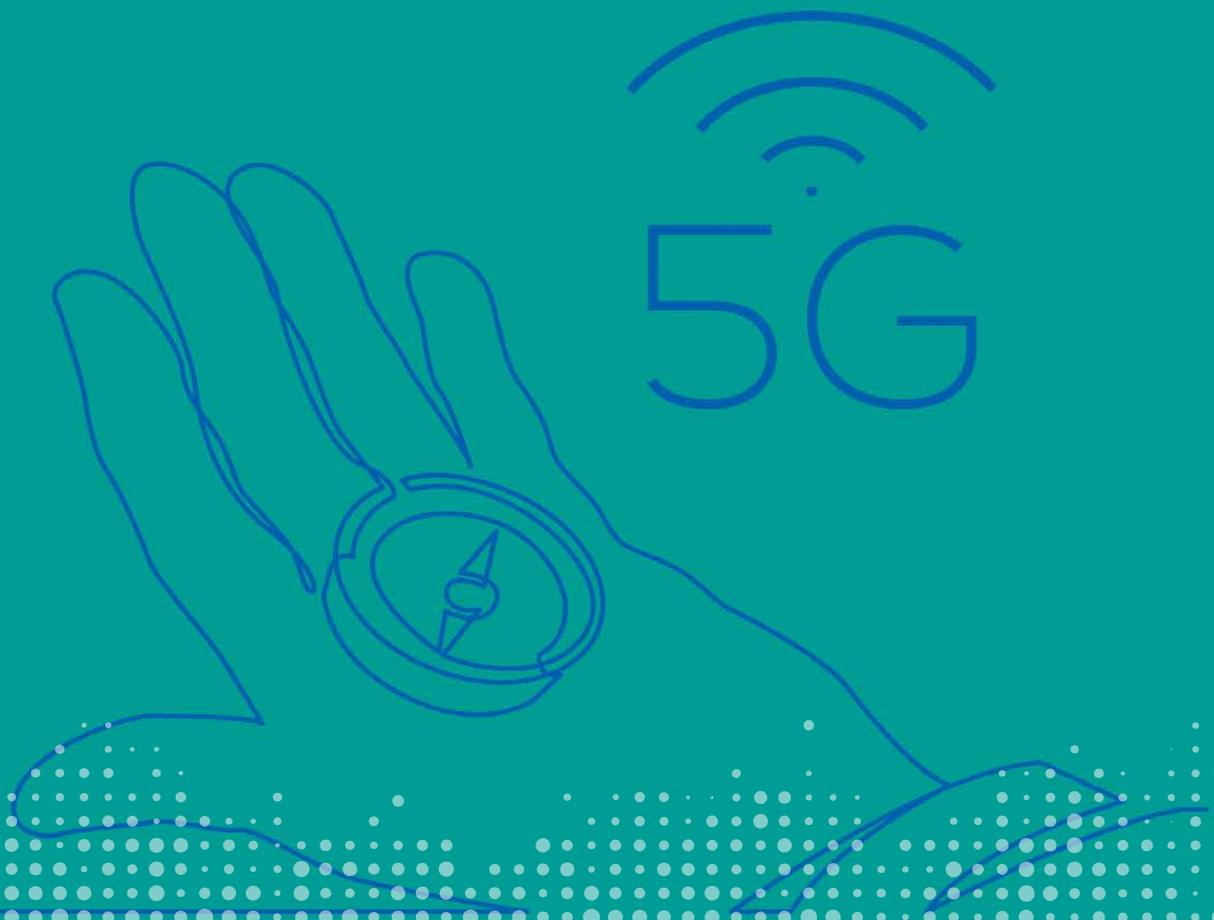




Leitfaden 5G-Campusnetze – Orientierungshilfe für kleine und mittelständische Unternehmen

*Konzepte, Begriffe, Betreibermodelle und Auswahlkriterien
für Produktion und Logistik mit Übertragbarkeit auf weitere
Domänen wie Medizin-Campus/Krankenhäuser, Häfen,
Bergbau, Baustellen und Landwirtschaft*



Impressum

Herausgeber

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)
Öffentlichkeitsarbeit
11019 Berlin
www.bmwi.de

Stand

April 2020

Gestaltung

PRpetuum GmbH, 80801 München

Bildnachweis

Burunduk's / Shutterstock / S. 13
Cirebon Jeh / Shutterstock / S. 36
cnythzl / Getty Images / Titel, S. 4, S. 13
Derplan13 / Shutterstock / S. 20
one line man / Shutterstock / Titel, S. 4, S. 7, S. 20, S. 36
Tiverets / Shutterstock / S. 7

Diese und weitere Broschüren erhalten Sie bei:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Referat Öffentlichkeitsarbeit
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
www.bmwi.de

Zentraler Bestellservice:

Telefon: 030 182722721
Bestellfax: 030 18102722721

Diese Publikation wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit herausgegeben. Die Publikation wird kostenlos abgegeben und ist nicht zum Verkauf bestimmt. Sie darf weder von Parteien noch von Wahlwerbern oder Wahlhelfern während eines Wahlkampfes zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Bundestags-, Landtags- und Kommunalwahlen sowie für Wahlen zum Europäischen Parlament.

Mit dem Technologieprogramm PAiCE (Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering) unterstützt das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb der Digitalen Agenda der Bundesregierung die Umsetzung der Leitvision „Industrie 4.0“ in die unternehmerische Praxis. In 16 Projekten arbeiten Unternehmen und Forschungseinrichtungen daran, den Einsatz innovativer digitaler Technologien in Produktion und Logistik in großen, praxisnahen Pilotprojekten zu erproben. Die über hundert Partner in den Projekten werden vom BMWi mit insgesamt 50 Mio. Euro gefördert. Zusammen mit den Eigenanteilen der Projektpartner hat PAiCE ein Volumen von über 100 Mio. Euro.

Dieser Leitfaden baut auf den Ergebnissen des PAiCE-Leuchtturmprojektes IC4F (Industrial Communication

for Factories) auf, das sich mit der Entwicklung einer Referenzarchitektur für industrielle Kommunikation einschließlich 5G mit dem Fokus auf IT-Sicherheit, Zuverlässigkeit, Echtzeitfähigkeit und Resilienz von industriellen Kommunikationsinfrastrukturen befasst. Der Leitfaden zeigt Anwendungsgebiete und beschreibt Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten von 5G-Campusnetzen. Er bietet damit eine Orientierungshilfe für Entscheider und Realisierer von Kommunikationsinfrastrukturen in kleinen und mittelständischen Unternehmen im produzierenden Gewerbe und auch in der Logistik. Die dargestellte Herangehensweise für den Aufbau und Betrieb von 5G-Campusnetzen ist auf weitere Geschäftsfelder wie Medizin-Campus/Krankenhäuser, Häfen, Bergbau, Baustellen, mobile Campusnetze und Landwirtschaft übertragbar.



Inhalt

1	Zusammenfassung	4
2	Einführung und Übersicht	7
2.1	5G-Campusnetze – ein technologischer Überblick	9
2.2	Lokales Spektrum	11
2.3	Aktuelle Marktentwicklungen	12
3	Neue Anwendungsszenarien durch 5G	13
3.1	Anwendungen in der Produktion	14
3.2	Anwendungen in der Intralogistik	14
3.3	Anwendungen in der Logistik	15
3.3.1	Transport an Häfen	15
3.3.2	Bahn und LKW	16
3.4	Anwendungen in der Smart City	16
3.5	Anwendungen bei der elektrischen Energieversorgung	16
3.6	Anwendungen im Bergbau	17
3.7	Anwendungen in der Medizin	17
3.8	Mobile Campusnetze	17
3.8.1	Anwendungen in der Landwirtschaft	18
3.8.2	Baustelle	18
3.8.3	Mobile Fabrik	18
3.9	Übersicht der Anforderungen	19
4	5G-Campusnetze – Topologien und Betreibermodelle	20
4.1	Architektur von 5G-Campusnetzen	21
4.2	Betreibermodelle	22
4.2.1	Separates 5G-Campusnetz (Eigenbetrieb)	22
4.2.2	Virtueller „Slice“ im öffentlichen Netz der Mobilfunkanbieter	24
4.2.3	„Network Slice“ im öffentlichen Netz der Mobilfunkanbieter mit separater User Plane	25
4.2.4	Weitere „hybride“ Mischformen und Variationen	26
4.2.5	Abwägung und Gegenüberstellung	28

4.3	Aufbau und Betrieb von 5G-Campusnetzen	30
4.3.1	Anwendungsidentifizierung	32
4.3.2	Machbarkeitsprüfung	32
4.3.3	Rechtliche Voraussetzungen (Lizenzwerb)	32
4.3.4	Vertragliche Voraussetzungen	33
4.3.5	Netzplanung	33
4.3.6	Netz-Installation und Inbetriebnahme	34
4.3.7	Integration in die Firmen-IT-Infrastruktur	34
4.3.8	Betrieb	34
4.3.9	Support	35
4.4	Zusammenfassung	35
5	Ausblick und weitere Entwicklung	36
5.1	Internationale 3GPP-Standardisierung und Regulierung	37
5.2	Ausblick auf 3GPP-Releases	38
5.3	Künftige 5G-Aspekte	40
5.4	Fazit	42
6	Anhang	43
6.1	Abkürzungen und wichtige 5G-Fachbegriffe	43
6.2	Referenzen und weiterführende Literatur	45
6.3	Links zu Projekten, Organisationen, Initiativen	47
6.4	Autoren und Ansprechpartner	48



1 Zusammenfassung



Unter dem Begriff „5G-Campusnetz“ wird ein geografisch begrenztes, lokales, für besondere Anforderungen wie industrielle Kommunikation angepasstes Mobilfunknetz verstanden. Dank der 5G-Technologie und der Verwendung dedizierter Frequenzen kann es die höchsten Anforderungen an die Dienstqualität hinsichtlich Latenz, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Kommunikationsnetze erfüllen. Dies macht 5G-Campusnetze für Anwendungen in verschiedenen Industriebereichen attraktiv. Deshalb gelten sie als wichtiger Wegbereiter für die Fabrik der Zukunft und sind derzeit Gegenstand zahlreicher Medienberichte.

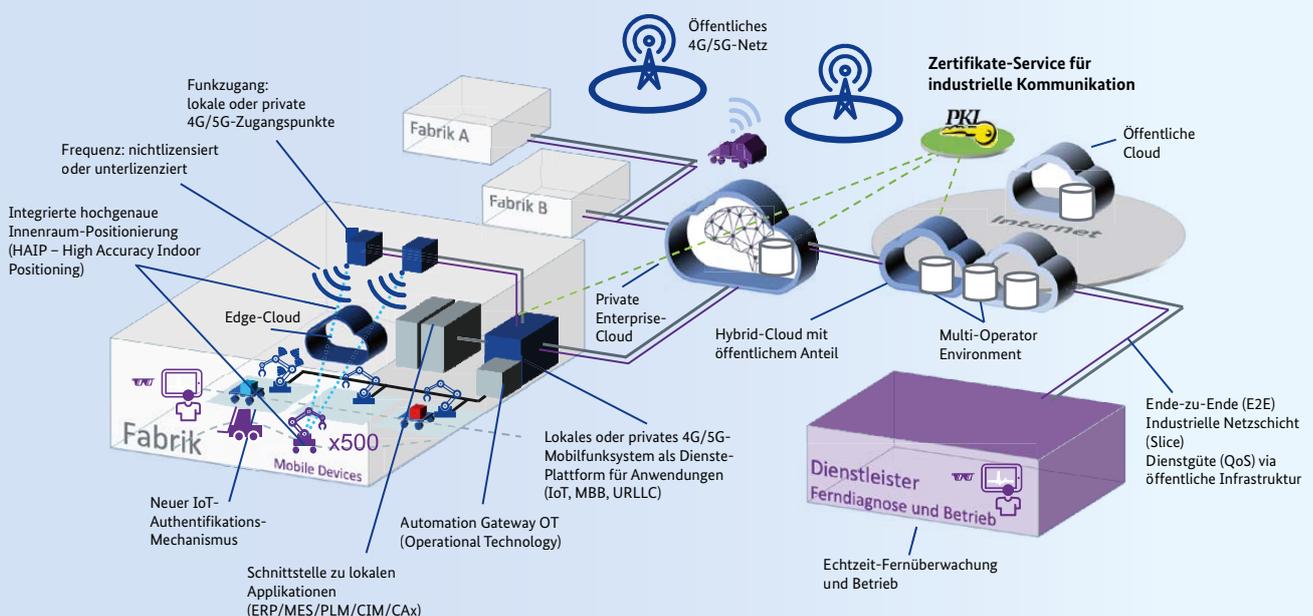
Die Fabrik der Zukunft, die sogenannte „Smart Factory“, ist auf eine technologisch deutlich anspruchsvollere Kommunikationsinfrastruktur angewiesen. Die Abbildung 1 zeigt Lösungsbausteine, um Maschinen, Prozesse, Roboter, Produkte, Werkzeuge und Menschen zuverlässig miteinander zu vernetzen. Im Gegensatz zu kabelgebundenen Vernetzungen ermöglichen mobile Funklösungen eine flexiblere und

dynamischere Produktion. Somit bereitet die Mobilfunkkommunikation neue Wege, durch die gewonnene Flexibilität eine höhere Produktivität zu erreichen.

Die Industrie führt derzeit eine rege Diskussion über die technischen Rahmenbedingungen von möglichen Betreibermodellen und den damit verbundenen Mehrwert von 5G-Campusnetzen in der industriellen Wertschöpfung. Zwar werden die zugrunde liegenden Technologien in der Branche zunehmend besser verstanden, doch ihre Vielfalt und Bandbreite verursachen viele Fragen zu den geeigneten Anwendungsmöglichkeiten und Erfolgsfaktoren, und somit zu den relevanten Auswahlkriterien.

Dabei steht 5G nicht nur für eine innovative Funktechnologie, die ein erweitertes Frequenzspektrum bereitstellt. Gerade in Kombination mit neuen Technologien wie dem Internet der Dinge (IoT), der bedarfsgerechten und automatisierten Verteilung von IT-Ressourcen (Mobile Edge Cloud) und mit Künst-

Abbildung 1: Beispiel für Lösungsbausteine eines 5G-Campusnetzes, das im Projekt IC4F betrachtet wird



Quelle: IC4F-Konsortium

licher Intelligenz (KI) stellen 5G-Campusnetze neue Technologien und Dienste bereit, die in den heutigen WiFi- und verkabelten Netzen noch nicht realisierbar sind. 5G bietet herausragende Eigenschaften für 5G-Campusnetze im industriellen Einsatz und wird mit der zunehmenden Digitalisierung ein wichtiger Baustein für die erfolgreiche Umsetzung von Industrie 4.0.

5G-Campusnetze bieten erhöhte Zuverlässigkeit, vorhersehbare Leistungsfähigkeit und integrierte Sicherheit für Anwendungen im industriellen Umfeld. Entscheidendes Merkmal ist eine durchgängige Funkabdeckung, und zwar ohne Unterbrechungen beim Funkzellenwechsel auch über große Standorte hinweg, sowohl im Innen- als auch im Außenbereich. 5G-Campusnetze bieten Funktionalitäten zur Unterstützung kritischer Anwendungen in der Industrieproduktion, d. h. für Anwendungen mit hohen Anforderungen an Zuverlässigkeit und garantierte, kurze Reaktionszeiten (geringe Latenz). Dank drahtloser Anbindung können die Netze jederzeit flexibel an veränderte Produktionsbedingungen oder Herstellungs- bzw. Logistikprozesse angepasst werden.

Für eine spätere erfolgreiche Umsetzung von entsprechenden Systemen ist eine umfassende und detaillierte Anforderungsanalyse auf Basis der geplanten Anwendungsfälle notwendig. Beispiele sind die sichere Verbindung und Kontrolle von Maschinen in einer Produktionslinie, jederzeit auffindbare Werkzeuge, die Steuerung mobiler Transportfahrzeuge oder eine umfassende Sensorik in der Warenlogistik. Eine formale Anforderungsanalyse hilft entscheidend bei der Identifikation der am besten geeigneten Lösung für das Unternehmen [1].

Dieser Leitfaden bietet Orientierungshilfen für mittelständische Unternehmen, die nach Kommunikationslösungen mit 5G für ihre digitalen Transformationsprozesse suchen. Der Leitfaden enthält die grundlegenden Konzepte, Begriffe und Anwendungsfälle sowie eine Gegenüberstellung alternativer Betreibermodelle, um den interessierten Entscheidungsträgern in Unternehmen eine fundierte Einschätzung der Potenziale dieser Technologie zu ermöglichen. Künftig werden neben den klassischen Funklösungen

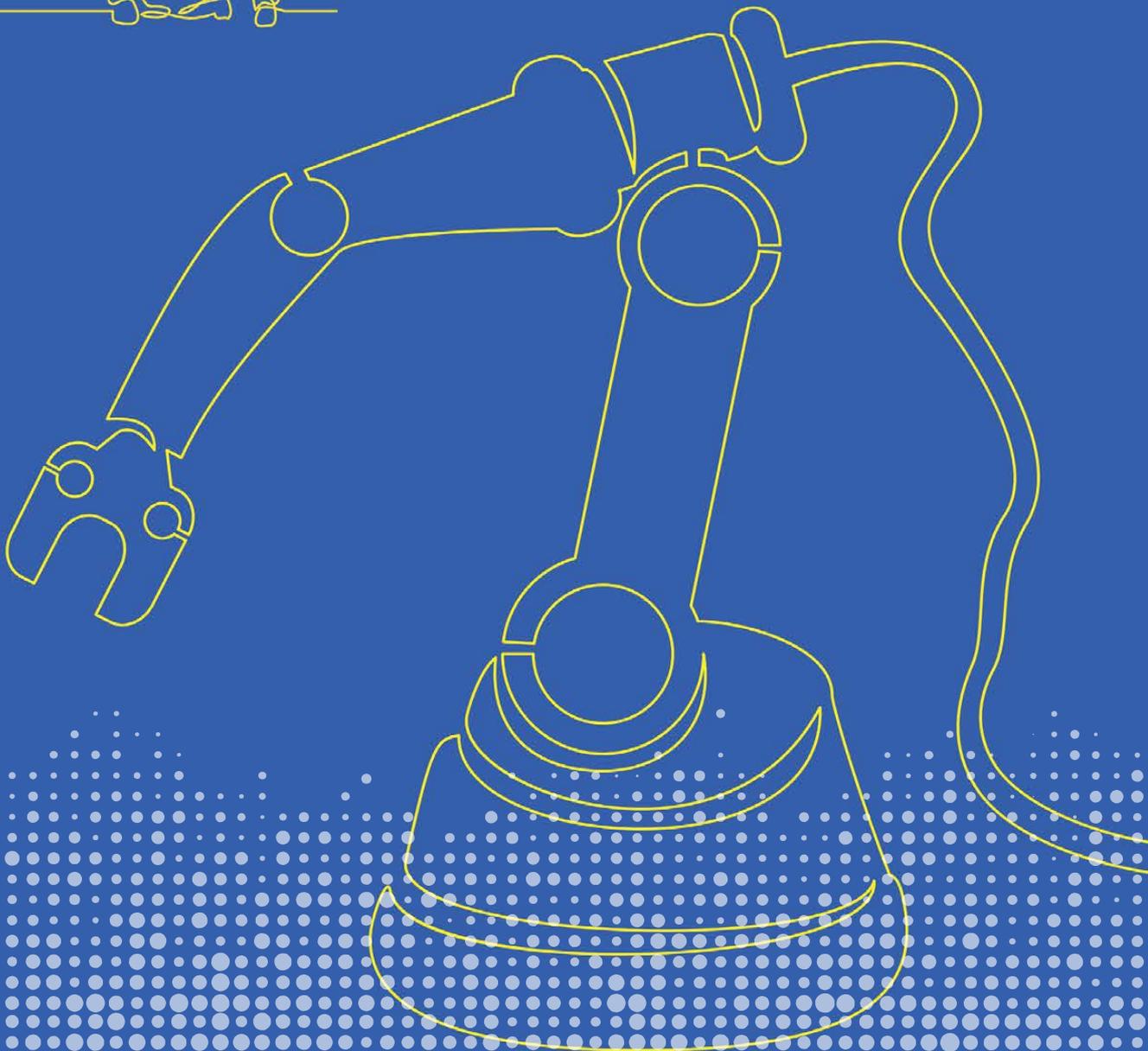
immer mehr Produkte 5G-fähig sein und es werden entsprechende Module zur Nachrüstung von Maschinen auf dem Markt erwartet. Die folgenden Kapitel geben Fakten und Einblicke bei der Anforderungsanalyse sowie bei der notwendigen Netzplanung oder Ausgestaltung einer privaten Netzlösung bzw. einem Campusnetz. Weiterhin werden der Erwerb einer Funklizenz angesprochen und die verschiedenen Möglichkeiten eines Netzbetriebs beurteilt. Für die verschiedenen Phasen der Planung, Umsetzung und den Betrieb von 5G-Campusnetzen bieten sich Herstellerfirmen von 5G-Netzen und Service-Provider mit entsprechendem Portfolio an.

Das Kapitel 2 erlaubt einen schnellen Überblick über grundlegende Technologien und das Frequenzspektrum von 5G-Campusnetzen. Das Kapitel wird um Referenzen zum Marktgeschehen ergänzt. In Kapitel 3 werden Anwendungsfälle für verschiedene Industriesektoren betrachtet, die einen großen Anwendungsbereich für 5G-Campusnetze repräsentieren. Das Kapitel 4 erläutert verschiedene Lösungsvarianten und zeigt kurz die grundsätzliche Netzarchitektur. Die betriebstechnischen Ausprägungen der unterschiedlichen 5G-Campusnetze, mögliche Betreibermodelle und Kriterien für den Aufbau und Betrieb von 5G-Campusnetzen werden im Folgenden verglichen. Schließlich beschreibt Kapitel 5 die Aktivitäten in der Standardisierung von 5G und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungen.

In diesen Leitfaden sind Arbeiten des Leuchtturmprojektes „IC4F – Industrial Communication for Factories“ eingeflossen, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie im Rahmen der Initiativen zu Industrie 4.0 maßgeblich gefördert wird.

Im Projekt IC4F werden industrielle Anwendungsfälle mit 5G-Campusnetzlösungen in einem Konsortium mit zahlreichen Partnern aus der Industrie und Wissenschaft aufgebaut, erprobt und validiert. Die Konsortialpartner fassen ihre Erfahrungen und Erkenntnisse in dieser Schrift als Orientierungshilfe für kleine und mittelständische Firmen sowie alle fachlich Interessierten zusammen.

2 Einführung und Übersicht



Die digitale Transformation bringt eine Reihe neuer Anforderungen mit sich, bei denen das Kommunikationsnetz eine wichtige Rolle spielt. Maschinen, Werkzeuge, Produkte und die in der Wertschöpfung beteiligten Menschen werden vernetzt. Durch den fundamentalen Wandel stehen aktuelles Wissen und Erkenntnisse über Prozesse, Produktion und Produkte im gesamten Betrieb zur Verfügung und Rechenleistung wird zuverlässig an die Orte gebracht, wo sie benötigt wird.

Die rasant steigende Anzahl von intelligenten Geräten und Systemen sowie die Weiterentwicklung von Geschäftsanwendungen benötigen erheblich mehr Bandbreite, um umfassendere Informationen zu Systemstatus und Betriebsumgebung bereitzustellen. Wichtige technologische Anforderungen werden im Folgenden kurz erläutert. Die Abbildung 2 zeigt die

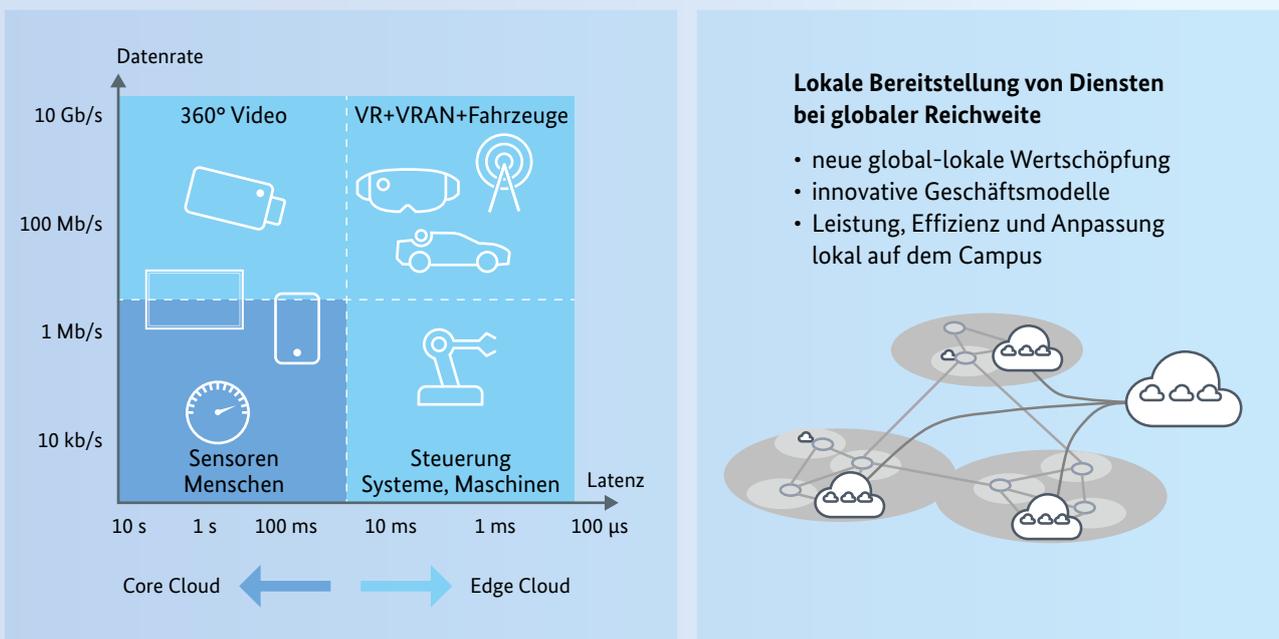
Einordnung von wesentlichen Neuerungen in der Kommunikationstechnik.

Geschäftskritische Anwendungen mit Fernzugriff, die Steuerung von Produktionssystemen, z. B. in der Industrieautomation und im Smart Grid, sowie die Kontrolle von autonomen Fahrzeugen benötigen wesentlich höhere Zuverlässigkeit von Kommunikationsdiensten und um Größenordnungen niedrigere Latenzzeiten.

Um diese Anforderungen zu erfüllen und industrielle Produktivitätsgewinne zu erzielen, müssen Kommunikationsnetze grundlegende Eigenschaften weiterentwickeln:

- **Netzzugang:** Verschiedene Zugangstechnologien (drahtlos, drahtgebunden und optisch) arbeiten zusammen.

Abbildung 2: Die digitale Transformation definiert Anforderungen an die Weiterentwicklung der 5G-Netze



Quelle: Nokia

- **Elastizität:** Netze werden dynamisch und programmierbar sein. Ob neue Standorte hinzukommen, Produktionsanlagen sich verändern, Produktionsprozesse sich dynamisch (re-)organisieren oder die Anforderungen an die Netz-Güte schwanken, das Kommunikationsnetz soll sich automatisiert anpassen und Rechenleistung wird dynamisch in lokalen Edge- und Hybrid-Clouds bereitgestellt.
- **Leistungsfähigkeit:** Das Netz soll steuerbare Verbindungen mit vorab festgelegter Netz-Güte für alle unterstützten Anwendungen bereitstellen, unabhängig von variierenden Anforderungen je Anwendung.
- **Ausfallsicherheit:** Bei geschäftskritischen Anwendungen muss das Netz die Verfügbarkeit sicherstellen. Zuverlässiger Betrieb von 99,99 % bis 99,9999 % Verfügbarkeit ist Voraussetzung für Produktivität und betriebliche Sicherheit.
- **Sicherheit (Security):** Netze sind Teil der Unternehmenssicherheitslösung. Die Datensicherheit ist dabei eine elementare Anforderung. Eine intelligente Netzstruktur trägt zur Minimierung bestimmter Sicherheitsbedrohungen bei.
- **Skalierbarkeit:** Netze sollten in einer Weise entworfen werden, die die Erweiterung der Bandbreite, der Verarbeitung und anderer Fähigkeiten vorwegnimmt und sich an diese anpasst. Umfangreichere Datenerhebung bietet einen tieferen Kontext und einen höheren Wert, und in jedem Investitionszyklus werden zweifellos viele überzeugende neue Anwendungen hinzukommen.

2.1 5G-Campusnetze – ein technologischer Überblick

Technologisch gesehen stellt 5G eine schrittweise Weiterentwicklung des vorhandenen 4G-Mobilfunks dar, bei der die Anwendbarkeit auf vertikale Märkte bereits in die Architektur einfließt. In der

5G-Netzarchitektur werden unterschiedliche Realisierungsstufen betrachtet. Bei der sogenannten 5G Non-Stand-Alone (NSA)-Architektur wird das LTE-Kernnetz weiterhin als Basis genutzt. Endgeräte kommunizieren aber bereits über 5G-Funktechnik. Die Netzsteuerung erfolgt jedoch weiterhin über die bestehende LTE-Technik. Dies bedingt dann aber auch eine duale Funk-Hardware in den Netzelementen und Endgeräten. Die als 5G Stand-Alone (SA)-Architektur bezeichnete Realisierungsstufe definiert eine komplett eigenständige 5G-Mobilfunkinfrastruktur.

5G bringt Neuerungen in den Bereichen:

- **Neue Funkschnittstellen (5G New Radio):** Die Steigerung der Performanz-Werte durch 5G wird vor allem durch neue Verfahren im Bereich der Luftschnittstelle (5G New Radio) realisiert. Die effektive Nutzung von unterschiedlichen, z. T. neuen und nicht zusammenhängenden Frequenzen ist eine wesentliche Herausforderung für 5G New Radio. Erweiterte Codierungs- und Multiplexing-Verfahren tragen zur Steigerung der Performanz in Bezug auf Durchsatz, Latenzzeit und Energieeffizienz bei. Ein weiteres Merkmal von 5G New Radio ist das sog. „Massive MIMO“. MIMO (Multiple Input Multiple Output) ist eine Antennentechnologie, die mit der Nutzung von Hunderten von Antennen in einer einzigen Basisstation Datentransferraten von bis zu 10 Gbit/s erreicht. Je mehr Antennen an der Basisstation verwendet werden, desto mehr Datenströme können verarbeitet und desto mehr Endgeräte können gleichzeitig bedient werden. Gleichzeitig kann damit die Sendeleistung reduziert und die Datenrate gesteigert werden. Die zusätzlichen Antennen und die dazugehörige parallelisierte digitale Signalverarbeitung ermöglichen es, die Energie beim Senden und Empfangen von Signalen räumlich auf immer kleinere Gebiete zu fokussieren, sogenanntes Beamforming. Es hat die Aufgabe, mit Hilfe mehrerer Antennen ein gerichtetes Signal zu erzeugen und so einen spezifischen Empfänger zu erreichen. Dieser Empfänger profitiert von einem Signalverstärkungseffekt und einer verbesserten

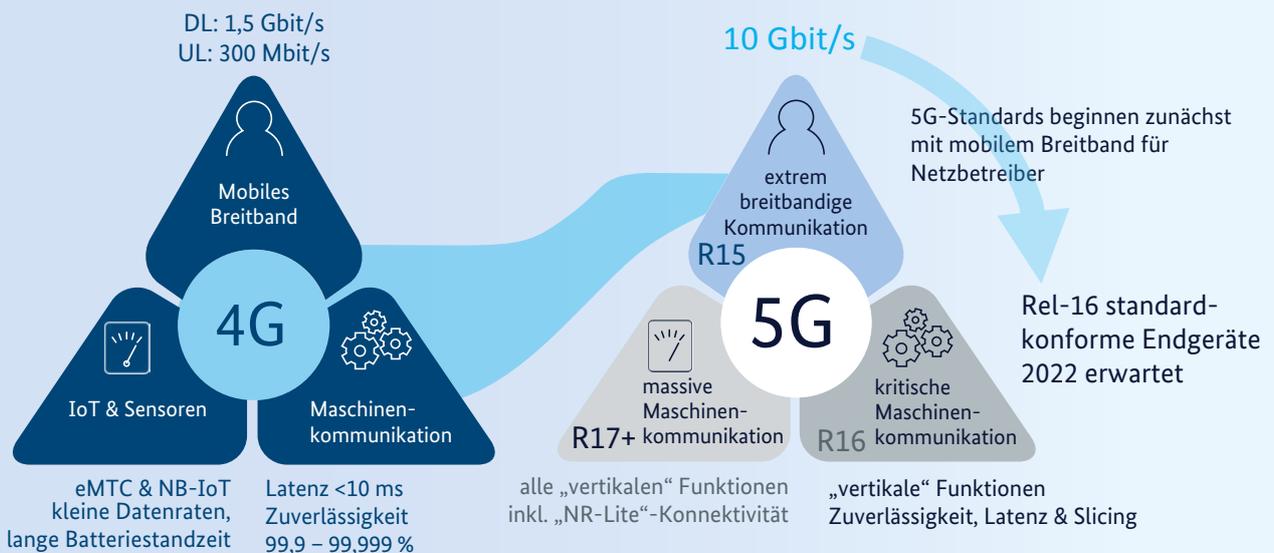
Interferenzunterdrückung. Mit Hilfe dieser Techniken ermöglicht 5G New Radio gegenüber bisherigen Funktechniken höhere Bandbreite, geringere Latenz und eine deutlich gesteigerte Anzahl von Endgeräten pro Fläche.

- Erweiterungen des Kernnetzes (5GC):**
 Es wird eine Dienste-basierte Architektur zur agilen Netz-Konfiguration entsprechend den Anforderungen von Anwendungsfällen eingeführt. Bereits in den 5G-Releases 16 und 17 werden eine Reihe Themen umgesetzt, die für 5G-Campusnetze wichtig sind. Beispiele sind LAN-Dienste, Unterstützung von TSN (Time Sensitive Networking), Zeitsynchronisation, Überwachung der Dienstgüte von der Anwenderseite, partielle Konfiguration des 5G-Netzes durch den Anwen-

der (Slicing) und Unterstützung von Nicht-3GPP-Authentisierung für Campusnetze.

- Virtualisierung der Netze (SDN/NFV):**
 Ein neuer Ansatz ist die Überführung von bisher in Hardware realisierten Funktionen in reine Software. Wie auch in der übrigen IT schon Praxis, ermöglicht dies eine Virtualisierung der Netze, die damit deutlich flexibler und dynamischer werden können. Software-defined Networking (SDN) und Network Function Virtualization (NFV) sind die Schlüsselmerkmale von 5G. Diese Konzepte erlauben es, spezifische Dienste unabhängig voneinander zu entwickeln, zu testen, zu betreiben, und zu Gesamtlösungen zusammensetzen. SDN trennt die Kontroll- und Datenebene von Netzen und ermöglicht damit erst eine Virtualisierung. Netze

Abbildung 3: Die 5G-Funktechnik baut auf existierender 4G/LTE-Technik auf und verändert die Möglichkeiten des industriellen Produktionsbetriebs



Quelle: Nokia

werden hierdurch mandantenfähig und unterstützen eine zentralisierte Sicht und Konfiguration von Netzkomponenten. SDN ist die Basis für Priorisierung, Dienstgüte und Slicing. NFV entkoppelt die Netzfunktionen von der Hardware, womit sie austauschbar, ortsunabhängig und flexibel platzierbar werden. Neben der Implementierung von Netzfunktionen bietet NFV aber auch die Möglichkeit, neue Funktionen aus der Anwendungsebene auf Netz-Hardware auszuführen, beispielsweise Funktionen zur Datenaggregation. 5G-Netze sind nicht nur Kommunikationsplattform, sondern können sich zur dynamischen Anwendungsplattform weiterentwickeln. Das gesamte 5G-Netz besitzt damit eine programmierbare, flexible und universelle Infrastruktur, ausgehend von den Endgeräten über die Transportnetze, den Edge-Clouds, das Kernnetz bis hin zu den „klassischen“ Cloud-Rechenzentren.

Die Leistungsparameter von 5G-Netzen übertreffen diejenigen von 4G/LTE in drei Dimensionen (Abbildung 3):

- eMBB – enhanced Mobile Broadband: Datenvolumina erreichen 10 Tbit/s/km² und Spitzen-Datenraten von 10 Gbit/s
- mMTC – massive Machine-Type Communications: hohe IoT-Endgeräte-Dichte von einer Million/km² und optimierter Energieverbrauch im Bereich von 10% bezogen auf LTE-Systeme
- URLLC – Ultra-Reliable Low-Latency Communications: Einweg-Latenzzeit unterhalb von 1 ms, Verfügbarkeit von 99,999%

2.2 Lokales Spektrum

Industriekunden sind zunehmend daran interessiert, ihre betrieblichen Abläufe flexibel zu steuern und zu verwalten. Drahtlose Kommunikation und Konnektivität spielen hier eine Schlüsselrolle und so ist der Zugang zu Frequenzen von großer Bedeutung.

Im Sommer 2019 wurde von der Bundesnetzagentur (BNetzA) ein Frequenzvergabeprozess für 5G in zwei Teilen angestoßen. Zunächst wurde in einer Auktion 5G-Frequenzspektrum zur nationalen Nutzung an die Mobilfunkbetreiber Deutsche Telekom, Telefónica und Vodafone sowie 1&1 Drillisch versteigert.

Anschließend wurde ein Zuteilungsverfahren für lokale 5G-Frequenzen gestartet. Die Bundesnetzagentur hat zusätzlich 100 MHz Frequenzbandbreite im Bereich 3,7 bis 3,8 GHz exklusiv für lokale und Campusnetze reserviert. Das Vergabeverfahren erlaubt, auf Antrag und unter bestimmten Voraussetzungen, die Zuteilung von Frequenzblöcken exklusiv auf ein oder mehrere Grundstücke [2]. Je nach gewünschter Netzlösung und Netzausprägung bieten sich verschiedene Optionen der Zusammenarbeit zwischen der Industrie und Dienstleistern.

Für viele Industrieunternehmen ergibt sich damit erstmals die Möglichkeit, ihr eigenes, individuelles und auf ihre Anwendungen und Belange maßgeschneidertes Netz zu realisieren.

Die Lizenzgebühr wird nach der Formel $1000 \text{ €} + B \cdot t \cdot 5 \cdot (6 \cdot a_1 + a_2)$ berechnet. B ist die Bandbreite in MHz zwischen 10 und 100 MHz in Zehnerschritten. t ist die Laufzeit der Zuteilung in Jahren. a ist die Fläche in km², wobei zwischen Siedlungs- und Verkehrsflächen (a₁) und anderen Flächen (a₂) unterschieden wird [2]. Eine 10-jährige Frequenzzuteilung für 30 MHz auf einer Fläche von 25 ha (500 x 500 m²) würde damit 3250 € kosten (Siedlungsgebiet), was einer jährlichen Lizenzgebühr von 325 €/Jahr entspricht.

Nähere Informationen sind auf der Internet-Präsenz der Bundesnetzagentur [3] verfügbar, u. a. detaillierte Verwaltungsvorschriften [2], Antragsformular und Gebührenmodell.

2.3 Aktuelle Marktentwicklungen

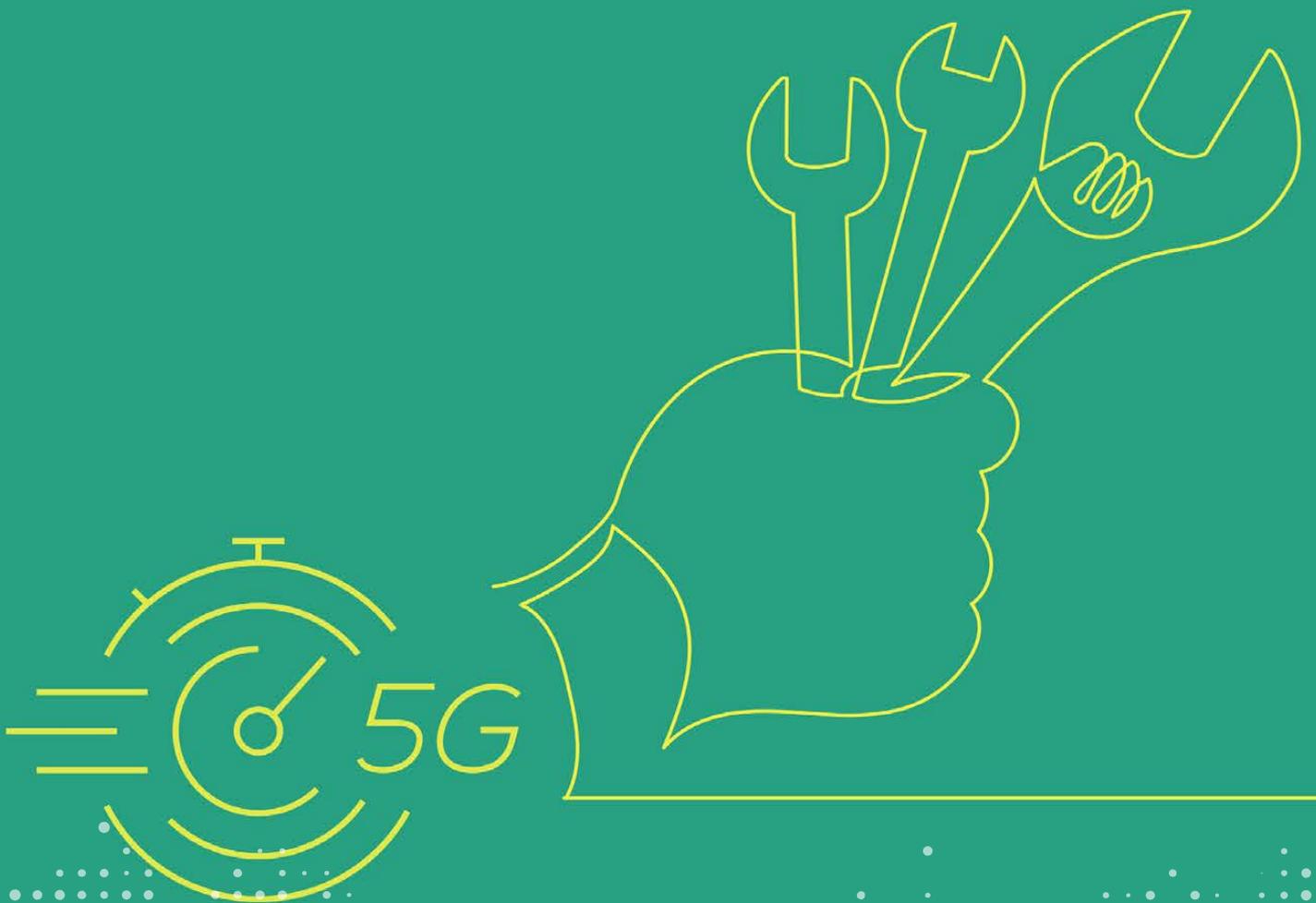
Für 5G-Campusnetze besteht aktuell ein hohes Interesse bei allen involvierten Marktteilnehmern und deren Verbänden. Abschätzungen zeigen ein Potenzial für 5.000 bis 10.000 5G-Campusnetze in Deutschland im Zeitraum bis 2025, wobei eine Mehrzahl der Netze bei KMU zum Einsatz kommen wird [4]. Nach einer Umfrage des VDMA [5] haben sich ca. 35 % der befragten Unternehmen bereits für den Aufbau von 5G-Campusnetzen entschlossen, wobei ca. 50 % einen eigenen Aufbau anstreben und ca. 20 % einen Eigenbetrieb.

Der Markt für 5G-Campusnetze befindet sich in der Startphase, nachdem nun Spektrum erworben werden kann und sich die Verfügbarkeit von kommerziellen Komponenten abzeichnet. Exemplarisch sollen hier einige Artikel und Studien genannt werden, die das Marktgeschehen aus verschiedenen Perspektiven beleuchten:

- 5G-ACIA beschreibt in einem White Paper verschiedene Einführungsszenarien von 5G-Campusnetzen für IIoT-Anwendungen, die durch 3GPP festgelegt wurden. Dieses White Paper wurde im Juli 2019 veröffentlicht [6].
- Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA) bereitet als Europas größter Industrieverband für das 2. Quartal 2020 eine Veröffentlichung zum Thema „5G im Maschinen- und Anlagenbau“ vor [7]. Einige Projektpartner von IC4F sind daran beteiligt.
- Einer Einschätzung von Arthur D. Little zufolge eröffnet die Nachfrage aus der Industrie zusammen mit den regulatorischen Veränderungen die Möglichkeit zur Umsatzsteigerung von etablierten Netzausrüstern und -betreibern sowie Eintrittschancen für neue Anbieter spezifischer Komponenten und Lösungen für 5G-Campusnetze [8].
- Netzbetreiber wie die Telekom bereiten Lösungen für 5G-Campusnetze vor, die hohe Verfügbarkeit garantieren, hohe Bandbreiten für industrielle IoT-Prozesse zur Verfügung stellen, schnelle Reaktionszeiten ermöglichen und Anforderungen an mobile Anwendungen abdecken [9].
- Die Bundesnetzagentur hat die Berechnung der Gebühren für 5G-Campusnetze bekannt gegeben, die beispielsweise vom Bundesverband Breitbandkommunikation als „moderat“ begrüßt wurden [10].
- T-Systems beschreibt IIoT-Einsatzszenarien für 5G-Campusnetze, um Industrie 4.0-Anwendungsfälle zu ermöglichen [11]. Im Dokument „5G Campus-Netze – LTE- und 5G-Technologie für lokale Firmennetze“ wird das Slicing für Anwendungen in Campusnetzen beschrieben [12].

Beim Einsatz von Funktechnologien, insbesondere in den für 5G vorgesehenen höheren Frequenzbereichen, gibt es teilweise Befürchtungen zu möglichen Auswirkungen auf Mensch und Umwelt. Aus Sicht des Bundesamts für Strahlenschutz können viele Erkenntnisse aus Studien, in denen mögliche Gesundheitswirkungen elektromagnetischer Felder des Mobilfunks untersucht wurden, zu einem großen Teil auf 5G übertragen werden. Dies betrifft vor allem Frequenzbänder bis zu 3,6 GHz. Auch für später geplante Frequenzbänder bei 26 GHz, 40 GHz oder bis zu 86 GHz ist davon auszugehen, dass hier unterhalb der bestehenden Grenzwerte keine gesundheitlichen Auswirkungen zu erwarten sind [13]. Auch nach Bitkom gehen von 5G-Funksystemen bei Einhaltung der geltenden Grenzwerte keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen durch elektromagnetische Felder mit den vom Mobilfunk verwendeten Frequenzen aus [14].

3 Neue Anwendungsszenarien durch 5G



3.1 Anwendungen in der Produktion

Im Zuge von Industrie 4.0 und sich ändernden Märkten und Kundenerwartungen ändern sich auch die Anforderungen an das bisherige Produktionsumfeld. Hersteller suchen mit ihren Lieferketten nach einem neuen Maß an Agilität und Prognose-Fähigkeit, um ihre Just-in-Time-Fertigung zu verbessern und die raschen Veränderungen der Verbrauchernachfrage besser zu bedienen. Angesichts des stockenden Produktivitätswachstums suchen die Hersteller auch nach effizienteren Wegen, um Lieferketten und Logistik zu verwalten, agilere Produktionsstätten zu schaffen und ihre Mitarbeiter mit moderner Technik zu unterstützen. Viele Hersteller sind bereits heute stark automatisiert, jedoch ist der Einsatz von Fließbandrobotern und automatisierten Transportfahrzeugen an statische Arbeitsabläufe gebunden. Die nächste Generation der Industrieautomation verspricht eine Optimierung der Produktion für flexiblere Änderungen der Arbeitsabläufe und eine schnelle Anpassung der Konstellationen an neue Anforderungen, auch für kleine Chargen bis hin zur Produktion von Einzelstücken, für die schnelle Umrüstungen benötigt werden.

Neben der Vernetzung der Maschinen wird es darauf ankommen, Waren, Produkte, Werkzeuge, Transportfahrzeuge und Mitarbeiter in die digitale Transformation einzubeziehen, um jederzeit über den Zustand und Fortschritt im Produktionsprozess Informationen zu erlangen. Vernetzte Sensoren und Aktoren, Werkzeuge und Maschinen (Industrial IoT), Analytik, Methoden der Künstlichen Intelligenz und Machine Learning sind vielversprechend für die Verbesserung der Echtzeitinformationen und der Steuerung automatisierter Prozesse. Mit der Zusammenführung dieser Daten und Informationen entsteht ein digitales Abbild der Produktionsprozesse, ein sogenannter Digitaler Schatten oder Digitaler Zwilling. Dies ermöglicht durch Analyse, Verstehen und Interpretation der gesammelten Daten und Informationen das Ableiten von Aktionen und Veränderungen, die

für die Steigerung der Produktionsleistung bzw. die Verbesserung der betrieblichen Effizienz und zur Entscheidungsfindung positiv beitragen.

5G verspricht, diese Anforderungen erfüllen zu können. So kann 5G die Vielzahl an Sensoren miteinander vernetzen, sodass flexible Sensorsysteme direkt an die Steuerung der autonomen Roboter gekoppelt und Probleme mit Steuerung oder Produktion vorausberechnet werden können. Auch die Steuerung der Systeme selbst kann mit 5G durch die latenzarme Verbindung realisiert werden. Durch die hohe Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der 5G-Kommunikation können sogar sicherheitskritische Prozesse mobil und flexibel eingesetzt werden. Durch die hohen Datenraten, die unterstützt werden, können Produktion und Steuerung auf hochauflösende Kamerasysteme zurückgreifen, die in Echtzeit und zuverlässig Informationen über Qualität des Produktes und Zustand der Produktion liefern. Eine umfangreiche Auswahl an Anwendungsfällen aus der Produktion findet sich in [15], [16]. Zahlreiche Anwendungsfälle werden im IC4F-Projekt umgesetzt [17].

3.2 Anwendungen in der Intralogistik

Mit 5G eröffnen sich für die Intralogistik, insbesondere für mobile industrielle Applikationen, neue Anwendungsmöglichkeiten, die bisher so nicht möglich waren. Dabei geht es nicht um klassische Flottenmanagementlösungen für Flurförderfahrzeuge, die aufgrund der gängigen Zeit- und Volumenanforderungen auch mit 4G oder WLAN realisiert werden können, sondern in der Regel um autonome Systeme. Zum einen ist davon auszugehen, dass in Zukunft die Anzahl dieser Systeme sprunghaft ansteigt, und zum anderen, dass die Systeme immer komplexere Aufgaben bewältigen müssen, da sie humanoide Aufgaben übernehmen werden, um die Produktivität zu erhöhen. Die autonomen Systeme der aktuellen Generation sind in der Regel extrem autark und benö-

tigen daher nur eine begrenzte mobile Anbindung. Routenberechnung, Lokalisierung, Problemlösungsstrategien und Sicherheitsfunktionen sind direkt in Fahrzeugen integriert. Von außen werden in der Regel nur Zielkoordinaten und Auftragsdaten übertragen und begrenzte Betriebsdaten abgerufen. Die nächste Generation der autonomen Fahrzeuge wird von 5G profitieren, da Edge-Cloud-Computing mit einer leistungsfähigen und hochstabilen Kommunikationsanbindung eine Auslagerung von Teilfunktionen ermöglicht. In erster Instanz werden Funktionen der Routenberechnung und Informationen, die für die Wartung relevant sind, abgebildet. Neue KI-Strategien können dadurch mit den entsprechenden Daten versorgt werden und Echtzeiteingriffe auf Basis von Digitalen Zwillingen werden möglich. Latenzzeiten unter 10 ms und Handover-Zeiten im Bereich von 1 ms lassen eine lückenlose Kommunikation zu und sind maßgebliche Wegbereiter für diese Entwicklung. Die Vorteile beim Betrieb großer Flotten von AGVs (Automated Guided Vehicle – fahrerloses Transportfahrzeug) liegen hierbei in der Reduzierung der Prozessorkapazitäten auf den Fahrzeugen, der nahezu unbegrenzten Speichermöglichkeit von Daten und der Auslagerung von zum Beispiel rechenintensiven Bildverarbeitungsprozessen. Lösungsstrategien, die für den Betrieb dieser großen Flotten notwendig sind, können dann in Zukunft auf der Edge-Cloud gerechnet werden, auf der alle Fahrzeugdaten verfügbar sind. Bei der übernächsten Generation von AGVs ist in der Planung, die Sicherheitssysteme in den globalen Kontext zu übertragen, was erneut zur Vereinfachung der Einzel-AGVs führen wird.

Bei der Bereitstellung entsprechender Infrastrukturen für autonome Systeme sind Randbedingungen einzuhalten, damit ein Betrieb möglich ist. Bei großen Flotten mit datenintensiver Kommunikation müssen entsprechend viele 5G-Zellen vorgehalten werden. Für das Verlagern sicherheitsrelevanter Funktionen und die Vermeidung von Produktionsausfällen bei zentralisierter Steuerung muss das Funknetz redundant aufgebaut werden.

Neben der Bereitstellung dieser technischen Möglichkeiten sind aber auch umfangreiche Standardisierungen notwendig, um derart umfangreiche Systeme in Zukunft zu realisieren. Während es sich bei einem 5G-Campusnetz um eine einheitliche Kommunikationsinfrastruktur handelt, ist in den Unternehmen in der Regel von einem Einsatz gemischter Fahrzeugflotten von verschiedenen Herstellern auszugehen. Alle diese Systeme müssen sich daher auf den verschiedenen Kommunikationsschichten gleich verhalten und über ein einheitliches Sicherheitskonzept verfügen. Hier werden in Zukunft noch umfangreiche Schnittstellen-Abstimmungen notwendig. Des Weiteren müssen diverse Service-Kanäle für die Hersteller bereitgestellt werden, damit die komplexen Systeme anspruchsgerecht gewartet werden können.

3.3 Anwendungen in der Logistik

3.3.1 Transport an Häfen

Heute werden bezogen auf das Warengewicht ungefähr 90 Prozent der Waren der Welt auf dem Seeweg transportiert [18]. Containerhäfen spielen eine entscheidende Rolle bei der Bewältigung von Verkehrsschwankungen und bei der Gewährleistung einer schnellen Abwicklung für ihre Kunden. Der Umfang und die Vorteile der Digitalisierung sind enorm, da ein Großteil des aktuellen Betriebs auf manuellen Prozessen beruht. Viele dieser Häfen haben begonnen, verstärkt zu automatisieren, um Prozesse, Effizienz sowie die Sicherheit der von ihnen umgeschlagenen Waren zu verbessern. Wenn ein Schiff mit mehr als 20.000 Containern an einem Seehafen anlegt, müssen die Waren schnell und sicher für den weiteren Versand entladen werden. Automatisierung und Digitalisierung ermöglichen es dem Hafen, den massiven Informationsfluss zu bewältigen, der mit den Schiffscontainern einhergeht und für den Rest der Reise generiert werden muss. Oft sind mehrere Unternehmen an den Vorgängen beteiligt, von denen jedes seinen eigenen Bedarf an dedizierter Konnektivität im

Hafen hat. Darüber hinaus müssen diese Bemühungen eng koordiniert werden. Die erste Anwendung, die am häufigsten angefordert wird, ist die Erstellung eines Echtzeitüberblicks über den Hafenbetrieb, wobei Kameras verwendet werden, um Disponenten die Möglichkeit zu geben, die Kräne und Portalhubwagen zu bedienen. Diese Kameras werden auch verwendet, um den Zustand der Container bei der Ankunft zu überprüfen und Diebstahl im Hafen zu vermeiden. Häfen der Zukunft müssen ferngesteuerte und automatisierte Lastkraftwagen, Portalhubwagen und Krane einsetzen, um die Effizienz und Sicherheit weiter zu verbessern.

3.3.2 Bahn und LKW

Die Automatisierung der Logistik beginnt an Häfen oder Flughäfen, aber das Leben der Bevölkerung findet in den Städten statt. Um von Häfen in die Städte zu gelangen, werden Transportmittel wie Bahn und Lastwagen eingesetzt. Auch hier nimmt die Automatisierung und Vernetzung stets zu, um einerseits die Effizienz, andererseits aber auch die Sicherheit zu erhöhen. Bahnhöfe, auf denen schnell und flexibel mit der Infrastruktur, den Zügen, aber auch dem Personal kommuniziert werden kann, können viel schneller auf Ausfälle, priorisierte Bewegungen und unvorhersehbare Vorfälle reagieren. Ein voll vernetztes Kamerasystem, das intelligent die Bilder in Echtzeit auswertet und mit dem Leitsystem verknüpft ist, kann Unfälle mit Passagieren verhindern, aber auch einer Überfüllung entgegenwirken, indem flexibel Züge getauscht oder Wagen angehängt werden, ohne dass der Betrieb gestört wird. Und auch hier kann dem Passagier selbst ein großes Angebot an Komfort und Multimedia bereitgestellt werden, indem das zentrale Leitsystem stets über alle Vorkommnisse und Verspätungen informiert ist und Streckenbelegungen flexibel managen kann. 5G liefert dabei besonders in Bahnhöfen immense Möglichkeiten durch die große Anzahl an Nutzern, die unterstützt werden und gleichzeitig hohe Datenraten bei niedrigerer Latenz nutzen können.

3.4 Anwendungen in der Smart City

In der Stadt angekommen, bietet 5G unendliche Möglichkeiten, Geschäftsmodelle für Firmen, aber auch für die Privatbevölkerung anzubieten. Der Komfortgewinn ist dabei immens, wenn eine zuverlässige Kommunikation alles mit allem verbindet. Das können Bürger mit Bürgern, Bürger mit der Infrastruktur, aber auch die Infrastruktur mit sich selbst sein. Nur einige Beispiele für vernetzte Infrastruktur sind Fahrzeuge, Ampeln, Türen, Supermärkte und vieles mehr. Hierbei können die unterschiedlichen Verbesserungen von 5G gegenüber den bisherigen Mobilfunkgenerationen individuell bis zum Maximum ausgeschöpft werden und bieten vor allem im Bereich privater Campusnetze ein großes Potenzial für Betreiber von Einkaufszentren, Schulen, Bürokomplexen, aber auch für ganze Innenstädte, wo eine Unabhängigkeit von öffentlicher Infrastruktur viele Möglichkeiten öffnet.

3.5 Anwendungen bei der elektrischen Energieversorgung

Die Schaffung einer sicheren und zuverlässigen Energieversorgung aus oft fluktuierenden Quellen erfordert die Überwachung und Steuerung von Geräten, die in Privathaushalten, Unternehmen und im Verteilnetz installiert sind, in einer Geschwindigkeit und Größenordnung, die weit über den heutigen Betrieb hinausgeht. Diese Verschiebung führt zu radikalen Veränderungen in den Nutzfunktionen und Geschäftsmodellen. Erhebliche Strommengen werden in Verbrauchergebäuden und an eigenständigen dezentralen Standorten erzeugt, was zu einem Austausch von Energie aus der Nachbarschaft und der Gemeinde führt. Einzelhandelsmärkte für Energie entstehen, um Echtzeit-Energietransaktionen mit Hilfe von Blockchains zu unterstützen und deren Ausführung zu erleichtern.

Die weit verbreitete Automatisierung, die Verwendung von Datenanalysen zur Unterstützung neuer Versorgungsanwendungen und die Verwendung

erweiterter Nachrichtensysteme durch das Außendienstpersonal werden den Betrieb der Versorger verändern. Es wurden enorme Kapitalinvestitionen getätigt, um das zentrale Stromnetz der Vergangenheit zu unterstützen. Nun muss diese Infrastruktur – ursprünglich für den Einweg-Energiefluss ausgelegt – den Zweiweg-Energiefluss bewältigen. Bestehendes Vermögen zu schützen, um die Energiekosten der Verbraucher niedrig zu halten, ist unabdingbar. Infolgedessen müssen die Versorgungsunternehmen eine Vielzahl von Sensoren und Controllern bereitstellen, um sicherzustellen, dass ihr Netz nicht überlastet wird und die Stromqualität erhalten bleibt. Die Möglichkeiten für digitale Effizienz im Energienetz sind vielfältig.

3.6 Anwendungen im Bergbau

In einer starken Wirtschaft profitiert der Bergbau von einer unstillbaren Nachfrage nach Mineralien. Bei günstigen wirtschaftlichen Bedingungen ist die Produktivität des Bergbaus hauptsächlich durch Engpässe im Mineralabbau oder in der Lieferkette begrenzt. Die Industrie leidet auch unter übermäßigen Betriebskosten und Kapitalkosten. Diese Faktoren zwingen den Bergbau, eine immer höhere Effizienz zu erzielen. Die Gefährlichkeit von Bergbaueingängen (gekennzeichnet durch Staub, die Verwendung von hochexplosiven Stoffen, extrem hohe Temperaturen und das Bewegen schwerer Geräte) führt zu einer stärkeren Betonung der Arbeitssicherheit in der Industrie.

Das Bedürfnis nach kontinuierlicher Verbesserung von Sicherheit, Produktivität und Effizienz führt zu einer beispiellosen Nachfrage nach Digitalisierung, Automatisierung und Optimierung aller Aspekte des Bergbaubetriebs von der Grube bis zum Hafen. Die Einführung automatisierter Minen im Tagebau führt zu einer Verbesserung der Betriebseffizienz.

3.7 Anwendungen in der Medizin

Um die zukünftigen Herausforderungen einer bedarfsgerechten und personalisierten Medizin zu erfüllen, müssen die Potenziale der Digitalisierung auch im Gesundheitswesen effizient genutzt werden. Dabei spielt der Einsatz geeigneter Kommunikationsinfrastrukturen eine entscheidende Rolle. Neben den technischen Anforderungsprofilen der verschiedenen medizinischen Anwendungsfelder ist besonders die Datensicherheit eine zentrale Anforderung an das Kommunikationsnetz.

5G bietet eine enorme Konnektivität und hohe Geschwindigkeiten. Diese Eigenschaften tragen dazu bei, die Gesundheitsversorgung zu verändern.

Medizinische Campusnetze für Krankenhäuser und Pflegeeinrichtungen stellen eine geeignete Kommunikationslösung dar, um zum einen die Sicherheit der hochsensiblen Gesundheitsdaten zu gewährleisten und zum anderen zukünftige applikationsspezifische Anforderungen zu erfüllen. Neue Anwendungsfelder sind insbesondere die schnelle Übertragung von großen Datenmengen aus bildgebenden medizinischen Systemen, die Erweiterung der Telemedizin und zuverlässige Patientenüberwachung in Echtzeit, digitale Assistenzsysteme wie AR/VR oder holografische Visualisierungen für neue Operationstechniken.

3.8 Mobile Campusnetze

Einige Anwendungsgebiete wie Landwirtschaft oder Baustellen können nicht mit fest installierter privater Infrastruktur oder einem Slice im öffentlichen Netz gelöst werden. Letzteres ist meist damit begründet, dass es immer noch signifikant große Gebiete ohne oder mit sehr sporadischer Abdeckung gibt. Um moderne Techniken und effizienzsteigernde Verfahren anwenden zu können, ist es aber wichtig, dass auf dem Feld oder der Baustelle eine zuverlässige Vernetzung mit hohen Datenraten und niedrigen Latenzzeiten gewährleistet wird. Dabei ist wichtig, dass die Anwendungen lokal autark lauffähig sind, da oft nur

eine Satellitenanbindung mit niedrigen Datenraten oder eine zeitweise aktive Richtfunkanbindung möglich ist. Ferner können Anwendungen in der Veranstaltungstechnik für mobile Events (z. B. Konzertfestivals) mit mobilen privaten 5G-Netzen realisiert werden [19].

3.8.1 Anwendungen in der Landwirtschaft

In der modernen Landwirtschaft sind Begriffe wie „Smart Farming“ und „Precision Farming“ überall zu finden. Doch gegenwärtige Mobilfunklösungen der Weitverkehrsnetze haben nicht die Fähigkeit, solche Anwendungen ausreichend zu unterstützen. Durch mobile Campusnetze auf privaten Frequenzen ist es möglich, zuverlässigen und hochbitratigen Mobilfunk auf landwirtschaftlichen Flächen zu bekommen. So können miteinander vernetzte autonom fahrende Fahrzeugverbände, kooperierende Drohnen und hochpräzises Düngen und Spritzen ermöglicht werden. Da auf dem Feld nur zu bestimmten Zeiten eine Abdeckung benötigt wird, wie z. B. beim Säen, Ernten oder Düngen, ist es wichtig, dass das Netz auf einer portablen, autark laufenden Plattform installiert wird und dem Landwirt schnell und flexibel zur Verfügung steht. 5G bietet mit den privaten Campusnetzen diese Möglichkeit und unterstützt zudem mit seiner flexiblen Konfigurierbarkeit viele Anwendungen, sodass die Netze dazwischen nicht ungenutzt sein müssen, sondern für andere Anwendungsfälle genutzt werden können.

3.8.2 Baustelle

Ein weiterer Anwendungsfall wird die Baustelle der Zukunft sein. Sind heute noch viele Bauunternehmer völlig ausgelastet, weil dringend benötigtes ausgebildetes Personal zum Führen der Maschinen fehlt, kann in Zukunft ein intelligenter autonomer Bagger selbsttätig Arbeiten ausführen. Die benötigten Informationen werden ihm entweder lokal durch eine Edge-Cloud vor Ort oder über eine Anbindung an die firmeneigene oder herstellerbetriebene Cloud gegeben. Mobile Campusnetze sind auch hier der Grundstein für solche Anwendungen, denn so können flexibel

Netze aufgebaut werden, wo noch keine Netze in ausreichender Qualität zur Verfügung stehen oder das bestehende Netz die Anforderungen an Latenz oder Datenrate nicht erfüllt. Dies wird besonders dann erforderlich, wenn mehrere Baumaschinen kooperativ mit anderen Maschinen oder sogar kollaborativ mit Arbeitern interagieren müssen. Die dafür benötigten Anforderungen können nur lokale, dafür konfigurierte Netze erfüllen. Durch die mobilen Campusnetze können so die Sicherheit auf Baustellen gesichert, die Effizienz gesteigert und die Bauzeiten verkürzt werden. Eine Baumaschine, die auf einer Baustelle auf einen Maschinenführer oder die Überfahrt zu einer anderen Baustelle wartet, wird es in Zukunft nicht mehr geben. Durch die hohe Vernetzung und die hochpräzise GPS- und 5G-gesteuerte Lokalisierung wird die Auslastung der Maschinen um ein Vielfaches verbessert. Diese Ansätze werden aktuell im Projekt DigitalTWIN [20] bearbeitet.

3.8.3 Mobile Fabrik

Eine mobile Fabrik ist eine in sich geschlossene Produktionseinheit. Sie besteht aus einsatzbereiten Modulen in Form von Fracht-Containern, die in kürzester Zeit an einem ausgewählten Ort montiert und aufgebaut werden können [21]. Erfolgreiche Anwendungsgebiete der „Factory-in-a-Box“ sind Produktionslinien der Elektronischen Industrie, aus dem Bereich der Konsumgüter sowie im Bereich Lebensmittel und Getränke. Es werden verschiedene, für Industrie 4.0 nützliche Konzepte genutzt, wie hyperflexible Produktionsprozesse durch Cloud-basierte Anwendungen, Sensoren auf Teilebenen, Manufacturing Execution Systems (MES) und Robotik. Mobile Fabriken bieten die Möglichkeit, Investitionen in Betriebstechnologien zu standardisieren. Hierbei werden in der Factory-in-a-Box je nach Produktionsschritt Sensornetze, AR/VR-Anwendungen oder kollaborative Robotik eingesetzt. Die Anbindung der Factory-in-a-Box an Cloud-Dienste je eingesetzter Maschine oder die Einbindung in die höheren Ebenen der Unternehmensinfrastruktur ist durch 4G- und 5G-Funktechnik an fast beliebigen Orten möglich.

3.9 Übersicht der Anforderungen

Die vorgestellten Anwendungsfälle von 5G sind sehr vielfältig. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Anwendungsfälle sind deren Anforderungen in Tabelle 1 in den Dimensionen Anzahl der Endgeräte, geforderte Datenrate und Latenz aufgeteilt. Dabei lassen sich die Anwendungen in drei grobe Kategorien aufteilen. Der erste Anwendungsfall ist Motion Control. Hierbei ist die direkte hochpräzise Steuerung und Regelung von Aktuatoren gemeint. Dabei muss eine sehr geringe Latenz zwischen dem Versenden und dem Empfang eines Steuerbefehls gegeben sein, damit es nicht zu Fehlsteuerungen kommt. Die Anforderungen an die Anzahl der Endgeräte und die Datenrate sind jedoch nicht sehr hoch. Der zweite Anwendungsbereich sind autonome Fahrzeuge, die sich im nicht öffentlichen Raum befinden und sich dort autonom bewegen. Dazu gehören die Intralogistik-AGVs, die autonomen Drohnen und Traktoren in der Land-

wirtschaft und die autonomen Baugeräte wie Bagger. Diese Anwendungsfälle sind charakterisiert durch hohe Datenraten und relativ anspruchsvolle Latenzzeiten, aber mit weniger involvierten Endgeräten. Die dritte Gruppe sind große Internet of Things-Netzwerke mit sehr vielen Teilnehmern, aber geringen Datenraten und hohen akzeptablen Latenzen.

Die Anwendungsfälle im Hafen sind nicht in der Tabelle 1 ausgeführt, können jedoch aus den drei beschriebenen Anwendungstypen zusammengesetzt werden. Zur Überwachung von Containern auf dem Hafengelände wird eine große Anzahl an Sensoren benötigt, die die Position der Container, aber auch die Temperatur von Kühlcontainern übertragen. Zum Transport der Container auf dem Hafengelände und Umladen auf LKWs werden autonome Fahrzeuge verwendet, die ähnliche Kommunikationsanforderungen wie in der Intralogistik haben.

Tabelle 1: Anforderungen an 5G der einzelnen Anwendungsfälle

Anwendungsfall	Anzahl Endgeräte	Datenrate	Latenz
Maschinensteuerung (Motion control) ¹	100	100 kb/s	2 ms
Intralogistik-AGVs ¹	100	10 Mb/s	20 ms
Landwirtschaft (autonome Drohnen und Traktoren) ²	20	20 Mb/s	20 ms
Baustelle (autonome Baugeräte) ²	20	20 Mb/s	20 ms
Smart City (Zähler, Umweltsensoren, IoT)	10 ⁶	100 b/s	10 s
Energieversorgung (Frequenzsteuerung) ¹	10 ⁵	100 b/s	< 50 ms

¹ Quelle: [16]

² abgeleitete Werte aus [16]

4 5G-Campusnetze – Topologien und Betreibermodelle



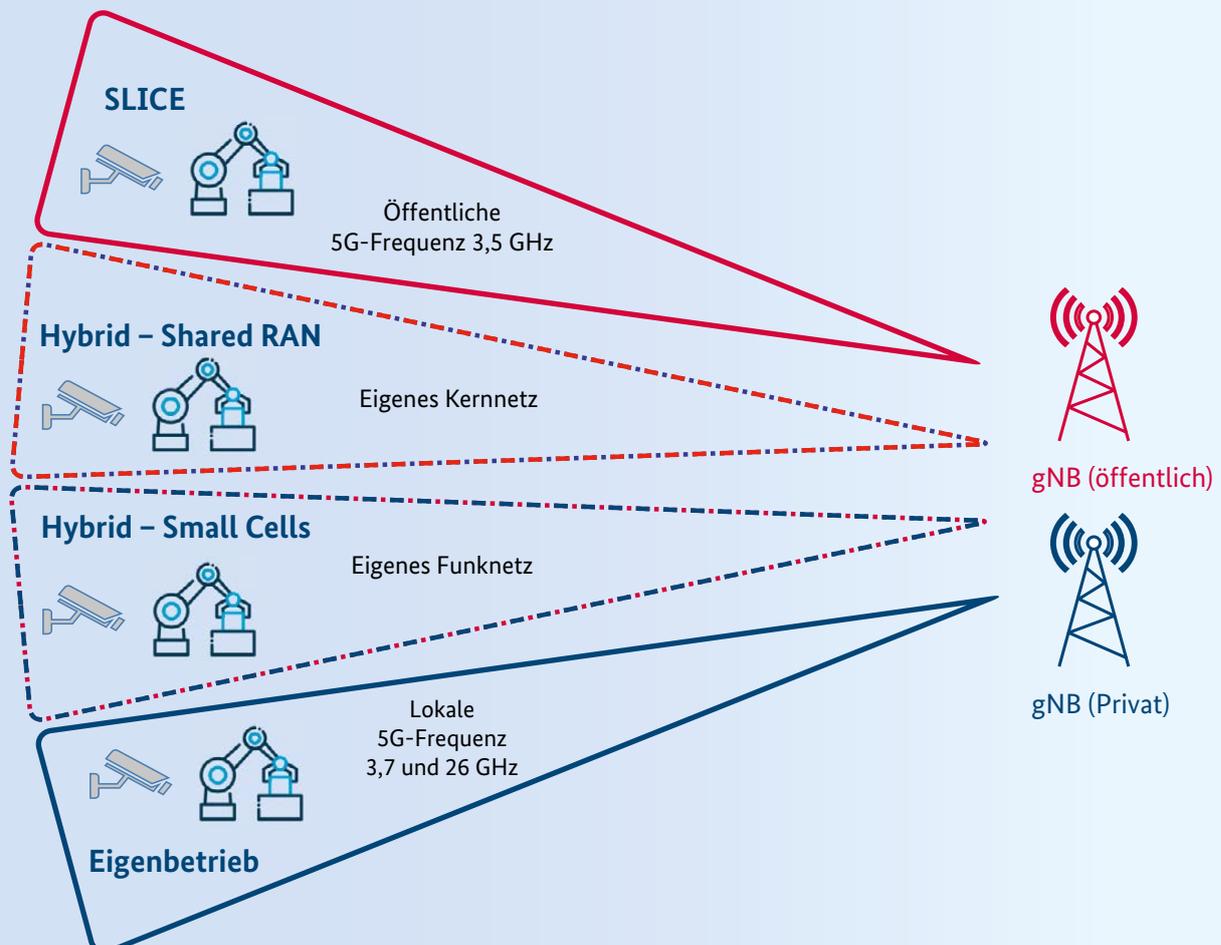
5G-Campusnetze lassen sich in unterschiedlicher Integrationstiefe in Bezug auf 5G-Mobilfunknetze der landesweiten („öffentlichen“) Mobilfunkbetreiber (MNO) aufbauen (siehe Abbildung 4). Neben vollständig isolierten Netzen („Eigenbetrieb“) und rein auf öffentlichen Netzen basierenden virtuellen Netzen können auch verschiedenste Zwischenformen umgesetzt werden. Drei Integrationstiefen beschreiben daher die wesentlichsten Varianten von 5G-Campusnetzen: die isolierten Netze („Eigenbetrieb“), die Hybridnetze (Teile mit einem MNO-Netz verknüpft, teilweise Eigenbetrieb) und die virtuell eigenen Netze

als Teil eines MNO-Netzes („Slices“), mit oder ohne dedizierter Vor-Ort-Hardware.

4.1 Architektur von 5G-Campusnetzen

Die wichtigsten Netzelemente eines 5G-Netzes sind in Abbildung 5 dargestellt. Das Funknetz (RAN, Radio Access Network) verbindet die Endgeräte über die Basisstationen (gNB, next generation Node B) mit der User Plane Function (UPF) und mit der 5G Core

Abbildung 4: Funkspektren und Betreibermodelle für 5G-Campusnetze



Control Plane (5GC-CP). Die gNB bestehen aus Sendeeinrichtungen, den zugehörigen Antennen sowie einer ggf. räumlich abgesetzten Einheit zur Signalverarbeitung. Die UPF ist das Gateway zur Kontrolle und Weiterleitung von Nutzdaten. Die 5GC-CP ist das Kernnetz, das seinerseits aus einer Reihe von Einzel-elementen besteht, die für die Separierung, Priorisierung und Zugriffssteuerung erforderlich sind. Die Verwaltung der Nutzerdaten erfolgt im Unified Data Management (UDM), das die Benutzerdaten inkl. spezieller Profile und Regeln enthält.

Eine wichtige Neuerung von 5G-Netzen ist die Möglichkeit der Bereitstellung lokaler bzw. netznaher Berechnungskapazitäten mittels Mobile Edge Cloud (MEC), einer lokalen Cloud-Infrastruktur im Netz, um Anwendungen eine Programmverarbeitung ohne lange Paketlaufzeiten zu ermöglichen.

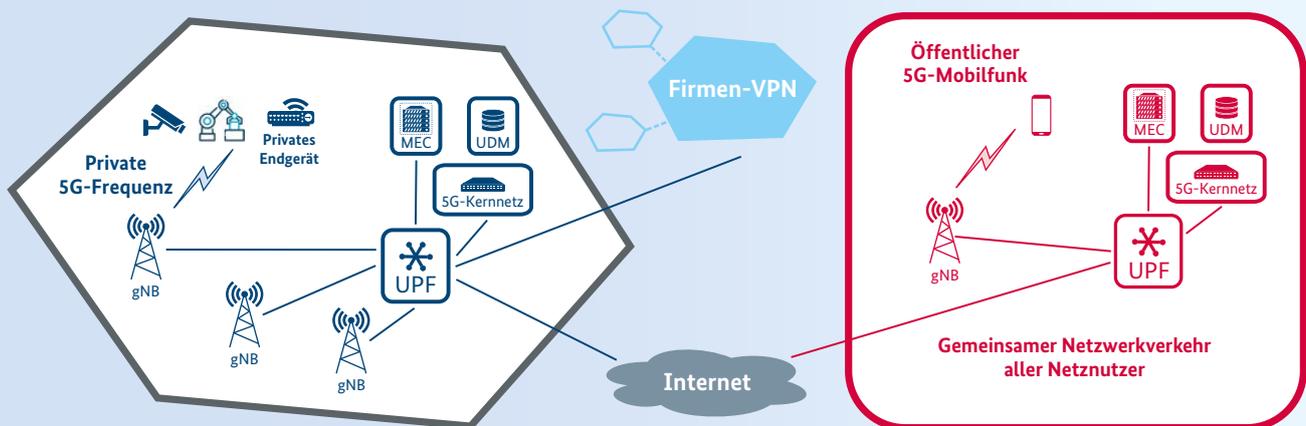
4.2 Betreibermodelle

Es gibt verschiedene Betreibermodelle zur Umsetzung von Anwendungsszenarien und Use Cases. Sie unterscheiden sich durch die Aufteilung von 5G-Netzfunktionen und deren Betrieb zwischen dem 5G-Campusnetzbetreiber und öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern. In diesem Kapitel werden wichtige Modelle und Aspekte für deren Auswahl erläutert.

4.2.1 Separates 5G-Campusnetz (Eigenbetrieb)

Bei einem separaten 5G-Campusnetz wird der Campusbetreiber zum lokalen, privaten 5G-Netzbetreiber. Aufbau und Betrieb des separaten 5G-Campusnetzes liegen in der eigenen Verantwortung des Campusbetreibers. Es besteht keine Integration mit dem öffentlichen Mobilfunknetz.

Abbildung 5: Netzelemente der 5G-Netze, im isolierten Eigenbetrieb vollständig separiert

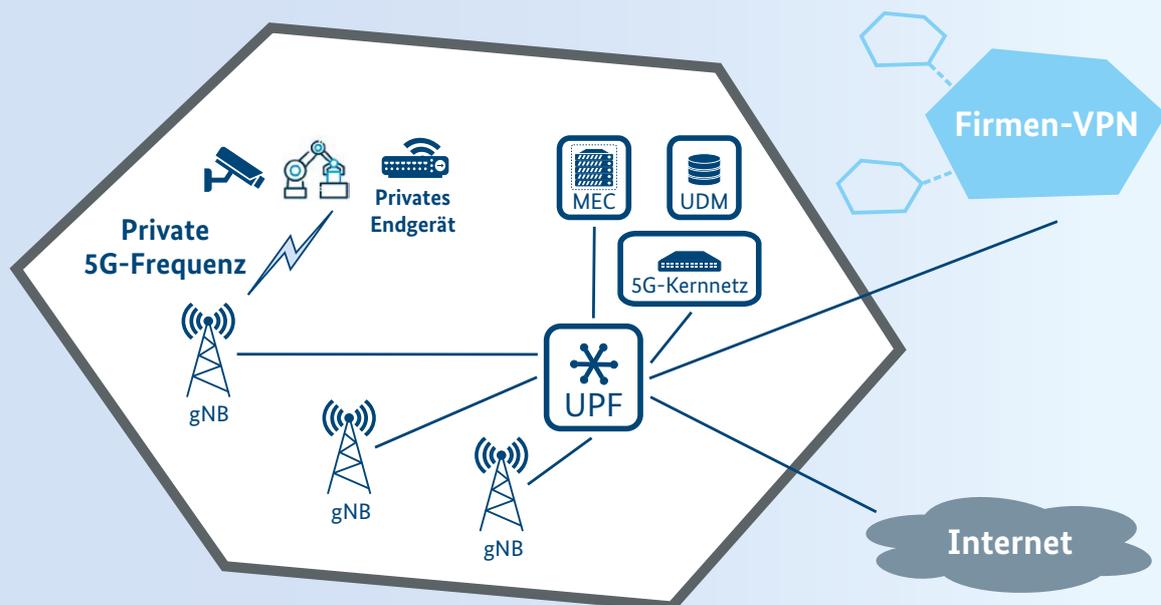


- Aufbau eines individuellen, privat nutzbaren Mobilfunknetzes mit eigener Netz-ID und strikter Abgrenzung vom öffentlichen Mobilfunknetz durch separate Hard- und Software sowie durch unterschiedliche Funkbänder (Stand-Alone).
- Bedarf einer lokalen Funklizenz, die vom Campusbetreiber bei der BNetzA zu beantragen ist (siehe Abschnitt 2.2).
- Verwendung branchenüblicher Sicherheitszertifikate (non-3GPP) ist möglich.
- Aufbau und/oder Betrieb können eigenständig oder durch Dienstleister erfolgen.

Alle Netzelemente in Abbildung 6 werden vollständig vom 5G-Campusnetz-Betreiber bereitgestellt und verantwortlich. Auch die mit dem Lizenzwerb einhergehenden Verpflichtungen sind von ihm zu erfüllen. Eine Übergabe an Dienstleister ist jedoch möglich. Eine Einbindung in öffentliche Mobilfunknetze besteht nicht.

Der Eigenbetrieb eines 5G-Campusnetzes lohnt sich in den Fällen, in denen eine hohe kommunikative Auslastung mit vielen Systemen, sehr hohe Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Kommunikationsdienste sowie ein langfristiger Betrieb zu erwarten sind. In der Kalkulation derartiger Systeme sind Erstellungs-, Betriebs- und Instandhaltungskosten zu berücksichtigen. Die Erstellungskosten fallen in diesem Betriebsmodell am höchsten aus, da zunächst alle Anlagen erworben werden müssen. Die Betriebskosten sind in der Regel weitgehend

Abbildung 6: Einsatzszenario als separates 5G-Campusnetz (Eigenbetrieb – keine MNO-Integration)



konstant und sind daher in Bezug zum Kommunikationsvolumen zu setzen. Aus diesem Grund kann der Betrieb bei großen Anlagen für den Betreiber kostengünstiger ausfallen. Für den Eigenbetrieb ist ferner technisches Know-how notwendig, entweder in Form einer eigenen Abteilung oder einer kontinuierlichen externen Unterstützung. Die technischen Verantwortlichkeiten sind klar geregelt. Dieses 5G-Campusnetz ist in der Regel auch das technisch leistungsfähigste von allen Betreibermodellen, da alle Systeme auf dem eigenen Betriebsgelände stehen und die lokale Funklizenz Interferenzen mit externen Nutzern vermeidet. Es ist somit prädestiniert für Echtzeitanwendungen, da sich keine zusätzlichen Laufzeiten ergeben. Auch lässt es sich zur Sicherung einer hohen Verfügbarkeit redundant auslegen. Durch den separaten Aufbau bietet es weniger Angriffspunkte und erfüllt somit höhere Datensicherheitsanforderungen.

- Private Campus-Funkverbindungen mit Dienstgüte (Quality of Service, QoS) in einem privaten 5G-Netz ohne Einbindung von Netzkomponenten, die von Externen benutzt werden.
- Gesicherte Übertragungsqualität für anspruchsvolle IoT-Datendienste im privaten Netz.
- Dedizierte Übertragungstechnik und -kapazitäten für Fabrik- und Campuskommunikation.
- Voller Zugriff auf die Verwaltungsfunktionen des 5G-Campusnetzes, inklusive aller Details der aktuellen und historischen Diagnosedaten (Dienstgüte auch für Monitoring und Diagnose).
- Geeignet für anspruchsvolle Echtzeitanwendungen und für Anwendungen mit sehr hoher Kommunikationszuverlässigkeit.
- Zulässige Anwendungen sind eingeschränkt auf rein Campus-interne Anwendungen, unternehmensübergreifende Anwendungen entlang der Wertschöpfungskette sind nur mit einem lokalen Internet-Übergang möglich.
- Bei benachbarten 5G-Campusnetzen mit lokaler Funklizenz sind Betreiberabsprachen notwendig [2].

4.2.2 Virtueller „Slice“ im öffentlichen Netz der Mobilfunkanbieter

In dem vollständig im Netz eines öffentlichen Mobilfunkbetreibers integrierten Einsatzszenarios eines 5G-Campusnetzes wird mittels einer sogenannten „Network Slice“ ein logisch eigenes Netz innerhalb des öffentlichen 5G-Netzes des Mobilfunkbetreibers eingerichtet (siehe Abbildung 7). Eine ausreichende Funk-Abdeckung durch das öffentliche 5G-Netz des Mobilfunkbetreibers ist Grundvoraussetzung. Seitens des Campusbetreibers sind keine Investitionen in eigene Netz-Hardware nötig (Endgeräte ausgenommen). Erforderliche Netzerweiterungen erfolgen durch den MNO, ggf. auch in kommerzieller Abstimmung mit dem Campusbetreiber. Alle Sendeinheiten und Elemente des 5G-Core-Netzes sind auch in der „Public Slice“ von allen MNO-Kunden nutzbar. Darüber können alle üblichen MNO-Dienste (wie z. B. die Sprachkommunikation oder IoT-Dienste der MNOs) bedient werden. Die „Private Slice“ dient ausschließlich firmeninternen Anwendungen des Campusbetreibers. Der MNO kann zusätzliche „öffentliche“ Kapazitäten bereitstellen. Der Campus-Eigner betreibt interne Dienste über das öffentliche MNO-Netz, eine lokale Terminierung ist damit in der Regel nicht möglich. Nutzer und Endgeräte des 5G-Campusnetzes müssen beim öffentlichen MNO registriert sein und benötigen eine SIM (SIM-Karte oder eSIM) des Mobilfunkanbieters.

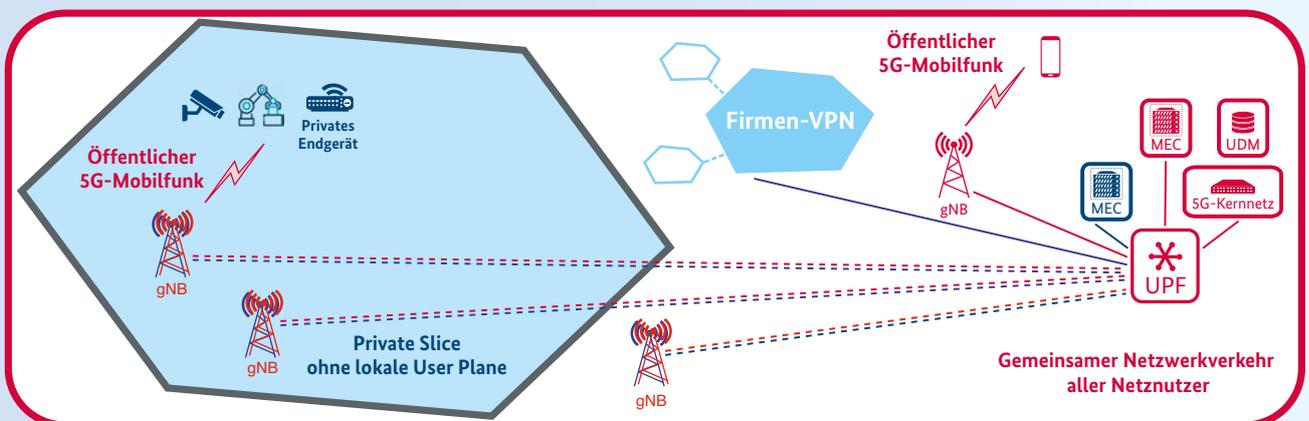
- Private Campus-Funkverbindungen mit vereinbarter Dienstgüte (QoS) in einem virtuellen privaten Netz („Slice“) über ein öffentliches MNO-Netz.
- Gesicherte Übertragungsqualität für anspruchsvolle IoT-Datendienste im privaten Netz („Slice“).
- Nutzung der Infrastruktur des öffentlichen 5G-Mobilfunknetzes.

Für virtuelle Campusnetze stellt der MNO seine externe öffentliche Kommunikationsinfrastruktur zur Verfügung und koppelt die Unternehmensdaten über spezielle Gateways aus. Damit ist ein getrennter Datenverkehr zu den öffentlichen Daten gesichert. Ein derartiges Betriebsmodell eignet sich sowohl für temporäre Anwendungen als auch in Fällen, wo umfangreiche Hardware-Installationen vermieden werden sollen. Da die öffentliche Kommunikationsinfrastruktur auch anderweitig belastet wird, kann es möglicherweise zu temporären Einschränkungen in der Bandbreite und der Dienstgüte (QoS) kommen. Die Kostenstruktur hängt stark vom MNO, der vereinbarten Dienstgüte und dem Service-Level ab und kann nur begrenzt bewertet werden. Es ist aber eine gute Skalierbarkeit gegeben, sodass auch kleinste Anwendungen realisierbar sind. Durch die Besonderheit der Infrastruktur eignet sich ein derartiges System nur begrenzt für zeitkritische und Echtzeit-Applikationen.

4.2.3 „Network Slice“ im öffentlichen Netz der Mobilfunkanbieter mit separater User Plane

Diese Variante basiert ebenfalls auf der Sendeeinfrastruktur eines MNO-Netzes, das aber durch Vor-Ort-Komponenten ergänzt wird, insbesondere wird eine lokale User Plane (UPF) bereitgestellt (siehe Abbildung 8). Dadurch kann auch eine Mobile Edge Cloud (MEC) lokal eingebunden werden, die dediziert für den Campusbetreiber Rechenleistung bereitstellt. Dabei bleiben die Nutzerdaten im Bereich des Campus, nur die Steuerung und das Management des 5G-Campusnetzes erfolgen extern aus dem MNO-Netz heraus. Das lokale Funknetz wird durch zusätzliche Funkstationen (Radio Units, RU) ergänzt. Damit wird es möglich, Daten vollständig im 5G-Campusnetz vor Ort zu halten, gleichzeitig können auch sehr latenzkritische Anwendungen unterstützt werden.

Abbildung 7: Virtuelles 5G-Campusnetz als „Slice“ im MNO-Netz



- Einrichtung eines individuellen, privat nutzbaren virtuellen 5G-Campusnetzes mit eigener Netz-ID innerhalb des öffentlichen 5G-Mobilfunknetzes, erweitert mit lokalen Netzkomponenten.
- Private Campus-Funkverbindungen mit Dienstgüte (QoS) in einem 5G-Mobilfunknetz mit lokalen Netzkomponenten und lokalen Anwendern, auf Basis einer mit dem MNO-Netz gemeinsamen Sendefunkinfrastruktur.
- Gesicherte Übertragungsqualität für anspruchsvolle IoT-Datendienste im privaten Slice.
- Lokale User Plane (UPF) zur Anbindung einer Campus Edge Cloud und für lokale Datenhoheit.

Die Geräte des 5G-Campusnetzes sind ebenfalls Teilnehmer des öffentlichen Mobilfunknetzes und benö-

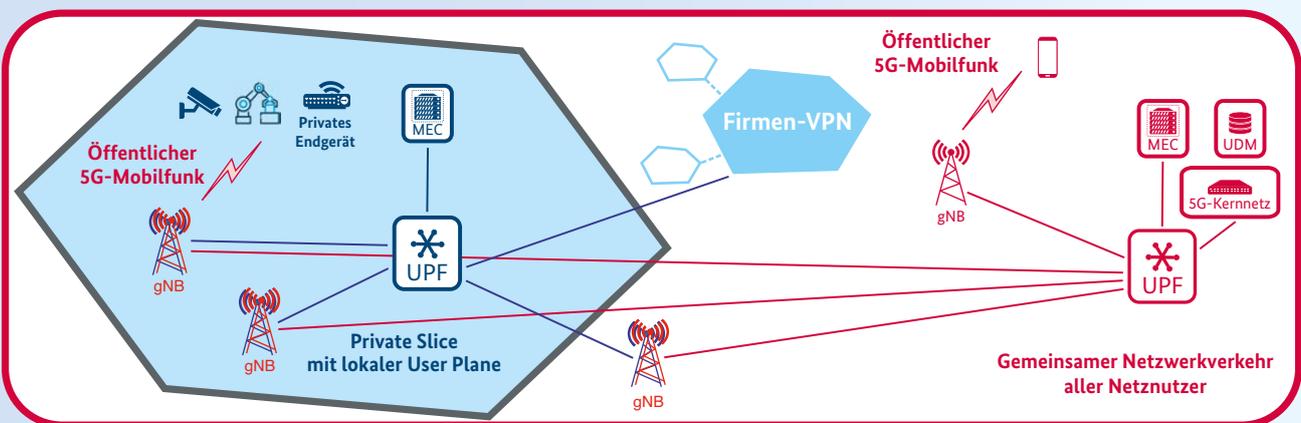
tigen eine SIM (SIM-Karte oder eSIM) des Mobilfunk-anbieters.

4.2.4 Weitere „hybride“ Mischformen und Variationen

Zahlreiche Mischformen zwischen den beiden genannten Betreibermodellen „völlig eigenständig“ und „völlig virtuell“ sind umsetzbar. Ein Beispiel wurde bereits im vorigen Abschnitt vorgestellt. Da der 5G-Core aus zahlreichen Einzelfunktionen besteht, ist es denkbar, auch diese z. T. lokal und z. T. beim MNO zu betreiben. Ein Beispiel hierfür ist das Zugriffsmanagement (UDM).

Hybride 5G-Campusnetze werden in der Regel von großen MNOs zur Verfügung gestellt. Sie bestehen aus Anlagen vor Ort, aber auch externen 5G-Core-Netzen in Rechenzentren, die je nach Aufteilung den Daten-

Abbildung 8: Einsatzszenario mit lokaler UPF und MEC (lokale User Plane)



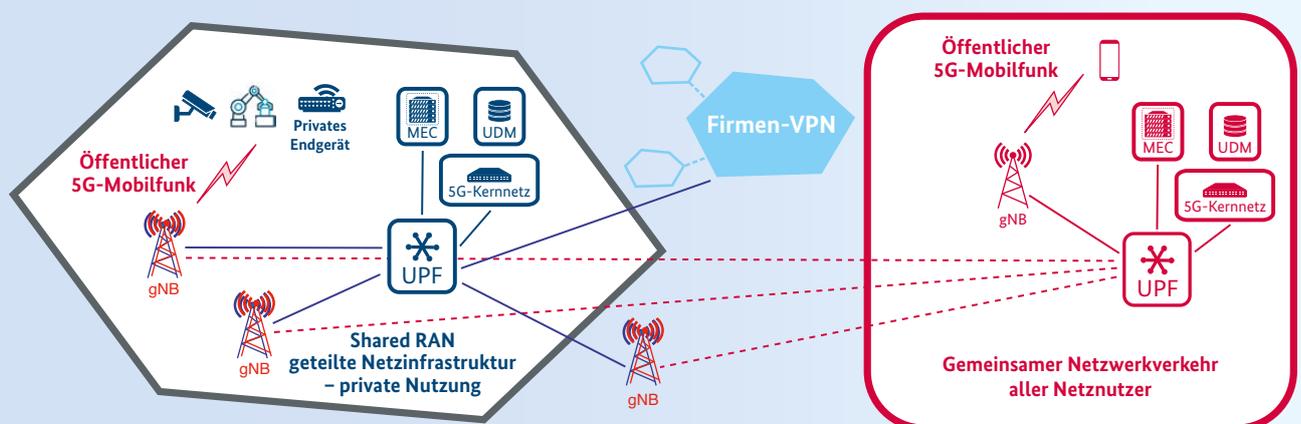
Quelle: IC4F-Konsortium

verkehr und/oder Netzsteuerungsverkehr managen. Diese Anlagen verbinden die Vorteile des örtlichen 5G-Campusnetzes (eine völlig eigenständige Kommunikationsinfrastruktur) mit dem Komfort eines extern gemanagten Systems. Sowohl das lokale 5G-Frequenzband wie beim Eigenbetrieb als auch die Frequenzen des MNO können verwendet werden, je nach Grad und Art der hybriden Variante. Die Lösungen sind aber frei skalierbar und können somit für jeden Anwendungsbereich verwendet werden. Die Sicherheitsanforderungen bzgl. Kommunikations- und Datensicherheit müssen mit dem MNO abgestimmt werden, sodass bei Bedarf auch ein produktionsrelevanter Betrieb ermöglicht wird. Exemplarisch werden im Folgenden zwei fundamental gegensätzliche Varianten vorgestellt, das RAN-Sharing-Modell und das Small-Cell-Gateway-Modell.

Das **RAN-Sharing-Modell** ist ein hybrides Einsatzszenario, bei dem nur die Sendeinfrastruktur (RAN) entsprechend den 3GPP-Spezifikationen gemeinsam von 5G-Campusnetz und dem öffentlichen Mobilfunknetz des MNO genutzt werden. Alle anderen Elemente und Funktionen sind separat. Alle Nutzerdaten des 5G-Campusnetzes bleiben innerhalb des Campus, öffentliche Anwendungen können über das öffentliche Mobilfunknetz oder lokal ausgekoppelt werden (siehe Abbildung 9).

Es ist möglich, zusätzliche Basisstationen im 5G-Campusnetz einzurichten, die ausschließlich für die Nutzer des 5G-Campusnetzes zur Verfügung stehen. In den wesentlichen Punkten ist dieses Einsatzszenario mit RAN-Sharing dem eines separaten 5G-Campusnetzes sehr ähnlich (siehe Abschnitt 4.2.1). Die Datenflüsse sowie die Steuerung und Management des 5G-Campusnetzes inkl. der Endgeräte bleiben in der Hand des

Abbildung 9: Hybrides Einsatzszenario als separates 5G-Campusnetz mit Shared RAN



Campusbetreibers und lokal. Durch das RAN-Sharing ist eine effizientere Nutzung der Basisstationen möglich, allerdings ist auch die Separierung nicht mehr so strikt. Eine Vereinbarung zum RAN-Sharing mit dem entsprechenden MNO ist unerlässlich.

Das **Small-Cell-Gateway-Modell** (siehe Abbildung 10) ist eine weitere hybride Einsatzvariante, die eine einfache 5G-Campusnetz-Implementierung basierend auf kleinen Funkzellen (Small Cells) ermöglicht. Small Cells sind mit kleinen 5G-Basisstationen (gNBs) ausgerüstet, die von der Leistungsfähigkeit und dem Formfaktor eher WLAN-Zugangspunkten ähneln. In diesem Fall kann der Campusbetreiber selbständig das Funknetz variieren, während das 5G-Core-Netz, die Einbindung der Endgeräte und die Rechenkapazitäten von einem MNO bereitgestellt werden. Für die Installation eines solchen 5G-Netzes bedarf es vor Ort nur einer geeigneten (LAN-) Netzinfrastruktur.

4.2.5 Abwägung und Gegenüberstellung

Ganz offensichtlich ist die Umsetzung eines vollständig eigenständigen 5G-Campusnetzes mit einem höheren eigenen Aufwand verbunden, als ein solches als „Managed Service“ über eine bestehende Infrastruktur (dem 5G-Netz des MNO) einzukaufen. Aber auch bzgl. anderer Kriterien, z. B. Laufzeiten und Latenzzeiten, haben die Varianten mit Vor-Ort-Core-Komponenten deutliche Vorteile. Wenig überraschend ist ein Abwägen zwischen Komplexität (für den Campusbetreiber) und der Realisierungsdauer und dem Betriebsaufwand nötig. Die nachfolgende Tabelle 2 führt für eine Reihe von Kriterien schematisch auf, wo die einzelnen Varianten Vor- und Nachteile haben.

Da die einzelnen Kriterien nicht einfach gegeneinander zu gewichten sind, ist eine ausgiebige Anforderung

Abbildung 10: Small-Cell-Gateway-Modell mit lokaler 5G-Frequenz, ausgelagertem 5G-Core-Netz und Datenverarbeitung

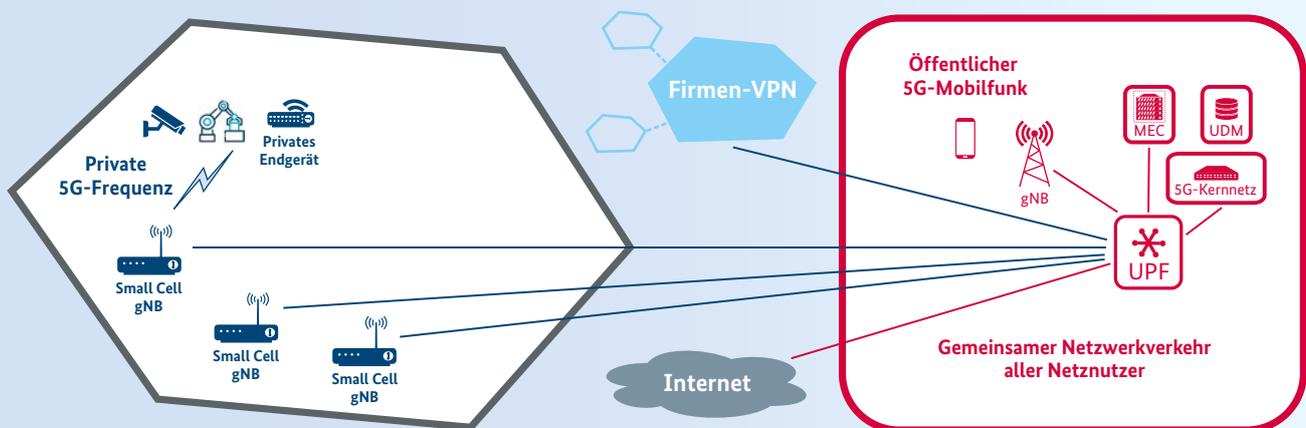


Tabelle 2: Vereinfachte Bewertung der verschiedenen Einsatzszenarien

	Separates Netz/ Eigenbetrieb	Virtual Slice	Slice mit lokaler User Plane	Hybrid
Kriterien	dediziertes, eigenständiges 5G-Campusnetz (4.2.1)	5G-Campusnetz innerhalb des öffentlichen Netzes eines MNO (4.2.2)	5G-Campusnetz mit lokaler User Plane und Netzelementen innerhalb des öffentlichen Netzes eines MNO (4.2.3)	Kombination aus lokalen (Eigenverantwortung) und durch MNO bereitgestellten Komponenten und Services (4.2.4) Varianten: Shared RAN/Small Cells
Umsetzungsdauer	-	+	o	o / o
Aufbaukosten	hoch	gering	gering bis mittel	mittel / mittel
Personalkompetenz beim Campusbetreiber	hoch	gering	mittel	mittel / gering
Datenhoheit	++	o	+	+ / o
Netz-Sicherheit	hoch	hoch	hoch	hoch / hoch
Sicherheitszertifikate	flexibel: branchenübliche (non-3GPP) oder SIM	SIM (SIM-Karte oder eSIM)	SIM (SIM-Karte oder eSIM)	SIM (SIM-Karte oder eSIM)
langfristig betreibbar (>10 Jahre)	++	+	+	+ / +
flexibel anpassbar (räumlich, kapazitiv, technisch)	++	-	o	o / +
Robustheit (Außen- und Innenstörungen)	+	+	o	o / +
hochverfügbar auslegbar	++	o	+	o / o
für hoch zeitkritische Anwendungen (TSN) auslegbar	++	o	++	+ / o
Monitoring- und Diagnose-Möglichkeiten für Campusbetreiber	++	-	-	o / o
kommerziell verfügbar	2020	2020	2021	2022+ / 2022+

rungsanalyse (auf Basis einer Analyse der geplanten Anwendungsfälle) ein wichtiger Schritt zur Identifikation der am besten geeigneten Lösung. Ferner ist wichtig, den benötigten Grad an Datensicherheit bei Übermittlung und Speicherung von geschäftsrelevanten Daten festzulegen. Nicht zu vernachlässigen sind darüber hinaus die Aufwände beim Campusbetreiber und potenziellen 5G-Campusnetzbetreiber für die Implementierung und den Betrieb eines solchen Netzes.

Als Auswahlhilfe gibt [6] die folgende, durchaus erweiterbare Liste an Fragen, die jeder potenzielle Anwender von 5G-Campusnetzen für sich beantworten sollte:

1. Was ist die maximale, akzeptable Umlaufzeit meiner Daten?
2. Ist es vertretbar, dass betriebsrelevante Daten den Campus bzw. die eigene IT-Umgebung verlassen (also durch einen externen Netzbetreiber verwaltet werden)?
3. Ist es vertretbar, dass externe Dienstleister wie ein externer Netzbetreiber Anzahl und Ort meiner Geräte kennen (selbst wenn die Daten auf dem Campus bzw. in der eigenen IT-Umgebung bleiben)?
4. Wird Konnektivität für die Geräte nur auf dem Campus (und der unmittelbaren Umgebung) benötigt, oder auch darüber hinaus, z. B. in Straßenfahrzeugen, Zügen, in anderen Ländern oder sogar weltweit, in Kundenniederlassungen usw.?
5. Sind die finanziellen und personellen Mittel vorhanden, um ein 5G-Campusnetz im Eigenbetrieb zu bauen und zu betreiben, oder alternativ das 5G-Campusnetz als eine Art Service einzukaufen?

6. Können entsprechende Garantien für die Dienstgüte (QoS) verbindlich festgehalten und umgesetzt werden (Service Level Agreements, Transparenz im Netzbetrieb), damit die Ende-zu-Ende-Dienstgüteanforderungen über alle Netzelemente (Funkstrecke, Netzknoten, Kommunikationsverbindungen etc.) eingehalten werden?

Es ist also immer die Frage des Warum zu beantworten. Neben offensichtlichen kommunikationstechnischen Gründen können hierbei Technologieerwerb und Marktdruck eine Rolle spielen. Bei Lieferanten kann es durchaus wesentlich sein, dass Produkte beim Kunden zukünftig 5G-fähig sind – immerhin planen schon heute knapp 50 % der Mitglieder des VDMA einen langfristigen Einstieg in die 5G-Technologie. Dadurch wären umfangreiche Tests im eigenen Hause möglich. Gibt es keinen zwingenden Grund für 5G-Technologien, ist auch durchaus zu erwägen, den Einsatz von 5G abzuwarten. Insbesondere ist es wichtig, daran zu denken, dass noch nicht alle industrierelevanten Releases auf dem Markt sind und die Kosten der Komponenten mit der Zeit sinken werden. Wenn keine eigene 5G-Expertise im Hause vorliegt, empfiehlt es sich, mit entsprechenden Partnern zu starten. Bei der Kosten-Nutzen-Analyse ist zudem zu berücksichtigen, dass die Folgekosten von 5G höher sein werden als zum Beispiel bei WLAN.

4.3 Aufbau und Betrieb von 5G-Campusnetzen

5G-Campusnetze sind in der Einführung, Umsetzung und im Betrieb einem komplexen IT-System recht ähnlich. In der nachfolgenden Tabelle 3 sind erforderliche Aufgaben und Aufwandstreiber für den Campusbetreiber (oder einem von ihm beauftragten Dienstleister) benannt. Die beim MNO anfallenden Aufgaben bleiben hier unberücksichtigt.

Tabelle 3: Aufgaben zum Aufbau und Betrieb beim Campusbetreiber

	Separates Netz/Eigenbetrieb	Virtual Slice	Slice mit lokaler User Plane	Hybrid
Aufwandstreiber	dediziertes, eigenständiges 5G-Campusnetz (4.2.1)	5G-Campusnetz innerhalb des öffentlichen Netzes eines MNO (4.2.2)	5G-Campusnetz mit lokaler User Plane und Netzelementen innerhalb des öffentlichen Netzes eines MNO (4.2.3)	Kombination aus lokalen (Eigenverantwortung) und durch MNO bereitgestellten Komponenten und Services (4.2.4) Varianten*: Shared RAN / Small Cells
Anwendungsidentifizierung	Beschreibung der (Schlüssel-) Anwendungen inkl. ihrer qualitativen, räumlichen und sicherheitsrelevanten Anforderungen und der zu erwartenden Verkehrsmengen			
Machbarkeitsprüfung	räumliche, rechtliche, organisatorische Anforderungen	räumliche, technische und integratorische Anforderungen	räumliche und integratorische Anforderungen an MNO und IT	räumliche, rechtliche und integratorische Anforderungen
Rechtliche Voraussetzungen (Lizenzwerb)	Erwerb Campuslizenz, Nachweis Fachkunde und Pflichten	keine	keine	ggf. Erwerb Campuslizenz, Nachweis Fachkunde und Pflichten
Vertragliche Voraussetzungen	bei Eigenbetrieb: keine bei Betrieb durch Dienstleister: Vertrag mit Dienstleister	(standardisiertes) Service Level Agreement mit MNO, Service-Vertrag, Monitoring-Vereinbarung	Service Level Agreement mit MNO, Service-Vertrag	Service Level Agreement mit MNO, Service-Vertrag, Monitoring-Vereinbarung
Netzplanung	Funknetz, Infrastruktur, Servicearchitektur	Einbindung lokaler Systeme, Zuarbeit für Netzplanung MNO	Ein- und Anbindung lokaler Systeme und 5G-Komponenten, Zuarbeit für Netzplanung MNO	Funknetz, Infrastruktur, Einbindung lokaler Systeme
Installation und Inbetriebnahme	Vortests und -abnahmen, Installation Systeme und Infrastruktur, Dienstleistungsführung	Dienstleistungsführung	Installation Systeme und Infrastruktur, Dienstleistungsführung	Vortests und -abnahmen Funknetz, Dienstleistungsführung
Integration in Firmen-IT	Dienste- und Rechtmanagement, Security	Rechtmanagement, Dienstanbindung	Dienste- und Rechtmanagement, Security	Rechtmanagement, Dienstanbindung
Betrieb	direkter Zugriff auf vollständiges FCAPS-Management und Service-Monitoring	nur SLA-Monitoring	SLA-Monitoring und Betrieb lokaler 5G-Komponenten	Betrieb und Monitoring Funknetz
Support	direkter Zugriff auf Vor-Ort 1st und 2nd Level Mobilfunk und Services	Standard IT-Support, externer Dienstleister	2nd Level Services und 5G-Core, Standard IT-Support, externer Dienstleister	Standard IT- und LAN-Support, externer Dienstleister

* die unterschiedlichen Hybridvarianten haben unterschiedliche Ausprägungen

Die einzelnen Schritte werden in folgenden Kapiteln erläutert.

4.3.1 Anwendungsidentifizierung

Die Beschreibung der (Schlüssel-) Anwendungen inkl. ihrer qualitativen, räumlichen und sicherheitsrelevanten Anforderungen sowie der zu erwartenden Verkehrsmengen ist der erste und notwendige Schritt, um zu einer Entscheidungsgrundlage für eine geeignete 5G-Campusnetzvariante zu kommen. In Kapitel 3 wurden einige relevante Anwendungsszenarien beschrieben. Die eigentlichen Anwendungen der Anwendungsfälle im Sinne dieses Abschnittes (z. B. die Überwachung und Steuerung einer Produktionseinheit) sind zu identifizieren und so weit wie möglich zu charakterisieren (einige Beispiele für Parameter sind zulässige Latenzzeiten, Fehlerempfindlichkeit, Verfügbarkeit, Robustheit, Verkehrsaufkommen und -art, Datensicherheit).

4.3.2 Machbarkeitsprüfung

Der Einsatz einer neuen Kommunikationstechnologie in einem Unternehmen bedarf grundsätzlich einer genauen betriebswirtschaftlichen und technischen Prüfung. In der Regel trifft man nicht auf ein Greenfield-Szenario, bei dem deutlich einfacher geplant werden kann, sondern man muss die bestehenden Infrastrukturen einbinden.

Die Überlegungen zur Vereinheitlichung der Technologie liegen daher auf der Hand und werden von 5G maßgeblich beeinflusst. Bei der Abschätzung, ob der Betrieb eines 5G-Campusnetzes sinnvoll ist, spielen eine umfangreiche Kosten-Nutzen- sowie eine Standortanalyse eine wesentliche Rolle. Dieses ist Gegenstand der Machbarkeitsprüfung, die zu klären hat, ob die rechtlichen, zeitlichen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für die angestrebte 5G-Campusnetzvariante erfüllbar sind:

- **Räumliche Anforderungen:** Die Prüfung umfasst Vor-Ort-Bedingungen, die sowohl äußere Bedingungen (Platz, Temperaturen, Feuchtigkeit, Topografie, Bebauung usw.) als auch innere Bedin-

gungen (grundsätzliche Montagemöglichkeiten, Betriebsräume usw.) umfasst.

- **Rechtliche Anforderungen:** Die Nutzung von 5G-Technologie für die angestrebten Anwendungen muss geprüft werden (Sicherheit und Robustheit, erforderliche Zertifizierungen, Arbeitsschutz, Funklizenz).
- **Organisatorische Anforderungen:** Die Umstellung von Prozessen wie auch die Bereitstellung von Personal und der Aufbau internen Know-hows müssen geklärt werden.
- **Integratorische Anforderungen:** Die Anbindungen von Systemen der Mobilfunkbetreiber (MNO) wie auch der internen IT und existierender industrieller Kommunikationsnetze bergen z. T. sehr komplexe Herausforderungen, um den Ansprüchen an Laufzeit, Verfügbarkeit, Verlässlichkeit und Sicherheit gerecht zu werden.

Ferner ist zu beachten, welche Bedeutung die abzudeckenden Bereiche haben. Sind die Systeme produktionsrelevant, kann der Ausfall des 5G-Campusnetzes zum Produktionsstillstand führen. Hier muss in der Regel über redundante Systeme nachgedacht werden, die natürlich höhere Hardwarekosten nach sich ziehen. Neben den funktechnischen Einrichtungen auf dem Betriebsgelände muss auch die Versorgung der Anlagen und Systeme mit 5G-Modulen sichergestellt sein. Hier wird sich die Palette der angebotenen Systeme in den nächsten Jahren deutlich erhöhen.

4.3.3 Rechtliche Voraussetzungen (Lizenzwerb)

Sofern eine eigene lokale Funkfrequenz erworben werden soll (siehe auch 2.2), müssen die Rahmenbedingungen im Hinblick auf Notwendigkeit und Verfügbarkeit nachgewiesen werden [2]. Es ist davon auszugehen, dass es nicht immer möglich sein wird, Spektrum im gewünschten Umfang an der gewünschten Stelle zu erwerben. Für das Antragsverfahren steht beispielsweise ein Online-Tool bereit [22], das die Antragstellung bei der BNetzA vereinfacht. Mit

der Antragstellung und mit dem Erwerb sind zudem Nachweispflichten gegenüber der BNetzA verbunden, die den sachgemäßen Einsatz des Spektrums sicherstellen sollen [2].

4.3.4 Vertragliche Voraussetzungen

Werden Aufbau und/oder Betrieb des 5G-Campusnetzes an Dritte übertragen, müssen Leistungen, Qualität, Fristen usw. vertraglich vereinbart werden. Bei separaten Netzen kann das Drittanbieter für Aufbau und Betrieb betreffen, falls das 5G-Campusnetz nicht selbst betrieben wird. Ist das 5G-Campusnetz teilweise oder ganz im Mobilfunknetz realisiert, müssen mit dem MNO Service Level Agreements (SLAs) über die vereinbarte Dienstgüte der 5G-Kommunikation und deren Monitoring-Möglichkeiten durch den 5G-Campusnetzbetreiber vereinbart sowie Haftungsfragen geklärt werden. SLAs liegen oft in standardisierter Form vor. Entsprechende Service-Verträge auf verschiedenen Stufen regeln zum Beispiel Reaktionszeiten bei Kommunikationsausfällen, die bei betriebsrelevanten Prozessen hohe finanzielle Konsequenzen haben können. Die zu vereinbarenden SLAs orientieren sich dabei wiederum an den vorab bestimmten Anwendungsanforderungen. Sie müssen so formuliert werden, dass eine Verletzung der Anforderungen der Anwendungen schnell erkannt sowie nachweisbar festgehalten wird und die Verantwortlichkeiten eindeutig festgelegt sind.

4.3.5 Netzplanung

Die Netzplanung umfasst neben der reinen Planung der Funkausbreitung, die ein empfindlicher Punkt für die Bereitstellung eines verlässlichen Dienstes darstellt, zahlreiche Aufgaben der Anbindungsplanung, Netzdimensionierung und Integration mit existierenden Netzen. Das Ergebnis der Netzplanung ist ein „Bauplan“, der ohne weitere Detailplanungen in die Implementierung überführt werden kann. Dieser Bauplan umfasst mindestens die folgenden Aspekte:

- **Funknetz:** Die erforderliche funktechnische Ausleuchtung hängt maßgeblich von den zu bedienenden Anwendungen und der Umgebung bzw.

Einrichtung ab. Sollen große Datenmengen bewegt werden, ist ein dichter Netzplan erforderlich. Geht es um vergleichsweise wenige Sensordaten, die aber zeitkritisch sind, sind Störungen der Funkfrequenzen mit hoher Zuverlässigkeit zu vermeiden. Auch die Umgebung (Pflanzenbewuchs, Gebäude) und die Einrichtung innerhalb von Hallen und Gebäuden (Sichtkontakt, viele Metallregale usw.) spielen eine Rolle. Bei benachbarten 5G-Campusnetzen mit lokaler Funklizenz müssen Betreiber-Absprachen beachtet werden.

- **Infrastruktur/Einbindung lokaler Systeme:** Die Infrastruktur-Planung umfasst die physischen und logischen Voraussetzungen zur Einbindung der 5G-Komponenten (z. B. der gNBs und Antennen), d. h. insbesondere auch die Elektro- und Kabelnetzplanung (Sicherheit, Brandschutz, Dimensionierung, Router und Switches) und die physikalische Härtung (mechanische Robustheit, Temperaturbereiche, Feuchtigkeit).
- **Anbindung und Einbindung lokaler Systeme:** Das 5G-Campusnetz muss – solange es nicht als isoliertes 5G-Netz betrieben wird – über eine ausreichend geeignete Anbindung nach außen (beispielsweise zum 5G-Core des MNO) verfügen. Durch die hohe Leistungsfähigkeit der 5G-Komponenten kann nun die Anbindung zum Flaschenhals werden, wenn sie nicht ausreichend die QoS-Mechanismen unterstützt oder bzgl. Dimensionierung oder Redundanz nicht ausreicht. Lokale Systeme (sowohl die lokalen 5G-Komponenten als auch z. B. Anwendungsserver oder Datenbanken) bedürfen insbesondere der ausreichenden Anbindung, da die 5G-Versprechen (geringe Latenzen, hohe Durchsätze, hohe Verfügbarkeit) sonst nicht ausgespielt werden können. Tatsächlich ist auch hier die initiale Anforderungsklä rung von immenser Bedeutung, da eine Überdimensionierung zu erheblich überhöhten Kosten führt. Selbstverständlich sind auch sicherheitskritische Aspekte zu berücksichtigen, eine sicherheitstechnische Härtung aller Systeme muss bereits in der Netzplanung berücksichtigt sein.

- **Service-Architektur:** Das 5G-Campusnetz kann auch der Bereitstellung von Diensten dienen. 5G verfügt über eine serviceorientierte Architektur. Es ist daher in der Netzplanung über die reine Anbindungsplanung hinausgehend festzulegen, wie und vor allem wo Dienste ihre Berechnungen durchführen und wie die Zielsysteme (z.B. Datenbanken, Produktionssysteme) anzusprechen sind.

4.3.6 Netz-Installation und Inbetriebnahme

Ein 5G-Campusnetz ist – sofern es nicht z.B. als „Turn-key“ von einem MNO oder Drittanbieter bereitgestellt wird – weit entfernt von einem „Plug-and-Play“-Netz. Derzeitige 5G-Campusnetze – sofern überhaupt schon erhältlich – sind noch sehr früh im Produktzyklus, d.h. dass im Aufbau und der Implementierung viele Anpassungen erforderlich sind.

- **Vortests und -abnahmen:** Wegen der geringen Erfahrungstiefe mit 5G-Systemen empfiehlt sich unbedingt eine so früh wie möglich umzusetzende Vorab-Testphase im kleinen Umfang. Auch bei „Turn-key“-Angeboten und leichtgewichtigen Varianten (etwa den oben diskutierten weiteren Hybrid-Lösungen) sind diese Vorlaufzeiten einzuplanen.
- **Installation der Systeme und Infrastruktur:** Bei der Montage und Ersteinrichtung von Infrastruktur und Systemen lässt sich auf umfangreiche Erfahrung zurückgreifen – oft auch im eigenen Hause. Das zeitliche Risiko ist bei gründlicher Planung daher gering. Befindet sich das 5G-Campusnetz teilweise oder ganz im Mobilfunknetz, müssen die SIMs (SIM-Karte oder eSIM) des Mobilfunkproviders installiert bzw. konfiguriert werden.
- **Diensteinführung:** Die reichhaltigen Möglichkeiten, die 5G bietet, bedeuten eine neue und zusätzliche Komplexität. Soll insbesondere von Leistungsmerkmalen wie MEC (Mobile Edge Cloud) Gebrauch gemacht werden, so birgt dies wegen der Neuheit dieser Möglichkeiten ein hohes zeitliches Risiko. Die Einbindung der Anwendungen

ist darüber hinaus in der Regel mit prozesstechnischen Änderungen verknüpft und auch als solche eine zeitliche und inhaltliche Herausforderung. Umfangreiches anwendungsfallspezifisches Testen ist daher unbedingt erforderlich.

4.3.7 Integration in die Firmen-IT-Infrastruktur

Das 5G-Campusnetz wird ein Teil der Firmen-IT-Infrastruktur bzw. der bisherigen industriellen Kommunikationsnetze. Insbesondere das Rechte- und Dienste-Management und die Sicherheit des 5G-Netzes bedürfen der engen Abstimmung mit der vorhandenen Systemlandschaft. Das Rechte-Management umfasst die Einbindung neuer und vorhandener Netznutzer und findet seitens des 5G-Netzes seinen Ausdruck im UDM (Unified Data Management). Dazu sind Provisionierungs-Schnittstellen in der Firmen-IT und im 5G-Netz vorzusehen.

Für das Dienste-Management, einschließlich der Kommunikationsdienste, bieten 5G-Campusnetze verschiedene Möglichkeiten, insbesondere können bestimmten Diensten höhere oder niedrigere Prioritäten eingeräumt werden. Die dazu erforderliche Definition und Verwaltung der (Kommunikations-) Dienste und Regeln (Start, Konfiguration, Modifikation, Beendigung) sowie ihrer Provisionierung in das 5G-Campusnetz bedarf der Anbindung an die vorhandene Firmen-IT.

4.3.8 Betrieb

Werden über das 5G-Campusnetz unternehmenskritische Anwendungen ermöglicht, so bedarf es eines umfangreichen Netzbetriebs:

- **Vollständiges FCAPS-Management und Service-Monitoring:** Für das Netzmanagement von 5G-Campusnetzen sind die Aspekte des Fault-, Configuration-, Accounting-, Performance- und Security- (FCAPS-) Managements zu betrachten. Hiermit sind Betreiber umfangreicher IT-Infrastrukturen in der Regel bereits vertraut, und so stellt das 5G-Campusnetz ggf. nur eine weitere Komponente in der Gesamtfirmeninfrastruktur

dar. Neu sind jedoch die spezifischen (Mobilfunk-) Herausforderungen und die zur Anwendung kommenden Protokolle. Bei Nutzung der Leistungsmerkmale von MEC (Mobile Edge Cloud) kommen für die Überwachung dieser verteilten Cloud-Struktur neue Aufgaben hinzu, die zudem eine hohe Aufmerksamkeit aufgrund des hohen Leistungsversprechens bedürfen.

- **SLA-Monitoring:** Wird das 5G-Campusnetz mit Hilfe von Dienstleistern, insbesondere über die MNOs, realisiert, werden zur Sicherstellung der Leistungsanforderungen Service Level Agreements (SLA) abgeschlossen. Das SLA-Monitoring hat nun lediglich zu überwachen, ob die SLAs tatsächlich eingehalten werden, es muss zudem vorab bereitgelegte Strategien (z. B. Produktions-Stopp) anwenden können, wenn die SLAs einmal nicht eingehalten werden. Das SLA-Monitoring geht in der Regel nicht über eine reine Überwachung hinaus, Fehlersuche und -behebung sind ebenfalls Aufgaben des Dienstleisters.
- **Betrieb lokaler 5G-Komponenten:** Lokale 5G-Komponenten, insbesondere die lokale UPF, können vom Campusbetreiber oder von einem Dienstleister betrieben werden. Bei diesen Komponenten handelt es sich um zeitkritische und datensicherheitsrelevante Systemkomponenten, die einer entsprechend hohen Aufmerksamkeit bedürfen.
- **Betrieb und Monitoring Funknetz:** Wird im Fall eines Hybrid-Netzes nur ein Funknetz aus Small Cells vor Ort aufgebaut, die aber beim Dienstleister (MNO) angebunden sind, so ist der Betrieb dieses lokalen Funknetzes vergleichbar mit dem Betrieb eines lokalen WLAN-Netzes. Dies bedeutet, dass hier meist ein pragmatischer Betriebsansatz zum Einsatz kommt, der die ausgefallenen Komponenten eher ersetzt, als sie aufwändig zu untersuchen.
- **Wartung/Netzanpassungen und -erweiterungen:** Unabhängig davon, ob das 5G-Campusnetz im Eigenbetrieb oder über Dienstleister realisiert wird, bedürfen die eingesetzten System-Komponenten

regelmäßiger Wartung und Aktualisierung. Insbesondere sind sehr hohe Verfügbarkeitszeiten ohne vereinbarte Wartungsslots nur dann zu erreichen, wenn die Systeme hochredundant ausgelegt sind. Sollte dies aus Kosten- oder Komplexitätsgründen nicht gewünscht oder möglich sein, sind regelmäßige Wartungsintervalle vorzusehen.

4.3.9 Support

Während sich der Betriebsaspekt um die Leistungsfähigkeit der Infrastruktur kümmert, stehen für den Support die (menschlichen) Nutzer im Vordergrund. Er umfasst die Anwenderbetreuung (inkl. Hotline und Trainings), den On-Site-Service sowie die Entstörung, d. h. die tieferegehende Fehleranalyse und -behebung. Dies ist insbesondere dort wichtig, wo Kommunikationsausfälle zu hohem Aufwand und finanziellen Kosten führen (z. B. Anhalten von Maschinen und Unterbrechen von Prozessen). Wird das 5G-Campusnetz über Dienstleister realisiert, werden diese in der Regel auch den Support bereitstellen. Die in Tabelle 3 genannten Support-Varianten „Vor-Ort 1st und 2nd Level Mobilfunk und Services“, „2nd Level Services und 5G-Core“ und „Standard IT- und LAN-Support“ stellen daher eine unterschiedliche Tiefe des Supports da.

4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden verschiedene Betreibermodelle für 5G-Campusnetze und die damit verbundenen Technologie-Architekturen und -Bausteine vorgestellt. Auf dieser Grundlage wurden Kriterien zum Aufbau und Betrieb von 5G-Campusnetzen zusammengestellt. Wichtig anzumerken ist, dass es zunächst im Interesse jedes Unternehmens liegt, die eigenen Anwendungsfälle für eine Vernetzung zu identifizieren und daraus die Anforderungen zu analysieren. Die Tabellen 2 und 3 geben darauf aufbauend entscheidende und objektive Hinweise an jedes Unternehmen für eine potenziell passende Ausprägung ihres 5G-Campusnetzes.

5 Ausblick und weitere Entwicklung



5.1 Internationale 3GPP-Standardisierung und -Regulierung

Für Unternehmen, die 5G-Campusnetze einführen wollen, haben Standards und Normen große Bedeutung. Die internationale Standardisierung von 5G-Mobilfunknetzen erfolgt in der 3GPP (3rd Generation Partnership Project). Die 3GPP spezifiziert Standards für Netzinfrastruktur und Endgeräte sowie die Anforderungen daran. Für Europa ist das ETSI (European Telecommunications Standards Institute) mit seinen Mitgliedern in 3GPP vertreten. In Bezug auf Spektrum bzw. Frequenzen zur Funkübertragung werden Rahmenbedingungen und Empfehlungen der ITU (International Telecommunication Union) durch die nationalen Regulierungsbehörden umgesetzt (BNetzA in Deutschland). Seit dem 3GPP-Release 16 sind die sogenannten vertikalen Nutzer stark im Fokus der 3GPP-5G-Standardisierung. Die technischen Spezifikationen werden in verschiedenen Arbeitsgruppen entwickelt.

Die Services-Arbeitsgruppe (3GPP SA1) betrachtet 5G-Anwendungsfälle und 5G-Anforderungen für Anwendungen mit anspruchsvollen Kommunikationsanforderungen mit sehr geringer Latenz und sehr hoher Verfügbarkeit (Work Items zu „Communication in Automation for Vertical Domains (CAV)“, FS_CAV, cyberCAV, (FS)_eCAV). Darunter fallen Anforderungen aus Sicht der Industrie- und der Energieautomation (Dokumente TS 22.104, TS 22.261, TR 22.804, TR 22.832). Auch die Anforderungen für Non-Public Networks, die Grundlage für 5G-Campusnetze, wurden hier formuliert (TS 22.261). Weitere wichtige vertikale Anwendungen kommen aus dem medizinischen Bereich (TR 22.826) und aus der Medienbranche (TS 22.263, TR 22.827).

Die Architektur-Arbeitsgruppe (3GPP SA2) bearbeitet diese Themen in den Work-Item-Familien LAN für vertikale Industrien (Vertical_LAN), industrielle Anwendungen von IoT (IIoT), nicht-öffentliche Netze

(NPN) und Anwendungen höchster Zuverlässigkeit und geringer Latenz (URLLC). Hier wurden auch die Konzepte für Stand-Alone Non-Public Networks (SNPN) und Public Network Integrated Non-Public Networks (PNI-NPN) spezifiziert. Darauf beziehen sich die in dieser Leitlinie vorgestellten unterschiedlichen Betreibermodelle.

Entsprechende Work-Item-Familien finden sich auch in vielen weiteren 3GPP-Arbeitsgruppen, wie der Security-Arbeitsgruppe (3GPP SA3) und den Arbeitsgruppen für das Funknetz (3GPP RANx) sowie für das Core-Netz und die Endgeräte (3GPP CTx).

Die ITU entwickelt und koordiniert seit mehr als 30 Jahren die internationalen Frequenz-Anordnungen im Mobilfunk. Die ITU koordiniert hierzu mit den nationalen Regulierungsbehörden die Zuordnung und Harmonisierung. Für 5G sind derzeit mit nur wenigen Abweichungen drei Frequenzbereiche von hohem Interesse. Die Abbildung 11 gibt einen Überblick für ausgewählte Länder weltweit. Die Zuordnung, Festlegung und internationale Harmonisierung von Frequenzbereichen gibt Herstellern von Endgeräten und Netzinfrastruktur Planungssicherheit für das Produkt-Design, weltweite Einsatzmöglichkeiten und erlaubt den Mobilfunknutzern außerdem internationales Roaming. Dies bedeutet, mit einem bestimmten Endgerät kann ein Nutzer auch in ausländischen Netzen 5G-Dienste anfordern. Unternehmen mit Campusnetzen in verschiedenen Ländern können diese verbinden und Endgeräte u. U. übergreifend nutzen.

Drei Frequenzbereiche bilden sich international:

- **Niedrige Frequenzlage:** Im Bereich 600 MHz in Nordamerika und 700 MHz in europäischen Ländern.
- **Mittlere Frequenzlage im Bereich 3.6 GHz:** Der Bereich 3,4 bis 3,7 GHz wurde in Deutschland im Jahre 2019 in einer Auktion versteigert. Der Bereich 3,7 bis 3,8 GHz ist in einem Zuteilungsverfahren zu beantragen. Auch in anderen Ländern

wird es eine Zuteilung lokaler Frequenzen geben, z. B. in Großbritannien und Malaysia. Global sind einige Abweichungen zu beobachten, die aufgrund von bestehenden Satelliten- oder Radardiensten einzuhalten sind.

- Hohe Frequenzlage im Bereich 24 bis 28 GHz:**
 Im Bereich um 26 GHz werden in Europa künftig Frequenzen genutzt werden, in einigen Ländern wird über eine lokale Zuteilung noch entschieden. Diese sogenannten Millimeterwellen verfügen nur über vergleichsweise kurze Reichweiten (im Bereich von 200 m), allerdings stehen mehr als 1 GHz an Bandbreite zur Verfügung. Hieraus resultieren für Anwendungen entweder höchste Datenraten oder sehr geringe Latenzzeiten.

Mit der WRC-19 (World Radio Conference 2019) wurden weitere Frequenzbereiche für eine Zuordnung im Mobilfunk beschlossen. Diese sind in noch höheren Frequenzbereichen, d. h. oberhalb von 30 GHz, angeordnet. Die nationalen Regulierungsbehörden haben damit eine Empfehlung für ihren nationalen Frequenzplan und 3GPP kann in den kommenden Planungen und Releases über technische Spezifikationen entscheiden.

5.2 Ausblick auf 3GPP-Releases

Aufgrund der Vielzahl der zu behandelnden Anwendungsfälle sowie durch das neu zu vereinbarende globale Frequenzspektrum gestaltete sich die Normung

Abbildung 11: Globaler Blick auf gemeinsame 5G-Frequenzen (bereits zugewiesen und geplant)



Quelle: IC4F-Konsortium

komplex und führte zu einem Standardisierungsprogramm in mehreren Phasen, siehe hierzu auch Abbildung 12:

Die erste Phase konzentriert sich auf die bestehende Core-Architektur EPC und den Einsatz neuer 5G-Funkzugangstechnologien, insbesondere unter Verwendung von Frequenzen unter 6 GHz. Diese Phase (3GPP Release 15) wird auch 5G-Funk über den Dual-Connectivity-Modus mit LTE als Anker einführen (5G NSA) und die Grundlagen für eine eigenständige Option (5G SA) schaffen. Es ist jedoch eine Vorwärtskompatibilität mit dem kommenden 5G-Core sichergestellt und die folgenden Releases sind mit 5G-Phase 1 abwärtskompatibel. Die Anwendungsfälle

fokussieren sich auf den breitbandigen Zugang mit extremen, deutlich höheren Datenraten (eMBB).

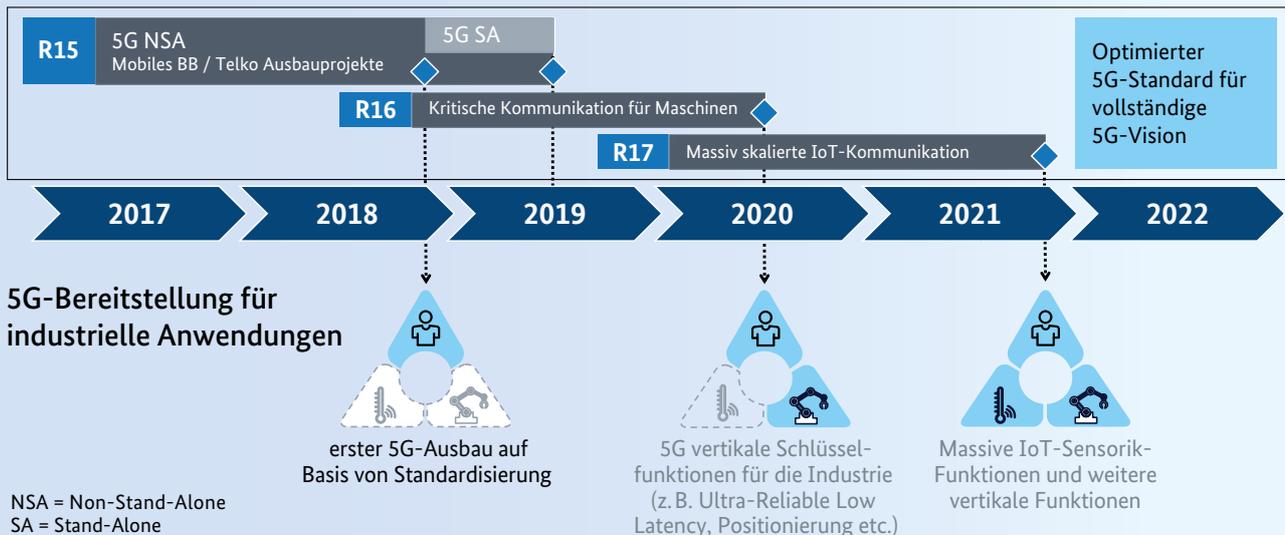
In der Phase 2 mit 3GPP Release 16 werden die Anforderungen an kritische MTC-Anwendungsfälle grundlegend erfüllt, d. h. latenzkritische oder hoch zuverlässige Anwendungsfälle sind berücksichtigt (URLLC) sowie grundlegende Funktionen für echtzeitfähige Anwendungen durch das sogenannte TSN (Time Sensitive Networking) standardisiert. Einige vertikale Lösungen mit ihren jeweiligen Anwendungsfällen werden im Standard unterstützt. Für Campusnetze beschreibt das 3GPP Release 16 auch die Ende-zu-Ende-Lösung für nicht-öffentliche 5G-Netze, d. h. private 5G-Netze.



weitere Informationen auf <https://gsacom.com/>

Abbildung 12: Entwicklung des 3GPP-Standards für 5G-Technologien

Bereitstellung der 5G-Standardisierung



Quelle: 3GPP und Nokia

In der Phase 3 mit 3GPP Release 17 wird der neue 5G-Core auch massive MTC-Anwendungen effizient unterstützen, d. h. eine sehr hoch skalierte Anzahl von IoT-Sensoren und -Aktuatoren mit Maschinen wird mit dem bis dahin entwickelten Ökosystem von Endgeräten im 5G-Funkstandard betreibbar. Die Funktionen für echtzeitfähige Anwendungen durch TSN werden erweitert, sodass Latenzzeiten möglich sind, die bisher nur mit kabelgebundenen Systemen erreichbar waren.

In weiteren Phasen der Standardisierung werden mit 3GPP Release 18 erste Erfahrungen aus kommerziellen Netzen aufgenommen und es werden weitere Ergänzungen zu vertikalen Anforderungen erwartet. Dies betrifft z. B. Anwendungsfälle wie die Funkkommunikation mit und zwischen Fahrzeugen und Fahrzeugkolonnen (Platooning) sowie flexiblere Konzepte für TSN.

5.3 Künftige 5G-Aspekte

Die ersten 5G-Netze nutzen höhere Frequenzen im Vergleich zu 3G oder 4G und so werden Funktionen zur deutlichen Verbesserung der Reichweiten und damit Funkabdeckung untersucht, d. h. insbesondere sehr große Reichweiten im Außenbereich und die funkbasierte Erreichbarkeit tief innerhalb von Gebäuden. Dadurch werden IoT-Dienste genauso wie die nach wie vor wichtigen Sprachdienste zuverlässiger. Weiter befasst sich die Standardisierung mit neuen Frequenzbereichen im Millimeterwellen-Bereich, z. B. die weltweit harmonisierten Frequenzen um 26 GHz, 39 GHz oder auch oberhalb von 66 GHz. Für industrielle IoT-Anwendungsfälle erhalten Endgeräte Beachtung durch die Fortführung einer Studie aus Release 17 zu „NR lite“, d. h. im Prinzip werden Funktionen vereinfacht, es wird die Komplexität der Endgeräte ge-

senkt, um nicht zuletzt auch die Kosten zu reduzieren. Dadurch wird es möglich werden, 4G-basierte Sensornetze nach 5G zu migrieren und die Vorteile der 5G-Technologie im Funksystem ebenso wie in den zentralen Kernnetzfunktionen zu nutzen. Ein wichtiges Standardisierungsthema sind dann auch neue Verfahren der Positionsbestimmung, die die Lokalisierung eines Endgerätes dreidimensional in den cm-Bereich verbessern können.

Dazu kommen Arbeitsbereiche einerseits zum Betrieb von Drohnen (UAV) beziehungsweise Drohnenapplikationen (UDC) und andererseits die Erweiterung der 5G-Netzabdeckung jenseits der terrestrischen Netze. Hierzu werden Systemansätze in verschiedenen Flughöhen betrachtet, z. B. große Höhe (high altitude), Niedriger Orbit (LEO, Low Earth Orbit) oder Hoher Orbit (HEO, High Earth Orbit).

Aus der Implementierung all dieser Aspekte in 5G lassen sich zahlreiche Vorteile für KMU ableiten, welche im Zuge der Campusnetze ausgeschöpft werden können. Darüber hinaus sind Campusnetze aus regulatorischer Sicht technologieneutral ausgelegt. Somit ist es möglich, ergänzende Systeme mit 5G zu integrieren oder bereits vorhandene Systeme in einem Mischbetrieb mit 5G weiter zu nutzen und zu optimieren. Ein Beispiel für solch ein System für den Inselbetrieb innerhalb eines Campusnetzes ist die in IC4F weiterentwickelte UWIN-Technologie zur Echtzeit-Anbindung von Sensoren und Aktuatoren auf Feldebene. Ebenso sind weitere Systeme möglich, welche sich über standardisierte Schnittstellen wie die Non-3GPP Inter-Working Function (N3IWF) mit 5G integrieren lassen.

5G-Campusnetze werden sich durch einen hohen Grad an Komplexität und ein äußerst breites Spektrum an Funktionen auszeichnen. Die Planung, Einrichtung und der Betrieb solcher Netze müssen so weit wie möglich automatisiert werden, denn viele 5G-Campusnetze werden von Institutionen betrieben, die im Gegensatz zu den Netzbetreibern nicht über die notwendige Expertise im Telekommunikationsbereich verfügen (z. B. Schulen, Krankenhäuser, Fabrikbetreiber). Dies ist eine zentrale Herausforderung,

die es zu bewältigen gilt, um die notwendigen Voraussetzungen für einen breiten Einsatz von 5G-Campusnetzen zu schaffen. Dies gilt insbesondere für Anwendungen in der Industrie 4.0, wo Produktionsanpassungen und ständige Veränderungen der Umgebung ein hohes Maß an Anpassungsfähigkeit und Flexibilität erfordern.

Um wichtige Prozesse wie Planung, Konfiguration und Optimierung in 5G-Campusnetzen zuverlässig zu automatisieren oder zu vereinfachen, wird zunehmend Künstliche Intelligenz (KI) zum Einsatz kommen. KI-Methoden sind vielversprechend, weil 5G-Campusnetze immense Datenmengen erzeugen werden, sodass KI-Methoden genutzt werden können, um aus diesen und anderen Daten (z. B. Kontext- oder Produktionsdaten) nützliche Informationen zu extrahieren und gegebenenfalls robuste Entscheidungen auf der Grundlage der extrahierten Informationen zu treffen. Auf diese Weise kann beispielsweise die Effizienz deutlich gesteigert oder die Planung und Konfiguration automatisiert werden. KI wird auch eine Ende-zu-Ende- (E2E-) Vorhersage kritischer Parameter der Dienstgüte (z. B. Datenrate, Latenzzeit) sowie eine proaktive Ressourcenoptimierung und Vernetzung auf der Grundlage dieser Informationen ermöglichen. Viele Anwendungen, sei es im Bereich autonomer Transportfahrzeuge oder der mobilen Robotik, weisen eine hohe Dynamik und Interaktion mit der Umgebung auf. Gleichzeitig stellen diese Anwendungen hohe Anforderungen an die Echtzeitfähigkeit, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des gesamten Systems. Kritische Zustände in 5G-Campusnetzen, undefinierte Systemzustände oder extreme Störungen müssen daher zuverlässig vorhergesagt werden, bevor sie auftreten, um rechtzeitig Gegenmaßnahmen (z. B. Bereitstellung zusätzlicher oder alternativer Kommunikationsressourcen) ergreifen zu können.

Es wird allgemein erwartet, dass KI im Kontext von 5G-Campusnetzen mehr und mehr an Bedeutung gewinnt und zu einem integralen Bestandteil dieser Netze wird. KI wird notwendig sein, um die Komplexität und den großen Funktionsumfang auch für Nicht-Experten beherrschbar zu machen. Für einige

Anwendungen müssen neue Online-KI-Methoden entwickelt werden, die auch mit relativ kleinen Datenmengen robuste Ergebnisse liefern. Zu diesem Zweck ist es unerlässlich, Domänenwissen (z. B. Modelle, Korrelationen) zu nutzen, um hybride KI-Methoden zu entwickeln, die nicht nur auf Daten basieren, sondern auch Domänenwissen berücksichtigen. Darüber hinaus werden Methoden für verteiltes Training und Lernen unter Kommunikationseinschränkungen für die Analyse großer Datenmengen benötigt (es werden hierfür auch neue funktionale Architekturen benötigt). Schließlich müssen die resultierenden Algorithmen von geringer Komplexität sein und für eine Implementierung mit niedriger Latenz (z. B. durch massive Parallelisierung) geeignet sein.

5.4 Fazit

5G-Technologien ermöglichen – vereinfacht ausgedrückt – die Kommunikation zwischen Menschen und Geräten. Dies geschieht entsprechend den ge-

schäftlichen Erfordernissen und bringt somit die Digitalisierung des Wirtschaftsstandorts Deutschland voran. Die zugrunde liegende Netztechnik kann Anwendungsfälle im traditionellen Mobilfunkverständnis sowie spezielle Szenarien und Anwendungsgebiete in Fabriken oder Industrieanlagen und darüber hinaus bedienen. In Zukunft werden die technologischen Grenzen weiter verschoben. Der kontrollierte Umgang mit Ressourcen und Energieeffizienz wird immer bedeutender. Offene Systeme, d. h. Open-Source-Systeme für die Weiterentwicklung von Funktionen und den sicheren Umgang mit Daten, werden eine immer größere Rolle spielen. Zellulare Netzstrukturen werden durch nachfrageorientierte Netzkonfigurationen ergänzt.

5G-Campusnetze etablieren sich hierbei als ein fester Bestandteil der Infrastruktur für eine private, nicht-öffentliche und vollständig gesicherte Kommunikation in Unternehmen.

6 Anhang

6.1 Abkürzungen und wichtige 5G-Fachbegriffe

2/3/4/5G	zweite/dritte/vierte/fünfte Mobilfunk-Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project: Globale Standardisierungsorganisation für Mobilfunknetze (Funknetz, Kernnetz, Dienste und Integration)
5G-ACIA	5G Alliance for Connected Industries and Automation: Internationale Allianz für die Unterstützung von 5G in der Industrieautomation und Industriekommunikation
5GC	5G Core network (5G-Kernnetz)
5GC-CP	5G Core network Control Plane: Steuerungs- und Management-Funktionen des 5G-Netzes im 5G-Kernnetz
AGV	Automated Guided Vehicle: automatisch geführtes, fahrerloses Transportfahrzeug
AR	Augmented Reality
BNetzA	Bundesnetzagentur: Deutsche Regulierungsbehörde
CAV	Communication in Automation for Vertical Domains: 3GPP-Arbeiten zu Anwendungsfällen und Dienstanforderungen von Automationsanwendungen
eMBB	enhanced Mobile Broadband: sehr hohe Datenübertragungsraten (1 Gbit/s und höher)
FCAPS	Fault, Configuration, Accounting, Performance, Security (Management von Fehlern, Konfiguration, Abrechnung, Leistung und Sicherheit): verschiedene Bereiche des Kommunikationsnetzmanagements
GHz	Gigahertz: Maßeinheit für den Frequenzbereich
gNB	next generation Node B: 5G-Basisstation
GPS	Global Positioning System
IC4F	Industrial Communication for Factories: vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördertes Forschungsprojekt, das sich mit 5G-Kommunikation in Industrieumgebungen beschäftigt
ID	Identifizier: Kennzeichnung, Bezeichnung
IIoT	Industrial IoT: Bezeichnung der 3GPP für Industriekommunikation mit hohen und besonderen Anforderungen wie z. B. Zeitsynchronisation
IoT	Internet of Things: Internet der Dinge
IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnik
ITU	International Telecommunication Union (Internationale Fernmeldeunion): Agentur der Vereinten Nationen für Informations- und Kommunikationstechnologien
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und Mittlere Unternehmen
LAN	Local Area Network: lokales Datennetz
LTE	Long Term Evolution: vierte Mobilfunk-Generation
MEC	Mobile Edge Cloud oder Multi-Access Edge Cloud
MES	Manufacturing Execution System

MHz	Megahertz: Maßeinheit für den Frequenzbereich
MIMO	Multiple Input Multiple Output: Funkschnittstelle mit mehreren gesteuerten Empfangsantennen und mit mehreren gesteuerten Sendeantennen
mMTC	massive Machine-Type Communications: hohe Dichte von 1 Mio. IoT-Endgeräten pro km ²
MNO	Mobile Network Operator: Mobilfunknetzbetreiber (eines öffentlichen Mobilfunknetzes)
MTC	Machine-Type Communication: Kommunikation zwischen Maschinen, Sensoren, Aktoren usw.
NFV	Network Function Virtualization
NPN	Non-Public Network: Bezeichnung der 3GPP für private Netze
NR	New Radio: neuartige 5G-Funktechnologie
NSA	Non-Stand-Alone: 5G-Mobilfunknetzarchitektur mit 5G-Funkkommunikation und LTE-Kernnetz
PNI-NPN	Public Network Integrated Non-Public Networks: Bezeichnung der 3GPP für private Netze, die in das öffentliche Mobilfunknetz integriert sind (z. B. hybride Betreibermodelle)
QoS	Quality of Service: Dienstgüte des Kommunikationsdienstes
RAN	Radio Access Network (Funknetz): funkbasierter Teil des Mobilfunknetzes vor Ort
SA	Stand-Alone: 5G-Mobilfunknetzarchitektur mit 5G-Funkkommunikation und 5G-Kernnetz
SA	Services and Architecture (Dienste und Architektur): Technische Spezifizierungsgruppe der 3GPP zu Diensten und Architektur von 3GPP-Kommunikationsnetzen
SDN	Software-defined Networking
SIM	Subscriber Identity Module: Hardware-Modul für die Benutzeridentität und 3GPP-Sicherheitszertifikate (SIM-Karte oder eSIM)
SLA	Service Level Agreement: Vereinbarung zwischen Netzbetreiber und Netznutzer
SNPN	Stand-alone Non-Public Networks: Bezeichnung der 3GPP für separate private Netze (Eigenbetrieb)
Slice	Virtuelles 5G-Netz mit definierten Eigenschaften, z. B. Teil eines MNO-Netzes
TR	Technical Report (technischer Report): informeller technischer Bericht der 3GPP
TS	Technical Specification (technische Spezifikation): normativer technischer Standard der 3GPP
TSN	Time Sensitive Networking: Sammlung von IEEE 802.1/3-Standards für Zeitsynchronisation und zeitbasierte Kommunikation z. B. in der Industriekommunikation
UAV	Unmanned Aerial Vehicle: unbesetztes Luftfahrzeug oder Drohne
UDM	Unified Data Management: Nutzerdatenverwaltung
UE	User Equipment: Endgerät
UPF	User Plane Function: Schnittstelle für die Nutzerdaten
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication: Mobilfunkkommunikation mit sehr hoher Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit (99,999 %) und sehr geringer Latenzzeit (1 ms)
UWIN	Ultra-reliable Wireless Industrial Network
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VR	Virtual Reality: Virtuelle Realität
WLAN	Wireless Local Area Network: drahtloses lokales Datennetz, basiert auf IEEE 802.11

6.2 Referenzen und weiterführende Literatur

- [1] Nokia: „5G transformation: 7 streams for success“, Whitepaper, 2019,
<https://pages.nokia.com/T003RI.5G-transformation-7-streams-for-success.html>
- [2] Bundesnetzagentur: „Frequenzzuteilungen für lokale Frequenznutzungen im Frequenzbereich 3.700-3.800 MHz (VV Lokales Breitband)“, Verwaltungsvorschrift, 19. November 2019,
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/RegionaleNetze/20191119_Verwaltungsvorschrift3.7-3.8GHz_pdf.pdf
- [3] Bundesnetzagentur, Regionale und lokale Netze, Webseite,
https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/lokalenetze-node.html
- [4] Abschätzung Nokia auf Basis produzierender Industriebetriebe in Deutschland mit > 250 Mitarbeiter/-innen
- [5] VDMA 5G Usergroup, Februar 2020
- [6] 5G-ACIA, „5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios“, White Paper, 5G Alliance for Connected Industries and Automation, July 2019,
<https://www.5g-acia.org/publications/5g-non-public-networks-for-industrial-scenarios-white-paper/>
- [7] „5G im Maschinen- und Anlagenbau“, Leitfaden für die Integration von 5G in Produkt und Produktion, VDMA und Fraunhofer IIS, Leitfadepapier
- [8] Jürgen Schreier: „Campusnetze: Wer macht das Geschäft?“, Bandbreite, 31. März 2019,
<https://www.bandbreite.io/campusnetze-wer-macht-das-geschaeft-a-815774/>
- [9] Deutsche Telekom: „5G Technologie in industriellen Campus-Netzen“,
<https://www.telekom.com/de/konzern/details/5g-technologie-in-campus-netzen-556690>
- [10] „5G: Bundesnetzagentur bestimmt Gebühren für Campusnetze“, heise online,
<https://www.heise.de/newsticker/meldung/5G-Bundesnetzagentur-bestimmt-Gebuehren-fuer-Campusnetze-4572908.html>
- [11] Daniela Hoffmann: „Welche IoT-Einsatz-Szenarien für 5G-Campusnetze möglich sind“, Produktion, 16. Juli 2019 (aktualisiert 28. Oktober 2019),
<https://www.produktion.de/digital-manufacturing/welche-iot-einsatz-szenarien-fuer-5g-campusnetze-moeglich-sind-108.html>
- [12] T-Systems International: „5G Campus-Netze – LTE- und 5G-Technologie für lokale Firmennetze“
- [13] Bundesamt für Strahlenschutz, Webseite zu 5G,
<https://www.bfs.de/DE/themen/emf/kompetenzzentrum/mobilfunk/basiswissen/5g.html>

- [14] Bitkom: „Mögliche Auswirkungen von 5G auf Mensch und Umwelt“, Positionspapier, 15. April 2019, <https://www.bitkom.org/Bitkom/Publicationen/Moegliche-Auswirkungen-von-5G-auf-Mensch-und-Umwelt>
- [15] 5G-ACIA: „5G for Automation in Industry – Primary use cases, functions and service requirements“, White Paper, Juli 2019, <https://www.5g-acia.org/publications/5g-for-automation-in-industry-white-paper/>
- [16] 3GPP TR 22.804: „Study on Communication for Automation in Vertical Domains“, <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3187>
- [17] Projekt IC4F (<https://www.ic4f.de/>) aus dem BMWi-Programm PAiCE
- [18] Bundeszentrale für politische Bildung: „Seefracht“, 3. April 2017, <https://www.bpb.de/nachschlagen/zahlen-und-fakten/globalisierung/52531/seefracht>
- [19] Projekt LIPS, (<http://www.lips-project.de/>)
- [20] Projekt DigitalTWIN (<https://d-twin.eu/>) aus dem BMWi-Programm Smart Service Welt II
- [21] Jennifer L. Schenker: „Factory In A Box“, The Innovator, 12. September 2019, <https://innovator.news/factory-in-a-box-11e5a8ab4f53>
- [22] Antragstellung bei der BNetzA, <https://campusnetzplaner.kn.e-technik.tu-dortmund.de>

6.3 Links zu Projekten, Organisationen, Initiativen

- 3GPP** 3rd Generation Partnership Project: weltweite Kooperation von Standardisierungsgremien für die Standardisierung im Mobilfunk,
<https://www.3gpp.org/>
- 5G-ACIA** 5G Alliance for Connected Industries and Automation: Internationale Allianz für die Unterstützung von 5G in der Industrieautomation und Industriekommunikation,
<https://www.5g-acia.org/>
- IC4F** Industrial Communication for Factories, Leuchtturmprojekt des BMWi: Zielsetzung ist die Entwicklung von sicheren, robusten und echtzeitfähigen Kommunikationslösungen für die verarbeitende Industrie,
<https://www.ic4f.de/>
- NGMN** Next Generation Mobile Networks: Projekt von Mobilfunkfirmen und Mobilfunkausrüstern zur Entwicklung der nächsten Mobilfunkgeneration,
<https://www.ngmn.org/>
- VDMA** Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.: Europas größter Industrieverband mit Hauptsitz in Frankfurt am Main,
<https://www.vdma.org>
- ZVEI** Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.: Industrieverband für die gemeinsamen Interessen der Elektroindustrie in Deutschland und auf internationaler Ebene,
<https://www.zvei.org/>

6.4 Autoren und Ansprechpartner

Autorenliste (alphabetische Auflistung):

Horst Angerer, Nokia
Michael Bahr, Siemens AG
Ansgar Bergmann, KION Group/STILL GmbH
Knut Drachslar, Gesellschaft für Produktionssysteme GmbH
Markus Fessler, Nokia
Martin Gergeleit, rt-solutions.de GmbH
Martin Janker, Schindler Fenster + Fassaden GmbH
Jorge Luis Juárez Peña, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Harald Klaus, Deutsche Telekom AG
Johannes Koppenborg, Nokia
Nicolaj Marchenko, Robert Bosch GmbH
Christian Schellenberger, Technische Universität Kaiserslautern
Bernd Schröder, brown-ippss GmbH
Kirsten Schuh, Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Julius Schulz-Zander, Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI
Markus Seipel, Deutsche Telekom AG
Slawomir Stanczak, Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI
Guido Weishaupt, Deutsche Telekom AG
Erich Zielinski, Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI
Marc Zimmermann, Technische Universität Kaiserslautern

Fachliche Koordination:

Erich Zielinski, Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI
Slawomir Stanczak, Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI
Julius Schulz-Zander, Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI

Ansprechpartner Begleitforschung PAiCE:

Inessa Seifert, Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Tilman Liebchen, Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH

