwickeln, um angesichts der schnellen Innovationszyklen konkurrenzfähig zu bleiben. Innovationsimpulse aus der Wissenschaft sind hierfür von großer Bedeutung. Dabei können neue Entdeckungen – beispielsweise aus der explorativen Forschung – die Grundlage für disruptive Veränderungen liefern.

In den nächsten Jahren gilt es, die neuen Möglichkeiten von KI und Quantentechnologien in der Datenverarbeitung, Kommunikation und Sensorik zu erschließen. Die deutsche Wissenschaft spielt dabei auf Weltniveau mit. Letztlich ermöglicht aber erst der Transfer der Technologien in die breite Anwendung, Wertschöpfungspotenziale zu realisieren, Wettbewerbsfähigkeit zu erhalten und die individuellen Lebensumstände der Bürgerinnen und Bürger durch Forschung zu verbessern. Technologische Souveränität erfordert daher, die Technologie-Pipeline der Wissenschaft kontinuierlich zu füllen, den Blick der Industrie für neue Entwicklungen in der Wissenschaft zu schärfen und den Transfer von brillanten Ideen aus der Wissenschaft in Innovationen durch gezielte Kooperationen und das Setzen innovationsfreundlicher Rahmenbedingungen zu befördern. Dabei kommt es aufgrund einer zunehmenden Komplexität von Forschungs- und Entwicklungsprozessen mehr und mehr auf disziplin- und länderübergreifende Zusammenarbeit an. Europa ist dabei ein natürlicher Partner Deutschlands. Die Hightech-Strategie 2025 der Bundesregierung bildet den Förderrahmen, um Forschung und Wirtschaft zu vernetzen. Anspruch ist es, Deutschlands Spitzenstellung in Schlüsseltechnologien auszubauen und die Umsetzung von Forschungsergebnissen in Produkte und Dienstleistungen zu beschleunigen.

Kompetenzen bündeln

Die Fördermaßnahmen des Programms tragen dazu bei, relevante Akteure aus wichtigen Branchen untereinander und mit der Forschungscommunity zu vernetzen. Ein Beispiel ist die 5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA), die aus der BMBF-Initiative „Industrielle Kommunikation der Zukunft“ entstanden ist. Ziel der Allianz ist es, die bestmögliche Anwendung von 5G-Technologien in der vernetzten Industrie zu realisieren, vornehmlich in den Prozess- und Automatisierungsbranchen. Die Allianz vertritt die Interessen der Industrie in den 5G-Standardisierungsgremien. Das ebenfalls aus der Initiative hervorgegangene Projekt „Industrial Radio

Forschungsinitiative „Industrielle Kommunikation der Zukunft“

Das BMBF hat frühzeitig die Erforschung von einzelnen Technologien für den 5G-Standard gefördert. Seit 2013 fördert das BMBF mit der Forschungsinitiative „Industrielle Kommunikation der Zukunft“ mit großem Erfolg die Anwendung von 5G mit Schwerpunkt Industrie 4.0, wie im Projekt „TACNET 4.0“ demonstriert wurde. Die Forschungsvorhaben „AMMCOA“ und „5G-NetMobil“ haben darüber hinaus gezeigt, dass mithilfe von 5G-Technologien Fahrzeuge präzise ihre Position bestimmen und auch ohne menschliches Zutun kooperative Arbeiten in der Land- und Bauwirtschaft durchführen können. Nicht zuletzt stammt die Idee lokaler und privater 5G-Netze, sogenannter Campusnetze, aus dieser Initiative. 5G-Campusnetze ermöglichen zum Beispiel Unternehmen, sichere und leistungsfähige 5G-Netze genau dort einzusetzen und selbst zu betreiben, wo sie notwendig sind, unabhängig vom Netzausbau der Mobilfunkanbieter. Der Initiative „Industrielle Kommunikation der Zukunft“ wurden von 2013 bis 2020 rund 66 Millionen Euro Fördermittel zur Verfügung gestellt.



Lab Germany (IRLG)“ erforscht wissenschaftlich-technische Fragestellungen aktueller und zukünftiger industrieller Funkkommunikationssysteme, unterstützt Unternehmen bei der Umsetzung und sichert über die Zusammenarbeit mit wirtschaftlich-politischen Gremien den Wissenstransfer für eine digitalisierte Gesellschaft.

Forschungstransfer beschleunigen

Ein wesentliches Instrument der Projektförderung sind Verbundprojekte, bei denen wissenschaftliche Einrichtungen und Unternehmen interdisziplinär zusammenarbeiten. Unternehmen, die Kommunikationslösungen in der Praxis einsetzen, sind für diese Projekte besonders wichtig. Sie kennen die Anforderungen am besten und können maßgeblich dazu beitragen, dass der Transfer in die Anwendung gelingt. Um den praktischen Nutzen der Forschung sicherzustellen, beurteilt das BMBF bei Entscheidungen über die Projektauswahl zu einzelnen Fördermaßnahmen neben der Qualität des Forschungsansatzes auch die Wirtschaftlichkeit und ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen.

6.3 Netzwerke und starke Akteure für künftige Kommunikationstechnologien aufbauen

Ziel ist, in Deutschland ein starkes Innovationsökosystem für Kommunikationssysteme aufzubauen. Dazu startet das BMBF im Rahmen der Umsetzung

des Zukunfts- und Konjunkturpakets der Bundesregierung „Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken“ die erste deutsche Forschungsinitiative zur 6G-Technologie und legt damit den Grundstein für eine zukunftsorientierte Forschung zu Kommunikationstechnologien.

Forschungs-Hubs 6G

Mithilfe innovativer Förderinstrumente wie der 6G-Hubs werden wissenschaftlich exzellente Forschungsnetzwerke im Bereich 6G aufgebaut. Aus Forschungsverbänden herausragender Forschungsinstitute und Hochschulen sollen Innovationen für die Kommunikationstechnologien der Zukunft entstehen. Ziel ist es, Kooperationen ins Leben zu rufen, in denen Forschungsinstitute und Hochschulen auf dem Gebiet von 6G zusammenarbeiten. Ein begleitendes Plattform-Projekt zur Bündelung der Aktivitäten der Netzwerke sowie industriegetriebene Verbundprojekte schaffen die Grundlagen für eine umfassende Forschung zu Technologien für die nächste Generation mobiler Kommunikation, inklusive der dafür notwendigen fasergebundenen Kommunikation. Neben der Erforschung der technologischen Grundlagen für 6G stehen der nachhaltige Aufbau von Know-how in der Wirtschaft durch Kooperationen mit den Forschungsnetzwerken und die Ausbildung von Fachexpertinnen und -experten in den Forschungseinrichtungen für den Telekommunikationssektor im Fokus.

6G-Plattform

Neben den „6G-Forschungs-Hubs“ fördert das BMBF zur übergreifenden Vernetzung der Akteure und Bündelung der 6G-Aktivitäten eine „Plattform für zukünftige Kommunikationstechnologien und 6G“ – kurz 6G-Plattform. Die 6G-Plattform soll im Rahmen der 6G-Initiative übergeordnete Fragestellungen zur Erforschung und Entwicklung der Grundlagen für einen zukünftigen 6G-Standard in enger Kooperation mit den „6G-Forschungs-Hubs“ bearbeiten und koordinieren. Eine internationale Harmonisierung mit anderen 6G-Programmen soll vorangetrieben und Fragen der Regulierung und Standardisierung adressiert werden.

Innovationscluster

Im Rahmen eines Spitzenclusterwettbewerbs sollen Netzwerke aus Forschungseinrichtungen, KMU und großen Technologieunternehmen gebildet werden. Damit sollen Ökosysteme für zukünftige Kommuni-

kationssysteme gestärkt und ein Umfeld für Start-ups etabliert werden, um den Transfer von innovativen Technologien in marktfähige Produkte zu beschleunigen.

6.4 Innovationskraft in Mittelstand und Industrie stärken

Die Corona-Pandemie hat uns vor Augen geführt, wie essenziell leistungsfähige Kommunikationssysteme für die gesamte deutsche Unternehmenslandschaft sind. Zum einen profitieren KMU von innovativen Vernetzungstechnologien, die praxisorientiert schnell in die Anwendung überführt werden. Zum anderen ist die Entwicklung innovativer Kommunikationstechnologien ein wichtiges Geschäftsfeld für neue und aufstrebende Unternehmen.

Junge, dynamische Unternehmen unterstützt das BMBF darin, ihre innovativen Ideen für neue hard- und softwarebasierte Kommunikationslösungen im international rasant wachsenden IKT-Bereich zur

Marktreife zu bringen. Eine Schlüsselrolle spielen hierfür Verbundprojekte und neue Ökosysteme, in denen Start-ups eng mit etablierten Systemherstellern und KMU zusammenarbeiten. Mittelständische IKT-Unternehmen sind eher langfristig aufgestellt und wägen die Nutzung neuer Technologien gründlich ab. Sie können daher dringend erforderliche Impulse für den nachhaltigen und breiten Einsatz neuer Kommunikations- und Vernetzungstechnologien liefern. Forschungsaktivitäten von KMU werden daher besonders gefördert. Das BMBF bietet seit 2007 mit der Förderinitiative KMU-innovativ zusätzlich zu den klassischen Förderprogrammen einen schnellen und leichten Zugang zu Technologieförderprogrammen.

6.5 Kompetenzen international bündeln

Kommunikationsstandards wie der Mobilfunk 5G oder Wi-Fi im heimischen Umfeld finden weltweit Anwendung. Deshalb werden diese Standards auch in internationalen Gremien definiert. Für einen Konsens



zu wichtigen Teiltechnologien dieser Systeme ist eine Harmonisierung mit Unternehmen verschiedener Herkunft notwendig. Um die zukünftige Standardisierung aus deutscher und europäischer Sicht erfolgreich mitgestalten zu können, ist eine Kooperation mit internationalen Akteuren in der Standardisierung unerlässlich. Es gilt deshalb, starke Partnerschaften und Allianzen zu etablieren. Dies sichert den erfolgreichen Transfer von Forschungsergebnissen in den Markt. Denn nur wer Standards setzt, kann auch technologisch souverän sein.

Strategische Projekte für Deutschland und Europa

Deutschland wird gemeinsam mit seinen europäischen Partnern technologische Kernkompetenzen zu Kommunikationssystemen ausbauen, um die eigene Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft werden hierzu an einem Strang ziehen.

Horizont Europa 2021–2027

Horizont Europa (engl. Horizon Europe) ist eines der weltweit größten Förderrahmenprogramme für Forschung und Innovation. Die Umsetzung der durch

Horizont Europa unterstützten Forschung zu Kommunikations- und Netztechnologien wird zukünftig im Rahmen der geplanten Partnerschaft für intelligente Netze und Dienste (engl. Smart Networks and Services) erfolgen.

Connecting Europe Facility Digital

Das EU-Programm „Connecting Europe Facility (CEF2) Digital“ unterstützt von 2021 bis 2027 Investitionen in Projekte für digitale Netzinfrastrukturen wie 5G und Gigabitnetze, die von gemeinsamem europäischem Interesse sind. Das Instrument trägt dazu bei, die Technologieforschung aus Horizont Europa in die Anwendung zu bringen.

EUREKA

EUREKA ist eine Initiative für anwendungsnahe Forschung in Europa. Mit der Forschungsinitiative bietet die EU Industrie und Wissenschaft einen Rahmen für bi- oder multinationale Projektkooperationen. EUREKA-Cluster sind thematische Schwerpunktprogramme, die Kompetenzen relevanter Akteure aus Industrie und Wissenschaft in den jeweiligen Technologiefeldern bündeln und auf eine rasche Überführung von FuE-Ergebnissen in die Anwendung abzielen. Die Initiative ermöglicht es, die in Europa vorhandenen fachlichen und finanziellen Ressourcen auch in der IKT-Forschung effektiver zu nutzen und damit die Wettbewerbsfähigkeit Europas auf dem Weltmarkt zu stärken. CELTIC-NEXT ist das Cluster mit Schwerpunkt IKT. Ein Kernelement bilden gemeinsame industriegetriebene europäische Projekte, die nationale Schwerpunkte betonen. Das Flaggschiffprojekt „AI-NET“ ist ein Beispiel für eine erfolgreiche CELTIC-NEXT-Kooperation, in der Partner aus fünf europäischen Ländern gemeinsam wissenschaftliche und technologische Lösungen für leistungsstarke Kommunikationsnetze mit hohen Sicherheitsstandards und nachhaltiger Kosten- und Energiestruktur entwickeln. Dieser erfolgreiche Ansatz soll fortgeführt werden, um auch in Zukunft über wettbewerbsfähige europäische Technologien zu verfügen.

Internationale Kooperationen 6G

Die Entwicklung und breite Etablierung neuer Kommunikationsstandards wie 6G erfordert eine internationale Harmonisierung der erforschten Lösungen. Nur so können vielversprechende Technologien, die hierzulande in partnerschaftlicher Zusammenarbeit entwickelt werden, auch weltweit Wirkung

AI-NET

Unter dem Dach des industriegeführten Kooperationsprojekts AI-NET entwickeln deutsche Forscherinnen und Forscher gemeinsam mit europäischen Partnern innovative Lösungen für die Automatisierung von glasfaserbasierten Kommunikationsnetzen. Ziel der vom BMBF geförderten Subprojekte ANIARA, ANTILLAS und PROTECT ist es, mithilfe von KI Lösungen für eine europaweite Kommunikationsinfrastruktur als Basis der Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft zu schaffen und so die technologische Souveränität der Europäischen Union zu stärken.*

* Informationen zu AI-NET und den Subprojekten: forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/service/aktuelles/ai-net

zeigen. Daher beabsichtigt das BMBF, gemeinsam mit Wertepartnern in Europa und der Welt bilaterale Forschungsmaßnahmen und -initiativen umzusetzen. Über die 6G-Plattform sollen zielführende Synchronisierung mit internationalen Forschungsprogrammen und wichtigen Akteuren aufgebaut werden.

EuroQCI

Ziel der Initiative European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI), an der fast alle EU-Mitgliedstaaten beteiligt sind, ist es, die Grundlagen für eine europäumspannende Infrastruktur zur Quantenkommunikation zu entwickeln, um die europäischen Kapazitäten in den Bereichen Quantenkommunikation, Cybersicherheit und industrielle Wettbewerbsfähigkeit weiter auszubauen. Als Gründungsmitglied der Initiative wird Deutschland seine umfassende Expertise auf dem Gebiet der Quantentechnologie einbringen und so seine internationale Vorreiterrolle weiter ausbauen. IT-Sicherheit und Quantenkommunikation wird im neuen Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung „Digital. Si-

cher. Souverän.“ behandelt, an das dieses Forschungsprogramm bei Querschnittsthemen anknüpft.

Europäische Kooperationen im Bereich Kommunikationstechnologien und Mikroelektronik

Im Rahmen sogenannter „Important Projects of Common European Interest“⁷ (IPCEI) zur Stärkung der EU-Volkswirtschaft und deren Wettbewerbsfähigkeit können Vorhaben von übergeordnetem, gesamt-europäischem Interesse unter Beteiligung mehrerer EU-Mitgliedstaaten bis zur ersten gewerblichen Nutzung gefördert werden. Aufgrund der strategischen Bedeutung der Kommunikationssysteme und der Mikroelektronik für die technologische Souveränität hat die Bundesregierung im europäischen Rahmen ein Interessenbekundungsverfahren für ein IPCEI zu Kommunikationstechnologien und Mikroelektronik gestartet. Die Förderung von IPCEI-Projekten ist ein Teil der Maßnahmen des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, BMWi.



7 Englisch für „Wichtiges Vorhaben von gemeinsamem europäischem Interesse“ (laut EU-Verträgen)

6.6 Forschungsergebnisse in die Anwendung transferieren

Forschungsteams an deutschen Hochschulen oder in der Industrie sind mit ihren Ideen und unkonventionellen Ansätzen häufig Vorreiter neuer Entwicklungen. Um gute Ideen schneller in die Anwendung zu bringen, wird das BMBF Initiativen starten und die Entwicklung von Strategien zu Ausgründungen aus Forschungsnetzwerken fördern. Dies soll dazu beitragen, das deutsche und europäische Ökosystem im Telekommunikationssektor zu stärken und somit die Abhängigkeit von marktprägenden außereuropäischen Herstellern zu mildern.

Grundlegender, zukunftsweisender Forschung den Weg bereiten

Damit bahnbrechende Innovationen entstehen, ist es wichtig, frühzeitig neue Wege zu erforschen und langfristig angelegte Forschung zu betreiben. Neben der anwendungsorientierten Forschung sind hierfür explorative Projekte besonders wichtig, die Zusammenhänge grundlegend untersuchen und etablierte Denkmuster hinterfragen. Auch wenn der Praxisbezug bei solchen Projekten meist nicht offensichtlich ist, können sie wesentliche Impulse für die weitere Technikentwicklung liefern. Damit perspektivisch tragfähige Ökosysteme entstehen, werden richtungs-

weisende Forschungsthemen mit Gamechanger-Potenzial im permanenten Austausch mit der Forschungsgemeinschaft und innovativen Unternehmen identifiziert und angemessen begleitet.

Kooperationen zwischen Industrie, Hochschulen und Forschungseinrichtungen zu 6G

Im Rahmen der 6G-Initiative werden industriegeführte Verbundprojekte initiiert. Sie bringen die verschiedensten Kompetenzen von Stakeholdern der Telekommunikationsbranche und Anwenderbranchen mit Forschungseinrichtungen zusammen, um Lösungen mit hoher Praxisrelevanz entlang der Wertschöpfungskette zu erforschen und zu entwickeln. So werden zielgerichtet Innovationen zur Lösung schnell in die Anwendung gebracht und frühzeitig Teil neuer Geschäftsmodelle beziehungsweise Produkte werden. Reallabore und Testfelder der 6G-Forschungs-Hubs schaffen insbesondere für KMU die Möglichkeit, um vorwettbewerblich technologische Anwendungen oder Teilkomponenten eines 6G-Systems mit Zukunftspotenzial erforschen und validieren zu können. Damit wird ein wichtiger Beitrag geleistet, um die Markteintrittsschwelle für neue Akteure für zukünftige Kommunikationssysteme zu senken.



7 Rahmenbedingungen des Programms

Innovative Kommunikations- und Netztechnologien wurden bisher im Rahmen des Programms „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ gefördert. Das erste Forschungsprogramm zu Kommunikationssystemen führt die erfolgreichen Maßnahmen zur Förderung von Kommunikationssystemen im Rahmen des IKT 2020-Programms fort. Eine besonders erfolgreiche Maßnahme des Programms „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ war beispielsweise die Forschungsinitiative „Industrielle Kommunikation der Zukunft“.

Für das vorliegende Programm plant das BMBF im Zeitraum von 2021 bis 2026 mehr als 100 Millionen Euro bereitzustellen, zuzüglich weiterer Mittel aus dem Konjunktur- und Zukunftspaket.

7.1 Entstehung

Der digitale Wandel als grundlegende Veränderung von gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und staatlicher Organisation ist in vollem Gange. Es ist eine wichtige staatliche Aufgabe, die digitale Gesellschaft und die digitale Ökonomie mitzugestalten.

Um die eigene Handlungsfähigkeit zu sichern, ist es erforderlich, die Forschung zu Kommunikationssystemen weiter zu stärken. Dies ist von übergeordneter Bedeutung für den Wirtschaftsstandort Deutschland, auch um konkrete Zukunftsaufgaben zu meistern, wie etwa die Fachkräftebasis in der Kommunikationstechnologie zu sichern. Aus dieser Notwendigkeit heraus begründet sich ein erhebliches Interesse des Bundes an einer erstklassig aufgestellten Forschungs- und Innovationslandschaft auf dem Gebiet der Vernetzungstechnologien.

Der bewertende Blick auf die technologischen Grundlagen und die Fachkräftebasis in Deutschland und die geopolitische Situation machen deutlich, wie notwendig eine schnelle Weiterentwicklung der Kommunikationssysteme ist. Vor allem ihre Schlüsselstellung für die technologische Souveränität macht die Erarbeitung eines eigenständigen Forschungsprogramms nötig. Der globale Charakter der Digitalisierung und der technologischen Entwicklung im IKT-Bereich erfordert europäische und internationale Anbindungen. Ein eigenständiges Forschungsprogramm auf Bundesebene ist daher aufgrund der außenpolitischen Befugnisse des Bundes unabdingbar.

Das BMBF hat renommierte Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft, den Fachkreis Kommunikationssysteme, systematisch in den Entstehungsprozess des Programms einbezogen. Die Mitglieder des Fachkreises haben die besondere Bedeutung der Forschung zu Kommunikationssystemen hervorgehoben. In einem Positionspapier⁸ haben die Expertinnen und Experten den Forschungsbedarf genauer analysiert, vor allem im Hinblick darauf, wie Deutschland und Europa in Zukunft technologisch souverän agieren können. Diese Erkenntnisse sind in das vorliegende Programm eingeflossen, ebenso wie die Ergebnisse von Workshops und Einzelinterviews im Rahmen des Forschungsdialogs mit der Fachgemeinschaft.

Außerdem wurden die Ergebnisse vorangegangener Fördermaßnahmen zu Kommunikationssystemen berücksichtigt, die im Rahmen der Evaluation des Forschungsrahmenprogramms „IKT 2020 – Forschung für Innovationen“ entstanden sind. Dabei wurden fehlende Finanzierungsmöglichkeiten und wirtschaftliches Risiko als größte Herausforderungen für Forschungsvorhaben identifiziert. Laut eigener Aussage der Geförderten wären fast zwei Drittel (63 Prozent) der geförderten Forschungsvorhaben ohne finanzielle Unterstützung entweder gar nicht oder nur in wesentlich geringerem Umfang durchgeführt worden. Eine Milderung des Forschungsrisikos durch den Staat ist

also nötig. Da jedoch ein erhebliches Bundesinteresse an sicheren und vertrauenswürdigen Kommunikationssystemen besteht und Forschung die notwendige Grundlage der Verbesserung von Kommunikations- und Vernetzungstechnologien ist, leitet sich hieraus für den Bund der dringende staatliche Handlungsbedarf ab.

7.2 Einbindung des Programms

Das neue Forschungsprogramm „Souverän. Digital. Vernetzt.“ trägt der enorm gesteigerten Bedeutung sicherer und vertrauenswürdiger Kommunikationssysteme für die Verwirklichung der Vision einer digitalisierten Gesellschaft und Wirtschaft Rechnung. Dieses erste Forschungsprogramm zu Kommunikationstechnologien unterstützt die Bestrebung, die technologische Souveränität Deutschlands und Europas bei Schlüsseltechnologien wie 5G und perspektivisch 6G zu sichern. Es steht nicht isoliert, sondern ergänzt bedarfsgerecht zahlreiche andere Aktivitäten der Forschungspolitik. Aufgrund der grundlegenden Bedeutung der Kommunikationssysteme und Vernetzungstechnologien für die gesamte Digitalisierung sind die Verbindungen der Kommunikationstechnik extrem vielfältig. Im Folgenden sind besonders zentrale Anknüpfungspunkte genannt.

Verknüpfung mit weiteren Strategien und Programmen

Das Forschungsprogramm gründet auf zentralen Strategien des BMBF und der Bundesregierung. Es trägt zur Umsetzung der Hightech-Strategie 2025⁹ bei, insbesondere indem es Deutschlands Zukunftskompetenzen für grundlegende Vernetzungstechnologien fortentwickelt, also die technologische Basis der digitalen Zukunft stärkt. Zudem leistet das Programm Beiträge zur Erreichung von Zielen der BMBF-Digitalstrategie¹⁰ und weiteren zentralen Strategien der Bundesregierung wie der Umsetzungsstrategie Digitalisierung, der KI-Strategie oder dem Klimaschutzpro-

8 forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/dateien/nachrichten/positionspapier_fachkreis-kommunikationstechnologien_technologische_souveraenitaet.pdf

9 hightech-strategie.de/de/hightech-strategie-2025-1726.html

10 bmbf.de/upload_filestore/pub/BMBF_Digitalstrategie.pdf

gramm 2030. Das Programm trägt unter anderem zur Umsetzung der Datenstrategie der Bundesregierung¹¹ und des BMBF-Aktionsplans „Natürlich. Digital. Nachhaltig.“¹² bei. Insbesondere tragen Teile des Forschungsprogramms durch Förderung der innovativen Anwendung von KI als Schlüsseltechnologie in systemrelevanten Branchen wie der Telekommunikation zur Umsetzung der Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung¹³ bei. Da Kommunikationssysteme integraler Bestandteil und Voraussetzung jedweder Digitalisierung sind, hat das Programm Berührungspunkte zu zahlreichen weiteren laufenden oder geplanten Strategien und Programmen der Bundesregierung und ihren Ressorts. Besonders starke Bezüge bestehen zu den Forschungsprogrammen zur IT-Sicherheit¹⁴, zur zivilen Sicherheit¹⁵, zur Industrie 4.0¹⁶, zur Medizintechnik¹⁷, zum autonomen und vernetzten Fahren¹⁸, zur Mikroelektronik¹⁹, zu interaktiven Technologien²⁰, zu Quantentechnologien²¹ sowie zur Zukunft der Wertschöpfung²².

Vernetzung mit weiteren Akteuren

Ein wesentlicher Aspekt der 6G-Initiative ist die von der 6G-Plattform koordinierte Vernetzung der relevanten Akteure aus Gesellschaft, Politik, Wissenschaft und Wirtschaft. Angestrebt ist zudem die Vernetzung mit Behörden wie dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) oder der Bundesnetzagentur und mit der Ressortrunde Zukunft der Kommunikationstechnologien unter Beteiligung des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI), des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) sowie des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi). Ebenso beabsichtigt das BMBF, unter Federführung von BMVI und Beteiligung des BMWi wichtige Stakeholder aus

der Industrie einzubinden. Die zukünftige Forschung zu Kommunikationssystemen erfordert insbesondere beim Thema 6G die nationale und internationale Koordination. Deshalb wird durch dieses Programm inner- und außerhalb der EU die Koordination mit internationalen 6G-Programmen vorangetrieben, um eine Harmonisierung verschiedener 6G-Visionen mit der 6G-Initiative und den europäischen 6G-Programmen zu erreichen.

7.3 Erfolgskriterien, Wirtschaftlichkeit und Evaluation

Erfolgskriterien des Gesamtprogramms

Ein wichtiger Indikator für den Erfolg des Gesamtprogramms ist das Ausmaß des Praxiseinsatzes zukünftiger Kommunikationstechnologien in Deutschland, gemessen unter anderem am Grad der Nutzung in Schlüsselbranchen hierzulande. Ein weiterer Indikator ist der Beitrag der Kommunikationstechnik zur technologischen Souveränität, gemessen unter anderem am Umfang des Einsatzes von Kommunikationstechnologien deutscher und europäischer Hersteller. Weitere Indikatoren sind etwa die Anzahl von ermöglichten Forschungsvorhaben, welche sonst nicht durchgeführt worden wären, sowie erzielte Netzwerkeffekte und die Qualität der Bündelung von Kompetenzen.

Erfolgskriterien der strategischen Ziele

Zu den in Kapitel 2 definierten Zielen wurden Indikatoren entwickelt, mit denen der Erfolg gemessen werden kann. Diese Indikatoren stellen keine abschließende Liste der möglichen Messgrößen dar

11 [bundesregierung.de/breg-de/suche/datenstrategie-der-bundesregierung-1845632](https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/datenstrategie-der-bundesregierung-1845632)

12 [bmbf.de/de/digitalisierung-und-nachhaltigkeit-10466.html](https://www.bmbf.de/de/digitalisierung-und-nachhaltigkeit-10466.html)

13 [ki-strategie-deutschland.de](https://www.ki-strategie-deutschland.de)

14 [forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/forschung/it-sicherheit](https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/forschung/it-sicherheit)

15 [sifo.de/de/sicherheitsforschung-forschung-fuer-die-zivile-sicherheit-1693.html](https://www.sifo.de/de/sicherheitsforschung-forschung-fuer-die-zivile-sicherheit-1693.html)

16 [plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/Leitbild2030/leitbild-2030.html](https://www.plattform-i40.de/PI40/Navigation/DE/Industrie40/Leitbild2030/leitbild-2030.html)

17 [gf-bmbf.de](https://www.gf-bmbf.de)

18 [bmbf.de/de/automatisiertes-fahren-4158.html](https://www.bmbf.de/de/automatisiertes-fahren-4158.html)

19 [elektronikforschung.de/rahmenprogramm](https://www.elektronikforschung.de/rahmenprogramm)

20 [interaktive-technologien.de/service/publikationen/miteinander-durch-innovation](https://www.interaktive-technologien.de/service/publikationen/miteinander-durch-innovation)

21 [quantentechnologien.de](https://www.quantentechnologien.de)

22 [zukunft-der-wertschoepfung.de/de/zukunft-der-arbeit-1725.html](https://www.zukunft-der-wertschoepfung.de/de/zukunft-der-arbeit-1725.html)



und werden gemäß der Konzeption als lernendes Programm bei Bedarf angepasst. Grundsätzlich wird eine sachgerechte Kombination aus qualitativen und quantitativen Indikatoren angestrebt.

Technologische und digitale Souveränität sichern

Wirtschaftliche Indikatoren für das Erreichen dieses Ziels sind unter anderem der Abdeckungsgrad von Wertschöpfungsketten und die Vollständigkeit des Innovationsökosystems durch beteiligte deutsche und europäische Akteure. Zusätzlich dienen Statistiken als Indikatoren, etwa zur Produktion, zum Exportanteil am Weltmarkt sowie zur Anzahl der Patente. Zudem werden Handelsbilanzen sowie die Beteiligung an internationaler Standardisierung berücksichtigt. Wissenschaftliche Indikatoren sind unter anderem das Renommee der forschenden Einrichtungen sowie deren Output, insbesondere auch die Zahl der Open-Access-Publikationen. Weitere Indikatoren mit Bezug zur Fachkräftebasis sind unter anderem die Anzahl der Promotionen zu Kommunikationstechnik sowie die Anzahl einschlägiger Publikationen junger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.

Innovationen auf den Weg bringen

Indikatoren für das Erreichen dieses Ziels sind unter anderem die Anzahl neuer Kontakte zwischen Wissenschaft und Wirtschaft und die Anzahl neuer Kooperationen sowie die Beteiligung an internationaler Standardisierung. Weitere Indikatoren sind die Anzahl der Patente und die Anzahl an Kommunikationstechnik-Start-ups am Markt.

Vernetzte Gesellschaft gestalten

Indikatoren für das Erreichen dieses Ziels sind unter anderem der Grad der gesellschaftlichen Nutzung künftiger Kommunikationstechnologien, die Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern bei der Entwicklung und dem Einsatz neuester Kommunikationstechnologien im alltäglichen Leben, ebenso wie der Umfang des Gebrauchs neuester Kommunikationstechnologien in der Digitalisierung. Weitere Indikatoren sind der Grad der Umsetzung von „Values by Design“ sowie die Gestaltung der Netze nach europäischen Normen und Standards, basierend auf künftigen Kommunikationstechnologien, die hierzulande und in Europa designt wurden.

Digitalisierung nachhaltig realisieren

Indikatoren für das Erreichen dieses Ziels sind unter anderem die Anzahl von Unternehmen, die mithilfe von künftigen Kommunikationssystemen ihre CO₂-Bilanz verbessern, die Langlebigkeit – bezogen auf die potenzielle Einsatzdauer – und die Energieersparnis, die im Vergleich zu früheren Generationen von Kommunikationssystemen pro übertragener Datenmenge erzielt wird. Weitere Indikatoren sind zum Beispiel die Zahl von Produktinnovationen bei nachhaltigen Kommunikationssystemen und der Beitrag, den künftige Kommunikationssysteme für die Erreichung der Klimaziele leisten.

Wirtschaft in Deutschland digital stärken

Wirtschaftliche Indikatoren für das Erreichen dieses Ziels sind die Anzahl von Produktinnovationen und Patenten, die Performance von deutschen Unternehmen im Bereich Kommunikationssysteme im weltweiten Vergleich sowie die Anzahl der Arbeitsplätze. Weitere Indikatoren für das Erreichen dieses Ziels sind unter anderem der Umfang, in welchem KMU zukünftige Kommunikationssysteme zur Verbesserung ihrer Wettbewerbsfähigkeit entwickeln und/oder einsetzen, der Kompetenzzuwachs in Unternehmen und die Breite der technologischen Kompetenz sowie die Attraktivität des Standorts Deutschland für Forschende.

Wirtschaftlichkeit der Projektförderung

Aufgrund der dynamischen Entwicklung im Bereich Kommunikationssysteme sowie zu erwartender Veränderungen der ökonomischen und technisch-wissenschaftlichen Rahmenbedingungen ist das Programm lernend angelegt. Bekannte und neue

Themenfelder werden laufend beobachtet und die jeweilige Ziel-, Aufgaben- und Prioritätensetzung aktualisiert. Förderinstrumente werden entsprechend passend weiterentwickelt. Durch Technologieanalysen sowie Fachgespräche und in permanentem Austausch mit der Fachgemeinschaft und den Stakeholdern aus Gesellschaft und Wirtschaft werden im Vorfeld von Bekanntmachungen die Fördermaßnahmen dem tatsächlichen Entwicklungsstand in Wissenschaft und Wirtschaft angepasst. Den im Verlauf des Prozesses zur Forschungsprogrammarbeit intensivierten Dialog mit Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft wird das BMBF zur Qualitätssicherung, Fortschreibung und Weiterentwicklung fortführen, um auf technologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen angemessen und zeitnah reagieren zu können.

Verfahren und Förderkriterien

Die Schwerpunktsetzung erfolgt in der Regel durch die Veröffentlichung von Förderthemen in Form von Bekanntmachungen im Bundesanzeiger sowie deren Verbreitung im Internet auf den Seiten des BMBF. Mit diesen Bekanntmachungen werden die Fördermodalitäten beziehungsweise -regularien verbindlich festgelegt. In einem zweistufigen Verfahren können zunächst Skizzen für Verbundprojekte bei dem beauftragten Projektträger eingereicht werden. Die eingereichten Projektvorschläge stehen im Wettbewerb. Das BMBF und die Projektträger behalten sich vor, sich bei der Auswahl der zu fördernden Projektvorschläge themenspezifisch durch einen unabhängigen Fachausschuss beraten zu lassen. Die der Bewertung und Auswahl zugrunde gelegten Kriterien für beide Stufen werden in den Bekanntmachungen der jeweiligen Fördermaßnahme veröffentlicht. In der zweiten Stufe des Auswahlverfahrens werden die Konsortien mit hinreichend hoher Priorität zur Vorlage eines förmlichen Förderantrages zu ihren Projektvorschlägen aufgefordert.

Durch die laufende Anpassung des Programms und der Qualitätssicherung für Fördermaßnahmen in Kombination mit dem wettbewerblichen Auswahlverfahren wird wissenschaftliche Exzellenz und eine große Innovationshöhe sichergestellt. Die Projektförderung mit nach diesem Prinzip gestalteten Förderbekanntmachungen folgt daher beim Mitteleinsatz grundsätzlich dem Maximalprinzip und eine Wirtschaftlichkeit ist gegeben.

Förderungen außerhalb von Bekanntmachungen sind von dieser Betrachtung nicht gedeckt und benötigen gegebenenfalls eine eigenständige Wirtschaftlichkeitsprüfung.

Evaluation

Durch einen laufenden Dialog mit den Zielgruppen, das Monitoring von Förderdaten sowie die Nutzung von Informationen aus Projektberichten, inklusive der Sicherstellung der Vollzugswirtschaftlichkeit, erfolgt eine fortlaufende zeitnahe Nachjustierung des Programms. Hierzu werden insbesondere die beschriebenen Indikatoren herangezogen. So werden sowohl die forschungspolitische Wirksamkeit des Programms als auch die Maßnahmenwirtschaftlichkeit laufend geprüft und gegebenenfalls geeignet ergänzt oder angepasst. Dies erreicht eine evidenzbasierte Justierung von Inhalten und Maßnahmen und bereitet die spätere Ex-Post-Evaluierung zur Zielerreichungs- und Wirkungskontrolle des Programms bereits zur Laufzeit vor.

Glossar

5G und 6G: Mobilfunkstandards der fünften (5G) und sechsten Generation (6G)

Bit: Heutzutage werden die Daten elektronisch binär als Folgen von 1 (AN) oder 0 (AUS) kodiert. Ein Bit ist die kleinste Informationseinheit, die einen binären Zustand repräsentiert und je nach Bedarf einen der Zustände 1 oder 0 annehmen kann.

Breitbandinfrastruktur: Infrastruktur für einen Internetzugang mit hohen Datenübertragungsraten. Breitbandzugänge können leitungsgebunden sein (Glasfaser, Kabel, DSL) oder drahtlos (beispielsweise mobile Breitbandzugänge über LTE oder 5G).

Caching: Zwischenspeicherung von Daten in einem im Vergleich zum Hauptspeichermedium schnelleren Pufferspeicher, um wiederholte Zugriffe auf häufig benötigte Daten zu erleichtern.

Cloud (Computing): Beim Cloud-Computing werden Anwendungen, Speicherplatz und Rechenleistung in ein virtuelles Rechenzentrum im Internet ausgelagert, das aus zusammengeschalteten Computern besteht. Bei Bedarf stellt diese sogenannte Cloud (deutsch: Wolke) aus Rechnern Soft- und Hardware über das Internet zur Verfügung.

Content-Centric Networking (CCN): Im Gegensatz zur IP-basierten Internet-Architektur betont das Content-Centric Networking (CCN) die Inhalte, indem es diese direkt adressierbar und für das Routing zugänglich macht. Ende-zu-Ende-Kommunikation basiert auf benannten Daten anstelle von IP-Adressen. CCN wird deshalb als eine informationszentrierte Netzwerkarchitektur (ICN) betrachtet. Das Ziel von CCN ist es, ein sichereres, flexibleres und skalierbares Netz bereitzustellen, um die aktuellen Anforderungen des Internets an eine in großem Umfang sichere Verteilung von Inhalten an eine Vielzahl von Endgeräten zu erfüllen.

Data-Oriented Network Architecture (DONA): Netzarchitektur, in der das (Web-)Namensauflösungssystem auf namensbasiertem Routing basiert (im Gegensatz zu IP-basiertem Routing im heutigen Internet).

(Funk-)Spektrum: Der Bereich der Radiowellen, die für die Übertragung der Mobilfunksignale genutzt werden, reicht von drei Kilohertz bis zu 300 Gigahertz. Dieser Bereich wird in Deutschland von der Bundesnetzagentur in Frequenzblöcken an verschiedene Anbieter vergeben.

Glasfaser: Glasfaserkabel dienen als (Daten-)Übertragungsmedium. Die Glasfaser ist ein Lichtwellenleiter, dessen Fasern aus dem Grundstoff Glas bestehen. Glasfasern übertragen Daten in Form von Licht beziehungsweise Lichtsignalen über weite Strecken. Glasfasern sind resistent gegenüber elektromagnetischen Störeinflüssen. Aufgrund der geringen Dämpfungen bei einer Datenübertragung über Glasfasern sind höhere Reichweiten und Übertragungsraten möglich. Es existieren verschiedene Ausbauprodukte, bei denen Kupfer- und Glasfaserkabel auf der sogenannten letzten Meile zum Kunden kombiniert werden.

Information-Centric Networking (ICN): Information-Centric Networking (ICN) ist ein Ansatz, die Internetinfrastruktur so weiterzuentwickeln, dass diese Anwendungen wie Mobile Video und Cloud-Computing direkt unterstützt, indem eindeutig benannte Daten als ein Grundprinzip des Internets eingeführt werden. Daten werden so unabhängig von Ort, Anwendung, Speicherung und Transportmedium behandelt und netzinternes Caching und Vervielfältigung können leichter bewerkstelligt werden. Die erwarteten Vorteile sind verbesserte Effizienz und eine bessere Skalierbarkeit in Bezug auf den Informations- und Bandbreitenbedarf.

Internet der Dinge: Im Internet of Things (IoT) sind Gegenstände über das Internet miteinander vernetzt, damit diese (selbstständig) miteinander kommunizieren und Aufgaben erledigen können. Sie versorgen Menschen beispielsweise mit Informationen, tätigen automatische Bestellungen oder erfüllen Warn- und Notfallfunktionen.

Internet Protocol (IP): Das IP ist durch drei Elemente charakterisiert: Packet switching, addressing und routing. Packet switching meint, dass jede Online-Kommunikation in einzelne Pakete unterteilt wird. Beispielsweise entstehen aus einer Webseite zahl-

reiche kleine Pakete, die einzeln übertragen werden. Addressing beschreibt, wie die Pakete ihr Ziel finden: Jedes Datenpaket beinhaltet standardisiert die Absenderin oder den Absender und die Empfängerin oder den Empfänger des Pakets. Sie sind mit ihrer IP-Adresse vermerkt. Den Weg von der Adresse, die etwas absendet, bis zur Adresse, die etwas empfängt, beschreibt das Routing: Das Internet ist ein dezentrales, distribuiertes (verteiltes) Netz, bei dem Daten über dieses Netz auf dem Weg vom Absenden zum Empfangen viele andere Computer (zum Beispiel Server oder Router) durchlaufen.

Kanalkodierungsverfahren: In der Nachrichtentechnik bezeichnet Kanalkodierung das Verfahren, um digitale Daten bei der Übertragung über gestörte Kanäle durch Hinzufügen von Redundanz gegen Übertragungsfehler zu schützen.

Künstliche Intelligenz: Künstliche Intelligenz (KI) ist ein Teilgebiet der Informatik. Sie erforscht Mechanismen, die intelligentes menschliches Verhalten in Maschinen simulieren können. Das beinhaltet zum Beispiel, eigenständig Schlussfolgerungen zu ziehen, angemessen auf Situationen zu reagieren oder aus Erfahrungen zu lernen

Latenz: Latenz bezeichnet die Zeit, die eine Nachricht für den Weg vom Sender bis zum Empfänger benötigt und in manchen Betrachtungen zusätzlich den Weg zurück vom Sender zum Empfänger. Latenz ist also die Zeit, die ein Signal braucht, um zum Beispiel vom Smartphone über den Funkmast ins Internet und wieder zurückzukommen. Unter optimalen Bedingungen liegt die Latenz in 4G-Netzen bei 50 Millisekunden. 5G soll Laufzeiten von unter zehn Millisekunden schaffen und damit Echtzeitanwendungen ermöglichen. Die Latenz beinhaltet drei Komponenten: Ausbreitungsverzögerung, Übertragungsverzögerung und Wartezeit.

Lokalisierung und sensorische Wahrnehmung: Eine Lösung zur Adressierung des Problems der beschränkten verfügbaren Funkbereiche besteht darin, Kommunikations- und sensorische Systeme so zu gestalten, dass sie gemeinsam arbeiten. So profitiert jedes System von der Existenz des anderen. Sensorische Systeme basierend auf Funk können zum Beispiel für hochgenaue Lokalisierung in der Umgebung,

3D-Kartographie, Materialanalyse oder für Radaranwendungen genutzt werden.

Maschine-zu-Maschine-(M2M)Kommunikation: Automatisierter Informationsaustausch zwischen Endgeräten wie Maschinen, Automaten, Fahrzeugen oder Containern untereinander oder mit einer zentralen Leitstelle, zunehmend unter der Nutzung des Internets und mobiler Zugangsnetze.

Millimeterwellen: Millimeterwellen sind hochfrequente elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge im Bereich von zirka ein bis zehn Millimeter, was einer Frequenz von 300 bis 30 Gigahertz entspricht (höhere Frequenz bedeutet kürzere Wellenlänge).

Mixed Reality (MR): Mixed Reality (deutsch: vermischte Realität) meint die Verbindung von echten mit virtuellen Welten. Dadurch lassen sich Arten von Umwelten und Visualisierungen schaffen, in denen physische und digitale Objekte koexistieren und in Echtzeit miteinander interagieren.

Mobile Edge Computing: Mobile Edge Computing ist im Gegensatz zum Cloud Computing die dezentrale Datenverarbeitung am Rand des Netzes.

Molekulare Kommunikation: Molekulare Kommunikation ermöglicht die Kommunikation mit Hilfe von relativ kleinen Molekülen wie Hormonen oder anderen kleinen Proteinen (zum Beispiel Zytokine), Peptiden, Kohlenhydraten, Lipiden und deren Kombinationen. Eine solche Kommunikation ist notwendig, wenn klassische Kommunikationstechnologien nicht möglich sind. Ein Beispiel hierfür ist die Kommunikation im menschlichen Körper, innerhalb dessen beispielsweise nur eingeschränkt per Funk kommuniziert werden kann.

Multiple-Input-Multiple-Output (MIMO): In der Nachrichtentechnik werden mit MIMO drahtlose Kommunikationssysteme bezeichnet, bei denen mehrere Sende- und Empfangsantennen zum Einsatz kommen. Dies ist die Basis für Kodierungsverfahren, die nicht nur die zeitliche, sondern auch die räumliche Dimension zur Informationsübertragung nutzen (englisch: Space-Time Coding). Dadurch lassen sich Qualität und Datenrate einer drahtlosen Verbindung deutlich

erhöhen. MIMO-Systeme können wesentlich mehr Bit pro Sekunde im zugewiesenen Bereich des Funkspektrums übertragen und haben somit eine höhere spektrale Effizienz als konventionelle Systeme.

Network-Slicing: Network Slicing erlaubt es Betreibern, ihre Infrastruktur oder Teile davon anwendungsbezogen und auf Abruf bereitzustellen – als eigenes Netz mit besonderen Eigenschaften, beispielsweise einer zugesicherten Datenkapazität oder Reaktionszeit (Latenz).

Platoon(ing): Fahrzeuge mit einem einheitlichen Kommunikationsstandard werden durch Vernetzung untereinander zu einem virtuellen Gespann gekoppelt. In minimalem Abstand folgen die im Platoon fahrenden Fahrzeuge einander. Das Fahrzeug an der Spitze steuert dabei die anderen.

Public-Key-Infrastruktur (PKI): Der Begriff PKI stammt aus der Informationstechnologie, aus dem Bereich asymmetrischer Verschlüsselung und deren praktischer Anwendung. Dahinter steht ein System, eine Infrastruktur, die der Erstellung, Verwaltung, Verteilung sowie Überprüfung von digitalen Zertifikaten samt der darauf abgelegten öffentlichen Schlüssel dient. Das Ziel der PKI besteht darin, Dienste bereitzustellen, die für einen sicheren Austausch von Daten zwischen Kommunikationsteilnehmenden sorgen – sicher im Sinne einer Verschlüsselung und signierter Daten.

Radio Access Network (RAN): RAN im Mobilfunk (deutsch: Funkzugangnetz) sorgt für die Funkverbindung zwischen den mobilen Endgeräten und dem Glasfaser-Kernnetz und besteht aus einer Basisstation, darauf implementierter Software und der Antenne für die Funkverbindung zu den Endgeräten.

Relay-Netze: Grundlage von Relay-Netzen ist ein technisch einfacher Ansatz, um Reichweite und Netzabdeckung zu vergrößern und Zuverlässigkeit zu steigern. Die Sende-/Empfangsgeräte in einem Relay-Netz kommunizieren ohne eine Zentralinstanz über (mehrere) Zwischenknoten.

Roaming: Mit Roaming wird die Fähigkeit von Mobilfunknutzenden bezeichnet, in einem anderen Netzwerk als dem Heimnetzwerk selbsttätig Anrufe

zu empfangen oder zu tätigen, Daten zu schicken und zu empfangen oder Zugriff auf andere Mobilfunknetzdienste zu haben.

Routing: Routing ist die Ermittlung und Festlegung des Weges eines Nachrichtenstroms durch das Netzwerk.

Shannon-Theorie/-Prinzip: Durch seine Arbeit „A Mathematical Theory of Communication“ (1948) hat Claude Shannon die Informationstheorie begründet. Mittels Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik ging er der Frage auf den Grund, unter welchen Bedingungen eine von einem Sender kodierte und durch einen gestörten Kommunikationskanal übermittelte Information beim Empfänger wiederhergestellt werden kann.

Spektrum (siehe auch Funkspektrum): Mit Spektrum wird der Frequenzbereich definiert (oder bemessen), der für Datenübertragung in einem bestimmten Nutzungsszenario (zum Beispiel Mobilfunk wie LTE oder 5G) zugeteilt werden kann.

Strahlenformungstechniken: Das einfachste Antennendesign strahlt gleichmäßig in alle Richtungen ab. Mithilfe von Strahlenformungstechniken kann man die Energie gezielt in die Richtung lenken, wo sich die Anwender befinden, sodass eine optimale Abdeckung erreicht und hohe Datenraten erzielt werden. Dazu kann die Sendeleistung bedarfsgerecht optimiert werden.

Taktil/Taktiler Internet: Als taktil wird eine Datenübertragung mit so geringen Latenzen bezeichnet, dass beispielsweise haptische Wahrnehmung quasi in Echtzeit übertragen werden kann und eine Mensch-Maschine-Interaktion über das Netz realisierbar ist.

Telerobotik: Die Telerobotik beschäftigt sich mit der Steuerung von Robotern aus der Distanz. Zur Anwendung kommen vor allem kabellose Übertragungsverfahren. Es werden zwei große Teilgebiete unterschieden: Telepräsenz mit Telepräsenzrobotern und Teleoperation mit Teleoperationsrobotern.

Value by Design: Die in Europa verwendeten Netztechnologien müssen Handlungsgrundsätzen der europäischen Politik für einen offenen Digitalraum

genügen, damit die sogenannten „Values by Design“ in die Systeme 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.

Virtualisierung: Der Grundgedanke der Netzwerkvirtualisierung besteht darin, IT-Services mit virtuellen Ressourcen abzubilden, die bisher fest an Hardware gebunden waren. So wurden bisher Server, Desktops und Datenspeicher virtualisiert. Cloud-Computing ist beispielsweise eine Art der Virtualisierung.

Visible Light Communication (VLC): Bei VLC werden handelsübliche LEDs als Alternative zum herkömmlichen drahtlosen Netzzugang eingesetzt. Dies ist dann von Nutzen, wenn Funkverbindungen nicht gewünscht sind oder durch Interferenzen gestört werden. Das Grundprinzip der VLC: Mittels eines Modulators wird eine LED sehr schnell ein- und ausgeschaltet. Diese Lichtimpulse werden von einer Photodiode im Empfangsgerät, wie zum Beispiel einem Smartphone, aufgefangen und als Nullen und Einsen in elektrische Impulse transformiert. Die Modulation geschieht dabei so schnell, dass das menschliche Auge kein Flackern des Lichts wahrnimmt.

Weitverkehrsnetz (Wide area network, WAN): Ein Weitverkehrsnetz ist ein Kommunikationsnetz, das sich über einen geografisch ausgedehnten Bereich erstreckt und häufig öffentlich verfügbare Übertragungstechnik nutzt, die von Netzbetreibern bereitgestellt wird. Der einfachste Fall eines Weitverkehrsnetzes ist der Verbund mehrerer Lokalnetze. Solche Netze nutzen beispielsweise Unternehmen, die geografisch verteilte Standorte in ein einheitliches Unternehmensnetz integrieren.

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat „Vernetzung und Sicherheit digitaler Systeme“
53170 Bonn

Bestellungen

schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09
18132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: bmbf.de
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

Juni 2021

Text

BMBF
VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

Gestaltung

VDI/VDE Innovation + Technik GmbH, Berlin

Druck

BMBF

Bildnachweise

Titelbild; S. 16/17; S. 24/25; S. 28/29: BMBF/familie redlich
S. 2: AdobeStock/steheap
S. 5: AdobeStock/vichie81
S. 8: AdobeStock/ivanko80
S. 9: AdobeStock/NDABCREATIVITY
S. 12: AdobeStock/volff
S. 14: AdobeStock/Gorodenkoff
S. 15: AdobeStock/Gorodenkoff
S. 19: AdobeStock/Pakhnyushchyy
S. 20: AdobeStock/Gorodenkoff
S. 21: Getty Images/Monty Rakusen
S. 22: AdobeStock/AA+W
S. 26: AdobeStock/mrallen
S. 27: AdobeStock/ltstudiooo
S. 30: AdobeStock/davooda (Icons)
S. 31: AdobeStock/Stanisic Vladimir
S. 32: AdobeStock/Andrey Armyagov
S. 33: AdobeStock/saksit
S. 35: AdobeStock/SFIO CRACHO
S. 36: GettyImages/Daniel Ingold/Westend61
S. 38: AdobeStock/weyo
S. 40: AdobeStock/Monster Zstudio
S. 43: AdobeStock/Gorodenkoff

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

