



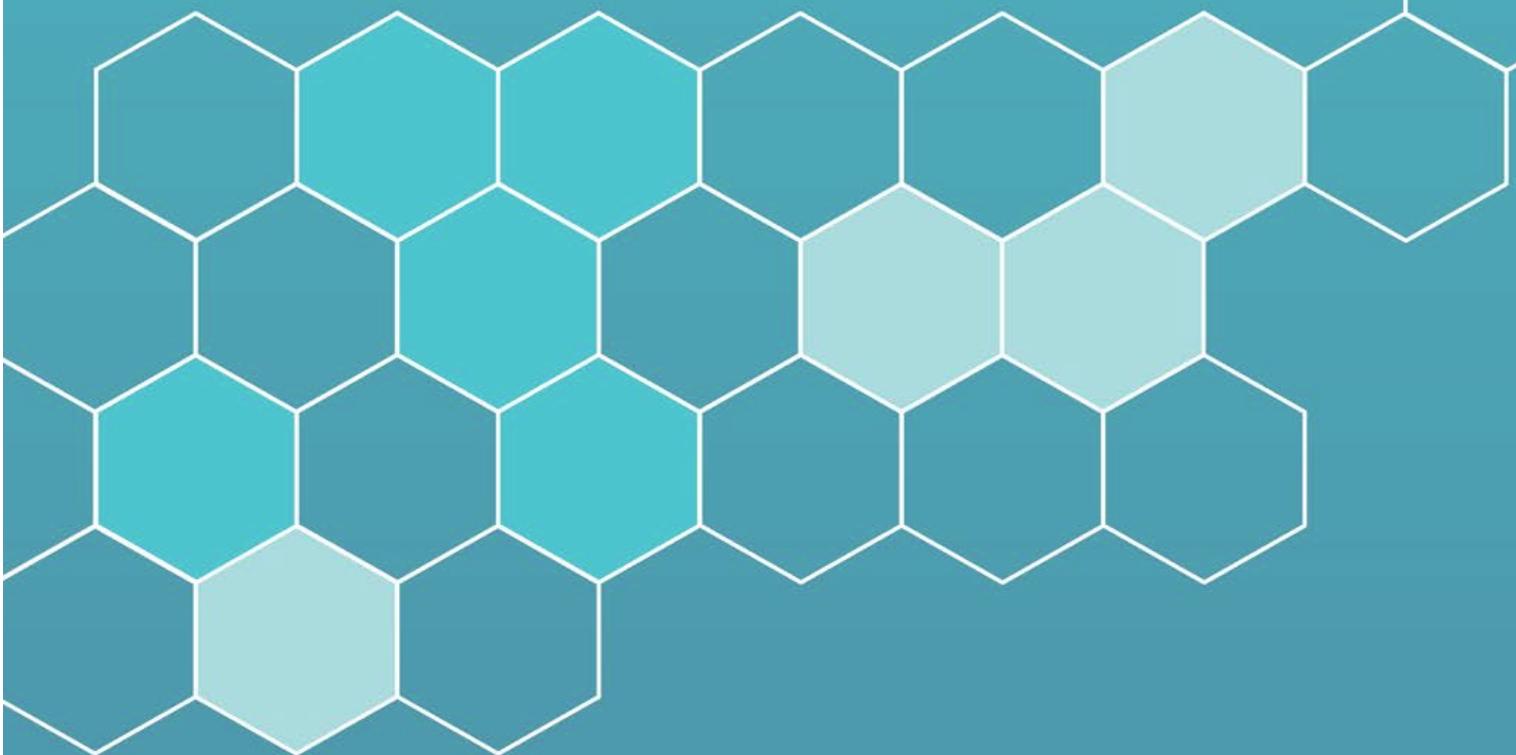
5G.NRW

Competence Center



NRW-Perspektive 6G

White Paper



Autor



Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Communication Networks Institute
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Kontakt



Lehrstuhl für Kommunikationsnetze

Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Technische Universität Dortmund

Otto-Hahn-Straße 6

44227 Dortmund

E-Mail: karsten.heimann@5g.nrw

Telefon: +49 231 755 - 4521

Fax: +49 231 755 - 6136

Gefördert durch

Ministerium für Wirtschaft, Innovation,
Digitalisierung und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Executive Summary

Die Marktdurchdringung des 5G Mobilfunkstandards wächst und immer mehr Unternehmen etablieren eigene 5G Campusnetze. Gleichzeitig haben Diskussionsrunden wie die vom Competence Center 5G.NRW ausgerichtete 6G Rocket Session gezeigt, dass das Rennen um 6G bereits begonnen hat. In diesem White Paper werden daher vor dem Hintergrund neuer Dienste und Anwendungsfelder für die nächste Mobilfunkgeneration die in aktuellen Forschungsarbeiten identifizierten 6G Schlüsseltechnologien herausgearbeitet und beleuchtet, wie Deutschland und NRW frühzeitig aber auch nachhaltig die Wertschöpfung durch 6G steigern kann.

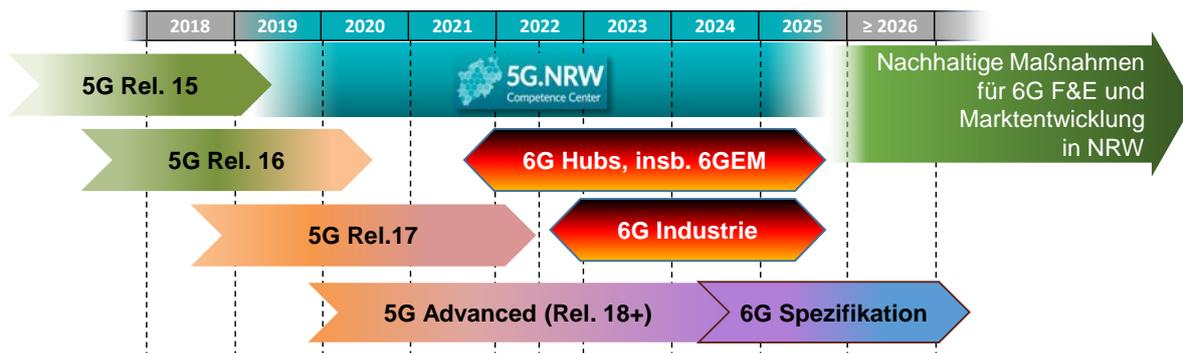


Abbildung 1: Zeithorizont des Competence Centers 5G.NRW in Bezug auf aktuelle Prozesse in der 5G Mobilfunkspezifikation und 6G Forschung: Für nachhaltige Auswirkungen auf die Entwicklung von 6G in Deutschland und NRW werden auch nach Ende der deutschen 6G-Forschungs-Hubs und des Competence Centers 5G.NRW weitere Förderungen erforderlich sein.

Wie bei den vorangegangenen Mobilfunkgenerationen werden auch für 6G neuartige Anwendungsfelder diskutiert, wodurch erstmals Dienste wie ein mobiles *Metaverse* ermöglicht werden sollen. Neben der Vernetzung rückt dabei die Mobilfunkkommunikation auch als Sensor-Technologie in den Vordergrund, wodurch innovative Konzepte zur Verschmelzung der physischen, digitalen und menschlichen Welten entstehen. Zur Umsetzung wird die native Integration von Künstlicher Intelligenz in der gesamten Netzarchitektur von entscheidender Bedeutung sein, während aber auch Themen der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz von Beginn an mitgedacht werden.

Das Competence Center 5G.NRW wird hierzu weiterhin den Innovationstransfer zwischen Forschung und Wirtschaft begleiten und neben internationalen Entwicklungen insbesondere auch die Arbeiten der deutschen 6G-Forschungs-Hubs bis 2025 verfolgen. Schon jetzt ist jedoch klar, dass auch darüber hinaus eine nachhaltige Forschungsförderung und die Transition zu einem 6G.NRW-Innovationsökosystem mit einer Perspektive bis 2030 gewährleistet sein muss, um aktuelle Bemühungen und Erfolge langfristig und nachhaltig über den gesamten 6G Technologielebenszyklus sichern und eine Chance für neue Produkte und Dienstleistungen mit Wertschöpfung in NRW bieten zu können. Für die spätere wirtschaftliche Verwertung *Made in NRW* ist folglich eine stetige, exzellente wie auch industriennahe Forschung und Entwicklung essentiell.

Inhalt

Executive Summary	1
Das Rennen um 6G hat bereits begonnen – NRW ist mit dabei	3
5G Rollout und Marktreife bedeutet Forschung und Entwicklung von 6G	5
Mit welchen Diensten und Anwendungsfeldern könnte 6G punkten?	7
6G Schlüsseltechnologien und wie sie in NRW vorangetrieben werden	9
Der Funkkanal als Sensor: Joint Communication and Sensing (JCAS).....	12
Tiefe Durchdringung mit Methoden der künstlichen Intelligenz (Native AI)	13
Intelligente Funkumgebungen und ihr Beitrag zu leistungsstarken 6G Netzen	16
Multidimensionale Netze	17
6G Security zur Stärkung von Privatsphäre, Sicherheit und Vertrauen	20
Mehr Wettbewerb und beschleunigte Innovationszyklen durch offene Schnittstellen	21
Nachhaltigkeit und Energieeffizienz	23
Zusammenfassung und Ausblick	25
CC5G.NRW bleibt Ihr Ansprechpartner für 6G Technologieentwicklungen	25
Ausblick: 5G/6G-NRW-Vorsprung nachhaltig ausbauen.....	25
Literatur.....	26

Das Rennen um 6G hat bereits begonnen – NRW ist mit dabei

Über die Aktivitäten des Competence Centers 5G.NRW wurde über die intensiven Arbeiten zur Entwicklung von NRW als 5G-Leitmarkt hinaus die langfristige Perspektive in Richtung 6G für NRW frühzeitig adressiert. Bereits im November 2020 wurde über das Portal des Competence Centers ein erster Entwurf des hier vorliegenden White Papers „6G Perspektive NRW“ vorgestellt¹. Ein knappes Jahr später ging es in der zweiten 5G.NRWWeek im September 2021 bereits nicht mehr nur um NRWs Rolle im Hinblick auf 5G: In der 6G Rocket Session als Teil der 5G.NRWWeek empfingen die Mitglieder und Gäste des 5G.NRW-Innovationsökosystems renommierte internationale Forschende, die Einblicke in aktuelle Trendtechnologieansätze zur nächsten Mobilfunkgeneration 6G lieferten und somit verdeutlichten, dass das Rennen um 6G bereits begonnen hat². Inzwischen konnte sich – aufbauend auf exzellente Vorarbeiten der Universitäten Aachen, Bochum, Dortmund und Duisburg-Essen und weiterer Forschungsinstitute der Fraunhofer- und Max-Planck-Gesellschaft und mit Unterstützung des Competence Centers – der vor allem in NRW angesiedelte BMBF-6G-Forschungshubs 6GEM etablieren (siehe Abbildung 1).

Dass also weltweit in Forschung und Entwicklung nicht nur die nächsten 5G Standardisierungsschritte verfolgt, diskutiert und mitgestaltet werden, sondern bereits mögliche Evolutionen über 5G hinaus („5G and beyond“) und in Richtung 6G ausdifferenziert werden, spiegelt sich neben den technologischen auch in politisch und gesellschaftlich getriebenen Diskussionen wider. Oftmals thematisieren diese auch die streitbare Zuordnung neu aufkommender Technologien und aus diesen resultierenden neuen Funktionen und Anwendungspotentiale des aktuellen 5G Mobilfunks oder des für 2030 avisierten Nachfolgers 6G.

Vor diesem Hintergrund verfolgt das Competence Center 5G.NRW neben der Begleitung des stetigen Innovationstransfers zwischen Forschung und Industrie das Ziel, frühzeitig eine NRW-Perspektive für ebendiesen neubeginnenden 6G Technologielebenszyklus zu erarbeiten. Repräsentiert durch Wissenschaftler der TU Dortmund nimmt das Competence Center aktiv an internationalen Konferenzen teil und analysiert die Weiterentwicklung von Wissenschaft, Technologie und Anwendungen von Kommunikationsnetzen und verwandten Disziplinen. So steuerte es bereits in 2019 unter Koordination des 6G Flagship Programms wertvolle Inhalte zu den Schwerpunktthemen *Critical*

¹ https://5g.nrw/app/uploads/2021/03/202011_Entwurf_White_Paper_NRW_Perspektive_6G.pdf

² Die Aufzeichnungen der Veranstaltungen sind weiterhin unter den folgenden Links verfügbar:

- Erste 5G.NRWWeek (10/2020): <https://5g.nrw/5G-nrweek/>
- Zweite 5G.NRWWeek (09/2021): <https://5g.nrw/2nd-5g-nrweek/>
- 6G-Rocket Session: <https://5g.nrw/5G-nrweek-rocket-session-6g-herausforderungen-und-loesung-sansaezte-ein-blick-in-die-glaskugel/>

and Massive Machine Type Communication towards 6G und *Machine Learning in Wireless Communication* bei und liefert zahlreiche wissenschaftliche Beiträge im 6G-Kontext.

Mit diesem Blickwinkel wird deutlich, dass auch 6G nicht nur LTE- und 5G-Netze weiterentwickeln, sondern gleichermaßen auch disruptive Innovationen mit sich bringen wird. So bergen beispielsweise Konzepte zur Nutzung von Funkübertragungen als Sensor oder dynamisch konfigurierbare Meta-Oberflächen zur gezielten Beeinflussung der Ausbreitung von Funkwellen vielschichtige, revolutionäre Potentiale sowohl in der Ausgestaltung zukünftiger 6G-Netze als auch in der Erschließung neuartiger Anwendungsfelder auf Basis eskalierter Leistungsparameter und Dienstgütern zellularfunkgestützter Übertragungssysteme.

Aufgrund der essentiellen Bedeutung der Kommunikationsnetze für die Digitalisierung und den Industriestandort NRW stellt die Stärkung industrienaher Forschung und Entwicklung dieses Bereiches eine Grundvoraussetzung dar, um NRW's Wertschöpfungsanteil national wie auch international langfristig und nachhaltig steigern zu können. Hierbei liegen die Potentiale auch in der steigenden Attraktivität lokaler und regionaler, sogenannter Campusnetze, die über den gesamten Technologielebenszyklus eine Chance für neue Produkte und Dienstleistungen mit Wertschöpfung in NRW bieten. Für die spätere wirtschaftliche Verwertung *Made in NRW* ist folglich eine stetige, exzellente wie auch industrienaher Forschung und Entwicklung im Bereich der o.g. 5G-Evolutionen wie auch disruptiven Technologieansätzen zentrale Voraussetzung. Hierzu liefert das Competence Center 5G.NRW durch das fortlaufende, umfangreiche Technologiemonitoring einen Zugang zu aufkommenden 6G-Schlüsseltrends und Impulse für das Innovationsökosystem 5G.NRW. Das hier vorgelegte White Paper *NRW Perspektive 6G* bildet den Abschluss der ersten Phase des Competence Centers. In den kommenden Jahren wird diese Perspektive in Wechselwirkung mit dem Forschungshub 6GEM weiter konkretisiert.

Das White Paper gliedert sich wie folgt: Nach einem Überblick über die geplanten Schritte in der 6G Standardisierung erfolgt ein Einblick in zukünftige Dienste und Anwendungsfelder von 6G sowie eine Detaillierung aktuell diskutierter Schlüsseltechnologien und ihrer Bedeutung für das bestehende Innovationsökosystem 5G.NRW. Anschließend wird thematisiert, inwieweit das Competence Center 5G.NRW in diesem Zuge auch weiterhin die Zusammenarbeit von und den Austausch mit weiteren nationalen und internationalen Forschungsinitiativen stärken wird. Schließlich blicken wir nicht nur auf das in drei Jahren CC5G.NRW gefestigte Netzwerk zurück, sondern skizzieren auch einen Ausblick auf die weitere Rolle des Kompetenzzentrums.

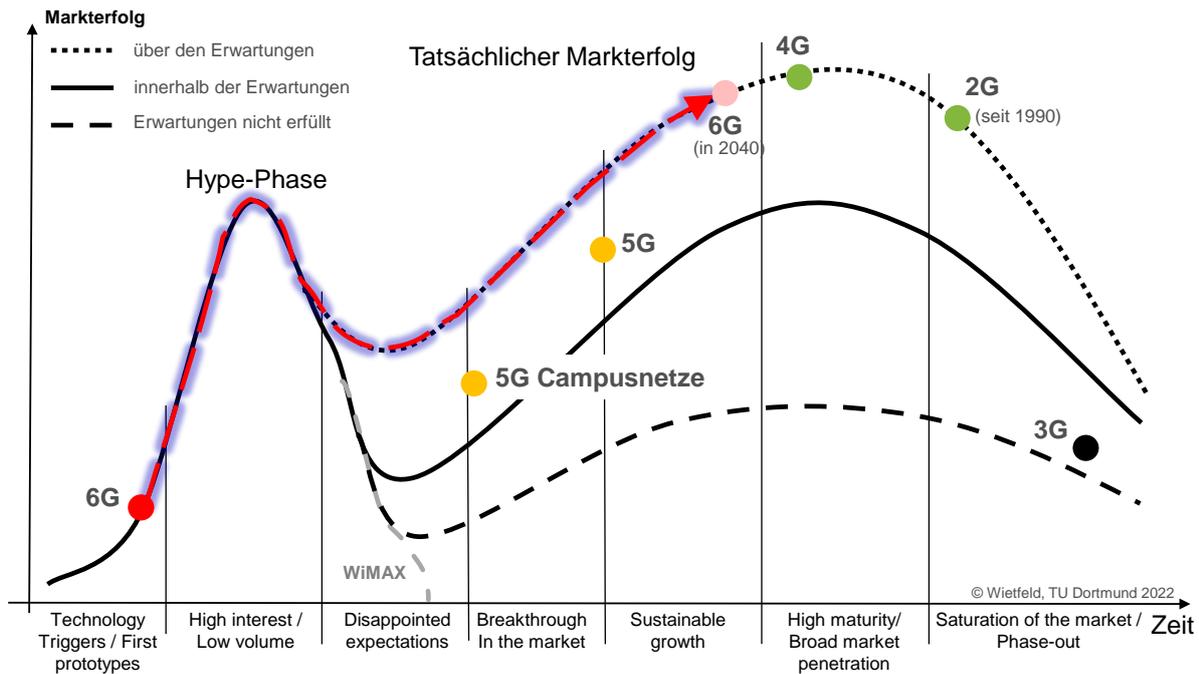


Abbildung 2: Lebenszyklen und Markterfolg der Mobilfunkgenerationen

5G Rollout und Marktreife bedeutet Forschung und Entwicklung von 6G – Der Zehnjahreszyklus der Mobilfunkstandardisierung

Der Technologielebenszyklus in der Standardisierung bisheriger Mobilfunkgenerationen betrug rund zehn Jahre. Das bedeutet auch, dass mit der Marktreife und der sukzessiven Verbreitung und Verfügbarkeit von 5G nicht nur die Ausgestaltung vorgesehener Funktionen und Ergänzungen weitergeführt wird. Stattdessen muss gleichzeitig auch eine Abgrenzung zu aufkommenden, neuartigen Technologieansätzen stattfinden, die noch wenig erforscht und unausgereift nur bedingt in der aktuellen Generation Berücksichtigung finden können und vielmehr für die nachfolgende sechste Mobilfunkgeneration tiefgreifend analysiert und erprobt werden müssen. Nicht zuletzt geht es bei der Standardisierung einer (Mobilfunk-)Technologie auch darum, definierte Leistungsmerkmale umzusetzen und Dienstgütereigenschaften gerecht zu werden. Neben der Identifikation oder Prognose von Leistungsparametern und Voraussetzungen zukünftiger Anwendungen ist daher der wissenschaftliche Diskurs zu Technologieansätzen und ihren Potentialen zur Realisierung dieser Anwendungen von zentraler Bedeutung. Vor diesem Hintergrund stellt Abbildung 2 angelehnt an den Gartner Hype Cycle [1] eine Einschätzung des Markterfolgs bisheriger Mobilfunkgenerationen innerhalb ihrer Technologielebenszyklen dem angestrebten Verlauf des beginnenden 6G Zyklus gegenüber: Während 3G/UMTS hinter den Erwartungen zurückblieb und in Deutschland bereits 2021 abgeschaltet wurde, ist 4G/LTE-Advanced etabliert und breit verfügbar. Ebenso scheint die Markteinführung von 5G – auch mit der Facette der Campusnetze – aktuell leicht über den Erwartungen zu liegen. Es ist somit an der Zeit, 6G auf den Weg zu bringen, um jetzt frühzeitig und nachhaltig bis in die 2030er Jahre die Wertschöpfung

in NRW anzuregen und schließlich den Markterfolg von 6G über den gesamten Technologielebenszyklus zu sichern.

Die *Working Party 5D - IMT Systems* der Internationalen Fernmeldeunion (ITU-R) hat die Arbeit an dem 6G-Anforderungskatalog aufgenommen und wird analog zu den vorigen Generationen ihre „IMT Vision for 2030 and beyond“ als Grundlage der 6G-Standardisierung verabschieden.³ Gleichzeitig verantwortet die globale Initiative *3rd Generation Partnership Project (3GPP)* die Ausgestaltung der etablierten Mobilfunkstandards zu LTE und 5G.

Ein Blick auf die Standardisierung – 3GPP Releases im Überblick:

5G wird sich noch substantiell weiterentwickeln, während mit ersten 6G Standards erst in 2027 zu rechnen ist.

Mit **3GPP Release 15** erschien die grundlegende Spezifikation der 5G-Mobilfunktechnologie mit Fokus auf den *enhanced Mobile Broadband (eMBB)* Anwendungsfall gemäß des für 5G maßgeblichen IMT-2020 Anforderungskatalogs der ITU-R. Dabei stellen hohe erreichbare Übertragungsraten die Kerncharakteristik von eMBB dar, wodurch dieser erste 5G Release eine große Sichtbarkeit erreicht hat. Die Einbettung in existierende 4G/LTE Infrastruktur mittels EN-DC im sogenannten *Non-Standalone* Betriebsmodus hat maßgeblich zu diesem Effekt beigetragen.

In **Rel. 16** greift die 3GPP die Erfahrungen und entstandene Anforderungen erster Systeme für Erweiterungen und Optimierungen auf. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der skalierbaren Ausweitung der *Ultra Reliable Low Latency (URLLC)* Kommunikation mit einer Zuverlässigkeit von 99,9999 % um industrielle Anwendungsfälle zu unterstützen⁴, z.B. im Bereich des Time Sensitive Networking (TSN). Fahrzeugkommunikation (C-V2X) und funkbasierte Positionierung sind weitere Schwerpunkte dieses Releases.

Für das jüngste **Rel. 17** liefen zum Teilaspekt des *enhanced Industrial IoT* mehrere Untersuchungen⁵ z.B. zum kontrollierten Einsatz in lizenzfreien Bändern, der Steigerung der spektralen Effizienz und Skalierbarkeit durch genauere Anpassung an die Kanaleigenschaften oder einer genaueren Synchronisation durch Korrektur der Ausbreitungsverzögerung.

Überdies hat bereits im September 2019 die Arbeit an **Rel. 18** in Form erster Machbarkeitsstudien zur Identifikation und Festlegung der Inhalte begonnen⁶. Dabei dominieren insbesondere Themen, die sich unter den Begriffen *Mission Critical* and *Resilient Communication* zusammenfassen lassen. Dazu gehören z.B. *Smart Energy* and Inf-

³<https://techblog.comsoc.org/2021/06/15/development-of-imt-vision-for-2030-and-beyond-from-itu-r-wp-5d/>

⁴ 3GPP RP-191584, „Physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency communication (URLLC)“

⁵ 3GPP RP-201310, „Enhanced Industrial Internet of Things (IoT) and ultra-reliable and low latency communication (URLLC) support for NR“

⁶ 3GPP Releases: <https://portal.3gpp.org/#/55934-releases>

rastructure, *Timing Resiliency*, sowie das Erreichen einer robusteren Netzverfügbarkeit durch Relays auf Fahrzeugen und Gateway UEs. Rel. 18 stellt gleichzeitig den nächsten Schritt in der 5G-Evolution dar, indem die Spezifikationen seitdem den **5G-Advanced** Schriftzug tragen werden. Eine Finalisierung des Rel. 18 wird für März 2024 angestrebt (vgl. Abbildung 1). Aktuell wird in 3GPP an den Plänen und potentiellen Inhalten für die **Rel. 19 und 20** gearbeitet.

Ab 2025 werden dann erste Planungsarbeiten in Bezug auf 6G erwartet mit dem Ziel, in 2027 mit dem **Release 21** erste **6G Standards** vorzulegen.

An dieser Zeitlinie wird deutlich, dass sich 5G noch substantiell weiterentwickeln wird und daher die weitere Beschäftigung mit 5G im Competence Center ebenso zielführend notwendig ist, wie die gleichzeitigen Beiträge zur 6G-Entwicklung.

Mit welchen Diensten und Anwendungsfeldern könnte 6G punkten?

Im Rückblick auf frühere Generationen des Mobilfunks lassen sich bestimmte Dienste und Anwendungsfelder, die die Einführung einer Mobilfunkgeneration besonders prägen und beförderten, recht eindeutig benennen (siehe Abbildung 3). Dabei ist allerdings gleichzeitig auch festzustellen, dass der Ausblick auf zukünftige Generationen auch Überraschungen (z.B. SMS) ebenso wie Enttäuschungen (z.B. Videotelefonie für UMTS) hervorgebracht hat. Oft spielt dabei auch die Wechselwirkung der neuen Fähigkeiten des Mobilfunknetzes mit der Verfügbarkeit von innovativen Endgeräten (z.B. Smartphones) kombiniert mit neuartigen Geschäftsmodellen (z.B. App-Stores) eine entscheidende Rolle.

Für die 5G Mobilfunktechnik zeichnet sich sehr deutlich ab, dass mit 5G vor allem die Erschließung neuer Anwendungsfelder im industriellen Umfeld ("Connecting Verticals") gelingt und somit Qualitätsgarantien erfordernde, sicherheitskritische Szenarien realisiert werden können. Zahlreiche dieser vertikalen Anwendungsfelder werden aktuell in den 5G.NRW-Projekten adressiert (von der hochautomatisierten Produktion und Logistik bis hin zu Medizintechnik und Landwirtschaft).

Bereits in 5G spielen *Augmented Reality (AR)* und *Virtual Reality (VR)* Anwendungen eine besondere Rolle: Die erst mit 5G erzielbaren niedrigen Verzögerungen der Kommunikation sind eine wesentliche Voraussetzung dafür, dass die interaktiven AR/VR-Anwendungen für Benutzer attraktiv sind.

Die Verknüpfung von virtuellen Welten mit der physikalischen Welt wird auch über digitale Zwillinge adressiert, die bereits mit 5G in Verbindung mit Edge Cloud-Konzepten realisiert werden, z.B. zur Steuerung von Produktionssystemen (siehe EU-Projekt mit NRW-Beteiligung 5G-Smart⁷).

⁷ <https://5gsmart.eu/>

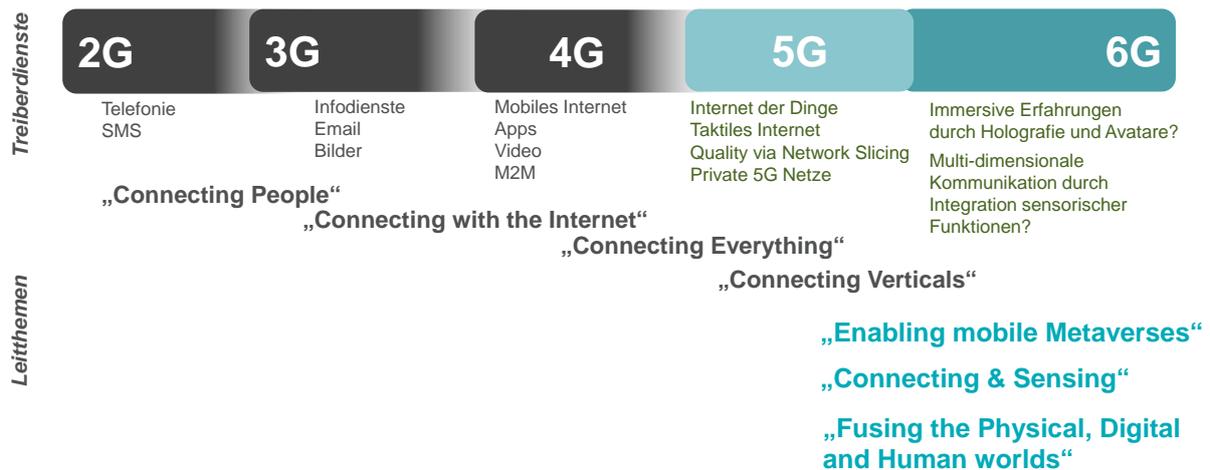


Abbildung 3: Mögliche Leitthemen für 6G aus Anwendungsperspektive.

Die Ideen und Visionen für potentielle Anwendungsfelder für 6G gehen noch einen deutlichen Schritt weiter und knüpfen an den Megatrend (oder auch Megahype) um zukünftige Metaverses an. Wie beispielsweise das Handelsblatt am 28.4.2022 dazu schreibt, wird das „Metaverse als Sammelbegriff für digitale, dreidimensionale Erlebniswelten verwendet, in der Menschen zusammenkommen, um zu spielen, einzukaufen, sich mit Kollegen zu treffen oder Konzerte zu besuchen. [...] Zuckerberg spricht von einer ‚neuen Generation des Internets‘, die auch als Web 3.0 bezeichnet wird.“ [2] Die Konzepte der Metaverses gehen dabei über die Entwicklung einer neuen Mobilfunktechnik hinaus und beziehen sich insgesamt auf die potentielle Weiterentwicklung des Internets. 6G kann jedoch in diesem Zusammenhang als entscheidende Plattform für den mobilen Zugang zu Metaverses dienen, in der Kombination von drahtloser Datenübertragung, integrierter Sensorik, neuartigen mobilen Endgeräten und lokal verfügbaren Rechenkapazitäten.

Aber auch unabhängig von der Entwicklung von Metaverses kann 6G neuartige, immersive Erfahrungen der Kommunikation und Interaktion zwischen Menschen ermöglichen, z.B. über holografische Kommunikation oder als Vorstufe auch über Kommunikation mittels Avataren. Die Technik der Holografie ermöglicht eine authentische Telepräsenz [3], die einer realen Präsenz nahe kommt und damit die heute schon bekannten Möglichkeiten von Videokonferenzen von der Zwei- in die Mehrdimensionalität führt. Die möglichen Einsatzfälle der Telepräsenz gehen weit über die Kommunikationsszenarien im geschäftlichen und privaten Bereich hinaus z.B. in Richtung der Ausbildung in Schulen und Hochschulen, der Medizin, in Kultur und Sport, im Handel, in Dienstleistungen wie z.B. Tourismus bis hin zur Wartung und Steuerung von Industrieanlagen. Überzeugende Telepräsenzlösungen könnten auch dazu beitragen, die mit Reisen verbundenen Kosten und Umweltfolgen nachhaltig zu reduzieren.

Aus technischer Sicht ist jedoch die Umsetzung einer praxistauglichen Telepräsenz mittels Holografie und die Integration dieser Form der Kommunikation in Metaverses mit zahlreichen, heute noch ungelösten Herausforderungen verbunden, wie beispielsweise den angemessenen Endgeräten zur Darstellung und Interaktion, der verfügbaren lokalen Rechenleistung und den zu unterstützenden sehr hohen Datenraten. Beispiele erster prototypischer Realisierungen auf 5G-Basis wurden auf dem Mobile World Congress 2022 gezeigt [4].

Aus heutiger Sicht lässt sich kaum vorhersagen, welche konkreten Anwendungen letztendlich die für 6G gesuchten „Killerapplikationen“ sind, jedoch ergeben sich genügend konkrete und belastbare Ansatzpunkte, die die Notwendigkeit substantieller Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten in Richtung zukünftiger Mobilfunknetze begründen. So schreibt die FAZ am 22.5.2022 in einem Artikel zur Einschätzung der Rolle der Metaverses im Verhältnis zu 6G: „Klar scheint aber: Wenn man das Metaverse nicht als Spielerei oder Werbeplattform der großen Player degradiert, ergeben sich mannigfaltige Möglichkeiten für unsere Gesellschaft und Industrie.“ [5]

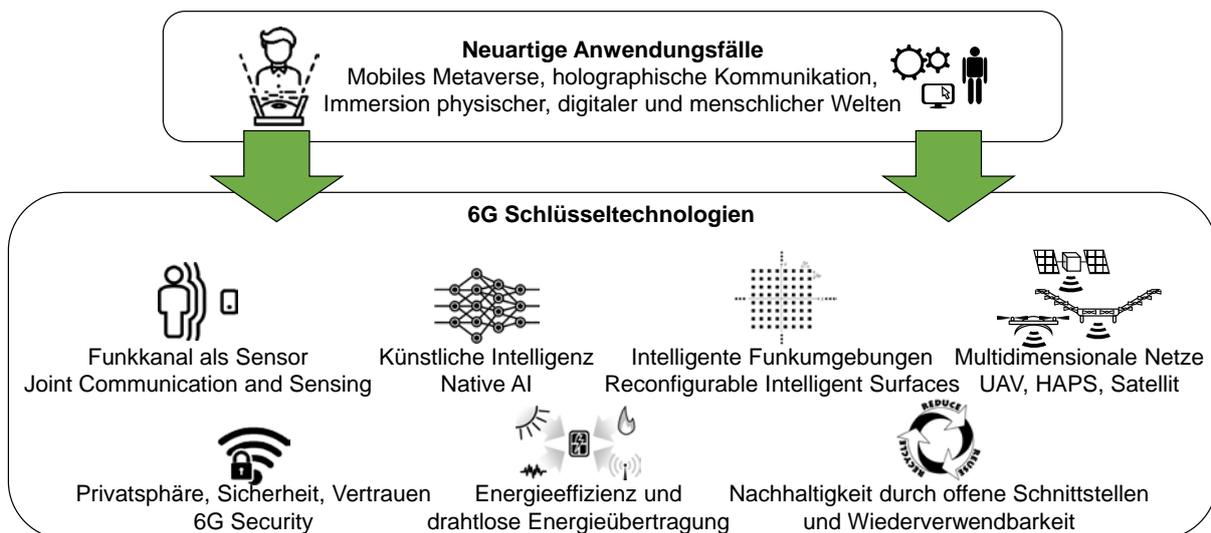


Abbildung 4 : Zukünftige Dienste und ihre Realisierbarkeit durch 6G Schlüsseltechnologien.

6G Schlüsseltechnologien und wie sie in NRW vorangetrieben werden

Repräsentiert durch die Partner der TU Dortmund hat das Competence Center erfolgreich an verschiedensten internationalen Konferenzen teilgenommen, die den Fokus auf die Weiterentwicklung von Wissenschaft, Technologie und Anwendungen von Kommunikationsnetzen und verwandten Disziplinen legen. Bei den Teilnahmen steht immer auch die Analyse aktueller Technologietrends im Vordergrund, welche schließlich auch aufbereitet und in zahlreichen Fachgesprächen mit Mitgliedern und Gästen des 5G.NRW-Innovationsökosystems thematisiert und diskutiert werden.

Überdies erzielt das Competence Center auch über eigene Beiträge und die Mitwirkung in 6G-Expertengruppen wie dem 6G Flagship Programm eine internationale Sichtbarkeit und stärkt somit nachhaltig den Forschungsstandort NRW.

Was ist das 6G Flagship Programm?

Bei dem 6G Flagship Programm (<https://www.6gchannel.com/>) handelt es sich um eine durch die Universität Oulu in Finnland gegründete, internationale Initiative, deren Ambition es ist, die Mobilfunkforschung über 5G hinaus voranzutreiben. In einer White-Paper Reihe zu 12 Schwerpunktthemen⁸ haben sich 250 Expertinnen und Experten aus mehr als 100 Organisationen und 30 Ländern zusammengetan, um mögliche Ausprägungen der zukünftigen 6G-Technologie auszuarbeiten. Mit einer Vision bis zum Jahr 2030 wird dabei die Zielsetzung verfolgt, die Industrie bei der Finalisierung der 5G-Technologie zu unterstützen, die notwendigen Grundlagen für zukünftige 6G-Standardisierung rechtzeitig zu erarbeiten und technologieunabhängig vertikale Anwendungen und Dienste gemeinsam mit der Industrie umzusetzen.

Das Competence Center 5G.NRW hat sich dabei als einer der verantwortlichen Autoren intensiv in das Kernthema **Critical and Massive Machine Type Communication towards 6G** [6] eingebracht und zusätzlich zum Schwerpunkt **Machine Learning in Wireless Communication** [7] beigetragen.

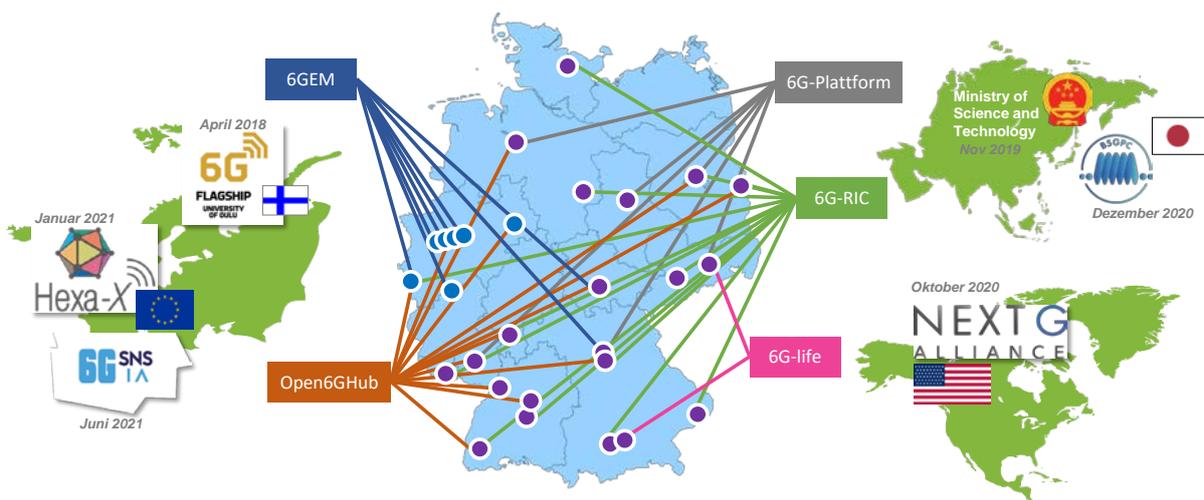


Abbildung 5: 6G Aktivitäten in NRW, Deutschland und international.

Aber nicht nur im internationalen Umfeld werden 6G Aktivitäten vorangetrieben. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) treibt mit den 6G-Forschungshubs die Stärkung von Forschung und Entwicklung hinsichtlich der sechsten Mobilfunkgeneration in Deutschland maßgeblich voran und stellt damit frühzeitig die Weichen für eine nachhaltige Wertschöpfung auch angesichts des internationalen Wettbewerbs (vgl. Abbildung 5). Sicher ist – und das zeigen die zahlreichen Forschungsvorhaben der 6G-Hubs (s.u.) ebenso wie die dargelegten Schlüsseltrends, dass mit 6G nicht nur eine Perspektive für die Fortentwicklung des Mobilfunks gegeben ist, sondern vielmehr die Erschließung neuer Anwendungsfelder und Hebung vertikaler Märkte durch leistungsstarke, nachhaltige und sichere 6G-Netze der Zukunft erst ermöglicht wird.

⁸ Ein Überblick über die 12 Schwerpunktthemen, sowie ein kostenfreier Download aller Beiträge ist hier verfügbar: <https://www.6gchannel.com/6g-white-papers/>

Was sind die 6G-Forschungshubs?

Im Rahmen der 6G-Initiative des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) soll die Forschung und Entwicklung zu 6G in Deutschland gezielt durch eine Fördermaßnahme unterstützt und ausgebaut werden.⁹

Daraufhin wurden Forschungsverbände herausragender Forschungsinstitute und Hochschulen zu vier „6G-Forschungs-Hubs“ ausgewählt, die seit August 2021 ihre Expertise auf verschiedensten Technologieebenen zusammenbringen, um die Forschung zur kommenden Mobilfunkgeneration 6G voranzutreiben.¹⁰

6GEM

Der „6G-Forschungs-Hub für offene, effiziente und sichere Mobilfunksysteme“ mit deutlichem Schwerpunkt in NRW strebt die Entwicklung eines ganzheitlichen 6G-Systems an, in welchem neue Technologien genutzt werden, um auf Basis digitaler Zwillinge vielschichtige neue Anwendungspotentiale von 6G umzusetzen.

6G-life

Der Forschungshub befasst sich mit der digitalen Transformation und Souveränität künftiger Kommunikationsnetze und setzt dabei den Schwerpunkt auf der Mensch-Maschine-Kollaboration, wobei insbesondere eine Beschleunigung von Reaktionsgeschwindigkeiten in Sensor-Aktor-Netzen auch unter Aspekten der Nachhaltigkeit und Energieeffizienz erzielt werden soll.

6G-RIC

Das „6G Research and Innovation Cluster“ widmet sich insbesondere der Entwicklung offener Schnittstellen, um über Technologiegrenzen hinweg eine Testinfrastruktur zur realistischen Erprobung neuer Komponenten zu ermöglichen. Dabei stellen Sicherheit, Kosten- und Energieeffizienz essentielle Entwurfskriterien dar.

Open6GHub

Ziel des Hubs ist es, den globalen Harmonisierungsprozess von 6G aktiv mitzugestalten, welcher perspektivisch gesellschaftlichen Prioritäten wie Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und Energieeffizienz berücksichtigt, indem bspw. die Wirtschaftlichkeit durch geteilte Nutzung von Infrastruktur durch verschiedene Betreiber gesteigert wird.

Überdies wurde als zweiter Teil der Fördermaßnahme die „Plattform für zukünftige Kommunikationstechnologien und 6G“ (**6G-Plattform**) etabliert, um zusätzlich die Vernetzung der Hubs zu stärken und die 6G-Aktivitäten zu bündeln.

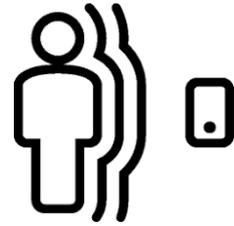
Nachfolgend werden auf Basis des fortlaufenden Technologiemonitorings essentielle 6G Schlüsselrends herausgearbeitet.

⁹ https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2021/04/3528_bekanntmachung

¹⁰ <https://www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/pressemitteilungen/de/karliczek-wir-wollen-bei-6g-an-der-spitze-sein.html>

Der Funkkanal als Sensor: Joint Communication and Sensing (JCAS)

Kommunikations- und Radartechnik wurden stets strikt voneinander getrennt fortentwickelt. Aufgrund der inzwischen überwiegenden digitalen Signalverarbeitung bestehen jedoch viele Überlappungen. Diese Erkenntnis, sowie verschiedene konzeptionelle Vorarbeiten aus den 2000er Jahren, wurden beispielweise in einem vielzitierten Beitrag [8] zu den *Proceedings of the IEEE* als Vision für ein hybrides Radar- und Kommunikationssystem vorgestellt. Besonderen Anklang fand hierbei die Idee, auf Basis der OFDM-Technologie, welche u.a. in aktuellen 4G/5G Netzen verwendet wird, Radarfunktionalitäten bereitzustellen, um z.B. im Rahmen der Vehicle-to-Everything (V2X) Kommunikation Umgebungsinformationen zu erfassen.



Mit Blick auf zukünftige Mobilfunknetzgenerationen wird in aktuellen Fachartikeln [9] bereits die tiefgreifende Integration von Radar-basierten Sensing-Methoden diskutiert, um die wachsende Nachfrage für derartige Dienste zu stillen und zeitgleich die kostbaren spektralen Ressourcen effizient auszuschöpfen. Letzteres muss jedoch nicht nur bedeuten, dass diese neuartige Komponente nur im Spektrum der Mobilfunknetzbetreiber vorzufinden sein wird, denn die mehreren Gigahertz reservierten Spektren für Fahrzeugaradare könnten somit zeitgleich auch für V2X-Datenübertragungen verwendet werden. Dies birgt somit insbesondere für den Straßenverkehr der Zukunft ein enormes Potential.

Als Ziel des JCAS Paradigmas steht ein vereinheitlicht-optimiertes System, welches in der Lage ist, die hohen Ansprüche an ein modernes Mobilfunknetz zu erfüllen sowie hochqualitative Umgebungsinformationen bereitzustellen. Es sollen die Charakteristika beider Technologien sowie der Mehrwert des einen Teilsystems für das jeweils andere geschickt ausbalanciert werden (Koordinationsgewinne) [10, 11]. Für diesen Schritt müssen jedoch Hardware, Signalverarbeitung und Protokolle weiter erforscht werden. Insbesondere für die perspektivische Nutzung von JCAS im sub-THz- bis THz-Frequenzbereich von 6G sind die Hürden derzeit noch sehr hoch, jedoch bieten die erzielbaren Datenraten von weit über 10 Gbit/s [12], sowie potentielle neuartige Anwendungen z.B. im Bereich der Werkstoffprüfung [13], einen hohen Anreiz für die 6G Forschung, um die Funknetze mehr in industrielle und alltägliche Prozesse einzubinden.

Eine vielversprechende Alternative besteht durch mobilfunkkanalbasierte Sensing-Techniken. Diese haben ihren Ursprung im Smart Home bzw. Internet-of-Things Kontext und haben zuletzt neue Standardisierungsaktivitäten für den WLAN Standard ausgelöst [14]. Der Vorteil dieser Verfahren ist, dass der Mobilfunkkanal, welcher inhärent zum Zwecke einer robusten Kommunikation beobachtet wird und somit Messdaten generiert, als Sensor interpretiert und folglich für verschiedene Dienste ausgenutzt werden kann [15]. So werden hardwareseitig keine Modifikationen benötigt; ebenso entfällt ein Großteil des Standardisierungsaufwands, welcher im kommenden Jahrzehnt zur

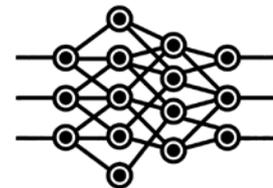
Realisierung von 6G Radar-basiertem *Sensing* anfällt. Dafür werden jedoch immer mindestens zwei Geräte benötigt, d.h. üblicherweise Funkmast und Endgerät. Da auch in Mobilfunknetzen die direkte Geräte-zu-Geräte Kommunikation seit ihrer Einführung mit LTE Advanced Rel. 12 und sukzessiven Ausweitung durch 5G zunehmend an Bedeutung gewinnt, sind in Zukunft wohlmöglich zahlreiche Technologieaspekte anwendbar.

So sind Mobilfunknetze prinzipiell jetzt schon mittels dieser Techniken in der Lage, z.B. Verkehrszählungen inklusive Charakterisierung des Fahrzeugtyps und der Durchfahrtrichtung durchzuführen, da sich während des Durchfahrtvorgangs die Signalstärke charakteristisch verändert [16]. Ebenso wurde gezeigt, dass aktive Netzteilnehmer auf verschiedene Art und Weisen geortet werden können. Etwaige Positionierungsdienste [17] sind bereits seit mehr als zwei Jahrzehnten fester Bestandteil von Mobilfunknetzen und werden fortlaufend weiterentwickelt, neuerdings insbesondere für industriennahe Anwendungen. Seit der Einführung der mmWave Frequenzen wurde in diesem Bereich an der Fortentwicklung und anschließenden Zusammenführung mit bestehenden Techniken gearbeitet, sodass in Experimenten bereits Genauigkeiten im Zentimeterbereich erzielt wurden [18]. Grund hierfür sind die frequenzbedingten, veränderten Kanaleigenschaften welche höhere Messgenauigkeiten ermöglichen. Aber auch die fortschrittliche mmWave Antennentechnik bietet einen Nährboden für neuartige Messmethoden und Anwendungsfälle außerhalb der Positionierung [19], welche in den nächsten Jahren weiter erforscht werden müssen.

Tiefe Durchdringung mit Methoden der künstlichen Intelligenz (Native AI)

Unter dem Schlagwort *Native AI (AI-Artificial Intelligence)* lassen sich unterschiedlichste Bemühungen, die Potentiale künstlicher Intelligenz von Beginn an in 6G mitzudenken, zusammenfassen.

Dabei steht insbesondere die tiefe Durchdringung in unterschiedlichste Bereiche des Netzes im Fokus. So können Methoden der künstlichen Intelligenz wie maschinelle Lernverfahren beispielsweise im Funkzugangsnetz [7] eingesetzt werden, um einerseits komplexe Protokollabläufe zu koordinieren und zu optimieren und andererseits die Effizienz der Funkübertragungen auf Basis neuartiger Kodier- und Modulationsverfahren sowie semantischer Kommunikation zu steigern.



Künstliche Intelligenz zur vorausschauenden Mobilitätsunterstützung in mmWave und THz Bändern

Die neuartigen Funkspektren im mmWave und THz-Bereich, wie sie in 5G und 6G für hochperformante Datenübertragungen insbesondere im Kontext datenhungriger Anwendungsfälle beispielsweise im Bereich der holografischen Kommunikation und Ex-

tended Reality vorgesehen sind, stellen aufgrund der deutlich höheren Signalausbreitungsdämpfung neue Anforderungen an die Übertragungs- und insbesondere die Antennentechnik. Zur Kompensation der Ausbreitungsverluste sind gerichtete Antennen mit entsprechendem Antennengewinn unabdingbar. In statischen Anwendungsfällen wie dem Fixed-Wireless-Access dient eine abgestimmte Übertragungstrecke der Mobilfunk-gebundenen Überbrückung der sogenannten *letzten Meile* in der Anbindung von Haushalten an das Breitbandinternet. Eine wesentliche Charakteristik von Mobilfunknetzen ist jedoch die nahezu inhärente Mobilität der Teilnehmenden, sodass eine dynamische Nachführbarkeit der Antennencharakteristik bzw. Sende-/Empfangsrichtung essentiell ist, um eine robuste mmWave/THz Hochleistungskommunikationsverbindung für mobile Endgeräte zu realisieren.

Mittels phasengesteuerten Antennenarrays (*Phased Array Antennas*) gelingt es dabei, von hohen Richtwirkungen zu profitieren und gleichzeitig eine hohe Flexibilität mittels elektronisch anpassbarer Ausrichtung – der sogenannten *Pencil Beams* (fokussierte Hauptkeule der Antennencharakteristik) – zu gewährleisten. Aufgrund der ausschließlich zielgerichteten Sende-/Empfangsprozesse ist jedoch eine fundamentale Umgestaltung herkömmlicher Funkzugriffsprotokolle, die auf Broadcast-Konzepte für allgemeine Signalisierungsaufgaben der Mobilfunkbasisstationen zurückgreifen, erforderlich. Die Richtungen der *Pencil Beams* müssen seitens Basisstation und Endgerät so abgestimmt werden, dass ihre Antennengewinne fortlaufend¹¹ auf die Signalausbreitung abgestimmt sind. Die Koordination beider Seiten gilt es nun insbesondere während des initialen Netzzugangs zusätzlich zu etablieren. [20]

Während die grundsätzliche Machbarkeit entsprechender Verfahren zum Beam Management in diversen Studien und Feldtests auch für herausfordernde Mobilitätsdynamiken wie bspw. bei Hochgeschwindigkeitszügen [21] oder im Automotive-Kontext exemplarisch nachgewiesen wurden, stellen Aspekte wie die Integration in handliche, mobile Endgeräte und der Umgang mit hohen und variablen Dämpfungs- und Abschattungseffekten insbesondere im THz-Bereich zentrale Forschungsfragen für zukünftige 6G Mobilfunknetze dar und bieten lohnende Anknüpfungspunkte zur Integration maschineller Lernverfahren und Methoden der Künstlichen Intelligenz [22]. So zeigen Forschungsarbeiten bereits Potentiale in der KI-gestützten Selektion von Übertragungszeitpunkten [23] und der intelligenten Einbindung von umfangreichen Kontextinformationen wie Radar-basierten Daten (vgl. JCAS) [24], Nutzerpositionsinformationen [25], sowie Kanalinformationen von sub-6 GHz Frequenzen [26] (vgl. kanalbasiertes Sensing). Als Vorstufe des Einsatzes von künstlicher Intelligenz wurde bereits die Verwendung von *Compressive Sensing*-basierten Beam Management Protokollen angedacht, um

¹¹ Demovideo zur automatisierten mmWave Beam-Nachführung (*Beamtracking*) (Hintergründe in [20]) auf Basis der CC5G.NRW Experimentalplattform verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=DjqCDtUAaBA>

durch minimierten Signalisierungsaufwand und unter Ausnutzung der statistischen Eigenschaften der Funkwellenausbreitung im mmWave Bereich (z.B. *channel sparsity*) die passgenaue (Neu-)Ausrichtung bzw. Nachführung der Pencil Beams zu gewährleisten.

Inzwischen gibt es eine Fülle an Untersuchungen bzgl. des partiellen, maßgeschneideren Einsatzes von maschinellen Lernverfahren (ML), siehe [27] für eine Übersicht. Zukünftige Arbeiten müssen jedoch insbesondere die Echtzeitfunktionalität der entwickelten Lösungen, sowie deren ganzheitlichen Einsatz mit Demonstratoren, d.h. auf Basis realer mmWave Kanaldaten, untersuchen. Eine Integration anderer neuartiger 6G Technologieansätze wie bspw. den Metasurfaces [28] muss zudem auch immer wieder möglich sein, sodass mit *native AI* auch die Grundlage für Erweiterungen und neue Konzepte geschaffen wird.

Möglicher Paradigmenwechsel durch den Einsatz Künstlicher Intelligenz für neuartige physikalische Funkübertragungskonzepte: „Beyond Shannon“ und „Semantic Communications“

Im Bereich der physikalischen Übertragungsschicht wird ein großes Potential des Einsatzes der Künstlichen Intelligenz in Konzepten gesehen, die sich von der etablierten Vorgehensweise einer schrittweisen Verarbeitung der Nutzdaten mittels Quellen- und Kanalkodierung deutlich abgrenzen. Während die Quellenkodierung das Ziel hat, den Informationsgehalt der ursprünglichen Daten zu extrahieren und damit die Datenmenge zu reduzieren, dient die Kanalkodierung dazu, die Daten trotz der zu erwartenden Störungen des Übertragungskanals möglichst fehlerfrei zu übertragen. Über entsprechende Kanalkodierungsverfahren können eventuell auftretende Bitfehler erkannt und ggf. korrigiert werden. Der Wissenschaftler Shannon hat die grundlegenden Zusammenhänge zu theoretisch maximal möglichen Datenraten über einen verlustbehafteten Kanal beschrieben. Die Forschung zu digitalen Mobilfunksystemen hat sich in den vergangenen Jahrzehnten vor allem darauf fokussiert, die realen Systeme der Shannon-Grenze anzunähern und so die spektrale Effizienz der Systeme, d.h. die Anzahl der übertragenen Bits pro Zeit und Bandbreite zu steigern.

Während die aktuellen 5G-Systeme noch der etablierten Sichtweise folgen, sind seit einigen Jahren unter dem Schlagwort „Beyond Shannon“ neuartige Konzepte der Datenübertragung vorgestellt worden. Hierbei steht im Vordergrund, die Bedeutung (Semantik) der zu übertragenden Daten in den Fokus zu rücken: Es geht dabei nicht mehr darum, die Nutzdaten in einzelne, standardisierte Symbole zu zerlegen, sondern die Bedeutung der Nutzdaten ganzheitlich zu extrahieren und zu übertragen. Bei der Erkennung der Bedeutung spielen Methoden des maschinellen Lernens eine herausragende Rolle. Gleichzeitig werden auch die Eigenschaften des Funkkanals mittels maschineller Lernmethoden erkannt und eine geeignete Kodierung abgeleitet [29]. Für eine Vertiefung des Potentials und der Herausforderungen der semantischen Kommunikation sei auf die Key Note¹² der im Rahmen der 5G.NRW Week durchgeführten 6G Rocket Session

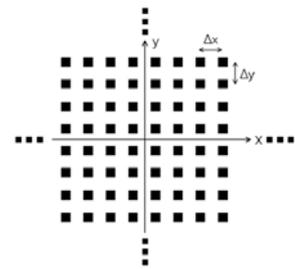
¹² Vortragsvideo als Teil der 6G Rocket Session verfügbar: <https://youtu.be/tDjmXHmnQyQ?t=643>

verwiesen. Mehdi Bennis (University of Oulu) erläutert in seinem visionären Beitrag die disruptiven Konzepte der semantischen Kommunikation sehr anschaulich [30].

Aktuell existieren erste Untersuchungen zur generellen Machbarkeit der angesprochenen Verfahren, die vielversprechende Ergebnisse im Hinblick auf die erzielbare spektrale Effizienz zeigen [31]. Jedoch sind noch weitergehende Forschungsarbeiten notwendig, um die Praxistauglichkeit und tatsächliche Überlegenheit gegenüber bisherigen Verfahren auch für komplexeste Inhalte, höchste Datenraten und hochdynamische Übertragungskanäle aufzuzeigen.

Intelligente Funkumgebungen und ihr Beitrag zu leistungsstarken 6G Netzen: „Reconfigurable Intelligent Surfaces“

Mit dem Schlagwort *Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)* wird ein neuartiges Systemkonzept beschrieben, welches die Ausbreitung von Funkwellen zwischen Sender und Empfänger nutzbringend beeinflusst. Nachdem der Funkkanal bisher



meist als gegeben angesehen wurde und Sende-/Empfangseinheiten mit Methoden wie der Kanalschätzung versuchten, Störeffekte zu minimieren und sich an die aktuellen Gegebenheiten bestmöglich anzupassen, stellt dieser Technologieansatz einen grundlegenden Perspektivwechsel dar und verkörpert damit eine der disruptiven 6G-Innovationen.

Ein RIS besteht aus sogenanntem Meta-Material, dessen Wechselwirkung mit elektromagnetischen Wellen dynamisch angepasst werden kann. Somit ist es möglich, dass RIS-Oberflächen Funksignale zielgerichtet reflektieren oder Interferenz durch andere Endgeräte passgenau verringern, ohne wiederum ihre Übertragungen zur adressierten Basisstation zu behindern. Eine Bündelung von Signalleistung wirkt sich dabei ähnlich zu den Phased Array Antennen positiv auf das Link Budget aus, also den tolerierbaren Signalausbreitungsverlusten zwischen Sender und Empfänger. Somit kann insgesamt eine Steigerung der Nutzungseffizienz spektraler Ressourcen erzielt werden. Über die aktive Steuerung der Oberflächeneigenschaften können einerseits störende Überlagerungen durch Mehrwegeausbreitung verhindert und andererseits auch Abschattungssituationen überbrückt werden. Zukünftig könnten Gebäude also mit entsprechend integrierten RIS-Oberflächen die Signalausbreitung nicht mehr durch Abschattung behindern, sondern durch geschickte Reflexionen günstig beeinflussen.

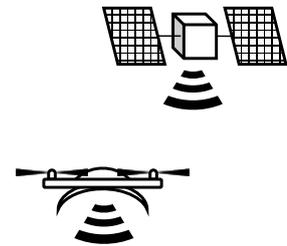
In seinem Beitrag¹³ arbeitet Prof. Emil Björnson (Linköping Universität, Schweden), „*Reconfigurable intelligent surfaces: Myths and realities*“ [32] die technischen Grundlagen auf und beleuchtet die Vor- und auch Nachteile der daraus abgeleiteten Systemkonzepte. So müssen sich RIS von bekannten Konzepten wie beispielsweise dem *Relay*-Ansatz

¹³ Vortragsvideo verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=ysSf1K2NUu0>

abgrenzen, mit welchem ebenfalls das Funksignal aufgegriffen und weitergeben, aber zusätzlich auch durch eine analoge oder digitale Aufbereitung verzögert und verstärkt wird. In seinem Vortrag wurde deutlich, dass RIS eine Schlüsselkomponente im Kontext des Designs zukünftiger Funkssysteme – auch über 6G hinaus – sein können, aber gleichzeitig auch kein Allheilmittel, welches bekannten Konzepten in jedem Fall überlegen ist. Schließlich erfordert die Abstimmung der Funkumgebung bzw. RIS-Konfiguration die fortlaufende Einschätzung und Bewertung der Funkkanaleigenschaften und ihrer Anpassungspotentiale sowie die entsprechende Signalisierung zum RIS. Das Competence Center hat diesbezüglich in einer Simulationsstudie [33] mögliche Mehrwerte im Kontext der hybriden Vernetzung von Fahrzeugen des Straßenverkehrs und Drohnen/Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) beleuchtet und die Potentiale für zukünftige Smart Cities aufgezeigt. Bis zu einer möglichen industriellen Einsatztauglichkeit besteht schlussendlich jedoch noch viel Forschungsbedarf [34].

Multidimensionale Netze

Vielschichtige Anwendungsfelder und die hohe Diversität an Anforderungen erfordern maßgeschneiderte Lösungen innerhalb des Mobilfunknetzes. Während 5G durch netzinterne Virtualisierung von Funktionen die Flexibilität und Dynamik der Ressourcennutzung im Netz steigert, wird 6G durch multidimensionale Ansätze die Zuverlässigkeit und Konnektivität revolutionieren. Dies wird einerseits durch die adaptive Aggregation unterschiedlichster Übertragungswege und Netztechnologien angestrebt, andererseits bieten neuartige Plattformen Potentiale zur Erschließung des Luftraums, welcher zukünftig vermehrt für innovative Dienste genutzt werden und durch moderne Flugsysteme neue Vernetzungsmöglichkeiten bieten wird. Gleichzeitig stellen sich neue Herausforderungen bei der Charakterisierung dieser Umgebungen durch mehrdimensionale Umgebungskarten (Radio Environmental Maps, REM).



Abdeckung in der Luft: Erschließung neuer Räume durch UAV, HAPS, Satelliten

Die mit minimaler terrestrischer Infrastruktur mögliche Funkversorgung über Satelliten ist seit vielen Jahrzehnten eine eingeführte und erprobte Kommunikationstechnik insbesondere für Anwendungsfälle in der Schifffahrt und der Luftfahrt. Auch für die (temporäre) Versorgung von Regionen mit unzureichender oder auch zerstörter terrestrischer Infrastruktur sind Satellitensysteme gängige Optionen, z.B. für die kommunikationstechnische Anbindung von Windparks oder die Versorgung in Katastrophengebieten. Auch wenn es bereits in der Vergangenheit mehrfach Versuche gab, Satellitensysteme für breitbandige Internetanwendungen zu etablieren, ist es erst mit dem ambitionierten Starlink-System gelungen, breitbandige Satellitenverbindungen (mit Datenraten im Bereich von 100 Mbit/s) bis hin zu Konsumenten Anwendungen verfügbar zu machen. Neben Starlink (SpaceX/Musk) befinden sich noch weitere Satellitenprojekte wie OneWeb (Bahri/Mittal & UK) oder Kuiper (Amazon/Bezos) im Aufbau. Diese Projekte

sind zunächst unabhängig von Mobilfunknetzen zu sehen und bieten aktuell auch noch keine Endgeräte, die vom Formfaktor her eine direkte Integration in Endgeräte terrestrischer Mobilfunknetze bieten können. Daher wird in Bezug auf 6G die enge Integration mit Satellitensystemen als Zielvorstellung formuliert und auch im Rahmen der 6G-Forschungshubs verfolgt¹⁴. Auch erscheint es im Sinne der technologischen Souveränität angezeigt, die Satellitentechnik aus europäischer Sicht weiterzuverfolgen. Angesichts der oben angeführten Projekte erscheinen die Marktchancen für weitere Satellitensysteme aktuell unsicher. Vielmehr könnte es möglicherweise eher vielversprechend sein, Wertschöpfungspotentiale durch die Integration der im Aufbau befindlichen Satellitensysteme Starlink, OneWeb und Kuiper mit zukünftigen 6G-Mobilfunksystemen zu heben.

Neben Satellitensystemen wird ebenfalls schon seit den 1990er Jahren das Konzept der *High Altitude Platforms* (HAPS) verfolgt¹⁵. Bisherige Ansätze, die unter anderem von Google und Facebook verfolgt wurden, sind jedoch trotz des Nachweises der generellen Machbarkeit nicht weiterverfolgt worden: Zuletzt wurde beispielsweise das Google Loon Projekt nach neun Jahren Laufzeit in 2021 eingestellt [35]. Auch wenn das HAPS-Konzept nun auch für 6G wieder im Gespräch ist, steht eine breite wirtschaftlich sinnvolle Nutzung in Frage, insbesondere auch vor dem Hintergrund der oben benannten Satellitenprojekte.

Die Nutzung von Drohnen als in vergleichsweise geringer Höhe fliegende Kommunikationsplattformen wird seit ca. 15 Jahren erforscht. Das NRW-Hightech-Forschungsprojekt AVIGLE [36] hat hier frühzeitig bereits die Machbarkeit einer fliegenden 4G-Basisstation erforscht. Aus diesem und weiteren von NRW aus initiierten bzw. mit Beteiligung von NRW-Forschungsinstituten durchgeführten Projekten sind international beachtete Ergebnisse hervorgegangen [37, 38]. Aufgrund der zunehmenden Miniaturisierung der Komponenten im Zusammenwirken mit dem Einsatz von Software-definierten Lösungen ist die Integration von Basisstationskomponenten mit Drohnensystemen bereits mit 4G und 5G Technik machbar. Aktuelle Forschungsarbeiten aus NRW beleuchten den potentiellen Nutzen von UAVs, die mit intelligenten rekonfigurierbaren Oberflächen (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS, siehe oben) ausgestattet werden, und weisen damit schon in Richtung 6G [33]. Es ist absolut zielführend, existierende Forschungsstärken von NRW in diesem Bereich weiter auszubauen.

Der breiten Umsetzung dieser Konzepte stehen jedoch oft regulatorische Einschränkungen entgegen, die aus Gründen der Sicherheit den Einsatz von Drohnensystemen in besiedelten Gebieten stark einschränken. So bleibt der Einsatz in Katastrophenfällen für „fliegende Basisstationen“ einer der relevantesten Anwendungsfälle, da hier die Notfallsituation zu einer Abwägung der unterschiedlichen Risiken zugunsten des Einsatzes von drohnengestützten Kommunikationsknoten ermöglicht. Das in Dortmund

¹⁴ <https://www.open6ghub.de/project/beyond-cellular/>

¹⁵ <https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx>

ansässige Deutsche Rettungsrobotikzentrum (DRZ) bietet hier in der Kombination mit der 6G-Forschung besondere Chancen, dieses Themenfeld von NRW aus international wettbewerbsfähig weiterzuentwickeln. So ist denn auch das DRZ als ein Testfeld im Forschungshub 6GEM verankert¹⁶. Weiterhin ist die Überwachung von vollständig automatisierten Industrieanlagen ein vielversprechender Ansatz für den Einsatz von Drohnen und damit dreidimensionalen Funknetzen. Hier leistet das 5G.NRW-Projekt 5hine¹⁷ wichtige Beiträge.

Das Multi-Connectivity für zuverlässige und adaptive Funkübertragungen

Bereits die Anforderungsprofile heutiger 5G-Anwendungen befinden sich in einem stetigen Wandel. Während die klassische Netzwerkdimensionierung weitestgehend auf stochastischem, menschlichem Verhalten und entsprechend korreliertem Verkehrsaufkommen basiert, wird der Anteil ereignisgesteuerter Maschinenkommunikation drastisch zunehmen. Dabei ist die größte Herausforderung die Realisierung einer zuverlässigen Kommunikation kritischer Ereignisse mit praktisch unvorhersehbarem Verhalten (z.B. im Falle von Nachrichten zur Vermeidung einer drohenden Kollision im Straßenverkehr oder in der Intralogistik).

Dieser Wandel macht eine Definition und Einführung neuer Leistungsparameter wie z.B. die Präzizierbarkeit des Verkehrsaufkommens unerlässlich [6]. Ausgehend von diesen neuen Serviceklassen müssen zukünftige 6G-Netze Ressourcen in einem mehrdimensionalen Multi-Connectivity Lösungsraum (Multi-X) bereitstellen, wobei sich der Lösungsraum z.B. aus unterschiedlichen Zugangstechnologien¹⁸ (**Multi-Radio Access Technologies**, RAT) wie 4G/5G und Wi-Fi 6 [39], verschiedenen Frequenzbändern (**Multi-Band**) oder auch Netzbetreibern [40]¹⁹ (**Multi-Operator**) zusammensetzen kann.

Damit auch für nicht oder kaum präzifizierbare Anwendungsklassen eine garantierte Dienstgüte unter Einsatz eines angemessenen Ressourcenaufwandes erzielt werden kann, müssen verfügbare Ressourcen dynamisch und in Abhängigkeit definierter Kosten (Frequenznutzung, Verzögerungszeiten, Energieverbrauch, etc.) zugewiesen werden. Der Einsatz datengetriebener Analyseverfahren ist in diesem Zusammenhang für die Identifikation des realen Verhaltens einzelner Netzwerke, Teilnehmer und Umgebungen zwingend erforderlich, um eine bedarfsgerechte Vermittlung notwendiger Ressourcen zu gewährleisten [41].

¹⁶ <https://cni.etit.tu-dortmund.de/details/bmbf-6g-research-hub-6gem-visits-drz-living-lab-for-evaluation-experiments-19088/>

¹⁷ https://www.dlr.de/sf/desktopdefault.aspx/tabid-10436/27573_read-73779

¹⁸ Vortragsvideo zu SKATES (Interoperable Multi-Connectivity Communication Module, Hintergründe in [39]) verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=hHqXNUFUUG4>

¹⁹ Vortragsvideo zu [40] verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=OCEyEcERCs4>

6G Security zur Stärkung von Privatsphäre, Sicherheit und Vertrauen



Mit der zunehmenden Verbreitung und Verdichtung von Mobilfunknetzen und der stetigen Aufnahme neuer Anwendungsfälle steigen gleichzeitig auch die Anforderungen hinsichtlich Privatsphäre, Sicherheit und Vertrauen [42]. Aufgrund der Systemkomplexität und dem heterogenen Systemcharakter, die sich aus dem Zusammenspiel verschiedenster (verteilter) Systeme ableiten, ergeben sich hier besondere Herausforderungen.

Beispielsweise listet die 3GPP hierzu in umfangreichen Katalogen²⁰ Anforderungen und Testfälle zur Überprüfung grundlegender Sicherheitsfunktionen der zum Großteil virtualisierten Netzwerkfunktionen im 5G-Kernnetz. Die zunehmende Verbreitung von günstigen Software-Defined Radios (SDRs) und Open-Source-Protokollstapeln ermöglichen es zudem, einen tiefgehenden Einblick in die Netzwerkaktivitäten auf der Luftschnittstelle zu erhalten, sowie auch aktiv in die Geschehnisse einzugreifen.

Dies fördert im signifikanten Maße die Erforschung und Entwicklung von Netzwerktechnologien und verbietet gleichzeitig den fadenscheinigen Schutz durch *Security Through Obscurity*, sodass zuverlässige Schutzmechanismen eingefordert werden.

Für 6G wird dabei die Umsetzung des *Secure-by-Design*-Prinzips eine essenzielle Rolle spielen. Denn fehlerhafte Implementierungen oder unbeabsichtigte Fehlkonfigurationen können in Anbetracht der überwältigenden Flexibilität und der damit verbundenen Komplexität für lange Zeit unentdeckt in den Netzen verweilen und damit langfristig die Sicherheit und die Zuverlässigkeit für Netznutzer und -betreiber kompromittieren.

Kürzlich vorgestellte Attacken wie ReVoLTE²¹ [43] haben öffentlichkeitswirksam gezeigt, wie durch die fehlerhafte Nutzung vorhandener Sicherheitsmechanismen VoLTE-Anrufe mitgehört werden können, und damit weltweit die Privatsphäre der Netznutzer signifikant beeinträchtigt wird.

Ein weiterer und häufig unterschätzter Sicherheitsaspekt ist die Möglichkeit zur Extraktion von Kommunikationsmetadaten. Beispielsweise werden sowohl in 4G als auch in 5G zahlreiche Signalisierungsinformationen, die den Nachrichtenaustausch zwischen Basisstation und Endgerät koordinieren, aus Effizienzgründen unverschlüsselt ausgetauscht.

Mit dem SDR-basierten Open-Source Werkzeug FALCON²² [44] können diese Ressourcenzuweisungen einer LTE Zelle in Echtzeit und mit einer zeitlichen Auflösung von 1ms extrahiert und visualisiert werden.

²⁰ 3GPP TS 33.117, "Catalogue of general security assurance requirements",
https://www.3gpp.org/ftp//Specs/archive/33_series/33.117

²¹ Siehe auch <https://revolte-attack.net> (Demo verfügbar: <https://www.youtube.com/watch?v=FiiELuFvwu0>)

²² FALCON Software-Tool open source verfügbar: <https://github.com/falckenber9/falcon>

Obwohl die Identität und die ausgetauschten Nutzdaten kryptographisch geschützt sind und somit nicht ohne die Kenntnis der geheimen Schlüssel dechiffriert werden können, kann ein externer Beobachter anhand der Verbindungsdaten dennoch Rückschlüsse auf die übertragene Datenmenge ziehen. In Kombination mit der zeitlichen Charakteristik des Nachrichtenaustauschs kann mithilfe von maschinellem Lernen auf den dahinterliegenden Dienst [45] rückgeschlossen werden oder sogar in aggregierter Form zur Identifikation oder Wiedererkennung einzelner Individuen angewandt werden [46].

Um den Risiken des Abhörens (Eavesdropping) und der äußeren Störung (Jamming) zu begegnen, müssen die Schutzmechanismen in 6G bereits an der untersten physikalischen Schicht Einzug nehmen. Denn diese Netzwerke werden in Zukunft zunehmend höchst sensitive Informationen wie z.B. die Daten von medizinischen Monitoringssystemen, Body-Area Networks und Bio-Cyber Interfaces transportieren [42].

Aber auch in Bereichen ohne direkten Personenbezug, wie intelligente Verkehrssysteme und Energiesysteme muss die Zuverlässigkeit und die Robustheit gegen äußere Störeinflüsse sichergestellt sein [42]. Eine Lösungsmöglichkeit, um das Security-Level in zukünftigen 6G Netzen zu steigern, ist der Einsatz des Funkkanals mit der Zielsetzung hochzuverlässiger kryptografischer Verschlüsselung. Dazu werden bereits Ansätze diskutiert, die durch ergänzenden Einsatz von *Reconfigurable Intelligent Surfaces* eine hochzuverlässige Sicherheit bereitstellen und insbesondere im maschinellen Umfeld als attraktive Alternative zu Public-Key-Techniken angesehen werden [47].

Mehr Wettbewerb und beschleunigte Innovationszyklen durch offene Schnittstellen

Das *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*²³ ist ein internationaler Verbund von Herstellern, Netzbetreibern und öffentlichen Gremien zur Mobilfunkstandardisierung. Die Spezifikationen sind dabei frei zugänglich, klammern jedoch die internen Schnittstellen des Funkzugangsnetzes, das *Radio Access Network (RAN)*, aus. Dies kann als ein Grund für die Aufteilung des Marktes auf nur wenige große Ausrüster gesehen werden. Um hier gesteigerten Wettbewerb und insbesondere beschleunigte Innovationszyklen zu ermöglichen ist es entsprechend notwendig offene Schnittstellen einzubringen.



Das sogenannte *Open RAN* Konzept [48] bricht die bisher starre Verbindung im Funkzugangsnetz zwischen den einzelnen Bestandteilen der Basisstationen auf und setzt dabei auf eine Modularisierung und Virtualisierung herstellerübergreifend offen standardisierter Komponenten. Damit wird eine freie Wahl der Ausrüster für sämtliche Komponenten ermöglicht, womit die Abhängigkeit von einzelnen Anbietern aufgelöst wird. Auch erlauben es Cloud-Technologien wie *Network Function Virtualization (NFV)*

²³ 3rd Generation Partnership Project (3GPP): <https://www.3gpp.org/>

Hard- und Software zu trennen. Die so entstehenden Teilbereiche eröffnen dabei im Sinne des *Software-Defined Networking* (SDN) Ansatzes beschleunigte Innovationszyklen bei zeitgleich verringerten Markteintrittsbarrieren. Zudem wird eine spezifisch auf die jeweiligen Einsatzzwecke zugeschnittene Auswahl der Komponenten anhand definierter Leistungsmerkmale, sowie deren dynamische Anpassung, beispielsweise durch den Einsatz von Maschinellen Lernverfahren zur Umsetzung von Network Slicing [49, 50], unterstützt. Bisher nicht im Mobilfunk tätige Unternehmen, Startups und Wissenschaft können dabei für relevante Teilaspekte maßgeschneiderte Lösungen einbringen. Der Ansatz erlaubt ebenfalls die Nutzung in Großserien produzierter Hardware zur Kostensenkung und Flexibilisierung. Dies trifft beispielsweise auf den Bereich der Server zu, welche als Plattform für die einzelnen Software-getriebenen Funktionen des RAN dienen. Entsprechend wird das Thema insbesondere durch Netzbetreiber als auch bisher nicht im Mobilfunk tätige Unternehmen getrieben.

Obwohl dies etablierte Netzausrüster unter Zugzwang setzt, haben auch diese das signifikante Potential des Ansatzes erkannt [51–53]. So bietet sich hier die Chance einen Fokus auf Innovationen und Alleinstellungsmerkmale zu setzen und die Basisfunktionalität aus offenen Quellen bzw. dem Ökosystem zusammenzustellen und kundenspezifisch zu adaptieren. So setzen beispielsweise noch im Rahmen von 5G unter anderem die Netzbetreiber 1&1 und O2 auf erste Open RAN Konzepte [54–56].

Gegenwärtig existieren jedoch noch zahlreiche Herausforderungen um die signifikanten Potentiale zu heben. So ist zunächst die Standardisierung selbst zu nennen. So definiert die *O-RAN Alliance*²⁴, ein Zusammenschluss von mehr als 30 Netzbetreibern sowie annähernd 300 Unternehmen, Universitäten und Forschungseinrichtungen, eine offene Spezifikation. Dazu zählen auch die Planung und Durchführung von Plugfests zur Gewährleistung der umfassenden Interoperabilität der resultierenden Lösungen.

Die O-RAN Spezifikation ist dabei jedoch nur als eine Spielart von Open RAN bzw. offener Schnittstellen zu sehen und wird durch die Linux Foundation im Rahmen der *O-RAN Software Community*²⁵ mit einer Referenzimplementierung unterstützt. Das generelle Konzept wird zudem durch die *Open RAN policy coalition*²⁶ und das *Telecom Infra Project* (TIP)²⁷, hier unter dem Begriff OpenRAN, gefördert. Außerhalb dieser Aktivitäten ergeben sich Fragestellungen bezüglich Zuständigkeit hinsichtlich der Einhaltung von Leistungsmerkmalen im Gesamtsystem und der Identifizierung von Fehlern bzw. Störungen.

Da die gegenwärtigen Konzepte und Initiativen einen primären Fokus auf 5G setzen, ist es hier unbedingt erforderlich die Anforderungen und Ansätze von 6G einzubringen um frühzeitig die Entwicklung der offenen Standardisierung zu beeinflussen. Damit ist der

²⁴ O-RAN Alliance: <https://www.o-ran.org/>

²⁵ O-RAN Software Community: <https://oran-osc.github.io/>

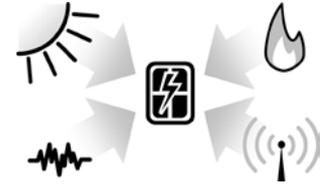
²⁶ Open RAN Policy Coalition: <https://www.openranpolicy.org>

²⁷ Telecom Infra Project: <https://telecominfraproject.com/>

Zeitpunkt ideal um aktuellste Erkenntnisse der Forschung einzuweben und Ergebnisse bzw. offene Punkte aus 5G zu berücksichtigen, um eine Adressierung identifizierter Potentiale zu gewährleisten.

Nachhaltigkeit und Energieeffizienz

Die stetig wachsende Nachfrage nach schnellen, hochverfügbaren Mobilfunknetzen resultiert in einem stark zunehmenden Datenverkehr über diese Netze. So wird vor dem Hintergrund von leistungsfähigeren Endgeräten, daten-intensiveren Inhalten wie 4K und 8K Videoübertragungen sowie VR/AR-Inhalten ein globaler Anstieg von 80 Exabytes pro Monat im Jahr 2021 auf 370 Exabytes pro Monat in den Mobilfunknetzen erwartet [57]. Das wachsende Volumen der Datenübertragungen erfordert gleichzeitig eine Erweiterung der Kapazität der Netze sowie der Datacenter, was in einem steigenden Energieverbrauch resultiert. Ziel von 6G ist es diese Energiekurve zu durchbrechen, indem ein ansteigender Datenverkehr nicht mehr einen äquivalent steigenden Energieverbrauch der Mobilfunknetze bedeutet [58]. Um den Energieverbrauch zukünftiger 6G-Netze vergleichbar zu 5G-Netzen zu ermöglichen, bedarf es Optimierungen an den Basisstationen und Technologiezentren.



Mit einem anteiligen Energieverbrauch von 73 % am Gesamtverbrauch der Mobilfunknetzbetreiber [59] stellen Optimierungen an den Basisstationen das größte Potential dar. Neben einer Effizienzsteigerung um einen Faktor von 10-100 [60] bzw. 300 [58] wird auch ein Energieverbrauch von nahezu 0 bei minimaler Zellauslastung – etwa nachts – als Ziel definiert [61].

Neben dem Aufbau energieeffizienterer Hardware und der damit verbundenen Reduktion an erforderlicher Kühlung von Prozessoren und Verstärkern werden in 6G neue Energiesparmaßnahmen eingeführt. Durch Beamforming kann Leistung zielgerichtet an die entsprechenden Teilnehmer übertragen und so Streufelder minimiert werden. Die damit verbundene hohe spektrale Effizienz [62] resultiert direkt in eine höhere Energieeffizienz, da durch höherwertigere Modulationen und geringere Interferenzen durch Streufelder die Dauer der Übertragung über die Funkschnittstelle ToA (*Time on Air*) minimiert werden kann. Durch den Einsatz von RIS ist es außerdem möglich die gerichtete Kommunikation auch in hohen Frequenzbändern über direkte Sichtverbindungen (*LOS-Line-of-Sight*) hinaus zu verteilen und damit den Einsatzbereich zu erweitern [60]. Neben dem Einsatz von Mehrantennensysteme (MIMO-*Multiple Input Multiple Output*) wird die Effizienz mittels reduzierten Overheads durch präventives Scheduling mithilfe von AI-basierten Übertragungsvorhersagen sowie dem *Grant-free* Funkkanalzugriffsschema gesteigert [60]. Darüber hinaus kann das Ziel eines nachhaltigen Mobilfunknetzes zwar auch durch Abschalten von Frequenzträgern verfolgt werden, was sich jedoch nachteilig auf die Nutzererfahrung der übrigen Kanalressourcen auswirken kann. Statt-

dessen bietet sich eine Abschaltung auf Symbol-Ebene in Szenarien mit wenig Auslastung der Netze an, was zu einem Energiesparpotential von bis zu 10 % führt [62]. Deterministische Übertragungsmuster können mittels KI erlernt werden und dienen zur Aktivierung und Deaktivierung von Sleep Modes und Energie-Management-Systemen in Basisstationen, ohne die Nutzererfahrung QoE (Quality of Experience) zu beeinträchtigen.

Der darüber hinaus bestehende Energiebedarf der Basisstationen kann durch Energy Harvesting reduziert werden, beispielsweise durch On-site-Photovoltaik-Anlagen, die im Jahr 2019 in den Vodafone-Netzen bereits 4 GWh Energie [63] verfügbar gemacht haben. Dem steigenden Energiebedarf in den Rechenzentren kann Quantum Computing unter Einsatz von *qubits* und komplexen Netzwerkoperationen auf Basis Künstlicher Intelligenz entgegenwirken, das ein Einsparpotential von mehreren Größenordnungen in Aussicht stellt [60].

Das Ziel der Nachhaltigkeit wird nicht nur netzseitig, sondern auch auf Seite der Endgeräte definiert. Mit 6G sollen Zero-Energy Geräte möglich sein, die durch eine Kombination aus Low-Power Communication, extrem geringen Energieverbrauch im Leerlauf (sog. *Idle-Zustand*) sowie *Energy Harvesting* unabhängig von klassischen Energiequellen werden [64]. Für *Energy Harvesting* werden dafür verschiedene grüne Energiequellen vorgeschlagen, von Licht, Vibrationen bis hin zu Temperaturdifferenzen [61]. Darüber hinaus steht auch die Energieversorgung mittels Funk zur Diskussion, indem neben WIT (*Wireless Information Transfer*) auch WET (*Wireless Energy Transfer*) in Form von dedizierten „Energistationen“, sog. *Energy Beacons*, ermöglicht werden soll [65]. Da die verfügbare Energie jedoch sehr gering sein wird, sind extrem energieeffiziente Kommunikationsprotokolle umso wichtiger und markieren den Bedarf an weiteren Optimierungen für einen reduzierten Overhead, insbesondere für die Übertragung kleinster Datenmengen verteilter Sensoren [61].

Zusammenfassung und Ausblick

CC5G.NRW bleibt Ihr Ansprechpartner für 6G Technologieentwicklungen

Wir blicken zurück auf drei spannende Jahre Competence Center 5G.NRW, in denen nicht nur ein Netzwerk verschiedener Stakeholder mit dem 5G.NRW-Ökosystem herangereift ist, sondern in denen durch die beiden 5G.NRWWeeks, vielen weiteren Veranstaltungen und Gesprächsterminen ein reger Erfahrungs- und Erkenntnisaustausch hinsichtlich 5G und 6G Entwicklungen für den Forschungs- und Industriestandort NRW stattgefunden hat. Als Competence Center haben wir dabei nicht nur den *Förderwettbewerb 5G.NRW* begleitet, sondern auch nationale Förderprogramme verfolgt.

Aus diesen Gründen freuen wir uns, Ihnen auch weiterhin in der zweiten Phase des Competence Centers 5G.NRW²⁸ die aktuellen Technologietrends und deren Anwendungspotentiale näherbringen zu dürfen und im Rahmen von Diskussionsrunden, Fachveranstaltungen und Werkstattgesprächen die neusten 6G-Entwicklungen aufzugreifen. Dabei werden wir selbstverständlich auch die Arbeiten der 6G-Forschungs-Hubs – darunter insbesondere des 6GEM-Hubs mit starker NRW-Beteiligung – mit großem Interesse verfolgen und Brücken zum 5G.NRW-Innovationsökosystem schlagen.

Ausblick: 5G/6G-NRW-Vorsprung nachhaltig ausbauen

Die Vergangenheit hat gezeigt, dass neuartige Technologieansätze und verbesserte Konzepte oft bereits in Vorgängergenerationen umgesetzt und erprobt werden. Neben zahlreichen, für 6G designierten, disruptiven Neuerungen werden daher sicherlich auch die aktuellen und zukünftigen 5G Netze von der für 2030 geplanten Einführung von 6G profitieren. Vor diesem Hintergrund gilt es umso mehr, das 5G.NRW-Innovationsökosystem durch kontinuierliches Technologiemonitoring am Puls aktueller Forschungsentwicklungen zu halten und NRW nicht nur als 5G-Leitmarkt nachhaltig zu stärken, sondern auch als Innovationsstandort weiter zu festigen und somit frühzeitig die 6G Wertschöpfung im Land zu etablieren. Über die Verlängerung des Competence Centers 5G.NRW und die 6G-Forschungs-Hubs wird dazu in den nächsten drei Jahren eine solide Grundlage geschaffen, sodass anschließend durch weitere Maßnahmen zur Stärkung des Innovationstransfers auf marktreife 6G Technologien *Made in NRW* mit einer Perspektive bis 2030 hingearbeitet werden kann. Die nachhaltige Begleitung dieser Technologieentwicklung durch Förderprogramme auch nach 2025 ist somit Grundvoraussetzung, damit die aktuellen Bemühungen in Forschung und Industrie auch in Zukunft zur Wertschöpfung beitragen und ein 6G.NRW-Innovationsökosystem langfristig etablieren.

²⁸ <https://www.wirtschaft.nrw/landesregierung-foerdert-competence-center-5gnrw-fuer-weitere-drei-jahre-mit-29-millionen-euro>

Literatur

- [1] Gartner Hype Cycle. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gartner.de/de/methoden/hype-cycle>.
- [2] N. Höfler und H. Krolle, „Was hinter dem Metaverse-Hype steckt“, *Handelsblatt*, 28. Apr. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/technik/metaverse-was-hinter-dem-metaverse-hype-steckt/28073180.html>.
- [3] D. Gotsch, X. Zhang, T. Merritt und R. Vertegaal, „TeleHuman2: A Cylindrical Light Field Teleconferencing System for Life-size 3D Human Telepresence“ in *CHI '18: CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, Montreal QC Canada, 2018, doi: [10.1145/3173574.3174096](https://doi.org/10.1145/3173574.3174096).
- [4] A. El Essaili, S. Thorson, A. Jude, J. C. Ewert, N. Tyudina, H. Caltenco, L. Litwic und B. Burman, „Holographic communication in 5G networks“, Ericsson AB, Ericsson Technology Review, 17. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/holographic-communication-in-5g-networks>.
- [5] F. Fitzek und H. Boche, „Hoffnungswert Metaverse: Am Lagerfeuer der Zukunft“, *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, 22. Mai 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/digitec/metaverse-unternehmen-tuefteln-an-virtuellen-welten-18051009.html>.
- [6] N. H. Mahmood, S. Böcker, A. Munari, F. Clazzer, I. Moerman, K. Mikhaylov, O. Lopez, O.-S. Park, E. Mercier, H. Bartz, R. Jüntti, R. Pragada, Y. Ma, E. Annanperä, C. Wietfeld, M. Andraud, G. Liva, Y. Chen, E. Garro, F. Burkhardt, H. Alves, C.-F. Liu, Y. Sadi, J.-B. Dore, E. Kim, J. Shin, G.-Y. Park, S.-K. Kim, C. Yoon, K. Anwar und P. Seppänen, „6G White Paper on Critical and Massive Machine Type Communication Towards 6G“, *6G Research Visions, University of Oulu*, Nr. 11, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.6gchannel.com/items/6g-white-paper-critical-massive-type-communication/> [PDF].
- [7] S. Ali, W. Saad, N. Rajatheva, K. Chang, D. Steinbach, B. Sliwa, C. Wietfeld, K. Mei, H. Shiri, H.-J. Zepernick, T. M. C. Chu, I. Ahmad, J. Huusko, J. Suutala, S. Bhadauria, V. Bhatia, R. Mitra, S. Amuru, R. Abbas, B. Shao, M. Capobianco, G. Yu, M. Claes, T. Karvonen, M. Chen, M. Girnyk und H. Malik, „6G White Paper on Machine Learning in Wireless Communication Networks“, *6G Research Visions, University of Oulu*, Nr. 7, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.6gchannel.com/items/6g-white-paper-machine-learning/> [PDF].
- [8] C. Sturm und W. Wiesbeck, „Waveform Design and Signal Processing Aspects for Fusion of Wireless Communications and Radar Sensing“, *Proceedings of the IEEE*, Bd. 99, Nr. 7, S. 1236–1259, 2011, doi: [10.1109/JPROC.2011.2131110](https://doi.org/10.1109/JPROC.2011.2131110).
- [9] A. Zhang, M. L. Rahman, X. Huang, Y. J. Guo, S. Chen und R. W. Heath, „Perceptive Mobile Networks: Cellular Networks With Radio Vision via Joint Communication and Radar Sensing“, *IEEE Vehicular Technology Magazine*, Bd. 16, Nr. 2, S. 20–30, 2021, doi: [10.1109/MVT.2020.3037430](https://doi.org/10.1109/MVT.2020.3037430).
- [10] D. Ma, N. Shlezinger, T. Huang, Y. Liu und Y. C. Eldar, „Joint Radar-Communication Strategies for Autonomous Vehicles: Combining Two Key Automotive Technologies“, *IEEE Signal Processing Magazine*, Bd. 37, Nr. 4, S. 85–97, 2020, doi: [10.1109/MSP.2020.2983832](https://doi.org/10.1109/MSP.2020.2983832).
- [11] K. V. Mishra, M. R. Bhavani Shankar, V. Koivunen, B. Ottersten und S. A. Vorobyov, „Toward Millimeter-Wave Joint Radar Communications: A Signal Processing Perspective“, *IEEE Signal Processing Magazine*, Bd. 36, Nr. 5, S. 100–114, 2019, doi: [10.1109/MSP.2019.2913173](https://doi.org/10.1109/MSP.2019.2913173).
- [12] P. Rodriguez-Vazquez, J. Grzyb, B. Heinemann und U. R. Pfeiffer, „A QPSK 110-Gb/s Polarization-Diversity MIMO Wireless Link With a 220–255 GHz Tunable LO in a SiGe HBT Technology“, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Bd. 68, Nr. 9, S. 3834–3851, 2020, doi: [10.1109/TMTT.2020.2986196](https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2986196).
- [13] M. Alissa, B. Friederich, F. Sheikh, A. Czynlik und T. Kaiser, „Experimental Investigation of Terahertz Scattering: A Study of Non-Gaussianity and Lateral Roughness Influence“, *IEEE Access*, Bd. 8, S. 170672–170680, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.3025361](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3025361).

- [14] F. Restuccia, „IEEE 802.11bf: Toward Ubiquitous Wi-Fi Sensing“, 27. März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://arxiv.org/pdf/2103.14918>.
- [15] Y. Ma, G. Zhou und S. Wang, „WiFi Sensing with Channel State Information“, *ACM Computing Surveys*, Bd. 52, Nr. 3, 2020, doi: [10.1145/3310194](https://doi.org/10.1145/3310194).
- [16] B. Sliwa, N. Piatkowski und C. Wietfeld, „The Channel as a Traffic Sensor: Vehicle Detection and Classification Based on Radio Fingerprinting“, *IEEE Internet of Things Journal*, Bd. 7, Nr. 8, S. 7392–7406, 2020, doi: [10.1109/JIOT.2020.2983207](https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.2983207).
- [17] R. Keating, A. Ghosh, B. Vejlgaard, D. Michalopoulos und M. Säily, „The evolution of 5G New Radio positioning technologies“, Nokia Bell Labs White Paper, 2021 [\[PDF\]](#).
- [18] K. Heimann, J. Tiemann, S. Böcker und C. Wietfeld, „Cross-Bearing based Positioning as a Feature of 5G Millimeter Wave Beam Alignment“ in *IEEE 91st Vehicular Technology Conference (VTC2020-Spring)*, 2020, doi: [10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129182](https://doi.org/10.1109/VTC2020-Spring48590.2020.9129182) [\[PDF\]](#) [\[Video\]](#).
- [19] S. Häger, S. Böcker, S. Jamali, T. Reinsch und C. Wietfeld, „A Novel System Architecture for Small-Scale Motion Sensing Exploiting 5G mmWave Channels“ in *IEEE Globecom Workshops*, 2021, doi: [10.1109/GCWkshps52748.2021.9682166](https://doi.org/10.1109/GCWkshps52748.2021.9682166).
- [20] K. Heimann, J. Tiemann, D. Yolchyan und C. Wietfeld, „Experimental 5G mmWave Beam Tracking Testbed for Evaluation of Vehicular Communications“ in *IEEE 2nd 5G World-Forum*, 2019, S. 382–387, doi: [10.1109/5GWF.2019.8911692](https://doi.org/10.1109/5GWF.2019.8911692) [\[PDF\]](#) [\[Video\]](#).
- [21] N. Nonaka, K. Muraoka, T. Okuyama, S. Suyama, Y. Okumura, T. Asai und Y. Matsumura, „28 GHz-Band Experimental Trial Using the Shinkansen in Ultra High-Mobility Environment for 5G Evolution“, *IEICE Transactions on Communications*, E104.B, Nr. 9, S. 1000–1008, 2021, doi: [10.1587/transcom.2020FGP0011](https://doi.org/10.1587/transcom.2020FGP0011).
- [22] Y. Heng, J. G. Andrews, J. Mo, V. Va, A. Ali, B. L. Ng und J. C. Zhang, „Six Key Challenges for Beam Management in 5.5G and 6G Systems“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 59, Nr. 7, S. 74–79, 2021, doi: [10.1109/MCOM.001.2001184](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2001184).
- [23] B. Sliwa, R. Falkenberg und C. Wietfeld, „Machine Learning for Resource-Efficient Data Transfer in Mobile Crowdsensing“ in *Machine learning for future wireless communications*, F.-L. Luo, Hg., Hoboken, NJ, Chichester, West Sussex, Piscataway, NJ: Wiley; IEEE Press, 2020, S. 137–156, doi: [10.1002/9781119562306.ch8](https://doi.org/10.1002/9781119562306.ch8).
- [24] N. González-Prelcic, R. Méndez-Rial und R. W. Heath, „Radar aided beam alignment in MmWave V2I communications supporting antenna diversity“ in *Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, 2016, doi: [10.1109/ITA.2016.7888145](https://doi.org/10.1109/ITA.2016.7888145).
- [25] F. Maschietti, D. Gesbert, P. de Kerret und H. Wymeersch, „Robust Location-Aided Beam Alignment in Millimeter Wave Massive MIMO“ in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2017, doi: [10.1109/GLOCOM.2017.8254901](https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2017.8254901).
- [26] T. Nitsche, A. B. Flores, E. W. Knightly und J. Widmer, „Steering with eyes closed: Mm-Wave beam steering without in-band measurement“ in *IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, 2015, S. 2416–2424, doi: [10.1109/INFOCOM.2015.7218630](https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2015.7218630).
- [27] B. M. ElHalawany, S. Hashima, K. Hatano, K. Wu und E. M. Mohamed, „Leveraging Machine Learning for Millimeter Wave Beamforming in Beyond 5G Networks“, *IEEE Systems Journal*, 2021, doi: [10.1109/JSYST.2021.3089536](https://doi.org/10.1109/JSYST.2021.3089536).
- [28] C. Jia, H. Gao, N. Chen und Y. He, „Machine learning empowered beam management for intelligent reflecting surface assisted MmWave networks“, *China Communications*, Bd. 17, Nr. 10, S. 100–114, 2020, doi: [10.23919/JCC.2020.10.007](https://doi.org/10.23919/JCC.2020.10.007).
- [29] N. Farsad, M. Rao und A. Goldsmith, „Deep Learning for Joint Source-Channel Coding of Text“ in *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2018, S. 2326–2330, doi: [10.1109/ICASSP.2018.8461983](https://doi.org/10.1109/ICASSP.2018.8461983).
- [30] M. Bennis, Centre for Wireless Communications, University of Oulu, Finland, „VisionX: Semantic Communication Meets Machine Learning“, 6G Rocket Session. 2nd 5G.NRWWeek, 8. Sep. 2021 [\[Video\]](#).

- [31] J. Hoydis, F. A. Aoudia, A. Valcarce und H. Viswanathan, „Toward a 6G AI-Native Air Interface“, *IEEE Communications Magazine*, Bd. 59, Nr. 5, S. 76–81, 2021, doi: [10.1109/MCOM.001.2001187](https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2001187)
- [32] E. Björnson, „Reconfigurable intelligent surfaces: Myths and Realities“ in *2nd 6G Wireless Summit (6G Summit)*, 2020 [\[Video\]](#).
- [33] K. Heimann, B. Sliwa, M. Patchou und C. Wietfeld, „Modeling and Simulation of Reconfigurable Intelligent Surfaces for Hybrid Aerial and Ground-Based Vehicular Communications“ in *Proceedings of the 24th International ACM Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, S. 67–74, doi: [10.1145/3479239.3485700](https://doi.org/10.1145/3479239.3485700) [\[PDF\]](#).
- [34] M. Di Renzo, M. Debbah, D.-T. Phan-Huy, A. Zappone, M.-S. Alouini, C. Yuen, V. Sciancalepore, G. C. Alexandropoulos, J. Hoydis, H. Gacanin, J. de Rosny, A. Bounceur, G. Lerosey und M. Fink, „Smart radio environments empowered by reconfigurable AI meta-surfaces: an idea whose time has come“, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Bd. 129, S. 1–20, 2019, doi: [10.1186/s13638-019-1438-9](https://doi.org/10.1186/s13638-019-1438-9) . [Online]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13638-019-1438-9> [\[PDF\]](#).
- [35] H. Martin-Jung, „Google-Projekt Loon: Die Luft ist raus“, *Süddeutsche Zeitung*, 22. Jan. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/google-internet-ballons-stratosphaere-loon-1.5182927>.
- [36] S. Rohde, N. Goddemeier, C. Wietfeld, F. Steinicke, K. Hinrichs, T. Ostermann, J. Holsten und D. Moormann, „AVIGLE: A system of systems concept for an avionic digital service platform based on Micro Unmanned Aerial Vehicles“ in *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, 2010, S. 459–466, doi: [10.1109/ICSMC.2010.5641767](https://doi.org/10.1109/ICSMC.2010.5641767) .
- [37] N. Goddemeier, K. Daniel und C. Wietfeld, „Role-Based Connectivity Management with Realistic Air-to-Ground Channels for Cooperative UAVs“, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Bd. 30, Nr. 5, S. 951–963, 2012, doi: [10.1109/JSAC.2012.120610](https://doi.org/10.1109/JSAC.2012.120610) .
- [38] S. Rohde und C. Wietfeld, „Interference Aware Positioning of Aerial Relays for Cell Overload and Outage Compensation“ in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, 2012, doi: [10.1109/VTCFall.2012.6399121](https://doi.org/10.1109/VTCFall.2012.6399121) .
- [39] J. Güldenring, P. Gorczak, M. Patchou, C. Arendt, J. Tiemann und C. Wietfeld, „SKATES: Interoperable Multi-Connectivity Communication Module for Reliable Search and Rescue Robot Operation“ in *International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, 2020 [\[PDF\]](#) [\[Video\]](#).
- [40] B. Sliwa, R. Adam und C. Wietfeld, „Acting Selfish for the Good of All: Contextual Bandits for Resource-Efficient Transmission of Vehicular Sensor Data“ in *Proceedings of the ACM MobiHoc Workshop on Cooperative Data Dissemination in Future Vehicular Networks (D2VNet)*, 2020, doi: [10.1145/3397166.3413466](https://doi.org/10.1145/3397166.3413466) [\[PDF\]](#) [\[Video\]](#).
- [41] Y. Abiko, T. Saito, D. Ikeda, K. Ohta, T. Mizuno und H. Mineno, „Flexible Resource Block Allocation to Multiple Slices for Radio Access Network Slicing Using Deep Reinforcement Learning“, *IEEE Access*, Bd. 8, S. 68183–68198, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2986050](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2986050) .
- [42] M. Ylianttila, R. Kantola, A. Gurtov, L. Mucchi, I. Oppermann, Z. Yan, T. H. Nguyen, F. Liu, T. Hewa, M. Liyanage, A. Ijaz, J. Partala, R. Abbas, A. Hecker, S. Jayousi, A. Martinelli, S. Caputo, J. Bechtold, I. Morales, A. Stoica, G. Abreu, S. Shahabuddin, E. Panayirci, H. Haas, T. Kumar, B. O. Ozparlak und J. Röning, „6G White paper: Research challenges for Trust, Security and Privacy“, *6G Research Visions, University of Oulu*, Nr. 9, 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.6gchannel.com/items/6g-white-paper-trust-security-privacy/> [\[PDF\]](#).
- [43] D. Rupperecht, K. Kohls, T. Holz und C. Pöpper, „Call Me Maybe: Eavesdropping Encrypted LTE Calls With ReVoLTE“ in *29th USENIX Security Symposium (USENIX Security 20)*, 2020, S. 73–88. [Online]. Verfügbar unter: <https://revolte-attack.net/> [\[PDF\]](#).
- [44] R. Falkenberg und C. Wietfeld, „FALCON: An accurate real-time monitor for client-based mobile network data analytics“ in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019,

- doi: [10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014096](https://doi.org/10.1109/GLOBECOM38437.2019.9014096) . [Online]. Verfügbar unter: <https://github.com/falkenber9/falcon> [PDF] [Video].
- [45] H. D. Trinh, Á. Fernández Gambín, L. Giupponi, M. Rossi und P. Dini, „Mobile Traffic Classification Through Physical Control Channel Fingerprinting: A Deep Learning Approach“, *IEEE Transactions on Network and Service Management*, Bd. 18, Nr. 2, S. 1946–1961, 2021, doi: [10.1109/TNSM.2020.3028197](https://doi.org/10.1109/TNSM.2020.3028197) .
- [46] F. Meneghello, M. Rossi und N. Bui, „Smartphone Identification via Passive Traffic Fingerprinting: A Sequence-to-Sequence Learning Approach“, *IEEE Network*, Bd. 34, Nr. 2, S. 112–120, 2020, doi: [10.1109/MNET.001.1900101](https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900101) .
- [47] P. Staat, H. Elders-Boll, M. Heinrichs, R. Kronberger, C. Zenger und C. Paar, „Intelligent Reflecting Surface-Assisted Wireless Key Generation for Low-Entropy Environments“ in *IEEE 32nd Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2021, S. 745–751, doi: [10.1109/PIMRC50174.2021.9569556](https://doi.org/10.1109/PIMRC50174.2021.9569556) .
- [48] F. Kurtz, S. Böcker und C. Wietfeld, „Open RAN - neue Spielregeln für den Mobilfunk“, *Elektronik*, Nr. 21, S. 76–81, Okt. 2021 [PDF].
- [49] D. Johnson, D. Maas und J. van der Merwe, „NexRAN“ in *ACM MobiCom '21: The 27th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, New Orleans LA USA, 2022, S. 17–23, doi: [10.1145/3477086.3480842](https://doi.org/10.1145/3477086.3480842) .
- [50] F. Kurtz, R. Wiebusch, D. Overbeck und C. Wietfeld, „Predictive 5G Uplink Slicing for Blockchain-driven Smart Energy Contracts“ in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2022 [PDF].
- [51] M. Buhrgard, S. Terrill, B. Ethiarajulu und P. Regårdh, „ONAP and the telecom industry’s open-source journey“, Ericsson White Paper, 2019. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/onap-and-the-telecom-industrys-open-source-journey>.
- [52] B. Fletcher, „Ericsson CEO pegs O-RAN as key for 6G“, *Fierce Wireless*, 16. Juli 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.fiercewireless.com/tech/ericsson-ceo-pegs-o-ran-as-key-for-6g>.
- [53] S. Tavares, Nokia, „Nokia Open RAN Overview“, Sep. 2020. [Online]. Verfügbar unter: <https://opennetworking.org/wp-content/uploads/2020/09/Sandro-Tavares-Solo-Final-Slides.pdf>
- [54] M. Kölling, „„Global einen neuen Telekomstandard anbieten“ – Wie Rakuten von der Partnerschaft mit 1&1 profitiert“, *Handelsblatt*, 11. Aug. 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/open-ran-technologie-global-einen-neuen-telekomstandard-anbieten-wie-rakuten-von-der-partnerschaft-mit-1und1-profitiert/27502222.html>.
- [55] S. Krempf, „Open RAN: Telekom erwartet einsatztaugliche Systeme bis 2023“, *heise online*, 27. Apr. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/news/Open-RAN-Telekom-erwartet-einsatztaugliche-Systeme-bis-2023-7067661.html>.
- [56] D. A. J. Sokolov, „O2 hat erste deutsche Mini-Funkzellen mit Open RAN“, *heise online*, 18. Jan. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.heise.de/news/O2-hat-erste-deutsche-Mini-Funkzellen-mit-Open-RAN-6330229.html>.
- [57] P. von Schierstädt, Infineon Technologies AG, „RF and Sensor Solutions for greener 5G networks“, 5G++ Summit. Dresden, 12. Mai 2022.
- [58] C. J. Bernardos und M. A. Uusitalo, Hg., *European Vision for the 6G Network Ecosystem*, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://5g-ppp.eu/european-vision-for-the-6g-network-ecosystem/>
- [59] „Annual Report 2021“, Vodafone Group Plc, 4. Juni 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://vodafone.com/ar2021>.
- [60] Y. L. Lee, D. Qin, L.-C. Wang und G. H. Sim, „6G Massive Radio Access Networks: Key Applications, Requirements and Challenges“, *IEEE Open Journal of Vehicular Technology*, Bd. 2, S. 54–66, 2021, doi: [10.1109/OJVT.2020.3044569](https://doi.org/10.1109/OJVT.2020.3044569) .

- [61] G. Wikström, P. Persson, S. Parkvall, G. Mildh, E. Dahlman, B. Balakrishnan, P. Öhlén, E. Trojer, G. Rune, J. Arkko, Z. Turányi, D. Roeland, B. Sahlin, W. John, J. Halén und H. Björkegren, „6G – Connecting a cyber-physical world: A research outlook toward 2030“, Ericsson White Paper, 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/a-research-outlook-towards-6g>
- [62] J. von Perner und V. Friderikos, Hg., *Green Future Networks: Network Energy Efficiency*. White Paper, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ngmn.org/publications/green-future-networks-network-energy-efficiency.html>
- [63] „Sustainable Business Report 2019“, Vodafone Group Plc, 5. Aug. 2019.
- [64] H. Viswanathan und P. E. Mogensen, „Communications in the 6G Era“, *IEEE Access*, Bd. 8, S. 57063–57074, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2981745](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981745) .
- [65] N. H. Mahmood, H. Alves, O. A. López, M. Shehab, D. P. M. Osorio und M. Latva-Aho, „Six Key Features of Machine Type Communication in 6G“ in *2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, doi: [10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083794](https://doi.org/10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083794) .