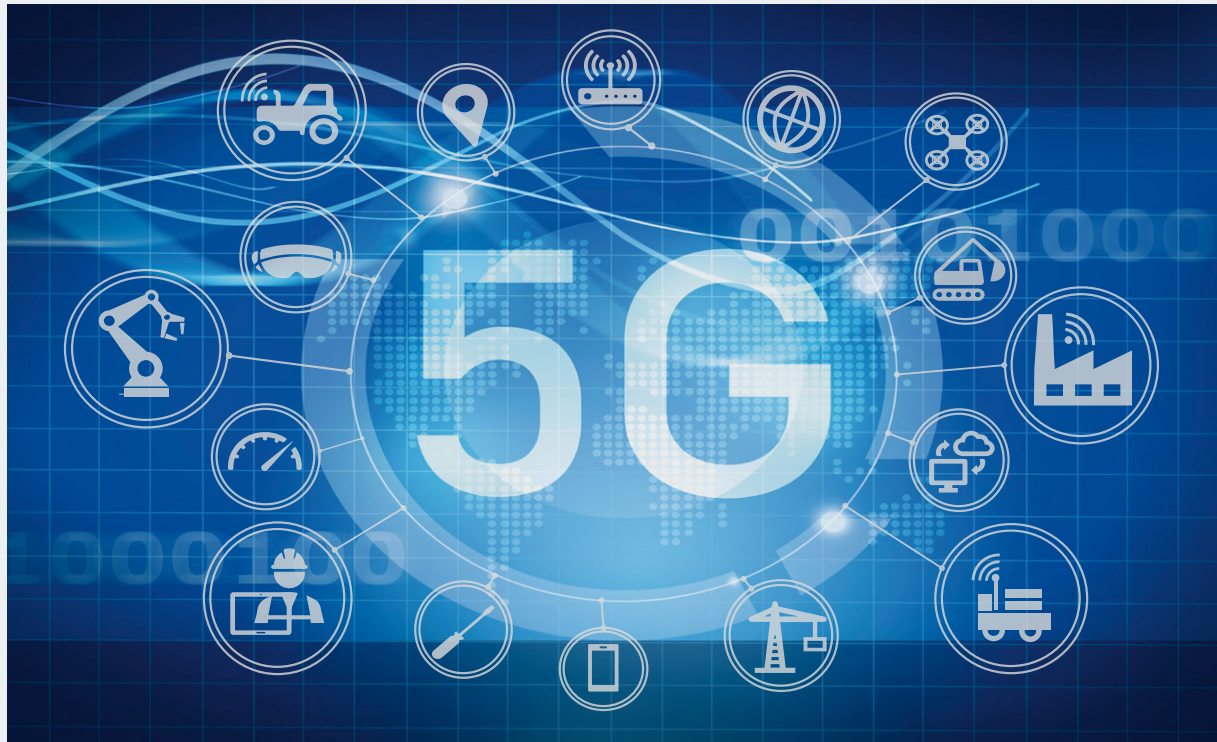


5G im Maschinen- und Anlagenbau

Leitfaden für die Integration
von 5G in Produkt und Produktion



Inhaltsverzeichnis

02	Vorwort VDMA	39 8	5G-Netze in der Produktion
04	Vorwort Fraunhofer IIS	39 8.1	Funkzugangsnetz
06	Abkürzungsverzeichnis	39 8.1.1	Anzahl und Verteilung der Antennen
08 1	Management Summary	40 8.1.2	Anzahl und Dimensionierung von Basisstationen
10 2	Ziel und Inhalt des Leitfadens	40 8.1.3	Verkabelung von zentralen und verteilten Einheiten
12 3	Funk in der industriellen Anwendung	40 8.2	Transportnetz
12 3.1	Einsatzgebiete und Problemstellungen	40 8.3	Kernnetz
13 3.2	Funklösungen in der industriellen Anwendung	41 8.3.1	Virtualisierung
15 3.3	Entscheidungskriterien für die Nutzung von Funk	41 8.3.2	Mischbetrieb verschiedener Hersteller
17 4	Überblick 5G	41 8.4	Betreibermodelle
17 4.1	Was ist 5G	41 8.5	Erwartungen an die kommenden 3GPP Releases
17 4.2	Wie erfolgt die Standardisierung von 5G	42 8.5.1	Release 15
19 4.3	Wie erfolgt die Kommerzialisierung von 5G	42 8.5.2	Release 16
20 5	Welche Vorteile bringt 5G für die Industrie	44 8.5.3	Release 17
22 5.1	Vergleich von 5G mit 4G im industriellen Umfeld	46 8.5.4	Release 18
23 5.2	Vergleich von 5G mit WLAN im industriellen Umfeld	47 9	5G im Produkt
26 6	5G im Maschinenbau	47 9.1	Entwicklung eines mit 5G vernetzten Produktes
26 6.1	Schlüsselakteure und deren Rolle	47 9.1.1	Notwendige Komponenten
26 6.1.1	Bundesnetzagentur	48 9.1.2	Komponenten-Anbieter für 5G im Produkt
26 6.1.2	Netzbetreiber	49 9.1.3	Höhe des Integrationsgrades
26 6.1.3	Infrastrukturanbieter	50 9.1.4	Herausforderung bei der Implementierung von 5G in Produkten
27 6.2	5G Use Cases im Maschinen- und Anlagenbau	51 9.1.5	Zertifizierung
28 7	Grundlagen 5G-Netz	53 9.2	Nachrüstung von 5G (Retrofit)
28 7.1	Struktur eines 5G-Netzes	53 9.3	Erwartungen an 3GPP Release 16
28 7.2	Generische Architektur eines Campus-Netzes	54 10	Glossar
31 7.2.1	Funkzugangsnetz	60 11	Empfohlene Literatur
31 7.2.2	Transportnetz	U3	Projektpartner / Impressum
32 7.2.3	Kernnetz		
32 7.3	Arten von Campus-Netzen		
34 7.3.1	Eigenständiges, unabhängiges Campus-Netz		
35 7.3.2	Campus-Netz in Verbindung mit einem öffentlichen Netz		
38 7.3.3	Beantragung eines Frequenzblocks für ein Campus-Netz		

Vorwort vom VDMA



Hartmut Rauen

Der Begriff 5G hat sich als ein weit verbreitetes Thema im Maschinen- und Anlagenbau etabliert. 5G, die fünfte Generation der Mobilfunktechnologie, verspricht ein wichtiger Wegbereiter für die Industrie der Zukunft zu werden. Innovative, industrielle Dienstleistungen und Anwendungen sowie neue Betriebs- und Produktionsmodelle werden entstehen.

Die Umsetzung von 5G in Produkt und Produktion wird eine kontinuierliche Integration erfordern, die von dem angebotenen Mehrwert und der tatsächlichen Nachfrage abhängt. Die große Herausforderung besteht darin, die spezifischen Anforderungen der Branche an Latenzzeit, Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Energieeffizienz und Sicherheit zu erfüllen.

Für die Zukunft wird erwartet, dass sich Produktion und Logistik zu einem hochgradig vernetzten System mit Integration von kollaborativen Robotern, Augmented Reality, Internet der Dinge, Massendatenanalyse, künstlicher Intelligenz und energieeffizienten Prozessen entwickeln. Die 5G-Konnektivität wird dabei eine Schlüsseltechnologie der Industrie 4.0 darstellen.

Dennoch besteht weiterhin ein großer Informations- und Evaluierungsbedarf bezüglich der 5G-Technologie, um das wahre Potenzial für die Produktion und das Produkt im Maschinen- und Anlagenbau zu entfalten.

Mit dieser Motivation und im Rahmen der 5G User Group startete der VDMA im September 2019 das Projekt, einen Leitfaden zu 5G nach den Anforderungen und Kriterien der Maschinen- und Anlagenbauindustrie zu realisieren. Das Ziel des VDMA-Leitfadens war von Anfang an, das Potenzial der 5G-Technologie für den Maschinen- und Anlagenbau frühzeitig zu erkennen und umzusetzen, damit seine globale Wettbewerbsposition gewährt bleibt.

Der vorliegende Leitfaden „5G im Maschinen- und Anlagenbau – Leitfaden für die Integration von 5G in Produkt und Produktion“ ist das Ergebnis einer intensiven und fruchtbaren Kollaboration zwischen dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS, der 5G-Kernarbeitsgruppe bestehend aus VDMA-Mitgliedsunternehmen und dem VDMA selbst. Diese Kooperation spiegelt sich sowohl im Umfang als auch im Inhalt des Leitfadens wider. Mit einem starken Fokus auf dem Maschinen- und Anlagenbau soll der Leitfaden Klarheit über den Nutzwert, die Anwendungsmöglichkeiten und die Herausforderungen von 5G schaffen.



Quelle: Alexander Supertramp / Shutterstock

Darauf zielen auch viele weitere Aktivitäten des VDMA ab, wie beispielsweise die Partnerschaft um die CMM Expo – Weltleitmesse für Connected Mobile Machines & Mobility (CMM). Oder die erfolgreiche Interessensvertretung und Vernetzung mit Akteuren aus Politik und Gesellschaft zur Vereinbarung wichtiger Rahmenbedingungen für den Mittelstand. Dies betrifft etwa die VDMA-Stellungnahme für private 5G-Frequenzen und faire Frequenznutzungsgebühren.

Unser herzlicher Dank geht an das Team des Fraunhofer IIS, insbesondere an Frau Karin Loidl, für die Erarbeitung dieses praxisnahen Leitfadens und die Validierung der Anwendungsfälle. Ebenfalls großer Dank gebührt den Mitgliedern der 5G-Kernarbeitsgruppe für ihr starkes Engagement in puncto Aufbereitung des Leitfadens und Ausarbeitung der Anwendungsfälle.

Wir wünschen Ihnen eine spannende Lektüre.

Hartmut Rauen

Stellvertretender
VDMA-Hauptgeschäftsführer

Dr. Reinhard Heister

Geschäftsführer
VDMA Elektrische Automation

Dr. Hermann Buitkamp

VDMA Landtechnik

Dr. Miriam Solera

VDMA Elektrische Automation

Vorwort vom Fraunhofer IIS



Bernhard Niemann



Thomas von der Grün



Karin Loidl

Die neueste Mobilfunkgeneration, kurz 5G, hat den Anspruch eines weltweiten, universellen Standards für Telefonie, mobiles Internet, Vernetzung von Maschinen und Fahrzeugen sowie das Internet der Dinge. Die Erwartungen an die Leistung von 5G, insbesondere auch aus den Industriezweigen Maschinenbau oder Automobilindustrie, sind dementsprechend hoch.

Jede Branche und jede Anwendung hat dabei spezifische, teilweise heterogene Anforderungen an 5G. Daher gibt es bei 5G unterschiedliche Ausprägungen, besonders hervorzuheben sind die massive, breitbandige Kommunikation für hohen Durchsatz, massive Maschine-zu-Maschine-Kommunikation sowie extrem niedrig-latente Kommunikation für kurze Verzögerungszeiten zwischen Sender und Empfänger.

Der Maschinen- und Anlagenbau nimmt dabei eine Sonderstellung ein. Zum einen werden alle Ausprägung von 5G benötigt. Zum anderen werden, zumindest in Deutschland, durch die Allokation eines speziellen Frequenzbands für Campus-Netze einzigartige Voraussetzungen für die Unterstützung der Digitalisierung des Maschinenbaus geschaffen. Diese einmalige Chance gilt es zu nutzen und die internationale Führungsposition des deutschen Maschinen- und Anlagenbaus weiter auszubauen.

Das Fraunhofer IIS als unabhängiger Forschungs- und Technologiepartner hat in enger Kooperation mit dem VDMA in diesem Leitfadens die Vor- und Nachteile sowie Einsatzmöglichkeiten von 5G für den Maschinen- und Anlagenbau analysiert und basierend auf den Anforderungen der Anwender bewertet. Die Forscher und Experten des Fraunhofer IIS greifen dabei auf über 20 Jahre Erfahrung in der Entwicklung von anwendungsspezifischen Kommunikations- und Lokalisierungssystemen sowie auf die Erkenntnisse aus der Teilnahme an der 5G-Standardisierung bei 3GPP zurück. Entstanden ist ein differenziertes Bild der Möglichkeiten und Herausforderungen. Die Besonderheit liegt in der Fokussierung auf die Anforderungen der Anwender und deren Einsatzszenarien, was nur über die intensive und aktive Beteiligung der Unternehmen aus dem Maschinen- und Anlagenbau möglich wurde. Unser besonderer Dank gilt daher den Mitgliedern der 5G-Kernarbeitsgruppe des VDMA:

- Acharkaoui, Rachid (CETECOM)
- Bergmann, Ansgar (KION GROUP/STILL)
- Bleider, Martin, Dr. (HAHN GROUP)
- Block, Dimitri (WEIDMÜLLER Gruppe)
- Buchart, Thomas (AGCO – Fendt)
- Forster, Rainer (MASCHINENBAU KITZ)
- Gayr, Stefan (GRENZEBACH)
- Gregorz, Annika (WEIDMÜLLER Gruppe)
- Ischen, Tobias (ZEISS Gruppe)
- Koch, Carsten (AGCO – Fendt)
- Krichel, Susanne, Dr. (LAPP)

- Lyczkowski, Eike (SEW-EURODRIVE)
- Malzacher, Dietrich (RITTAL)
- Marb, Philipp (GRENZEBACH)
- Menschig, Arnd, Dr. (ZEISS Gruppe)
- Moebus, Ralf (LAPP)
- Nevermann, Peter, Dr. (CETECOM)
- Rodewald, Michael (ZEISS Gruppe)
- Yamen, Soner (SICK)

Auf der Habenseite der 5G-Technologie stehen insbesondere ein lizenziertes Spektrum und eine zentrale Ressourcenzuweisung. Diese bieten Vorteile bei Störsicherheit und Güte-Garantien für Parameter wie beispielsweise Latenz.

Schon mit dem aktuell verfügbaren Release 15 bietet 5G deutliche Erweiterungen der Funktionen, um Anforderungen der Industrie abdecken zu können. Viele Einsatzszenarien, die mit 5G umgesetzt werden können, lassen sich aber auch mit anderen Funklösungen realisieren, dann jedoch eine heterogene Landschaft aus unterschiedlichen standardisierten und proprietären Lösungen zum Einsatz kommt.

Seine entscheidenden Vorteile wird der 5G-Standard erst perspektivisch mit Release 16 und 17 und in Kombination mit flexibel und dynamisch konfigurierbaren Kernnetzen für die Industrie zeigen.

Da sich 5G noch in der Einführungsphase befindet und erste Netze gerade am Entstehen sind, wurden einige Werte im Leitfaden berechnet und müssen sich erst in der Realität beweisen. Hochspezialisierte Funklösungen, teilweise angebunden an ein 5G-Kernnetz, werden aber auch in der Zukunft bei der Bewältigung besonderer Herausforderungen eine Rolle spielen. Wir gehen davon aus, dass 5G im Maschinen- und Anlagenbau viele Anwendungen finden wird und zeigen kann, dass es für die Nutzung im industriellen Umfeld geeignet ist.

Bernhard Niemann
Fraunhofer IIS

Thomas von der Grün
Fraunhofer IIS

Karin Loidl
Fraunhofer IIS

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project	FCC	Federal Communications Commission (USA)
5GC	5G Core	FDD	Frequency Division Duplex
AMF	Access & Mobility Management Function	FR1	Frequenzband 1 (< 6 GHz)
AoA	Angle of Arrival	FR2	Frequenzband 2 (> 6 GHz, mmWave-Frequenzband)
AoD	Angle of Departure	FTS	Fahrerlose Transportsysteme
AP	Access Point	FTTB	Fiber to the Building
API	Application Programming Interface	GCF	Global Certification Forum
AR	Augmented Reality	gNB/ gNodeB	next generation Node Basestation (5G)
AUSF	Authentication Server Function	GNSS	Global Navigation Satellite System
BBU	Base Band Unit	GSA	Global Mobile Suppliers Association
BLE	Bluetooth Low Energy		
BNetzA	Bundesnetzagentur		
CA	Carrier Aggregation	HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
CEP	Circular Error Probable	HF	High Frequency
CN	Core Network	HSS	Home Subscriber Server
COTS	Commercial Off-the-Shelf	HLS	High Layer Split
CP	Control Plane		
CPE	Customer Premises Equipment	IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
CPF	Control Plane Function	iHOP	industrial Frequency Hopping
CPU	Central Processing Unit	IoT	Internet of Things
C-RAN	Centralized RAN	IoT over	
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance	NTN	IoT over Non-Terrestrial Networks
CU	Central Unit	iPCF	industrial Point Coordination Function
DAS	Distributed Antenna System	ISED	Innovation, Science and Economic Development (Canada)
DL	Downlink	ISM	Industrial, Scientific and Medical Band
DN	Data Network		
DNS	Domain Name Server		
DoC	Declaration of Conformity		
D-RAN	Distributed RAN		
DU	Distributed Unit	KI	Künstlicher Intelligenz
E2E	End to End	LF	Low Frequency
EAP	Extensible Authentication Protocol	LGA	Land Grid Array
EHT	Extremely High Throughput	LLS	Low Layer Split
eMBB	enhanced Mobile Broadband	LPWA	Low Power Wide Area
eNB/ eNodeB	evolved Node Basestation (4G)	LPWAN	Low Power Wide Area Networks
EPC	Enhanced Packet Core	LTE-M	LTE Machine Type Communication
		LWL	Lichtwellenleiter

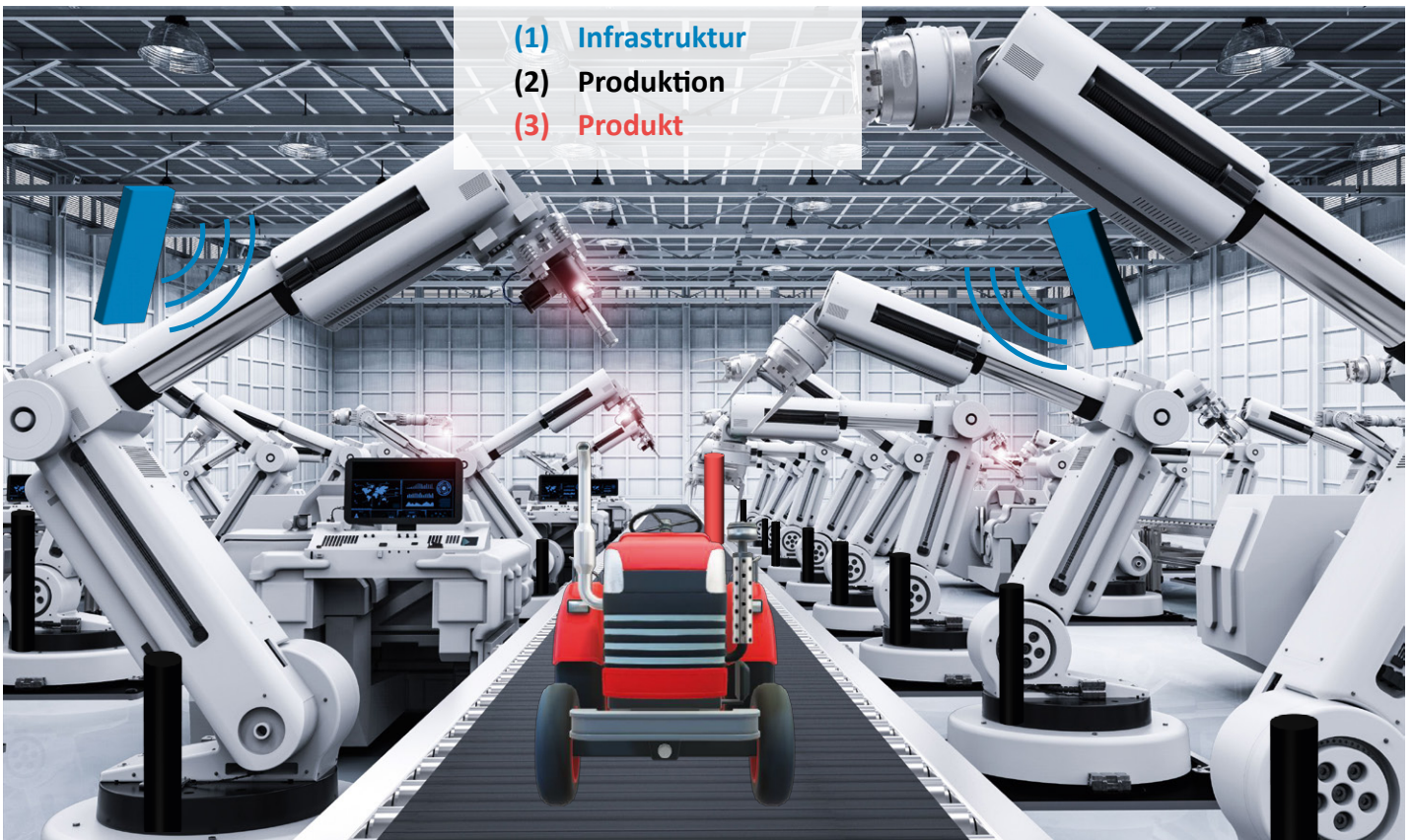
MEC	Multi-Access Edge Computing	SA	Standalone
MCX	Mission Critical Communication	SCS	Subcarrier Spacing
MIMO	Multiple Input Multiple Output	SHF	Super High Frequency
ML	Maschinelles Lernen	SIM	Subscriber Identity Module
mMTC	massive Machine Type Communication	SLA	Service Level Agreement
MNO	Mobile Network Operator	SMF	Session Management Function
MRP	Market Representation Partners	SoC	System-on-Chip
MTBF	Mean Time Between Failures	sTTI	short Transmission Time Interval
		SUCI	Subscription Concealed Identifier
N3WIF	Non-3GPP Interworking Function	TD	Technische Dokumentation
NB	Node Basestation	TDD	Time Division Duplex
NB-IoT	Narrowband Internet of Things	TLS	Transport Layer Security
NEF	Network Exposure Function	TSN	Time Sensitive Networking
NFV	Network Function Virtualization	TTFF	Time to first fix
NGP	Next Generation Positioning	TTI	Transmission Time Interval
NPN	Non-Public Network	TWT	Target Wakeup Time
NR	New Radio		
NRF	Network Repository Function	UDM	Unified Data Management
NR-U	New Radio – Unlicensed	UDR	Unified Data Repository
NSA	Non-Standalone	UE	User Equipment
NSSF	Network Slice Selection Function	UHF	Ultra High Frequency
		UL	Uplink
OAuth 2.0	Open Authorization Version 2.0	UNB	Ultra-Narrow-Band
OEM	Original Equipment Manufacturer	UP	User Plane
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access	UPF	User Plane Function
OTA	Over-the-Air	URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
		USAT	Universal Subscriber Application Toolkit
PCF	Policy Control Function	USIM	Universal Subscriber Identity Module
PD	Packet Duplication		
PDCP	Packet Data Convergence Protocol	UWB	Ultra Wideband
PN	Public Network		
PoE	Power-over-Ethernet	VM	Virtual Machine
QCI	Quality Class Indicator	VNF	Virtual Network Functions
QoS	Quality of Service		
		WHAN	Wireless Home Area Network
RAN	Radio Access Network	WLAN	Wireless Local Area Network
RACH	Random Access Channel	WNAN	Wireless Neighborhood Area Network
RED	Radio Equipment Directive		
RFID	Radio Frequency Identification	WWAN	Wireless Wide Area Network
RRH	Remote Radio Head	WPAN	Wireless Personal Area Network
RSE	Radiated Spurious Emissions		
RSS	Received Signal Strength		
RTLS	Real-time Location System		
RU	Radio Unit		

1 Management Summary

In der Vergangenheit wurden Funklösungen in der produzierenden Industrie nur in begrenztem Umfang eingesetzt. Der Anteil der Firmen, die Funk nutzen, steigt allerdings in den letzten Jahren kontinuierlich. Dabei werden verschiedene Lösungen nicht nur im Bereich weniger kritische Anwendungen verwendet u.a. um Monitoring und Telemetrie zu ermöglichen, sondern auch bei der Steuerung von Maschinen eingesetzt. Gründe für den zunehmenden Einsatz von Funk in der Industrie sind unter anderem das wachsende Bedürfnis nach Mobilität und Flexibilität in der Produktion, Einsparungen bei den Verkabelungskosten und eine schnellere Nachrüstung von Bestandsmaschinen oder Gewichtseinsparungen durch den Wegfall von Kabeln. Die Entscheidung, ob eine

kabelgebundene oder kabellose Lösung für den eigenen Anwendungsfall geeignet ist, orientiert sich dabei an den spezifischen technischen Anforderungen der Anwendung.

5G ist die erste Mobilfunkgeneration, die stark von den industriellen Anwendern geprägt wurde. 5G setzt neue Impulse mit seinen geplanten Eigenschaften bezüglich Zuverlässigkeit, Latenz und Lokalisierung. Zudem erfüllt 5G die von der Industrie priorisierten Anforderungen wie erhöhte Sicherheit, einen garantierten Dienstgüte „Quality of Service (QoS)“ sowie eine erhöhte Verfügbarkeit des Netzes. Die angestrebten Leistungsmerkmale der fünften Mobilfunkgeneration sind:



- eMBB (enhanced Mobile Broadband) mit einer hohen Spitzen-Datenrate von bis zu 20 Gbit/s im Downlink und 10 Gbit/s im Uplink.
- mMTC (massive Machine Type Communication) ermöglicht die Anbindung von bis zu 1 Mio. Endgeräte pro km².
- URLLC (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication) garantiert eine sehr zuverlässige Kommunikation mit einer Latenz bis zu 1 ms und einer hohen Verfügbarkeit für kritische Anwendungen.

Zu beachten ist, dass nicht alle Leistungsmerkmale von 5G gleichzeitig erfüllt werden können bzw. bestimmte Vorbedingungen erfüllt sein müssen. Mit dem ersten Release 15, das ab 2020 kommerzialisiert wird, stehen diese Leistungsmerkmale erst zum Teil zur Verfügung. Die vollen Leistungsmerkmale folgen dann mit den kommenden Releases.

Die für den Einsatz von 5G in der Industrie treibenden Anwendungen sind unter anderem die Flexibilisierung der Produktion, fahrerlose Transportsysteme, mobile Bediengeräte, Prozess-Monitoring und neue Mensch-Maschine-Schnittstellen, wie z. B. Augmented Reality Anwendungen. Auch im Bereich Retrofit können Anwendungen profitieren. Zudem ermöglicht 5G auch neue Fertigungskonzepte mittels drahtlos vernetzter Maschinen.

In Deutschland können Unternehmen seit 2019 5G-Lizenzen beantragen und damit zum Netzbetreiber für ihr eigenes 5G-Campus-Netz (Non-Public Network – NPN) werden. Gründe für die Errichtung eines NPNs sind u.a. individuelle, einstellbare QoS-Anforderungen, hohe Sicherheitsanforderungen, insbesondere Datensicherheit, sowie eine Erleichterung der Identifizierung der Verantwortung für Verfügbarkeit, Wartung und Betrieb und damit keine oder nur eine begrenzte Abhängigkeit von öffentlichen Netzbetreibern. Welche Art von NPN am besten für ein Unternehmen geeignet ist, hängt von mehreren Faktoren wie Latenz, Netzsicherheit, Subscriber Management, Hoheit über Firmendaten, Reaktionszeiten, Besitzverhältnisse und Flexibilität ab und muss für jeden Fall individuell betrachtet werden.

Der Leitfaden befasst sich detailliert mit der Realisierung von Campus-Netzen für die Produktion. Dies umfasst die Infrastruktur (Hard- und Software) des Funkzugangsnetzes, des Transportnetzes, des Kernnetzes sowie das Betreibermodell, das bei der Einführung eines 5G-Kommunikationsnetzes in der Produktion notwendig ist. Hinzu werden für die kommenden Releases die geplanten Funktionalitäten beschrieben, die für den Einsatz von 5G in der Produktion wichtig sind.

Bei der Integration von 5G in den Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus kann zwischen Anwendungen mit sehr hohen Datenraten (eMBB), Industrial IoT (URLLC) und Massive IoT (mMTC) unterschieden werden. Unternehmen werden in dem Leitfaden auch Hilfestellungen für die Weiterentwicklung zu vernetzten Produkten finden. Dies umfasst u.a. Modems, Module und die Zertifizierungen, die für einen Einsatz in Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus wichtig sind.

Insgesamt beleuchtet der VDMA-Leitfaden „5G im Maschinen- und Anlagenbau“ die Möglichkeiten von 5G im Maschinenbau für Produktion und Produkt und betrachtet die potenziellen Herausforderungen beim Einsatz von 5G.

2 Ziel und Inhalt des Leitfadens

Im November 2019 hat die Bundesnetzagentur das Antragsverfahren für lokale 5G-Campusnetze im Frequenzbereich 3.700-3.800 MHz eingeleitet. Die Nutzung dieser Funkfrequenzen für 5G-Campusnetze ermöglicht es dem Maschinen- und Anlagenbau, innovative industrielle Dienstleistungen und Anwendungsfälle voranzutreiben, die auf Echtzeit-Kommunikation, Flexibilität, Vielseitigkeit, Effizienz und Qualität industrieller Fertigungsprozesse und Produkte zugeschnitten sind. Die Integration von 5G in Produkt und Produktion mit entsprechender Erfüllung und Sicherstellung der strengen Anforderungen der industriellen Anwendungen wird jedoch erhebliche Herausforderungen mit sich bringen.

Der VDMA-Leitfaden ist auf die Integration von 5G in Produkt und in Produktion des Maschinen- und Anlagenbau fokussiert. Er enthält Wissen und Information über den aktuellen Stand der 5G-Technologie, vermittelt ein Verständnis für die Vorteile von 5G im Maschinenbau und betrachtet die möglichen Herausforderungen.

Eine zentrale Frage ist der Nutzwert von 5G für den Maschinen- und Anlagenbau. Dazu gehört die Definition des Ausgangspunktes, des gewünschten Szenarios und der Anforderungen, für die 5G-Eigenschaften den größten Mehrwert und die größte Nachfrage erzeugen können. Dies wird unternehmensspezifisch sein und muss daher von jedem Unternehmen individuell analysiert werden.

Der VDMA-Leitfaden ist daher auf die Integration von 5G in Produkt und in Produktion des Maschinen- und Anlagenbau fokussiert. Er enthält Wissen und Information über den aktuellen Stand der 5G-Technologie, vermittelt ein Verständnis für die Vorteile von 5G im Maschinen-

bau und betrachtet die möglichen Herausforderungen beim Einsatz von 5G. Diese Aspekte werden sich verändern, wenn mit den weiteren 5G-Releases neue Funktionalitäten integriert werden.

Der VDMA-Leitfaden gibt darüber hinaus Hilfestellung zur Einschätzung der eigenen Ausgangssituation für die Integration von 5G in Produkt und Produktion und greift folgende wichtigen Fragen auf:

- Welche Kriterien sind wichtig bei der Entscheidung, ob eine Anwendung mit Kabel oder Funk realisiert werden soll?
- Welche Vorteile bringt 5G für mein Unternehmen?
- Welche Kriterien sind relevant bei der Entscheidung für ein Campus-Netz?
- Welche Infrastruktur brauche ich?
- Was ist beim Aufbau einer mit 5G-vernetzten Produktion zu beachten?
- Wie mache ich meine Maschine 5G-Ready?
- Welche Anwendungen im Maschinen- und Anlagebau sind für mein Unternehmen sinnvoll?
- Was sind die Anforderungen und Einsatzszenarien für meine Anwendungsfälle?

Der VDMA-Leitfaden wurde durch die Erarbeitung und Validation von folgenden Anwendungsbeispielen komplementiert. Diese wurden von der 5G-Kernarbeitsgruppe definiert, vom Fraunhofer IIS validiert und stehen den VDMA-Mitgliedern online unter Use Cases zum Leitfaden 5G im Maschinen- und Anlagenbau (<https://ea.vdma.org/viewer/-/v2article/render/47636048>) zur Verfügung.

- Flexibilisierung der Produktion (AGCO – Fendt)
- HMI – Human Machine Interface (HAHN GROUP, SEW-EURODRIVE)
- M2M-Anwendungen (LAPP, WEIDMÜLLER Gruppe)
- Mobile Bedienterminals mit Nothalt (SICK)

- Mobile Messsysteme in Produktionsumgebungen (ZEISS Gruppe)
- Ortung und Kommunikation in der Logistik (KION GROUP/STILL, SEW EURODRIVE)
- Predictive Maintenance (RITTAL)
- Remoteanwendungen (AGCO-Fendt, SEW-EURODRIVE, MASCHINENBAU KITZ)
- Retrofit (KION GROUP/STILL, SICK)
- Verschleißbehafte Anwendungen mit kritischen Datenstrecken (LAPP)

Die Validierung der Anwendungen erfolgt Anhand einer Analyse der 5G Funktionsfähigkeit im Abgleich mit den Anforderungen der verschiedenen Use Cases. Sie stellt detailliert die erforderlichen Parameter sowie einen Vergleich zwischen 5G und anderen drahtlosen Technologien dar. Diese Übung sollte von allen Unternehmen vor der Implementierung einer 5G-Anwendung durchgeführt und immer auf Basis der neuesten, verfügbaren Releases von 5G aktualisiert werden.

Der VDMA-Leitfaden und die genannten Anwendungsfälle vermitteln somit ein umfassendes Verständnis von 5G für Produkt und Produktion im Maschinen- und Anlagenbau, sodass deren Nutzen sorgfältig abgeschätzt und eine Umsetzungsstrategie damit definiert werden kann.

Use Cases finden Sie online unter VDMA 5G Anwendungsfälle

<https://ea.vdma.org/viewer/-/v2article/render/47636048>



Quelle: Patpitchaya / Shutterstock

3 Funk in der industriellen Anwendung

3.1 Einsatzgebiete und Problemstellungen

Funklösungen wurden in der Vergangenheit in der produzierenden Industrie meist nur verwendet, um weniger kritische Anwendungen im Bereich Monitoring und Telemetrie zu ermöglichen. Grund hierfür war, dass viele Funktechnologien im industriellen Umfeld bisher eine zu geringe Leistungsfähigkeit in Bezug auf Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Latenz hatten.¹ Der Anteil der Firmen, die Funktechnologien einsetzen, steigt allerdings in den letzten Jahren. Dabei werden Funklösungen nicht nur im Bereich Fernzugriff (Remote), sondern auch bei der Steuerung von Maschinen eingesetzt. Die Gründe für den Einsatz von Funktechnologie reichen dabei vom zunehmenden Bedarf an Mobilität und Flexibilität in der Produktion, über

die Einsparung von Kosten für die Verkabelung und eine schnellere Umrüstung von Maschinen, bis hin zur Einsparung von Gewicht durch den Wegfall von Kabel. Die wichtigsten Anforderungen an ein Funksystem sind hierbei Zuverlässigkeit, eine sichere Übertragung sowie eine geringe Latenz. Das spiegelt sich auch in den am häufigsten genannten Gründen wider, bisher keine Funksysteme einzusetzen, nämlich Bedenken im Bereich Sicherheit und Zuverlässigkeit. Als genereller Nachteil von Funksystemen wird dabei auch die teilweise fehlende Interoperabilität zwischen den Produkten verschiedener Hersteller gesehen. 5G setzt hier neue Impulse mit seinen geplanten Leistungsmerkmalen bezüglich Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit, Latenz und Lokalisierung (siehe Kapitel 4.1). Daher werden in diesem Leitfaden die Möglichkeiten von 5G im Maschinen- und Anlagenbau für Produktion und Produkt vertieft beleuchtet und die möglichen Herausforderungen beim Einsatz des neuen Mobilfunkstandards betrachtet. Eine Kombination aus Kabel und Funk sowie ein Mischbetrieb von verschiedenen Funksystemen wird dabei noch über längere Zeit die Realität sein.

¹ Quelle: VDE Positionspapier. Funktechnologien für Industrie 4.0, abgerufen unter: <https://www.vde.com/resource/blob/1635512/acf5521beb328d25ffda9fc6a723501/positionspapier-funktechnologien-data.pdf>

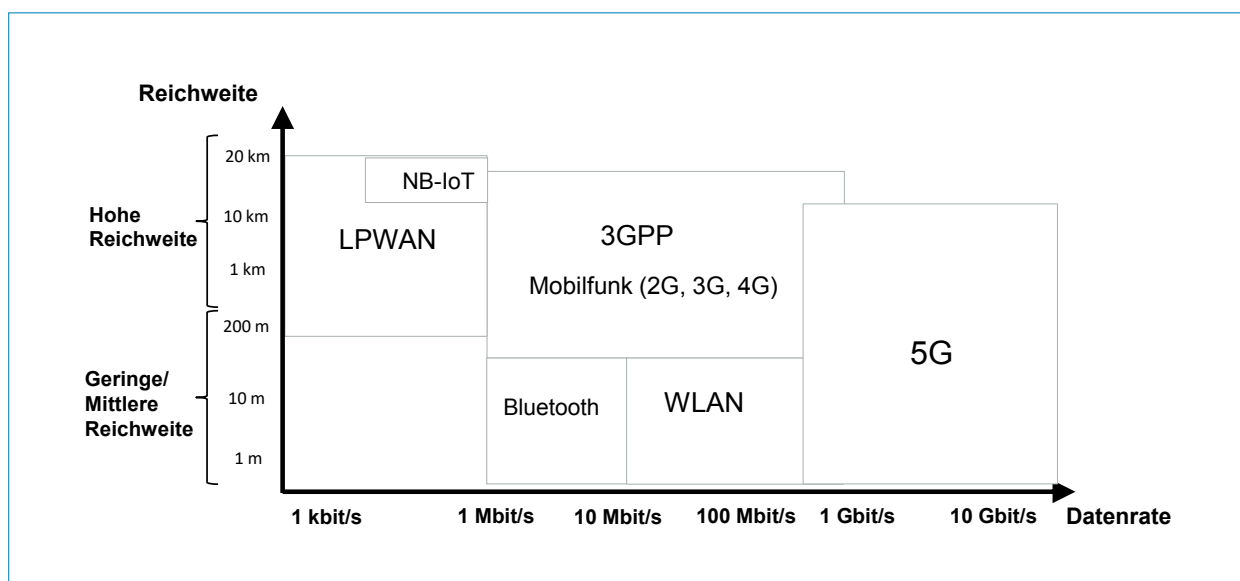


Abbildung 1: Übersicht über die typische Reichweite und Datenrate gängiger Funktechnologien, 4Q/2019.

3.2 Funklösungen in der industriellen Anwendung

Im Folgenden werden einige der am häufigsten verwendeten drahtlosen Technologien kurz beschrieben.²

WLAN: Wireless Local Area Network (WLAN) ist eine Technologie zur Datenübertragung sowohl für Privatanwender als auch für die Industrie, standardisiert durch die Arbeitsgruppe (Working Group) 802.11 des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Die Technologie nutzt die lizenzfreien 2,4 GHz und 5 GHz ISM-Bänder, wobei mit dem kürzlich verabschiedeten Standard IEEE 802.11ax (zertifiziert nach Wi-Fi 6) auch die Nutzung des 6 GHz-Bandes möglich werden soll, falls hierfür eine Allgemein-zuteilung erfolgt. Mit Wi-Fi 6 sollen Datenraten von mehreren Gbit/s durch die effizientere Nutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite realisierbar sein. Überdies soll Wi-Fi 6 eine bis zu 75 % bessere Kommunikationslatenz (bis zu 1 ms für IEEE 802.11ax wave 2³) sowie eine höhere Sendereichweite erzielen. Weitere Features sind ein flexibler und garantierter Quality of Service (QoS) sowie die Energiesparfunktion Target Wakeup Time (TWT), wobei deren Funktionalität erst noch in der Realität getestet werden muss. WLAN eignet sich auch zur Lokalisierung, hierbei werden insbesondere Feldstärke- und Winkelbasierte Lokalisierungsmethoden genutzt.

Eine maximale Spitzendatenrate (peak data rate) von bis 30 Gbit/s soll der in der Standardisierung befindliche IEEE 802.11be-Standard (geplante Zertifizierung nach Wi-Fi 7) ermöglichen. Dafür soll der auch unter Extremely High Throughput (EHT) firmierende Standard das 6 GHz Band sowie eine deutlich größere, minimale Kanalgröße von 40 – 80 MHz nutzen (bei einer maximalen Bandbreite von 160 MHz bzw. 320 MHz). Time Sensitive Networking (TSN) soll der kommende WLAN-Standard mit einer

Latenz von weniger als 5 ms sowie mit einer Zuverlässigkeit von bis zu 99,99 % unterstützen (d.h. 0,01 % der gesendeten Datenpakete werden nicht korrekt übertragen).⁴

Für die Implementierung eines WLAN-Netzes im industriellen Umfeld werden spezielle proprietäre Industrielösungen (sog. Industrielles WLAN) angeboten, die sich durch eine höhere Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Robustheit auszeichnen. Industrielle WLAN Lösungen nutzen optimierte Protokolle, um z.B. eine effizientere Belegung der Kanäle sowie ein besseres Client Management zu ermöglichen (z.B. durch iPCF oder iHOP). Am Markt verfügbare industrielle WLAN-Lösungen erzielen eine Rohdatenrate zwischen 150 Mbit/s und 1,733 Gbit/s (1Q/2020).

Bluetooth: Bluetooth (IEEE 802.12.1) ist eine Funktechnologie, die eine Übertragung geringer Datenmengen über eine relativ kurze Distanz ermöglicht. Bluetooth nutzt wie WLAN das 2,4 GHz ISM-Band. Mit der Einführung von Bluetooth Low Energy mit Bluetooth Version 4 können Geräte energiesparender betrieben werden. Bluetooth Low Energy in Kombination mit Feldstärkemessung und der Fingerprinting-Methoden wird häufig auch für Lokalisierungsanwendungen genutzt. Im Rahmen von Bluetooth Version 5.1 wurde die Winkelmessung in den Standard eingeführt, die eine dm-genaue Lokalisierung ermöglichen kann. Die kürzlich verabschiedete Bluetooth Version 5.2 verspricht eine niedrigere Ende-zu-Ende (E2E) Latenz, insbesondere, wenn unterschiedliche Dienste eines Gerätes gleichzeitig ein Bluetooth-Modul nutzen möchten. Weiter soll ein verbessertes Energie-Management für einen geringeren Energieverbrauch sorgen sowie Interferenzen mit anderen Technologien verringert werden, die auch das 2,4 GHz ISM-Band nutzen.⁵ Im industriellen Bereich wird Bluetooth z.B. zur drahtlosen Übertragung von Steuerungsdaten vom Automatisierungsmodul zum Steuerungsnetz oder für gerichtete Funkverbindungen bei Regalbediengeräten in Hochregallagern in Dienstleistungszentren eingesetzt.

² Es gibt weitere Ausprägungen industrieller Funkkommunikation, z.B. WirelessHART (IEEE 802.15.4), Dedicated Short Range Communication (DSRC), DSRC siehe auch Glossar.

³ IEEE 802.11-18/1160r

⁴ Quelle: López-Pérez/García-Rodríguez/Galati-Giordano/Kasslin/Doppler: IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax, 2019

⁵ Quelle: Nikoukar/Raza/Poole/Günes/Dezfouli: Low-Power Wireless for the Internet of Things: Standards and Applications, 2018

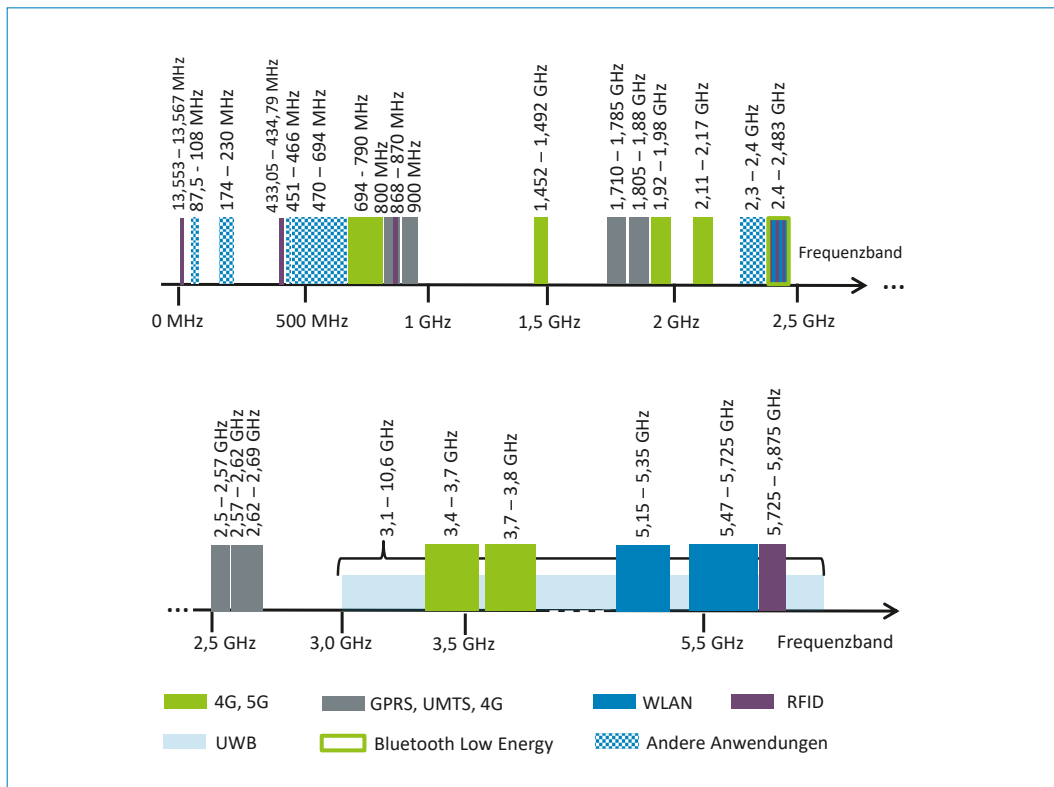


Abbildung 2: Übersicht ausgewählter Frequenzbereiche in Deutschland unter 6 GHz, 4Q/2019.^{6, 7}

RFID: Radio Frequency Identification (RFID) ist eine weit verbreitete Funktechnologie, die insbesondere für die Güter- und Warenidentifikation entlang der Wertschöpfungskette genutzt wird. RFID wird auf unterschiedlichen lizenzfreien Frequenzen verwendet. Gängige Frequenzen sind 433 MHz und 868 MHz. Manche Systeme werden auch in den 2,4 GHz oder 5,8 GHz ISM-Bändern betrieben. RFID kann Daten typischerweise nur über eine geringe Distanz übertragen. Lesegeräte werden hierfür an zentralen Punkten installiert, bspw. an Toren für den Ein- und Ausgang von Waren und Gütern oder an Ein- und Ausgängen von Maschinen innerhalb von Fertigungsstraßen.

Ein RFID-System kann auch als Tracking- oder Lokalisierungssystem genutzt werden. Hierbei wird entweder punktuell festgestellt, wo sich Produktionsgüter im Produktionsprozess befinden (Tracking) oder kontinuierlich lokalisiert (Real-time Location System, RTLS).

LPWAN: Low Power Wide Area Networks (LPWAN) sind Funknetze, die eine Übertragung geringer Datenmengen bei geringem Energieverbrauch und gleichzeitig hoher Netzabdeckung gewährleisten sollen. Um einen geringen Energieverbrauch der Endgeräte zu ermöglichen, weisen diese eine geringe Sendeleistung auf, gepaart mit einer niedrigen Bandbreite und hoher Latenz. In Europa werden LPWANs insbesondere auf dem lizenzfreien 868 MHz SRD-Band und dem 2,4 GHz ISM-Band betrieben. In der Industrie werden LPWANs insbesondere für die Maschinenkommunikation sowie Sensor-Anwendungen verwendet, allerdings nur für Latenz-unkritische Anwendungen. Für zeitkritische Anwendungen und zur Übertragung großer Datenmengen sind LPWANs aufgrund ihrer technologischen Beschaffenheit nicht geeignet.

6 Quelle: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/DrahtloserNetzzugang/Projekt2018/Frequenzen700bis3600_pdf

7 Eine Übersicht über die in Deutschland vergebenen Frequenzen bietet der Frequenzplan der Bundesnetzagentur, abrufbar unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/20191202_Frequenzplan.pdf

Mobilfunk: Seit der Einführung von 4G (auch als Long Term Evolution, LTE, bezeichnet) wurde die Nutzung von Mobilfunk auch für die Industrie interessant. Mit technologischen Neuerungen wie Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) sowie einer höher geordneten Modulation konnte die maximal übertragbare Datenrate für eine definierte Bandbreite vergrößert werden. Grund hierfür ist, dass nun Datenpakete verschiedener Nutzer über die ganze zur Verfügung stehende Bandbreite und deren Sub-Trägerfrequenzen mit unterschiedlicher Bandbreite nach Maßgabe der Nutzeranforderungen verteilt werden können. Benötigt ein Nutzer (z.B. Temperatursensor an einer Maschine) nur eine geringe Datenrate (z.B. Sensordaten), so wird ihm eine Sub-Trägerfrequenz mit nur geringer Bandbreite zugewiesen. Hierdurch wird die zur Verfügung stehende Bandbreite effizienter genutzt, da jedem Nutzer die Bandbreite zugeteilt wird, die er benötigt. Zudem wurde die maximale Bandbreite auf 20 MHz erhöht. Mit der Standardisierung von LTE-M (LTE Machine Type Communication) und LTE Cat-NB1 (NarrowBand IoT) wurde LTE für die Maschinenkommunikation sowie IoT-Anwendungen optimiert. 4G-Netze werden auch als nichtöffentliche Netze auf Werksgeländen und in Fabrikhallen betrieben.

UWB: Für eine genaue Lokalisierung wird in der Industrie häufig die Funktechnologie Ultra Wideband (UWB) eingesetzt. Die Standardisierung von UWB zur Übertragung großer Datenmengen scheiterte, wodurch die Technologie weitestgehend nur zur Lokalisierung genutzt

wird. Da UWB das gesamte Frequenzspektrum zwischen 3,1 GHz und 10,6 GHz (in der EU insbesondere 6 GHz bis 8,5 GHz) nutzt und somit den Frequenzbereich vieler anderer Funktechnologien stören kann, ist der Einsatz dieser Technologie strengen regulatorischen Vorgaben unterworfen, die nicht zuletzt die Signalstärke stark beschränken. In der Industrie werden UWB Systeme unter anderem für die Lokalisierung von Produktionsgütern und fahrerlosen Transportsystemen in Produktions- und Logistik-szenarien genutzt.

3.3 Entscheidungskriterien für die Nutzung von Funk

Bei der Vernetzung im industriellen Bereich sind kabelgebundene Lösungen bisher die erste Wahl. Sie sind sinnvoll, wenn es um besonders zuverlässige und stabile Verbindungen geht, oder wenn durch die notwendige kabelgebundene Verlegung von Energieleitungen bereits Kabelbäume vorhanden sind. Kabellose Lösungen sind meist dann sinnvoll, wenn bestehende Infrastrukturen erweitert oder flexibel vernetzt werden sollen. Der Einsatz von funkbasierter Kommunikation ist daher empfehlenswert bzw. notwendig, wenn folgende Aspekte und Kriterien in hohem Maße erforderlich werden (siehe auch Tabelle 2):

- hohe Bewegungsfreiheit bzw. **Mobilität** (z.B. mobile und bewegliche Systeme wie Fahrerlose Transportsysteme (FTS) oder Werkzeuge)

Leistungskriterien funkbasierte Kommunikationssysteme	Leistungskriterien funkbasierte Lokalisierungssysteme	Weitere Kriterien zur Leistungsbeurteilung eines Funksystems
• Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit • Mean Time Between Failures (MTBF) • Latenz • Reichweite • Survival Time • Jitter • Quality of Service (QoS) • Robustheit	• Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit • Latenz (Position) • Positions- und Richtungs-genauigkeit • Time to first fix (TTFF)	• Maximale Dichte der Endgeräte (User Equipment, UE) • Maximale Geschwindigkeit der Endgeräte • Energieverbrauch • IT-Sicherheit (Vertraulichkeit und Integrität) • Kosten

Tabelle 1: Überblick ausgewählte Leistungskriterien für funkbasierte Kommunikations- und Lokalisierungssysteme.

- Zugang zu produktionsnahen Informationen , in **dynamischen Umgebungen** (z.B. bewegliche Lager- und Produktionsgestelle)
- **Nachrüstung** von Bestandsmaschinen (sog. Retrofit, z.B. für das Energie-Monitoring)

Die Entscheidung, ob eine kabelgebundene oder kabellose Lösung für den eigenen Anwendungsfall geeignet ist, orientiert sich an den spezifischen technischen Anforderungen der Anwendung, welche dann mit der Leistungsfähigkeit der Technologie abzugleichen ist und nach den eigenen Bedürfnissen gewichtet werden muss. Wichtige Leistungskriterien für funkbasierte Systeme sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Kriterien	Kabel	Funk
Flexibilität		
Anpassungsfähigkeit der Installation an geänderte Produktionsprozesse	Niedrig	Moderat bis Hoch
Zugriff auf Informationen	Niedrig an Datenleitung gebunden	Hoch im Funkabdeckungsbereich über konforme Endgeräte verfügbar
Bewegungsfreiheit (Mobilität)	Niedrig eingeschränkt	Hoch flexibel
Robustheit		
Verschleißanfälligkeit Einfluss von langfristigen mechanischen Bewegungen bei dynamischen Strecken	Hoch Risiko von Brüchen	Niedrig verschleißfrei
Störanfälligkeit Einfluss von Störsendern	Niedrig	Moderat bis Hoch
Einfluss von Umweltbedingungen Staub, Feuchtigkeit, Temperatur	Niedrig	Niedrig
Einfluss von Umgebungsbedingungen räumliche, bauliche, sowie materielle Beschaffenheit	Niedrig	Moderat bis Hoch
Zugriffssicherheit Möglichkeit des unbefugten Zugriffs auf den Kommunikationskanal und Sicherheit der verwendeten Authentifizierungsverfahren sowie Protokolle	Hoch	Moderat
Kosten		
Investitionskosten Durchbrüche, Trassenführung, Leerrohre, Switches, Server, Kabel	Moderat bis Hoch	Hoch RAN, Core, Funkplanung
Installationsaufwand	Hoch Energiekabel und Datenkabel	Moderat Antenneninstallation
Betriebskosten	Niedrig	Moderate bis Hoch Updates, Support

Tabelle 2: Ausgewählte Kriterien zur Entscheidung Kabel oder Funk. Bewertungsparameter: kritisch (rot), moderat (gelb), unkritisch (grün).

4 Überblick 5G

4.1 Was ist 5G

5G steht für die aktuelle, fünfte Mobilfunkgeneration. Zusammenfassend verspricht 5G schnelles mobiles Breitband, hochzuverlässige Netze mit sehr geringer Latenz sowie eine sehr hohe Dichte an Endgeräte. Nachfolgend werden diese angestrebten Leistungsmerkmale genauer erläutert:

- **eMBB** (enhanced Mobile Broadband) soll eine sehr hohe Spitzen-Datenrate (Peak Data Rate) von bis zu 20 Gbit/s im Downlink (DL) und 10 Gbit/s im Uplink (UL) bieten.
- **mMTC** (massive Machine Type Communication) soll die Anbindung von bis zu 1 Mio. Endgeräten pro km² ermöglichen.
- **URLLC** (Ultra-Reliable and Low-Latency Communication) garantiert eine sehr zuverlässige Kommunikation mit sehr geringer Latenz (bis zu 1 ms) und damit eine hohe Verfügbarkeit für kritische Anwendungen.

Zu beachten ist, dass nicht alle Leistungsmerkmale gleichzeitig bereitgestellt werden können bzw. bestimmte Voraussetzungen erfüllt werden müssen. Um eine sehr geringe Latenz zu erzielen, ist z.B. eine speziell darauf ausgelegte Infrastruktur notwendig. Dies beinhaltet zum Beispiel eine hohe Dichte von Antennen, die Nutzung hoher Frequenzbereiche und eine Anbindung der Antennen über Glasfaserkabel. Grundsätzlich kann 5G an der Luftschnittstelle alle 0,5 ms ein Datenpaket anliefern oder abholen. Die Daten müssen allerdings verschiedene Protokollschichten sowie die Mobilfunkinfrastruktur (z.B. Router) passieren. Daher kommen auch Lösungen wie Edge Computing zum Einsatz, bei der die Berechnungen direkt in der Infrastruktur stattfinden (siehe auch Kapitel 7.2). Mit dem ersten 5G Release 15, das ab 2020 kommerzialisiert wird, werden noch nicht alle Leistungsmerk-

male vollständig verfügbar sein. Diese folgen dann mit den Releases 16, 17 und 18 in den kommenden Jahren. Ein Ausblick auf die anstehenden Entwicklungen innerhalb von 5G wird in Kapitel 8.5 gegeben.

4.2 Wie erfolgt die Standardisierung von 5G

Die Standardisierung von 5G erfolgt durch die Arbeit der Standardisierungsorganisation 3GPP (3rd Generation Partnership Project), welche schon die Standardisierung von 3G (UMTS) sowie 4G (LTE) vorangetrieben hat. Im Rahmen der 3GPP sind verschiedene Interessengruppen und Organisationen in unterschiedlichen Funktionen an diesem Vorhaben beteiligt. Im Folgenden werden diese kurz beschrieben:

Die sog. **Organizational Partners** der 3GPP (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TSDI, TTA, TTC) entsprechen den großen sieben Standardisierungsorganisationen aus China, Europa, Indien, Japan, Korea sowie den USA. Sie bestimmen die grundsätzliche Ausrichtung und Strategie der 3GPP. Aktiv an der Standardisierung teilnehmen können Unternehmen und Organisationen, die als sog. **Individual Member** (IM) Mitglied einer der oben genannten Organizational Partners sind.

Die sog. **Market Representation Partners** (MRP) bringen die Anforderungen, die bestimmte Märkte an 5G haben, in die 3GPP ein – sie sind also Interessenvertreter von Industriezweigen oder Branchen. Die MRPs haben dabei nur eine beratende und keine Entscheidungsfunktion. MRPs sind z.B. 5G ACIA, IPV6 Forum, Small Cell Forum und TD Industry Alliance.⁸

⁸ Eine detaillierte Liste finden Sie hier: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/partners>

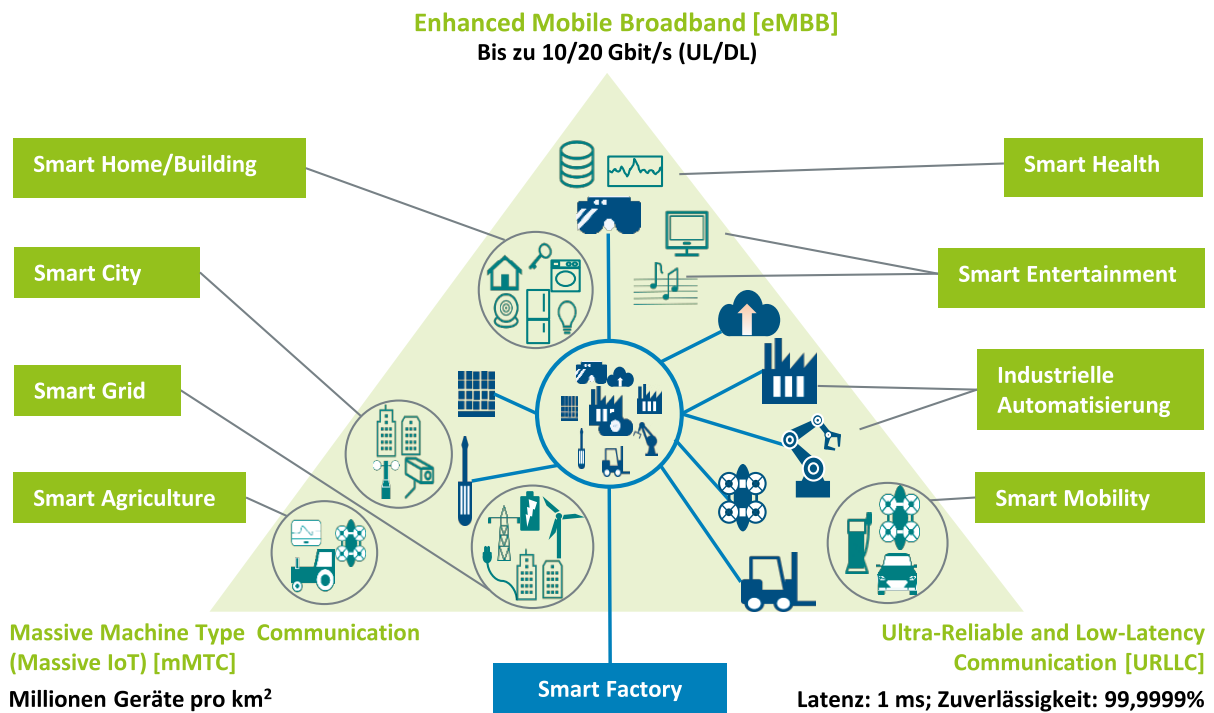


Abbildung 3: Überblick Leistungsmerkmale und Anwendungen von 5G in Anlehnung an ITU IMT-2020 (International Telecommunication Union ITU).

Darüber hinaus nehmen weitere **Standardisierungsgremien und Projektgruppen** am Standardisierungsprozess im Rahmen einer formellen Zusammenarbeit teil. Neben der ITU sowie den Zertifizierungsorganisationen PTCRB und GCF sind unter anderem folgende Akteure beteiligt: IEEE, 5G Forum, 5G IA, One M2M, IMT-2020.⁹

Die Standardisierung ist ein fortlaufendes Verfahren, in dem neue Funktionen in einem klar definierten Prozess beschlossen und veröffentlicht werden. Diese einzelnen Veröffentlichungen nennt man **Release**. Neue Releases werden ca. alle 12 – 18 Monate veröffentlicht. Zwischen der Veröffentlichung eines Releases und der Verfügbarkeit von Produkten am Markt vergehen im Schnitt weitere 12 – 18 Monate.

In dieser Zeit werden parallel weitere Releases veröffentlicht. Die Planung der Weiterentwicklung von 5G ist in den Kapiteln 8.5 und 9.3 beschrieben.

Mit dem 3GPP Release 15 wurde der erste Release innerhalb der Entwicklung von 5G verabschiedet. Hierbei unterscheidet man zwischen Non-standalone, NSA, LTE mit 5G (Release wurde im Dezember 2017 verabschiedet) und Standalone, SA, eigenständiges 5G (Release wurde im Juni 2018 verabschiedet). Für den industriellen Sektor ist vor allem der SA-Betrieb ohne LTE interessant. Mit 3GPP Release 16 (Dezember 2019) und Release 17 (geplant für 2021) erfährt 5G eine kontinuierliche Verbesserung mit der Implementierung erweiterter Funktionen. Vor allem ab Release 17 und mit dem in Aussicht stehenden Release 18 wird die Funktionalität von 5G bezüglich der speziellen Anforderungen aus verschiedenen Branchen wie z.B. der Industrie stetig optimiert.

⁹ Eine detaillierte Liste finden Sie hier: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/partners>.

4.3 Wie erfolgt die Kommerzialisierung von 5G

Erfahrungsgemäß vergehen 12 – 18 Monate zwischen der Verabschiedung eines Releases und dem Erscheinen der ersten neuen Features in einzelnen Mobilfunk-Komponenten und Produkten. Typischerweise werden nicht alle neuen Funktionen eines 3GPP-Standards kommerzialisiert, d.h. in 5G-fähigen Produkten verfügbar sein. Die Komponenten- und Endgerätehersteller entscheiden selbst, welche Funktionen in ihren Produkten verfügbar sind. Die Überführung der Funktionen aus dem Standard in kommerziell verfügbare Komponenten ist die Voraussetzung für den Einsatz von 5G im Maschinen- und Anlagenbau.

Der Einsatz von 5G in Maschinen oder Anlagen (5G im Produkt der Maschinen- und Anlagenbauer) hängt von der Verfügbarkeit von 5G-Komponenten ab, die zur Integration in andere Systeme geeignet sind (siehe Kapitel 9). Die Verfügbarkeit von geeigneten 5G-Infrastrukturkomponenten für sog. Non-Public Networks (NPN)/Campus-Netze hingegen ist erforderlich, um 5G in der Produktion einzusetzen (siehe Kapitel 7 und 8).

5 Welche Vorteile bringt 5G für die Industrie

Mit Hilfe von 5G sollen die unterschiedlichen Anforderungen verschiedener Industriezweige sowie deren Anwendungen in einer Funklösung abgebildet werden, um Skaleneffekte nutzen zu können, die auf der Endgeräteseite sowie auf Netzinfrastruktur- und Netzbetriebsseite entstehen. Durch eine geplante, deutlich höhere Leistungsfähigkeit in Bezug auf Übertragungsraten, Zuverlässigkeit und Latenz aber auch einer größeren Flexibilität soll 5G die verschiedenen Vorteile einzelner Funklösungen in einem Netz abbilden. Zudem erfüllt 5G die von der Industrie priorisierten Anforderungen wie erhöhte Sicherheit, einen garantierten Quality of Service (QoS) über das Network Slicings sowie eine erhöhte Verfügbarkeit.

Nachfolgende Tabelle stellt auf Basis ausgewählter Kriterien Orientierungswerte dar, welche die Leistungsfähigkeit von 5G im Vergleich zu anderen Funklösungen aufzeigen kann. Zu beachten ist, dass die Latenz bereits heute im Release 15 deutlich geringer als in den definierten QoS-Profilen ist (bis unter 1 ms in einer Richtung). In einem Campus-Netz/NPN (siehe Kapitel 7) sind aktuell bereits 0,5 ms Latenz im Downlink (DL) von der Basisstation zum UE möglich (siehe auch Kapitel 5.1).

¹ Die angegebenen Werte sind der 5G Spezifikation 3GPP TS 23.501 Release 15 entnommen, welche QoS-Klassen (5G NR QoS Identifier, 5QI) definiert. Diese 5QI enthalten alle sowohl eine Packet Error Rate als auch ein Packet Delay Budget. Darüber hinaus gehende 5QI Zielwerte werden innerhalb des Standardisierungsprozesses in weiteren Releases diskutiert und können sich teilweise noch ändern bzw. verbessern gemäß den Service Requirements in 3GPP TS 22.261 und TS 22.104 sowie Erweiterungen für URLLC im 5G Kernnetz in der Studie TR 23.725.

² Max. 100 MHz Bandbreite können im Rahmen eines NPN im Frequenzbereich 1 (FR1) lizenziert werden. Wird das NPN von einem Mobilfunkanbieter betrieben, so beschränkt sich die maximal verfügbare Bandbreite darauf, wie viel dem Mobilfunkanbieter bei der Frequenz-Auktion für das 3,6 GHz-Band zugeteilt wurden. Die Deutsche Telekom erhielt dabei 90 MHz, Vodafone 90 MHz, Telefónica 70 MHz und Drillisch 50 MHz. Im in Deutschland noch nicht zugeteilten Frequenzbereich 2 (FR2) sind bis zu 400 MHz Bandbreite vorgesehen (siehe auch Kapitel 7.3.3.). Damit können höhere Datenraten bis zu 20 Gbit/s bei geringerer Reichweite erreicht werden.

³ Zielwerte für die Lokalisierungs Genauigkeit im Innenbereich sind 3 m (Release 16), < 1 m (Release 17) und wenige dm (Release 18).

⁴ Die maximale Bandbreite von 100 MHz ist nur im Wege der Carrier Aggregation (CA) zu erreichen. Keiner der Mobilfunkanbieter in Deutschland erreicht diese Bandbreite im Wege der CA. Ansonsten ist die maximale zusammenhängende Bandbreite auf 20 MHz beschränkt.

⁵ Da UWB grundsätzlich nur als Lokalisierungstechnologie genutzt wird, gelten die angegebenen Werte für die Lokalisierungsleistung der Technologie.

⁶ Die Lokalisierungs Genauigkeit variiert hinsichtlich des genutzten Lokalisierungssystems.

⁷ Die maximale Anzahl von UEs, die aktiv mit einer LTE Funkzelle verbunden sein kann, variiert je nach Zelltyp. Beispiele schwanken zwischen 200 UEs (www.informationszentrum-mobilfunk.de/technik/funktionsweise/funkzellen-netze/) und 800 UEs pro Small Cell. (<https://www.nokia.com/blog/mission-not-impossible-small-cells-some-big-challenges>).

⁸ Die angegebenen Werte beziehen sich auf IEEE 802.11ax (Wi-Fi 6) und können je nach verwendetem Standard und verwendeter Hardware variieren.

⁹ 10 ms ist die maximale Kommunikationslatenz nach IEEE 802.11ac/ax. Die Kommunikationslatenz von industriellem WLAN ist ggf. niedriger als die angegebene Latenz. Die Kommunikationslatenz der zweiten Entwicklungsstufen von IEEE 802.11ax soll sich bis auf 1 ms verbessern (Zielwert). Die Kommunikationslatenz von IEEE 802.11be soll bis zu 5 ms betragen (befindet sich im Standardisierungsprozess) bei einer Zuverlässigkeit von bis zu 99,99 %. Grundsätzlich kann die worst-case Latenz bei WLAN deutlich höher ausfallen.

¹⁰ Die Lokalisierungs Genauigkeit hängt von der verwendeten Lokalisierungsmethode ab. Eine Lokalisierungs Genauigkeit von 5 m und besser ist mit Feldstärkenmessung in Kombination mit Fingerprinting möglich. Für den kommenden Lokalisierungsstandard IEEE 802.11az wird eine Lokalisierungs Genauigkeit von bis zu 1 m und weniger erwartet.

¹¹ Die Lokalisierungs Genauigkeit hängt von der verwendeten Lokalisierungsmethode sowie dem genutzten Standard ab. Eine Lokalisierungs Genauigkeit von bis zu 85 cm ist dabei nur mit Winkelmessung (sog. Angle of Arrival, AoA) zu erzielen, wobei hierfür speziellen Antennen (sog. Antennen Arrays) notwendig sind. BLE in Kombination mit RSSI-fingerprinting erreicht eine Lokalisierungs Genauigkeit zwischen 5 m und 2 m.

¹² Für eine bessere Übersichtlichkeit wird nur UHF RFID dargestellt. Die abgebildeten Werte unterscheiden sich dabei für LF, HF und SHF RFID.

¹³ Die typische Lesegeschwindigkeit eines RFID UHF-Systems liegt zwischen 200 und 500 Transpondern pro s.

¹⁴ Die angegebenen Werte sind der LTE Spezifikation 3GPP TS 23.203 entnommen, welche QoS-Klassen (Quality Class Indicator, QCI) definiert. Diese QCI enthalten alle sowohl eine Packet Error Loss Rate als auch ein Packet Delay Budget.

¹⁵ je nach Netzausbau und Konfiguration.

¹⁶ Die angegebenen Werte für Bluetooth beziehen sich auf BLE Version 5.

¹⁷ Quelle: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/things-you-should-know-about-bluetooth-range>

Technologie	Verfüg- bar- keit (%)**15	Latenz (s)	Reichweite pro Funkzelle (typisch; m)	Datenrate (DL; Mbit/s)	Max. Geschwin- digkeit des UEs (km/h)	Frequen- zen (Europa)	Band- breite (MHz)	UE pro Zelle/AP	Lokalisie- rungsgenau- igkeit (in Gebäuden, typisch; m)	
5G*1	Release 15	bis zu 99,9999 % bei 10 ms E2E Latenz	bis zu 5 ms E2E Latenz bei 99,999 % Verfüg- barkeit	10 – 50 m (Gebäude, Femtozelle), ca. 0,5 – 2 km (Werks- gelände, Mikrozelle)	bis zu 20 Gbit/s voraus- sichtlich bis zu 4 Gbit/s (NPN)*21	bis zu 500 km/h	3,4 – 3,7 GHz (öffentlich) 3,7 – 3,8 GHz (NPN) 26 GHz (in Planung)	100 MHz (FR1)*2; 400 MHz (FR2)	mehrere tausend	bis zu 20 m (Latenz: unter 30 s)
	Release 16	noch nicht spezifiziert	noch nicht spezifiziert; geringere Latenz als bei Release 15 (5 ms) zu erwarten							Ziel: unter 3 m*3 (Latenz: weni- ger als 1 s)
	Release 17	noch nicht spezifiziert	noch nicht spezifiziert, geringere Latenz zu erwarten (< 5 ms)							noch nicht spezifiziert Ziel: unter 1 m (Latenz: weniger als 100 ms)
	Release 18	noch nicht spezifiziert	noch nicht spezifiziert, geringere Latenz zu erwarten (< 5 ms)							noch nicht spezifiziert, mögliches Ziel: wenige dm (Latenz bis zu 10 ms)
LTE und LTE sTTI*14	bis zu 99,9999 % bei 10 ms Latenz	bis zu 5 ms bei 99,999 % Verfüg- barkeit	10 – 50 m (Fabrikhalle) 0,5 – 2 km (Werks- gelände)	bis zu 1 Gbit/s (4x4)*24; bis zu 4 Gbit/s (8x8)*25	bis zu 300 km/h	700, 800, 900 MHz 1,8 / 1,5 / 2,1 / 2,6 GHz	20 MHz; 100 MHz*4	bis zu 1000*7	Bis zu 20 m (Außen- bereich) (Latenz: unter 30 s)	
WLAN*8	k.A.	bis zu 10 ms*9	10 – 20 m (typisch, komplexe Industrieum- gebung) bis zu 30 m (Lager) 30 – 50 m (Büro) bis zu 300 m (Freifläche)	bis zu 9,6 Gbit/s (theore- tisch)*23 bis zu 1,7 Gbit/s (industrielles WLAN)	k.A.	2,4 GHz 5 GHz	20 – 160 MHz	bis zu 250	< 5 m*10	
BLE*16	k.A.	typisch zwischen 7 und 20 ms	Innenbe- reich: 10 m (typisch)*17 – 50 m (maximal, Latenz > 100 s)*18 Außenbe- reich: bis zu 300 m*19	1 – 2 Mbit/s (BLE 5)	k.A.	2,4 GHz	1 – 2 MHz	k.A.	5 m – 0,85 m *11	
RFID (UHF)*12	k.A.	bis zu wenige ms	10 m (pas- siv) – 100 m (aktiv)*20	bis zu 50 kbit/s	k.A.	433 MHz 868 MHz	1,74 MHz 2 MHz	bis zu 500 pro s*13	bis zu 1 m (RTLS)	
UWB*5	bis zu 99,9 % (Lokali- sierung)	bis zu 10 ms (Lokalisie- rung)	10 – 50 m (Innen- bereich)	bis zu 27,24 Mbit/s *22	bis zu 50 km/h	3,1 – 10,6 GHz	mind. 500 MHz	bis zu 5500	2 m bis 0,03 m*6	

Tabelle 3: Vergleich der Leistungsfähigkeit von ausgewählten Funktechnologien anhand von spezifischen Kriterien, 4Q/2019.

Network Slicing

Durch Network Slicing wird es möglich, innerhalb des 5G Netzes eigene, logisch getrennte Netze mit spezifischen Eigenschaften bereitzustellen. Bei der Ressourcenplanung werden die definierten Eigenschaften (QoS) des Slice berücksichtigt, um sicherzustellen, dass weder Kapazität noch andere Merkmale der Slices beeinträchtigt und somit zugesicherte SLAs (Service Level Agreement) unterschritten werden. Unter anderem sind folgende Beispiele für Network Slicing denkbar:

- Ein mMTC genannter Slice wird definiert mit niedriger Übertragungskapazität, Bandbreite und Best-Effort-Eigenschaften, dem zeitunkritische Anwendungen mit niedrigen Datenmengen zugeordnet werden (z.B. Temperatursensoren).
- Ein URLLC genannter Slice kann mit hoher Priorität in der Zustellung arbeiten, damit ihm zugeordnete autonom fahrende Roboter oder Drohnen zuverlässig gesteuert werden können.

- Ein dritter eMBB genannter Slice kann zur Bereitstellung hoher Bandbreiten angelegt werden, um Videoanwendungen realisieren zu können.

Die genannten Slices beeinflussen sich im Parallelbetrieb nicht, was eine zuverlässige Nutzung aller Anwendungen ermöglicht.

5.1 Vergleich von 5G mit 4G im industriellen Umfeld

Die Anwendungsmöglichkeiten von 5G im industriellen Bereich sind aufgrund der erweiterten Leistungsfähigkeit um ein vieles breiter als von 4G. 5G-Netze dürften aufgrund ihrer Flexibilität, Virtualisierung und der Kompatibilität auf längere Sicht mit geringerem Installations- und Planungsaufwand verbunden sein.

Latenz: Während im 4G-Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN) die Basisstationen (Base Bands Units, BBUs) eine verteilte Architektur (Distributed RAN, D-RAN) besitzen, zeichnet sich 5G durch eine zentralisierte Architektur (Centralized RAN, C-RAN) aus, die das Kernnetz hinsichtlich des Datenaufkommens entlastet und dadurch zukünftig eine niedrige Latenz ermöglicht. In 5G sind für den Release 15 die QoS-Profile spezifiziert (mit E2E Latenz und zugehöriger Zuverlässigkeit).¹⁰ Diese sind mit den bisher aus 4G bekannten vergleichbar.¹¹ Da 5G in seiner Rahmenstruktur aber deutlich flexibler als 4G aufgebaut ist, bietet es auf der Radioschnittstelle eine geringere Latenz. Die Verzögerungszeiten auf der 5G-Funkschnittstelle ohne zugehörige Netzelemente bis zum öffentlichen Datennetz sind bereits heute im Release15 deutlich geringer (bis unter 1 ms in einer Richtung) als die E2E Latenz der definierten QoS Profile. Bei einer optimierten Konfiguration in einem Campus-Netz/NPN (siehe Kapitel 7) sind aktuell bereits

Fortsetzung der Tabellen-Erläuterungen von Seite 20

¹⁸ Eine Reichweite von ca. 50 m ist im Innenbereich möglich (normaler Modus, Datenrate: ca. 80 kbit/s, Latenz > 100 s). Im sog. Long-Range Modus ist die maximale Reichweite etwas höher (60 m bei einer Datenrate von ca. 12 kbit/s und einer Latenz von über 680 s).

¹⁹ Eine Reichweite von ca. 350 m ist im Außenbereich unter LOS-Bedingungen möglich (normaler Modus, Datenrate: ca. 180 kbit/s, Latenz: > 45 s). Im sog. Long-Range Modus ist die maximale Reichweite etwas höher (> 530 m bei einer Datenrate von ca. 18 kbit/s und einer Latenz > 450 s).

²⁰ Quelle: <https://www.rfid-grundlagen.de/frequenzen.html>

²¹ Quelle: 3GPP TR 37.910.

²² Für UWB sind in IEEE 802.15.4-2011 vier verschiedene Datenraten definiert: 110 kbit/s, 850 kbit/s, 6,81 Mbit/s, 27,24 Mbit/s.

²³ Für den neuen WLAN-Standard IEEE 802.11ax beträgt die theoretische maximale Datenrate 9,6 Gbit/s. Dieser Wert kann in realen Installationen typischerweise nicht erreicht werden.

²⁴ Maximale theoretische Datenrate bei 16 (4x4) Antennenelementen.

²⁵ Maximale theoretische Datenrate bei 64 (8x8) Antennenelementen.

¹⁰ Quelle: siehe hierzu 3GPP TS 23.501.

¹¹ Quelle: siehe hierzu 3GPP TS 23.203.

ca. 0,5 ms Latenz im Downlink (DL) von der Basisstation zum UE möglich (bei einem Subträgerabstand/SCS von 60 kHz). Zahlenwerte für unterschiedliche Frequency Division Duplex (FDD) und Time Division Duplex (TDD) Konfigurationen sind im Detail beschrieben im Self-Assessment Report TR 37.910.¹²

Kosten: Im Gegensatz zur Mehrheit der 4G Cores (EPC, Enhanced Packet Core), die als eigenständige Netzelemente realisiert sind, setzt der 5G Core (5GC) auf Virtualisierung und virtualisierte Netzelemente, die sogenannten Virtual Network Functions (VNF). Die Virtualisierung von Netzfunktionen ermöglicht den Betrieb des 5GC auf kommerziell verfügbarer Hardware (Commercial Off-the-Shelf, COTS) bzw. Cloud Plattformen. Mit COTS sind Kosteneinsparungen durch Nutzung von standardisierter Hardware und durch einfache Integration der Mobilfunkinfrastruktur in die IT möglich.

Installation: Die Kosten sowie der Installationsaufwand im RAN kann bei 5G im Vergleich zu 4G durch die C-RAN Architektur sowie durch den verstärkten Einsatz Small Cells weiter reduziert werden (s. auch Kapitel 8). Weiterhin entfällt im 5GC die interne Verkabelung von Netzelementen und vereinfacht dadurch die Installation des Kernnetzes.

Lokalisierung: In 4G war bisher üblicherweise eine Lokalisierungsgenauigkeit von bis zu 20 m möglich. Für industrielle Anwendungen, die deutlich höhere Positioniergenauigkeiten benötigen, ist 4G daher bisher nicht geeignet. In 5G werden ab den Releases 16 und 17 neue Verfahren standardisiert, die eine Lokalisierungsgenauigkeit bis zu 3 m (Rel. 16) bzw. 1 m und darunter (geplant für Rel. 17) ermöglichen sollen. Innerhalb der Standardisierung von 5G wird aktuell eine Lokalisierungsgenauigkeit von bis zu 20 cm angestrebt, wobei Simulationen die prinzipielle Leistungsfähigkeit von 5G hinsichtlich dm-genaue Lokalisierung bestätigen.

Sicherheit¹³: Im Rahmen der Standardisierung von 5G wurden neue Sicherheitsmaßnahmen und -konzepte erarbeitet, um Sicherheitslücken der bisherigen Standards 3G und 4G zu schließen und Sicherheitsmechanismen in Richtung eines flexiblen und dynamischen Netzes einzuführen. In 5G werden weit verbreitete Standardverfahren für Verschlüsselung (z.B. Verschlüsselung der Subscriber Identität – Subscription Concealed Identifier, SUCI –) und Integrität, aber auch Verfahren für die Authentifizierung und das Key-Agreement auf Basis von Extensible Authentication Protocol (EAP) verwendet. Neben Transport Layer Security (TLS 1.3) kommt für den sicheren Informationsaustausch zwischen Netzfunktionen OAuth 2.0 (Open Authorization Version 2.0) zum Einsatz.

5.2 Vergleich von 5G mit WLAN im industriellen Umfeld

Der Vergleich zwischen 5G und WLAN zeigt an ausgewählten Kriterien, das voraussichtlich mit 5G eine deutlich verbessertes Handover sowie ein besserer garantierter QoS mit geringerer Störanfälligkeit möglich sein wird.

Bandbreite und

Übertragungskapazitäten: Für WLAN bewegt sich die Bandbreite bisher zwischen 20 MHz und 160 MHz (IEEE 802.11ax¹⁴), wobei in Zukunft bis zu 320 MHz (IEEE 802.11be¹⁵) möglich sein sollen. Im 3,7 GHz-Frequenzband, das für Non-public Networks (NPNs, siehe Kapitel 7.3) vorgesehen ist, beträgt die maximale Bandbreite bei 5G 100 MHz. Im

13 Beschreibung der 5G-Sicherheitsarchitektur in 3GPP: TS 33.401 (System Architecture Evolution (SAE)) und 3GPP TS 33.501 (Security architecture procedures for 5G systems).

14 Quelle: López-Pérez/García-Rodríguez/Galati-Giordano/Kasslin/Doppler: IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax, <https://arxiv.org/pdf/1902.04320.pdf>

15 Quelle: López-Pérez/García-Rodríguez/Galati-Giordano/Kasslin/Doppler: IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The Next Generation of Wi-Fi Technology Beyond 802.11ax, zuletzt abgerufen unter: <https://arxiv.org/pdf/1902.04320.pdf>

12 Quelle: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3190>

Vergleich zu WLAN verwendet 5G aber ein lizenziertes Band, das von keiner anderen Funkanwendung belegt wird.

Zertifizierte Endgeräte nach Wi-Fi 6 können theoretisch bis zu 9,6 Gbit/s (DL) erreichen, am Markt verfügbare industrielle WLAN-Produkte können Rohdatenraten zwischen 150 Mbit/s und 1,733 Gbit/s erreichen. Für 5G sind Spitzenwerte mit bis zu 20 Gbit/s (DL) angepeilt. Hierzu ist allerdings eine aggregierte Bandbreite von mind. 400 MHz notwendig (siehe auch Kapitel 7.3.3). In einem NPN (mit 100 MHz Bandbreite) können voraussichtlich bei optimaler Konfiguration und unter geeigneten Bedingungen Übertragungskapazitäten von 4 Gbit/s erreicht werden.¹⁶ Der gerade in der Standardisierung befindliche WLAN Standard IEEE 802.11be soll im 6 GHz Band eine Spitzendatenrate von 30 Gbit/s erreichen.

QoS, Latenz: WLAN-fähige Endgeräte für den Heimbereich nutzen standardmäßig das CSMA/CA-Protokoll, welches der Kollisionsvermeidung von Datenpaketen dient. Hierbei wählt ein WLAN Access Point (AP, Zugangspunkt) zufällig Endgeräte aus, die Datenpakete senden dürfen, wobei hierdurch ein bestimmter QoS nicht garantiert werden kann. Gleichzeitig steigt die Latenz mit der Anzahl an Netzteilnehmern spürbar an. Industrielles WLAN hingegen nutzt sog. Controller in Verbindung mit der Industrial Point Coordination Function (iPCF) und weiterer Mechanismen, welche die Sendeberechtigungen der einzelnen APs zentral regeln und latenzkritische Anwendungen priorisieren können. Hierdurch kann letztendlich eine geringe Latenz von unter 10 ms erreicht und teilweise die Anforderungen industrieller Ethernet-Protokolle wie Profinet I/O erfüllt werden. Auch wenn damit eine bessere Latenz garantieren werden kann, so ist das Problem eines zu hohen Jitters und einer zu hohen worst-case Latenz noch nicht gelöst.

Für den kürzlich verabschiedeten WLAN-Standard IEEE 802.11ax wurde eine Verbesserung des QoS durch Base Station Coloring sowie eine niedrigere Latenz angekündigt, wobei die typische Latenz von IEEE 802.11ax wave 1 (erste Generation) zwischen 50 und 10 ms liegen soll. Für IEEE 802.11ax wave 2 (zweite Generation) ist eine Verringerung der Latenz auf bis zu 1 ms geplant. Da bisher nur wenig Standard-konforme Hardware verfügbar war, ist eine aussagekräftige Überprüfung der angekündigten Leistungsfähigkeit von 802.11ax noch nicht möglich. Der gerade in der Standardisierung befindliche WLAN Standard IEEE 802.11be zielt auf eine Latenz von bis zu 5 ms. Im Gegensatz hierzu ist es einem 5G-Netz möglich, die Bereitstellung von Diensten in einer bestimmten Qualität an Endgeräte zu priorisieren und hierdurch QoS mit einer niedrigeren Latenz zu garantieren.

Störanfälligkeit: Aufgrund der Nutzung des offenen ISM-Bandes durch WLAN können Interferenzen mit anderen Funktechnologien auftreten, die ebenfalls diese Frequenzbänder belegen. Während dies insbesondere für das 2,4 GHz-Band gilt, welches auch Bluetooth und RFID nutzen, ist das 5 GHz-Band weniger stark belegt. Durch Anstrengungen, auch das 6 GHz-Band für WLAN nutzbar zu machen, soll der Störanfälligkeit von WLANs weiter entgegen gewirkt werden. Industrielles WLAN nutzt das sog. Industrial Frequency Hopping (iHOP), durch das ein AP Kanalstörungen identifizieren und einen gestörten Kanal vorübergehend löschen kann. Im Gegensatz dazu ist bei 5G die Vergabe der Frequenzen lizenziert, u.a. um Störungsfreiheit zu ermöglichen.

Mobilität: Bei der Entwicklung des Mobilfunks wurde der reibungslose Wechsel eines Endgerätes zwischen verschiedenen BBU (Handover) forciert. Da WLAN ursprünglich für den Consumer-Bereich entwickelt wurde, in dem die Handover-Problematik keine große Rolle spielt, hat die Technologie hier Schwächen. Dies gilt insbesondere für WLAN-Netze, die auf einer großen Fläche, wie einem Industriegebiet, installiert sind und eine Vielzahl von APs und Routern aufweisen. Beim Handover im WLAN (das UE wechselt den Router/Repeater äquivalent zur Basisstation), kann es trotz

16 Quelle: 3GPP TR 37.910.

guter Funkabdeckung zu einem kurzzeitigen Abbruch der Verbindung kommen. Zur Vermeidung von Verbindungsabbrüchen werden WLAN-Controller sowie das iPCF-Verfahren eingesetzt, wodurch allerdings nicht alle Probleme der Mobilität überwunden werden können. Ob durch Wi-Fi 6 die Roaming-Problematik¹⁷ früherer Versionen spürbar verbessert werden kann, ist noch offen. Da auch der neue Standard auf die bekannten Fast Roaming Protokolle zurückgreift, ist allerdings keine signifikante Verbesserung zu erwarten. Im Gegensatz zu 5G muss in einem WLAN-Netz bei einem Wechsel des Routers immer eine Authentifizierung durchgeführt werden, die bspw. bei industriellem WLAN typischerweise bis zu 30 – 50 ms Zeit einnimmt und daher die Latenz signifikant erhöht (nach IEEE 802.11r).

Lokalisierung: Obwohl die WLAN Technologie ursprünglich nur für die Übertragung großer Datenmengen konzipiert wurde, kann jedes Netz auch für die Lokalisierung genutzt werden. Bisher wurde insbesondere die Messung der Feldstärken (Received Signal Strength, RSS) von APs oder Endgeräten in Verbindung mit der sog. Fingerprinting-Methode dazu genutzt, die Position mit einer Genauigkeit von

5 m und besser zu bestimmen. Aus diesem Grund begann 2015 der Standardisierungsprozess eines neuen Standards IEEE 802.11az, welcher das sog. „Next Generation Positioning“ (NGP) ermöglichen soll. Als neue Methode zur Positionsbestimmung soll die Messung des Einfalls- oder Ausfallswinkels (Angle of Arrival, AoA/Angle of Departure, AoD) alleine oder in Kombination mit Laufzeit-basierter Reichweitenmessung (ranging) eingeführt werden, wobei auch die cm-genaue Lokalisierung im 60 GHz-Band ein Ziel ist. NGP soll abwärtskompatibel (z.B. mit IEEE 802.11n/ac/ad) sein und Anfang 2021 verabschiedet werden.¹⁸ Während für 5G Release 16 eine Positionsgenauigkeit von 3 m im Innenbereich vorgesehen ist, soll diese mit Release 17 auf unter 1 m verbessert werden. Theoretisch bietet 5G die Möglichkeit der dm-genauen Lokalisierung, die möglicherweise ab Release 18 im Standard verfügbar sein wird.

¹⁷ Roaming meint im WLAN Umfeld die Mobilität des UEs bei Wechsel von AP oder Router, dies ist nicht zu verwechseln mit dem Begriff Roaming im Mobilfunk, der die Mobilität zwischen Mobilfunkanbieter bei Auslandsaufenthalten bezeichnet.

¹⁸ Quelle: Zhu/Segev: Proposed 802.11az Functional Requirements, <https://mentor.ieee.org/802.11/dcn/16/11-16-0424-11-00az-proposed-802-11az-functional-requirements.docx>.

6 5G im Maschinenbau

6.1 Schlüsselakteure und deren Rolle

6.1.1 Bundesnetzagentur

Die Aufgabe der Bundesnetzagentur (BNetzA) besteht in der Aufrechterhaltung und der Förderung des Wettbewerbs in sogenannten Netzmärkten sowie in der Moderation von Schlichtungsverfahren. Zu den Netzmärkten zählen die Sektoren Energie, Telekommunikation, Post und Eisenbahn. Seit März 2019 liegt auch die Regulierung von nichtöffentlichen Netzen (Non-Public Networks (NPN) oder Campus-Netze) im Aufgabenbereich der BNetzA.

6.1.2 Netzbetreiber

Öffentliche Mobilfunknetze werden in Deutschland durch vier Netzbetreiber unterhalten: Deutsche Telekom, Vodafone, Telefónica und 1&1 Drillisch. Um eine bestimmte Frequenz für die Bereitstellung von Mobilfunk zu nutzen, bieten die Netzbetreiber im Rahmen der Lizenzvergabe bei der BNetzA um Lizenzen für die Nutzung von Frequenzblöcken in einem verfügbaren Frequenzspektrum. Für die bundesweite Nutzung von 5G in öffentlichen Netzen wurden im Jahr 2019 Frequenzen im Bereich von 2 GHz und 3,6 GHz zur Verfügung gestellt.

Neben dem Betrieb des öffentlichen Mobilfunknetzes bieten diese Unternehmen vermehrt den Aufbau und Betrieb von Campus-Netzen im Frequenzbereich von 3,7 – 3,8 GHz an, die als NPN auf Betriebsgeländen errichtet werden können (siehe auch Kapitel 7.3).

6.1.3 Infrastrukturanbieter

Infrastrukturanbieter liefern die notwendige Ausrüstung für die öffentlichen Mobilfunknetze und bieten meist ein vollständiges Portfolio für eine Systemlösung an. Infrastrukturanbieter für öffentliche Mobilfunknetze bieten auch die Infrastruktur für NPN an. Dabei entstehen parallel zu den etablierten Anbietern eine große Zahl neuer Anbieter mit Cloud- und Software-Hintergrund, welche die notwendige Ausrüstung für 5G-basierte NPN oder auch nur einzelne Systemkomponenten im Portfolio haben.

6.2 5G Use Cases im Maschinen- und Anlagenbau

Die für den 5G-Einsatz in der Industrie treibenden Use Cases sind unter anderem die Flexibilisierung der Produktion, fahrerlose Transportsysteme (FTS), mobile Bediengeräte, Prozess-Monitoring und neue Mensch-Maschine-Schnittstellen, wie z.B. Augmented Reality (AR). Auch im Bereich Retrofit können Anwendungen profitieren. Wenn z.B. nicht die benötigte Rechenleistung auf einer Maschine vorliegt, dann können diese über 5G an einen zentralen Server zur Auswertung angebunden werden. Zudem ermöglicht 5G neue Fertigungskonzepte mittels drahtlos vernetzter Maschinen. Auch in wieweit 5G Feldbus, Ethernet sowie kabellose Techniken wie z.B. WLAN ersetzen kann, wird in den von den VDMA-Mitglieder betrachteten Use Cases beurteilt, und ist online unter VDMA 5G Anwendungsfälle (<https://ea.vdma.org/viewer/-/v2article/render/47636048>) verfügbar.

Ab 2020 werden die ersten 5G-Netze basierend auf dem Release 15 im Anlagen- und Maschinenbau geplant und aufgebaut. Der Leitfaden betrachtet daher in den nachfolgenden Kapiteln die drei wichtigen Fragen:

- Welche **Infrastruktur** brauche ich?
- Was ist beim Aufbau einer mit **5G vernetzte Produktion** zu beachten?
- Wie mache ich meine Maschine **5G-Ready**?

Use Cases finden Sie online unter VDMA 5G Anwendungsfälle
<https://ea.vdma.org/viewer/-/v2article/render/47636048>

5G im Maschinen- und Anlagenbau – Use Cases

Flexibilisierung der Produktion	Ortung und Kommunikation in der Logistik (Ortung von mobilen Flurförderzeugen) (KION GROUP/STILL, SEW-EURODRIVE, Fraunhofer IIS)	Mobile Messsysteme in Produktionsumgebungen (ZEISS Gruppe, Fraunhofer IIS)	Einsatz von Echtzeitfähigen Datenstrecken in verschleißbehafteten Anwendungen (LAPP, Fraunhofer IIS)	Echtzeitfähige Datenstrecken
	Mobile Bedienterminals mit Nothalt (SICK, Fraunhofer IIS)	Remoteanwendungen (Wartung und Betrieb) (AGCO-Fendt, MASCHINENBAU KITZ, SEW-EURODRIVE, Fraunhofer IIS)	M2M-Anwendungen (WEIDMÜLLER Gruppe, LAPP, Fraunhofer IIS)	
	HMI - Human Machine Interface (HAHN GROUP, SEW-EURODRIVE, Fraunhofer IIS)	Predictive Maintenance (RITTAL, Fraunhofer IIS)	Retrofit bei mobilen Systemen und stationären Maschinen (KION GROUP/STILL, SICK, Fraunhofer IIS)	

Abbildung 4: 5G im Maschinen- und Anlagenbau – Use Case.

7 Grundlagen 5G-Netz

7.1 Struktur eines 5G-Netzes

So wie jedes Mobilfunknetz lässt sich auch das 5G-Netz grundsätzlich in das Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN), das Transportnetz, sowie das Kernnetz (Core Network, CN) einteilen.

Im **Funkzugangsnetz** sind die Endgeräte (User Equipment, UE), Antennen und Basisstationen (Base Band Units, BBUs) verortet.

Das **Transportnetz** verbindet die örtlich verteilten BBUs des Funkzugangsnetzes mit dem Kernnetz (CN).

Im **Kernnetz** sind das Teilnehmermanagement (Subscriber Management), die Steuerebene (Control Plane, CP), also die Funktionen wie das Signalisierungs-Management (Session Management Function, SMF) und Registrierungs- und Mobilitäts-Management (Access and Mobility Management Function, AMF) sowie die Nutzerebene (User Plane, UP), also die Einheit, die Sprach- und Datenströme vermittelt, angesiedelt.

7.2 Generische Architektur eines Campus-Netzes

In Deutschland können Unternehmen seit 2019 5G-Lizenzen beantragen und damit zum Netzbetreiber für ihr eigenes 5G-Kommunikationsnetz bzw. Campus-Netz oder auch Non-Public Network (NPN) werden.

Ein NPN bzw. Campus-Netz kann dabei aus mehreren Gründen wünschenswert sein:

- Hohe QoS-Anforderungen
- Hohe Sicherheitsanforderungen, insb. Datensicherheit
- Erleichterung der Identifizierung der Verantwortung für Verfügbarkeit, Wartung und Betrieb

Ein NPN beschreibt dabei ein 5G-Netz, das bestimmungsgemäß für den nichtöffentlichen Gebrauch errichtet wird. Ein NPN kann dabei, je nach Isolationsgrad, mit dem öffentlichen Mobilfunknetz (Public Network, PN) kommunizieren. Im Gegensatz zu einem PN, das Dienste für die breite Öffentlichkeit anbietet, stellt ein NPN Dienste nur für eine klar definierte Organisation oder Gruppe innerhalb festgelegter räumlicher Grenzen bereit (z.B. einen Campus oder einen Fabrikstandort). Diesbezüglich können die Begriffe Non-Public Network (NPN) und Campus-Netz synonym verwendet werden. Die öffentlichen Mobilfunknetze werden dabei in der Fläche noch längere Zeit vor allem auf 4G aufbauen, während parallel ein stufenweiser Ausbau von 5G erfolgt.

Innerhalb eines NPN gibt es verschiedene Ausprägungen. Welche Art von NPN am besten für ein Unternehmen geeignet ist, hängt von mehreren Faktoren ab und muss für jeden Fall individuell betrachtet werden (s. Kapitel 7.3).

Mit dem zunehmenden Reifegrad von 5G in den kommenden Jahren kann dabei auch die Ablösung bestehender Netze/Lösungen, die spezifischen oder zukünftigen Anforderungen nicht mehr gerecht werden, sinnvoll sein.

Bevor die Entscheidung für den Aufbau eines NPN gefällt werden kann, sollten die grundlegenden Aspekte eines NPN/Campus-Netzes (s. Abbildung 5) betrachtet werden.

Innen-/Außenbereich: Die Mobilfunkversorgung erfolgt üblicherweise im Außenbereich über Basisstationen (BBUs) mit hoher Sendeleistung und damit hoher Flächenabdeckung. Die lückenlose Mobilfunkversorgung von Campus-Arealen mit nur einer Basisstation und wenigen Antennen ist meist aufgrund von baulichen Gegebenheiten unzureichend. Oft ist das Aufstellen von mehreren BBUs und Antennen notwendig. Vor allem im Innenbereich ist aufgrund der Abschirmungen durch Mauern, beschichtete Fenster und Stahleinbauten

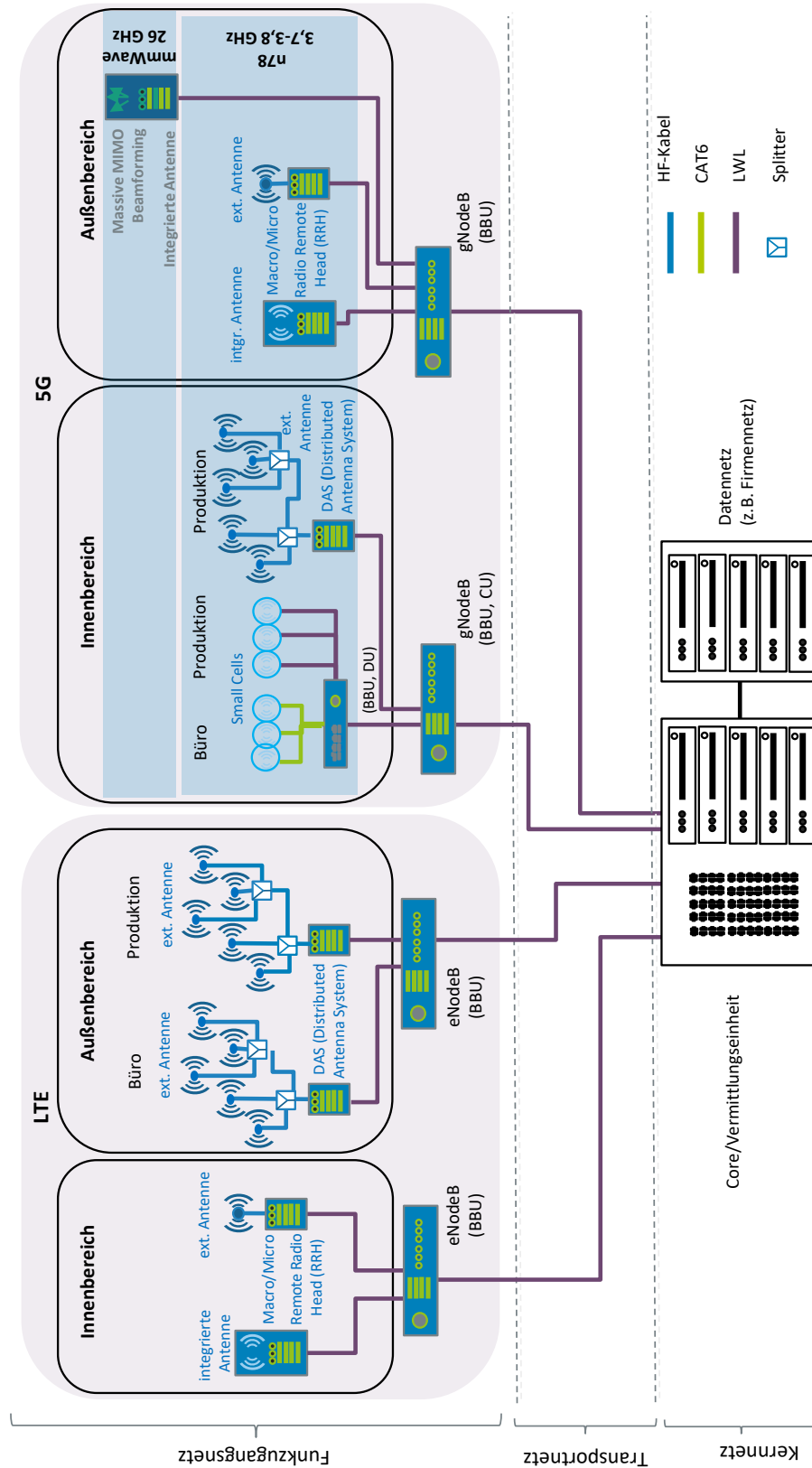


Abbildung 5: Generische 5G-Netzarchitektur eines Campus-Netzes/NPN, 4Q/2019.

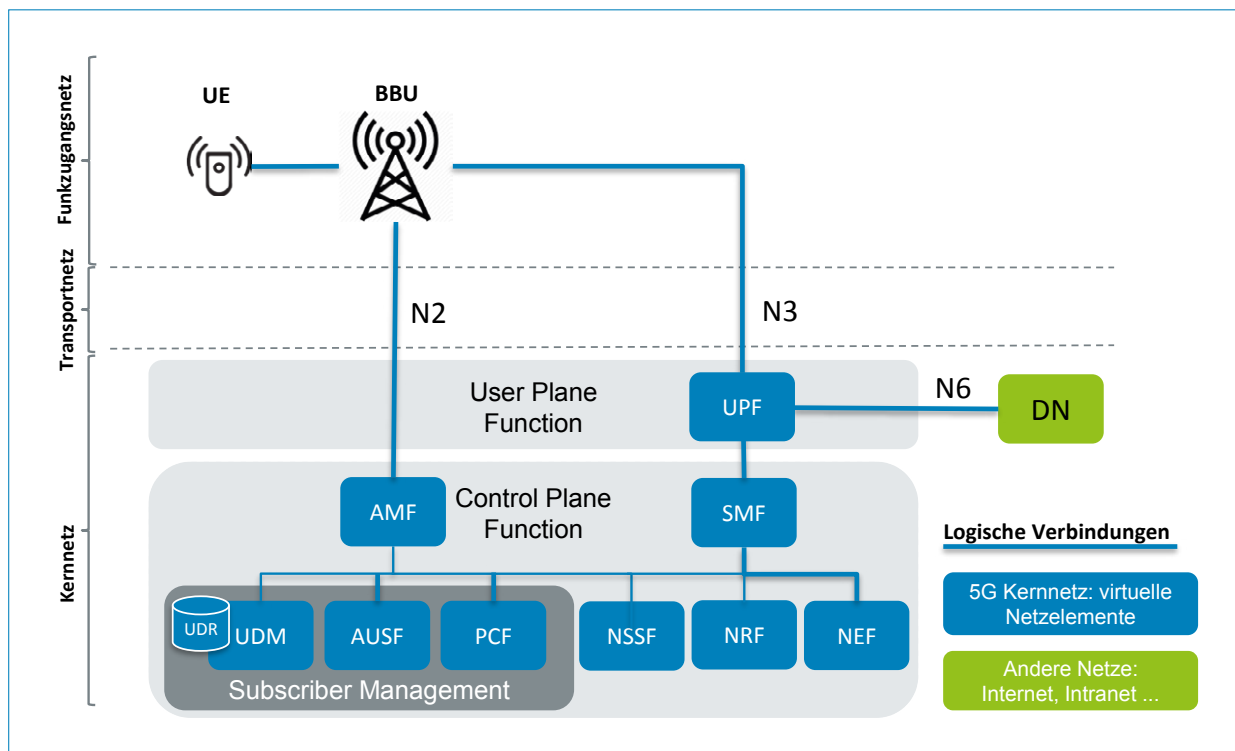


Abbildung 6: Generische Architektur eines 5G-Kernnetzes.

eine lückenlose Mobilfunkversorgung durch eine Basisstation im Außenbereich meist nicht gegeben. Daher ist hier die verteilte Anbringung von Antennen im Innenbereich über die Etagen, Räumlichkeiten und Hallen hinweg zur lückenlosen Versorgung notwendig. Die Anbindung der verteilten Antennen erfolgte bisher über ein sogenanntes Distributed Antenna System (DAS, Netz von Antennen, die räumlich verteilt, aber mit einer gemeinsamen Signalquelle verbunden sind). Da ein DAS aufwendig in der Installation ist, kommen vermehrt Small Cells zum Einsatz, die wegen ihrer niedrigen Sendeleistungen auch für den Inneneinsatz ausgelegt sind.

5G/4G: Da noch über eine gewisse Zeit verfügbare industrielle UEs größtenteils auf LTE (konform zu den 3GPP Rel.14 (LTE Advanced) und darunter) basieren werden, besteht z.B. in Fällen einer kurzfristigen Einführung von 5G ggf. die Notwendigkeit eines Parallelbetriebs von 4G und 5G. Das bedeutet im ungünstigsten Fall den parallelen Einsatz eines 5G RAN und 5G Cores sowie eines 4G RAN und 4G Cores, und verdoppelt somit die Kosten- aber auch den

Implementierungsaufwand. Nur wenige Hersteller sind aktuell in der Lage, den Parallelbetrieb von 5G und 4G RANs alleinig mit einem 5G Kernnetz, zu unterstützen. Abbildung 5 zeigt beispielhaft den Parallelbetrieb eines 5G- und eines 4G-Netzes in einem Campus-Netz. 5G-fähige BBUs werden dabei als gNB/gNodeB (next generation NodeB) bezeichnet, 4G-fähige BBUs hingegen als eNB/eNodeB (evolved NodeB).¹⁹

Infrastruktur/Verkabelung: Die Anbindung der Antennen an die BBUs auf dem Campus erfolgt über Ethernet Cat6, LWL (Lichtwellenleiter) oder über HF-Kabel. Die unterschiedliche Implementierung von Funktionalitäten der BBUs durch die Hersteller wirkt sich dabei auf den Verkabelungsaufwand und die Kosten aus und wird in Kapitel 8.2 beschrieben.

19 Optionen für eine Migration von LTE zu 5G können u.a. hier entnommen werden: NGMN Overview on 5G RAN Functional Decomposition, https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/Publications/2018/180226_NGMN_RANFSX_D1_V20_Final.pdf.

7.2.1 Funkzugangsnetz

Die Aufgabe des Funkzugangsnetzes (Radio Access Network, RAN) ist die Kontrolle der Kommunikationskanäle, die über die Antennen an der Luftschnittstelle aufgebaut werden sowie die Mobilitätskontrolle der Endgeräte ohne Verbindungsabbrüche.

Dabei wurde 4G bisher meist mit einer sogenannten Distributed RAN (D-RAN) Architektur aufgebaut. Basisstation (BBU) und Remote-Radio-Head (RRH) sind dabei typischerweise in der Nähe der Antenne positioniert. Damit sind alle Netzelemente des RANs direkt am Aufstellungsort der Antenne und damit entfernt vom Kernnetz (CN). Daher spricht man bei 4G von einer verteilten (distributed) Architektur. Ein 4G D-RAN besteht aus folgenden Komponenten:

- **Base Band Unit (BBU):**
zentraler Bestandteil einer Basisstation (eNodeB), aufgestellt in einem Betriebsraum (Klimatisierung je nach Größe und somit der Hitzeentwicklung der BBU).
- **Remote Radio Head (RRH):**
besteht aus Spannungsversorgung, Sende- und Empfangsbaugruppe, und Endverstärker mit integrierter oder externer Antenne zur Montage z.B. an einem Antennenmast. Externe Antennen werden via Jumperkabel (HF-Kabel) mit der RRH verbunden. Die Anbindung der RRH zur BBU erfolgt via Glasfaser.

In 5G ist erstmals die Centralized-RAN (C-RAN) Architektur umgesetzt. Hier werden die Funktionen der BBUs und RRHs räumlich auseinandergezogen, die BBUs können somit näher zum zentralen Core aufgestellt werden. Die Funktionalitäten werden in 5G gemäß 3GPP auf die Radio Unit (RU, Antenne), Distributed Unit (DU, verteilte Einheit) und Central Unit (CU, zentrale Einheit) aufgeteilt. In 5G ist es auch erstmals möglich, Rechenkapazität sowie kleinere Rechenzentren und die IT-Infrastruktur am Rande (Edge) des Netzes anzubinden. 5G ermöglicht so das Konzept von Multi Access Edge Computing (MEC, bisher Mobile Edge Computing genannt) im

RAN zu realisieren. Firmenanwendungen und Server lassen sich dadurch direkt am RAN anbinden und damit sehr nahe an die verarbeitende Einheit auf dem Campus platzieren, was zu einer deutlichen Reduktion der Latenz führt.²⁰

Offene Funkzugangsnetze

Eine neue Entwicklung im Bereich der RANs – und damit auch für Campus-Netze/NPN relevant – sind offene Funkzugangsnetze (Open RAN, Entwicklung vorangetrieben durch die O-RAN Alliance). Während die Hardware der Netzelemente (z.B. der BBU) bisher speziell für diese Anwendungen entwickelt wurde, wird beim Open RAN-Ansatz standardisierte, kommerziell verfügbare Hardware verwendet. Die Funktionalität der RAN-Netzelemente wird dabei als reine Software entkoppelt, mit standardisierten Schnittstellen entwickelt und ist auf jeglicher standardbasierten Hardware lauffähig. Somit ist die Funktionalität der Netzelemente unabhängig von darunterliegender Hardware-Plattform. Damit voraussichtlich verbunden sind geringere Kosten für den RAN-Aufbau und für den Betrieb des RANs, eine geringe Abhängigkeit von einzelnen Herstellern sowie eine erhöhte Flexibilität.

7.2.2 Transportnetz

Das Netz zur Anbindung der BBUs an das Kernnetz wird als Transportnetz bezeichnet. Das Transportnetz ist überwiegend ein optisches Netz bestehend aus Multiplexern, Routern und Switches, die über Glasfaserleitungen miteinander verbunden sind. Die Anbindung des Transportnetzes zu den verteilten BBUs und zum zentralen Kernnetz erfolgt ebenfalls via Glasfaser.

²⁰ Weitere, detaillierte Ausführungen zur RAN-Architektur und der idealen Platzierung von CU, DU, UPF und MEC finden sich in: NGMN Overview on 5G RAN Functional Decomposition, abgerufen unter: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/Publications/2018/180226_NGMN_RANFSX_D1_V20_Final.pdf

7.2.3 Kernnetz

3GPP empfiehlt die Netzelemente des Kernnetzes (Core Network, CN) zu virtualisieren (s. Abbildung 6). Sie können somit als Software auf einer handelsüblichen Hardware-Plattform implementieren werden. Die Virtualisierung ermöglicht auch die Implementierung des CN in einer Cloud Umgebung. Die virtualisierten Elemente des CN sind folgende:

- **Subscriber Management**
(Teilnehmermanagement, analog dem HSS, Home Subscriber Server, in 4G)
 - UDM: Unified Data Management, Teilnehmer Daten Management
 - UDR: Unified Data Repository, Teilnehmer Datenbasis
 - PCF: Policy Control Function, Zugangskontrolle
- **CPF: Control Plane Function**
(Kontrollebene)
 - AUSF: Authentication Server Function, Authentifizierung
 - AMF: Access & Mobility Management Function, Registrierungs- und Mobilitätsmanagement
 - SMF: Session Management Function, Sitzungsverwaltung
 - NSSF: Network Slice Selection Function, Auswahl eines Netz-Slices für ein bestimmtes Gerät
 - NRF: Network Repository Function, analog DNS (Domain Name Server zur Adressauflösung)
 - NEF: Network Exposure Function, Gateway zu anderen Netzen
- **UPF: User Plane Function** (Nutzerebene)
- **DN:** Das Data Network (DN) stellt die eigenen Firmenanwendungen und Server, das Internet oder andere Datennetze dar. Diese werden über das Kernnetz via Ethernet und über das Firmennetz angeschlossen.

N2, N3 und N6 sind die Schnittstellen zwischen RAN und UPF (N3), zwischen Data Network und UPF (N6) und RAN und AMF (N2).

7.3 Arten von Campus-Netzen

Grundsätzlich können Campus-Netze/NPNs in isolierte, eigenständige Netze ohne Verbindung mit dem öffentlichen Netz (Standalone NPNs) und in NPNs, die in Verbindung mit dem öffentlichen Netz stehen, unterteilt werden.²¹ Dabei ist es wichtig zu beachten, dass sich die Wahl des NPN-Modells stark auf z.B. Latenz, Netzsicherheit, Subscriber Management, Hoheit über Firmendaten, Reaktionszeiten, Besitzverhältnisse und Flexibilität bei Änderungen auswirkt. Die nachfolgend aufgezählten Vor- und Nachteile dienen als Beispiele und müssen in jedem konkreten Fall individuell betrachtet werden, da sich z.B. ein Vorteil zum Nachteil wandeln kann, wenn in einem konkreten Fall nicht die notwendige Erfahrung zu einem Themengebiet vorhanden ist. Die Darstellung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

21 5G-ACIA White Paper, 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios, www.5g-acia.org

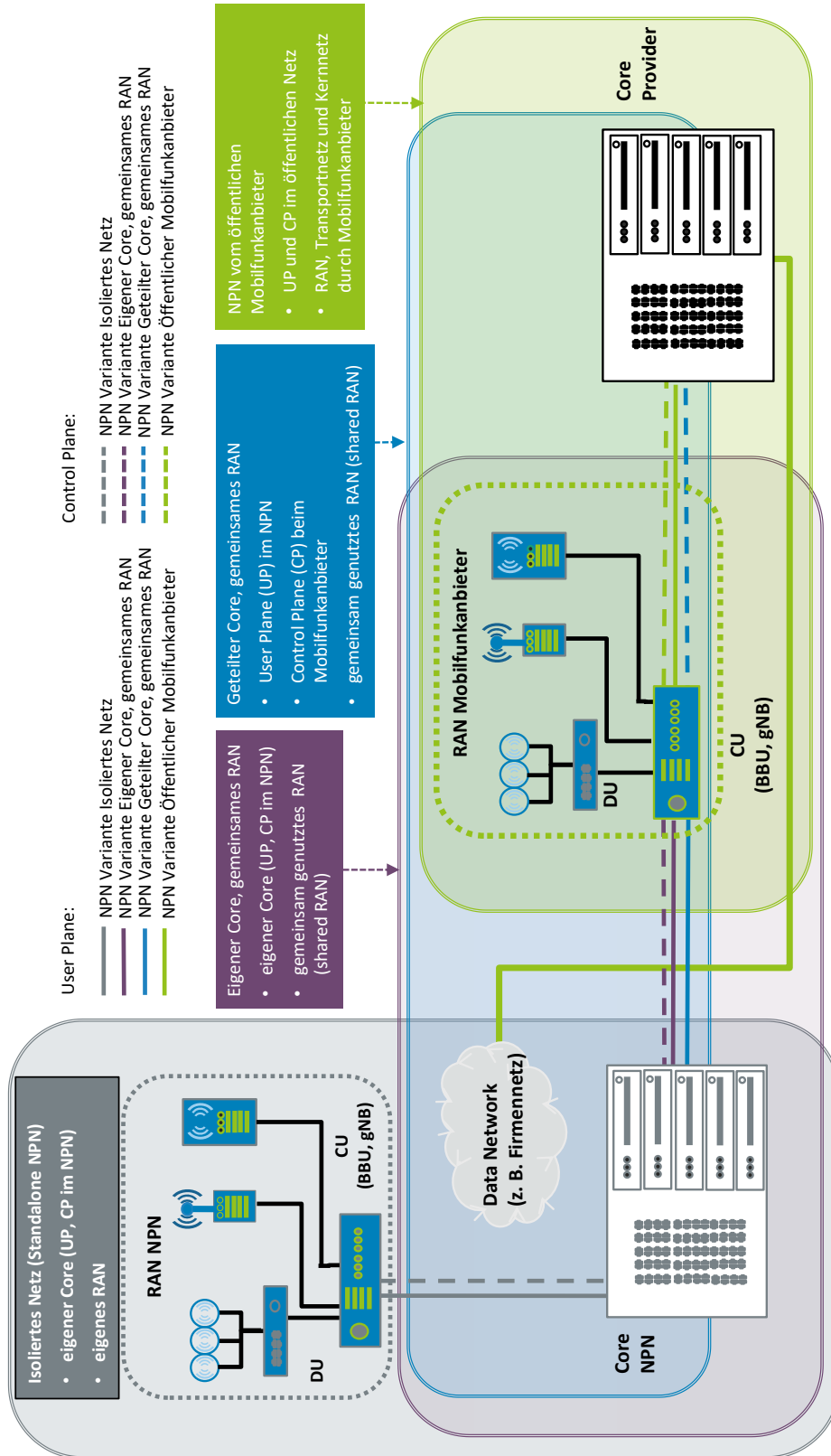


Abbildung 7: Überblick Architekturen ausgewählter Varianten eines 5G Campus-Netztes.

7.3.1 Eigenständiges, unabhängiges Campus-Netz

Alle Netzfunktionen befinden sich innerhalb der logischen Grenzen des Campus.

■ Isoliertes Netz (Standalone NPN)

In diesem Szenario wird das NPN als unabhängiges, eigenständiges Netz bereitgestellt (Standalone NPN). Dementsprechend besitzt es ein eigenes RAN und ein eigenständiges Kernnetz. Das NPN ist durch eine Firewall vom öffentlichen Netz getrennt. Über sog. dual subscription können Endgeräte, die dem NPN angehören, auch Dienste des öffentlichen Netzes nutzen.

Die Netzsicherheit obliegt dem Betreiber des NPN. Bei dual subscription ist zu beachten, dass der gleichzeitige Zugang des UEs in ein NPN und ein öffentliches Netz, die mit Hilfe einer Firewall eingebaute strenge Isolierung zwischen den beiden Netzen sicherheitstechnisch gefährden kann.

Eine eigene Funktion (Non-3GPP Interworking Function, N3WIF) ermöglicht auch das Einbuchen in ein 5G-Netz über eine unter Umständen offene WLAN-Verbindung. Zusätzlich ist zu beachten, dass eine dual subscription nicht alleine über das gleichzeitige Einbuchen in zwei 5G-Basisstationen möglich ist.

Fazit: Dieses Szenario ermöglicht einen **maximalen Grad an Freiheit sowie große Entscheidungsspielräume**. Notwendig ist aber **eigenes Betriebspersonal und Spezialisten mit Fachwissen im Bereich Mobilfunk**. Weniger Fachwissen ist notwendig, wenn die Implementierung des NPN durch ein Generalunternehmen mit dem nötigen Wissen erfolgt. Der Betrieb des Netzes kann als Managed Service vergeben oder alternativ durch Weiterbildung des eigenen IT-Personals abgedeckt werden.

Isoliertes Netz (Standalone NPN)	
Vorteile	Nachteile
Niedrige Latenz Hohe Sicherheit (Hoheit über Firmendaten und Zugangshoheit zum NPN liegt in eigener Hand) Subscriber Management liegt in eigener Hand Schnelle Reaktionszeit im Störfall Flexibilität bei NPN-Infrastruktur Änderungen Flexibilität bei Service und QoS-Anpassungen (z.B. neue Netz-Slices) Gute Anpassung an eigene Anforderungen Interne Sprachkommunikation kann über das NPN erfolgen Keine Abhängigkeitsverhältnisse und Bindungsfristen mit einem Netzbetreiber Kein Abstimmungsbedarf mit Netzbetreibern notwendig bezüglich: • Liegenschaftsverträge • Besitzverhältnisse Infrastruktur • Implementierung (Verträge z.B. Gestattungsvertrag, Koordination) • Infrastruktur Änderungen • Release- und Lifecycle-Management	Mobilfunk-Erfahrung und Mobilfunk-Spezialisten werden bei Implementierung und Betrieb benötigt Release- und Lifecycle-Management notwendig Kosten durch Erwerb eigener Funklizenz Kosten durch Erwerb der Infrastruktur Kosten durch operationellen Betrieb

Tabelle 4: Isoliertes Netz (Standalone NPN) – in Abbildung 7 grau gekennzeichnet.

7.3.2 Campus-Netz in Verbindung mit einem öffentlichen Netz

In diesem Szenario existiert ein öffentlicher und ein privater Netzteil. Hierbei wird der öffentliche Teil von einem Netzbetreiber/Mobilfunkanbieter (Mobile Network Operator, MNO) betrieben, während der nicht öffentliche Netzteil vom Nutzer des NPN betrieben wird. Im Folgenden sind die derzeit bekanntesten Varianten aufgeführt.

Die Mobilfunkanbieter entwickeln dabei ihre Geschäftsmodelle stetig weiter, so dass die Aufstellung keinen Anspruch auf Vollständigkeit hat. Es empfiehlt sich grundsätzlich, ein individuelles Angebot einzuholen, das den unternehmensspezifischen Bedürfnissen entspricht.

■ Eigener, getrennter Core, gemeinsam genutztes RAN (Shared RAN)

In diesem Szenario schließen der Betreiber des NPN und der Betreiber des öffentlichen Netzes eine Vereinbarung über die gemeinsame Nutzung des RAN (Basisstationen, Antennen), also ein

Shared RAN. Es ist möglich, nur einen Teil des RAN mit dem öffentlichen Netz zu teilen. NPN-Nutzer können somit auf das gesamte NPN-RAN zugreifen, während das öffentliche Netz nur via der gewünschter NPN Basisstationen erreichbar ist. In diesem Szenario besitzen das NPN und das öffentliche Netz je ein getrenntes und eigenständiges Kernnetz (CN). Alle NPN-Verkehrsflüsse bleiben in diesem Szenario innerhalb des NPN, während der Verkehrsfluss des öffentlichen Netzes über das öffentliche Netz übertragen wird. Hier kann der NPN-Betreiber eine Roaming-Vereinbarung mit einem öffentlichen Netzbetreiber/Mobilfunkanbieter treffen. Die Verantwortung für die Netzsicherheit liegt beim Mobilfunkanbieter.

Fazit: Dieses Szenario ermöglicht einen hohen Grad an Freiheit und große Entscheidungsspielräume. Auch hier wird eigenes Betriebspersonal mit Spezialwissen im Mobilfunk benötigt. Die Implementierung des NPNs sowie der Betrieb als Managed Service kann durch einen Generalunternehmer erfolgen oder durch Weiterbildung des eigenen IT-Personals abgedeckt werden.

Eigener, getrennter Core, gemeinsam genutztes RAN (Shared RAN)

Vorteile

Niedrige Latenz erst nach Aufbau des Kommunikationskanals zwischen UE und Firmenanwendung,
Hohe Sicherheit (Hoheit über Firmendaten und Zugangshoheit zum NPN liegt in eigener Hand)
Subscriber Management liegt in eigener Hand
Schnelle Reaktionszeit im Störfall
Flexibilität bei Service und QoS-Anpassungen
Gute Adaption an eigene Bedürfnisse

Nachteile

Aufbau des Kommunikationskanals zwischen UE und Firmenanwendung ist mit höherer Latenz verbunden als beim isolierten NPN
Mobilfunk-Erfahrung und -Spezialisten werden bei Implementierung und Betrieb benötigt
Benötigt Release- und Lifecycle-Management
Abhängigkeitsverhältnisse (z.B. Planung zur 5G-Abdeckung) und Bindungsfristen mit dem Netzbetreiber
Abstimmungsbedarf mit Netzbetreiber an gemeinsam genutzten BBUs und Antennen (Shared RAN) nötig:

- Liegenschaftsverträge
- Besitzverhältnisse zur NPN Infrastruktur (wichtig bei Netzbetreiberwechsel)
- Implementierung (Verträge z.B. Gestattungsvertrag, Koordination)
- Infrastruktur Änderungen
- Release und LifeCycle Management

Kosten durch Erwerb eigener Funklizenzen
Kosten durch den teilweisen Erwerb der Infrastruktur
Kosten durch operationellen Betrieb
Kosten für NPN-Service durch Mobilfunkanbieter

Tabelle 5: Eigener, getrennter Core, gemeinsam genutztes RAN (Shared RAN) – in Abbildung 7 lila gekennzeichnet.

■ **Geteilter Core (Shared Core),
gemeinsam genutztes RAN (Shared RAN),
CP gehostet vom Mobilfunkanbieter,
UP gehostet vom NPN**

NPN und öffentliches Netz nutzen das RAN gemeinsam, wobei die Aufgabe zur Kontrolle und Signalisierung (CP, Control Plane) im öffentlichen Netz, die Nutzerebene (UP, User Plane, zum Informationsaustausch von Daten und Sprache) im NPN verbleibt. Dies wird durch Network Slicing oder einen Zugangspunkt/Gateway (Access Point Name, APN) ermöglicht, wobei Letzterer die Unterscheidung zwischen öffentlichen und nichtöffentlichen Datenteilen erlaubt.

Auch hier wird ein eigenes Kernnetz (CN) im NPN benötigt. Das NPN kann eine unmittelbare Verbindung zum öffentlichen Netz und dessen Diensten herstellen. Der NPN-Betreiber kann Roaming-Vereinbarungen mit einem öffentlichen Netzbetreiber für ausgewählte UEs abschließen. Die Verantwortung für die Netzsicherheit liegt beim öffentlichen Mobilfunkanbieter.

Fazit: Auch für dieses Szenario ist **eigenes Betriebspersonal** mit Spezialwissen im Bereich Mobilfunk notwendig, wenn auch in geringerem Maße im Vergleich zu allen Varianten mit einem eigenen Core. Der Bedarf an Spezialwissen

Geteilter Core (Shared Core), gemeinsam genutztes RAN (Shared RAN), CP gehostet vom Mobilfunkanbieter, UP gehostet vom NPN	
Vorteile	Nachteile
Niedrige Latenz erst nach Aufbau des Kommunikationskanals zwischen UE und Firmenanwendung	Aufbau des Kommunikationskanals zwischen UE und Firmenanwendung ist mit höherer Latenz verbunden als beim isolierten NPN
Hoheit über Firmendaten liegt in eigener Hand	Zugangshoheit zum NPN liegt nicht in eigener Hand
Interne Sprachkommunikation kann umgestellt werden und über das NPN erfolgen	Subscriber Management liegt nicht in der eigenen Hand (Verzögerungen bei der Einbindung oder Änderungen von UEs ins NPN)
Mobilfunk-Erfahrung und –Spezialisten in geringem Umfang notwendig	Eingeschränkte Reaktionszeiten im Störfall, vor allem bei Netzelementen (z.B. BBU), die beim Mobilfunkanbieter liegen. Reaktionszeiten im Störfall ist vom Service Level Agreement (SLA) abhängig
Änderungen in der Infrastruktur übernimmt Mobilfunkanbieter	Abhängigkeitsverhältnisse (z.B. Planung zur 5G-Abdeckung) und Bindungsfristen mit dem Netzbetreiber
Geringe Notwendigkeit zu Release- und Lifecycle-Management	Flexibilitätsverlust bei Infrastruktur Änderungen
	Verlangsamte Anpassungsfähigkeit bei Service und QoS (z.B. neue Network Slices)
	Geringere Adaptionfähigkeit an eigene Bedürfnisstruktur
	Es entstehen Abhängigkeitsverhältnisse und Bindungsfristen mit einem Netzbetreiber
	Notwendigkeit zur Abstimmung mit dem Mobilfunkanbieter bei gemeinsam genutzten BBUs, Antennen (Shared RAN) und dem Kernnetz bezüglich:
	• Liegenschaftsverträge • Besitzverhältnisse zur NPN Infrastruktur (wichtig bei Netzbetreiberwechsel) • Implementierung (Verträge z.B. Gestattungsvertrag, Koordination) • Infrastruktur Änderungen • Konfigurationsabhängigkeiten des eigenen NPN vom Kernnetz des Mobilfunkanbieter, ggf. Notwendigkeit von nachgelagerten Interoperabilitätstests mit Mobilfunkanbieter • Release- und Lifecycle-Management
	Kosten durch den teilweisen Erwerb der Infrastruktur
	Kosten durch operationellen Betrieb
	Kosten für NPN-Service durch den Mobilfunkanbieter

Tabelle 6: Geteilter Core (Shared Core), gemeinsam genutztes RAN (Shared RAN), CP gehostet vom Mobilfunkanbieter, UP gehostet vom NPN – in Abbildung 7 blau gekennzeichnet.

reduziert sich weiter, wenn die Implementierung des NPN ausgelagert wird. Dieser Vorteil muss gegen die verstärkte **Abstimmung mit dem Mobilfunkanbieter und der geringeren Flexibilität** bezüglich NPN-Infrastruktur-Anpassungen, Adaption an eigene Bedürfnisse, der Sicherheit- und Zugangshoheit, sowie Einbindung neuer UEs abgewogen werden. Freiheitsgrade und Entscheidungsspielräume sind in diesem Szenario gering.

■ **NPN wird von einem öffentlichen Netz bereitgestellt**

Sowohl der öffentliche als auch der nichtöffentliche Teil des Netzes befinden sich in der Hand eines Mobilfunkbetreibers, wobei beide Teile so behandelt werden, als wenn sie unterschiedlichen Netzen angehören würden. Die Implementierung des RAN, des Transportnetzes als auch

des Kernnetzes erfolgt durch den Mobilfunkanbieter. Zur Implementierung des Szenarios dienen Network Slicing oder APN. Die Verantwortung für die Netzsicherheit liegt beim Mobilfunkanbieter.

Fazit: Dieses Szenario benötigt **kein eigenes Betriebspersonal**. Weder zur Implementierung, noch zum Betrieb, noch Schnittstellenwissen zum Mobilfunknetz des Netzbetreibers zur Anbindung eigener Firmenanwendungen. Alle Freiheitsgrade und Entscheidungsspielräume benötigen **hohen Abstimmungsbedarf mit dem Mobilfunkanbieter**. Hier ist die Flexibilität am geringsten bezüglich NPN-Infrastruktur-Anpassungen, Adaption an eigene Bedürfnisse, der Zugangshoheit, sowie Änderungen oder Einbindung neuer UEs. In diesem Szenario ist die Latenz am größten.

NPN wird von einem öffentlichen Netz bereitgestellt („NPN hosted by the public network“)

Vorteile

Niedrige Latenz erst nach Aufbau des Kommunikationskanals zwischen UE und Firmenanwendung
Hoheit über Firmendaten liegt in eigener Hand
Interne Sprachkommunikation kann umgestellt werden und über das NPN erfolgen
Mobilfunk-Erfahrung und –Spezialisten in geringem Umfang notwendig
Änderungen in der Infrastruktur übernimmt Mobilfunkanbieter
Geringe Notwendigkeit zu Release- und Lifecycle-Management

Nachteile

Hohe Latenz
Zugangshoheit zum NPN sowie Subscriber Management liegen nicht in eigener Hand (Verzögerungen bei der Einbindung oder Änderungen von UEs ins NPN)
Die Sicherheit ist genau zu beachten (Zugang zur User Plane ist ggf. über das Netz des Mobilfunkanbieters möglich)
Die Übertragung von sensiblen Daten ist Ende-zu-Ende zu verschlüsseln
Verzögerungen bei der Einbindung weiterer UE ins NPN
Reaktionszeiten im Störfall SLA abhängig
Abhängigkeitsverhältnisse (z.B. Planung zur 5G-Abdeckung) und Bindungsfristen mit dem Netzbetreiber
Flexibilitätsverlust bei Infrastruktur Änderungen
Geringere Anpassungsfähigkeit bei Service und QoS (z.B. neue Network Slices)
Geringe Adaptionfähigkeit an eigene Bedürfnisstruktur
Es entstehen Abhängigkeitsverhältnisse und Bindungsfristen mit einem Netzbetreiber
Abstimmung mit dem Mobilfunkanbieter notwendig bei gemeinsam genutzten BBUs und Antennen (Shared RAN) bezüglich:

- Liegenschaftsverträge
- Besitzverhältnisse zur Infrastruktur (wichtig bei Netzbetreiberwechsel)
- Implementierung (Verträge z.B. Gestattungsvertrag, Koordination)
- Release- und Lifecycle-Management

Tabelle 7: NPN wird von einem öffentlichen Netz bereitgestellt („NPN hosted by the public network“) – in Abbildung 7grün gekennzeichnet.

7.3.3 Beantragung eines Frequenzblocks für ein Campus-Netz

Frequenzbereich 3,7 GHz

Um einen Frequenzblock im **Frequenzbereich von 3,7 – 3,8 GHz** (Frequenzbereich 1, FR1, < 6 GHz) zu erhalten, muss vom Grundstückseigentümer oder dessen Mieter/Pächter ein Antrag über ein Formblatt²² bei der BNetzA gestellt werden. Um eine zügige Bearbeitung des Antrags zu gewährleisten rät die BNetzA, den Antrag in elektronischer Form an 226.lokalesbreitband@bnetza.de zu senden. Der Antragsteller kann auch ein Dritter sein, der mit der technischen Umsetzung des NPNs beauftragt ist (z. B. ein öffentlicher Netzbetreiber oder Systemanbieter).

Die Gebühr²³ richtet sich dabei insbesondere nach der Bandbreite (**B**, min. 10, max. 100 MHz), der Laufzeit der Zuteilung (**t**; in Jahren bzw. anteilig je angefangenem Monat) sowie der Art der Fläche für die die Zuteilung gelten soll. Siedlungs- und Verkehrsflächen (**a₁**, in km² z. B. Betriebsgelände, Gewerbegebiete) werden dabei sechsfach gewichtet, andere Flächen (**a₂**, in km², z. B. landwirtschaftliche Flächen) nur einfach, wobei die Fläche in km² anzugeben ist. Ein Sockelbetrag von 1000 € ist obligatorisch. Falls die Genehmigung durch die BNetzA erfolgt ist, wird diese zunächst für maximal 10 Jahre ausgestellt. Die Kosten für die Gebühr kann nach der folgenden Formel berechnet werden:

$$\text{Gebühr} = 1000 + B \cdot t \cdot 5 (6a_1 + a_2)$$

Vor Inbetriebnahme einer Basisstation muss der Antragsteller die standortbezogenen Frequenznutzungsparameter durch die BNetzA festsetzen lassen und Angaben machen bzgl. der verwendeten Geräte, der Übertragungsrate, der Sendeleistung und Modulationsstufe. Bauliche Eigenschaften der Antenne (Höhe, Gewinn, Bauart,

Elevation und Ausrichtungswinkel) sowie der Standort der Basisstation unter Angabe der Koordinaten müssen ebenfalls angegeben werden. Was es zu beachten gilt:

- Um eine gute funktechnische Verträglichkeit zu gewährleisten, schreibt die BNetzA vor, Verhandlungen mit den Betreibern benachbarter Netze zu führen, um Absprachen²⁴ zu treffen, die mögliche Störungen vermeiden sollen.
- Antragsteller oder dessen beauftragter Dritter müssen Fachkunde hinsichtlich der Installation und Inbetriebnahme der Funkanlage aufweisen. Zudem werden finanzielle Leistungsfähigkeit sowie Zuverlässigkeit vorausgesetzt.²⁵

Der Antragsteller ist dazu verpflichtet, ein Frequenznutzungskonzept im Rahmen der Antragstellung vorzulegen, wobei hier insbesondere der Frequenzbedarf auf Grundlage des beabsichtigten Geschäftsmodells zu erläutern ist. Hierbei sind unter anderem auch die Standorte der geplanten BBUs sowie die Feldstärkenverteilung auf dem Grundstück auf Grundlage einer Karte des Grundstücks darzulegen. Weiterhin ist die beantragte Bandbreite (in MHz, mind. 10 MHz), der zeitliche Verlauf des Netzauf- und -ausbaus sowie die Maßnahmen zur Sicherstellung einer effizienten Frequenznutzung darzulegen.

Frequenzbereich 26 GHz

Für das Antragsverfahren zur Beantragung der Nutzung von **Frequenzen²⁶ im Bereich 26 GHz (24,25 – 27,5 GHz)** hat die BNetzA im Februar 2020 einen Entwurf zu den grundlegenden Rahmenbedingungen²⁷ veröffentlicht. Grundsätzlich werden 200 MHz-Frequenzblöcke oder ein Vielfaches davon zugeteilt, im Einzelfall auch 50 MHz oder ein Vielfaches hiervon. Ein synchronisierter Betrieb benachbarter Zellen wird nicht gefordert, aber empfohlen, da potentiell notwendige Schutzbänder zu Lasten beider Betreiber benachbarter NPNs gehen.

22 Die benötigten Formblätter für einen Antrag sind unter folgendem Link verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/RegionaleNetze/20191129_Antragsformblaetter3.7-3.8GHz.zip

23 Wie die Gebühr berechnet wird, kann auf der Internetseite der BNetzA eingesehen werden: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/lokalenetze-node.html

24 / 25 Voraussetzungen und Inhalte von Absprachen und Definitionen der Rechtsbegriffe sind der Verwaltungsvorschrift (VV) Lokales Breitband erläutert.

26 Im Frequenzbereich FR1 (unter 6 GHz) stehen bis zu 100 MHz Bandbreite zur Verfügung, im Frequenzbereich FR2 (über 6 GHz) können bis zu 400 MHz aggregiert werden.

27 Der Entwurf ist einzusehen unter https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/RegionaleNetze/20191220_EntwurfGrundlegendeRahmenbedingungen26GHz.pdf

8 5G-Netze in der Produktion

Wurde sich für die Einführung eines 5G-Netzes in der Produktion entschieden, sind nachfolgende Faktoren bei der Implementierung zu beachten.

8.1 Funkzugangsnetz

Erfahrungswerte zeigen, dass eine lückenlose Mobilfunkversorgung durch das RAN aber auch geringe Latenz nur mit einer sorgfältigen Funknetzplanung für den Innen- und Außenbereich gewährleistet werden kann. Für das RAN²⁸ des NPN ermittelt hierzu die Funknetzplanung die individuelle und ausreichende Anzahl an:

- Antennen (Radio Unit, RU, physikalische Antenne), enthält alle RAN-Funktionen unterhalb der LLS-Schnittstelle, nach 3GPP Split Option 6-8
- verteilten Einheiten (Distributed Units, DUs), die DU, enthält alle RAN-Funktionen zwischen LLS- und HLS-Schnittstelle, nach 3GPP Split Option 1-5 und ermöglichen eine verteilte Aufstellung der Antennen
- zentrale Einheiten (Central Units, CUs), enthält alle RAN-Funktionen über der HLS-Schnittstelle und den Übergang zum Kernnetz

8.1.1 Anzahl und Verteilung der Antennen

Die Funknetzplanung ermittelt dabei bei einer Ortsbegehung die optimale Funkausleuchtung und simuliert mittels Verkehrsmodellen zur lückenlosen Mobilfunkversorgung auf dem Firmengelände, die nötige Anzahl an verteilt aufzustellenden Antennen und deren Aufstellungsorte im Innen- und Außenbereich.

Empfehlung für geringen

Installationsaufwand und Betriebskosten

Antennen können über ein DAS angebunden werden (bestehend aus Coupler, Splitter, elektrooptischer Wandler und HF-Kabel). Es entstehen dabei Medienumbrüche von der Glasfaser auf das HF-Kabel, die einen erhöhten Installationsaufwand erfordern. Je nach Größe der elektrooptischen Wandler sind zusätzliche 19" Schränke zu installieren oder es ist ggf. für eine ausreichende Kühlung zu sorgen. Für die Stromaufnahme von DAS sind Stromkabel zu verlegen. Da die Antennen und die dazugehörige Rechenleistung räumlich getrennt sind, müssen HF-Kabel verlegt werden. DAS sollten daher aufgrund ihrer hohen Komplexität vermieden werden.

Der Einsatz von Small Cells (Antennen mit geringer Sendeleistung) ist bei vergleichbarem Leistungsspektrum eine gute Alternative. Small Cells können daher für eine lückenlose Netzabdeckung in ausreichender Menge auf dem Campus ausgebracht werden. Die überwiegende Mehrheit von Small Cells kann per Power-over-Ethernet (PoE) über die DUs mit Strom versorgt werden, sodass eine weitere Verkabelung für die Stromzufuhr nicht notwendig ist. Small Cells können auch über Glasfaser angebunden werden, benötigen aber hierfür eine eigene Spannungsversorgung.

Empfehlung für genaue Positionierung

Die Ausbringung und die Dichte der Antennen hat einen großen Einfluss auf die Lokalisierungsgenauigkeit. Hierbei unterscheidet sich eine Installation, mit der eine performante Lokalisierung ermöglicht werden soll, deutlich von einer reinen Kommunikationsinstallation. Beispielsweise müssen Antennen auf verschiedenen Ebenen angebracht werden, um eine Lokalisierung zu ermöglichen. In diesem Fall sollte bei der Installation Experten zu Rate gezogen werden, um eine optimale Lokalisierungsleistung des Systems zu erreichen.

28 Die Basisstation (BBU) ist in 5G in drei Teile (RU, DU, CU) aufgeteilt (siehe auch TR 38.801). Eine detaillierte Betrachtung findet sich in: NGMN: 5G RAN CU - DU Network Architecture, Transport Options and Dimensioning v 1.0, abgerufen unter: https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/Publications/2019/190412_NGMN_RANFSX_D2a_v1.0.pdf

8.1.2 Anzahl und Dimensionierung von Basisstationen

Die Funknetzplanung ermittelt durch Verkehrsmodelle die nötige Dimensionierung der BBUs für eine lückenlose Mobilfunkversorgung auf dem Firmengelände. Um die Anforderungen an Datendurchsatz zu erfüllen, müssen mehrere BBUs mit ausreichender Leistungsfähigkeit auf dem Firmengelände verteilt aufgestellt werden.

Empfehlung für Betriebsräume

BBUs sollten in eigenen Betriebsräumen aufgestellt werden, und je nach Größe und Wärmeentwicklung klimatisiert werden. Der Brandschutz für Betriebsräume und alle Zuleitungswege muss in geeigneter Form berücksichtigt werden.

8.1.3 Verkabelung von zentralen und verteilten Einheiten

Für die Anbindung der Antennen an die BBUs sind Leerrohre, Kabelkanäle und Trassen für Ethernet CAT6, LWL und HF-Kabel sowie Patchfelder für die Verkabelung im Innenraum zur Verfügung zu stellen. Aufgrund der geringeren Kosten können Ethernet CAT6 Kabel im Büro-Bereich eingesetzt werden. In Bereichen mit größeren Kabellängen > 100 m sind LWL empfohlen.

Empfehlung zur Kostenreduktion

Mit der entsprechenden Wahl der Hardware lässt sich der Verkabelungsaufwand der Campus-Installation erheblich reduzieren.

- DU und CU in einem Gerät: Sind die Instanzen (DU, CU) in einem Gerät (BBU) integriert, so entstehen lange Kabelwege zu jeder Antenne. Die Kosten für die Verkabelung steigen. Der Verkabelungsaufwand und somit auch die Installationszeit verlängert sich.
- DU und CU in zwei eigenständigen Geräten: Sind die Instanzen eigenständig, können die DUs verteilt und somit näher an den Antennen aufgestellt werden. Das verringert den Aufwand für die Verkabelung, da die Anbindung jeder Antenne mit kurzen Kabelwegen zur DU

erfolgt (Ethernet CAT6 oder LWL) und die Anbindung der DU zur CU nur noch mit einer LWL Leitung installiert wird (anstatt zwischen DU und CU die Kabel multipliziert mit der Anzahl der Antennen zu verlegen). Je kürzer die Kabelwege und je weniger Kabel zu verlegen sind, desto niedriger sind Kosten, Zeit und Aufwand zur Implementierung eines NPNs.

8.2 Transportnetz

Falls für mehrere Firmenstandorte NPNs implementiert werden, sollte die Anbindung und Wegeführung dieser Standorte möglichst redundant erfolgen (Resilienz). Gemeint ist damit z.B. die doppelte Wegeführung der Glasfaserleitungen vom Kernnetz zu den BBUs. Die redundante Wegeführung erfolgt von und bis zum Gebäude (FTTB, fiber to the building). Beide Wege sollten örtlich voneinander getrennt verlegt werden, sodass im Falle eines Leitungsbruchs durch höhere Gewalt die Verbindung über die zweite Wegeführung aufrechterhalten werden kann (sog. Failover Szenario).

Im Gebäude selbst sollte zur Verlegung der Glasfaserkabel ausreichende Trassen bzw. Leerrohre vorhanden sein. Bei Durchbrüchen und Bohrungen ist ggf. die Genehmigung des Architekten einzuholen sowie Brandschutzmaßnahmen zu beachten.

8.3 Kernnetz

Die Tendenz bei den Funktionen des Kernnetzes geht in Richtung Virtualisierung (Network Function Virtualization, NFV). Bei 5G wird diese Virtualisierung erstmalig vollständig umgesetzt. Die Funktion der Netzelemente wird hierbei komplett von der Hardware entkoppelt und als reine Software in eine Cloud-Umgebung portiert. Bei der Wahl des virtualisierten Kernnetzes und somit des Herstellers sind nachfolgende Punkte zu beachten, um für den operationellen Betrieb eines Campus-Netzes keine unnötige Komplexität zu erzeugen.

8.3.1 Virtualisierung

Die Virtualisierung der Netzelemente sollte als Container implementiert sein.

Container sind modular und in sich abgeschlossenen programmiert und kommunizieren mittels API (Application Programming Interface) mit den anderen virtualisierten Netzelementen des CNs. Container lassen sich schneller hochfahren, portieren oder verschieben als beispielsweise Virtuelle Maschinen (Virtual Machine, VM). Die Implementierung eines Containers bedarf im Vergleich zu VMs weniger Code und Ressourcen wie Speicher oder Rechenleistung.

- 5GC vs. EPC (LTE-Core): Die Wahl sollte, wenn möglich, auf einen 5G Core fallen, der sowohl im NSA (Non-Standalone) als auch SA (Standalone) Mode betrieben werden kann.
- NSA-Betrieb: Wird das NPN im NSA Mode implementiert, ist der Migrationspfad in Richtung eines reinen 5G Netzes komplex und sowohl vom Einstiegszeitpunkt als auch von der Wahl des Herstellers abhängig. Zudem muss sowohl ein LTE- als auch ein 5G-RAN implementiert werden. Hierbei muss sowohl ein 5G- als auch ein 4G-Core installiert werden (abhängig von der Wahl des Herstellers). Die Kosten zur Implementierung eines NPNs werden im ungünstigsten Falle verdoppelt, wobei der zeitliche und technische Mehraufwand hierbei noch nicht mit einbezogen ist.
- SA-Betrieb: Herstellerabhängig und bei Verfügbarkeit sowohl eines SA-Cores als auch 5G-fähiger industrieller UEs kann auf die LTE-Technologie vollständig verzichtet werden. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ermöglichen nur wenige Hersteller den SA-Betrieb. Erste SA-fähige, eingebettete 5G-Module sind seit Q1 2020 verfügbar. Mit der Verfügbarkeit von SA-fähigen UEs ist ab Q4 2020 zu rechnen.

8.3.2 Mischbetrieb verschiedener Hersteller

Trotz einer weltweiten Standardisierung ist zu beachten, dass die Produkte der verschiedenen Infrastrukturhersteller teilweise nicht ohne Interoperabilitätstest auskommen. Während Grundfunktionen meist fehlerfrei zwischen den Herstellern zusammenwirken, sind weiterführende

Funktionen oft nicht interoperabel. Die Tests und der Entwicklungsaufwand sowie die Zyklen bis zum fehlerfreien Zusammenarbeiten können erfahrungsgemäß bis zu einem Jahr dauern.

Bei Updates und neuen Releases muss die Interoperabilität wiederholt betrachtet werden.

8.4 Betreibermodelle

Die Angebote der Hersteller von Infrastrukturelementen für ein NPN erlauben vielfältige Variationen von Betreibermodellen. Sie reichen von der Bereitstellung von Technikern im Fehlerfall über unbegrenzte Software-Upgrades bei neuen Releases (Lifecycle Management), kostenlose Bugfixes oder Sicherheitsupdates bis hin zum kompletten Betrieb des NPN.

Je nach Betreibermodell werden die Aufgaben für den Betrieb eines NPNs in eigene Leistungen oder fremde Leistungen (Hersteller oder MNO) aufgeschlüsselt. Die Wahl hängt vor allem von den individuellen Möglichkeiten ab, aber auch die Wahl der NPN-Variante bestimmt das Betreibermodell. Während ein eigenes Standalone-NPN alle Betreibermodelle zulässt, wird ein NPN, das von einem öffentlichen Netzbetreiber bereitgestellt wird, auch nur von diesem betrieben.

Tabelle 8 gibt eine Auswahl möglicher Betreibermodelle wieder.

8.5 Erwartungen an die kommenden 3GPP Releases

Die Standardisierung von 5G ist ein stetiger Prozess, der über mehrere Jahre stattfinden wird. Bisherige Mobilfunkgenerationen haben sich im Schnitt jeweils über zehn Jahre entwickelt. 5G ist dabei die erste Mobilfunkgeneration, die auch stark von den industriellen Anwendern geprägt wurde.²⁹ Wie in Kapitel 4.2 erläutert, erfolgt diese Entwicklung in Releases.

²⁹ Vgl. u.a. 3GPP TS 22.104 (Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains), 3GPP TR 22.804 (Study on communication for automation in vertical domains), 3GPP TS 22.261 (Service requirements for the 5G system).

Das aktuell in der Finalisierung befindliche Release 16 wird von der 3GPP als „5G Phase 2“ bezeichnet und soll Mitte 2020 abgeschlossen sein. Von ersten Implementierungen in Form marktverfügbarer Produkte kann somit bis Ende des Jahres 2021 ausgegangen werden.

Ein grober zeitlicher Ablauf sowie ein Überblick über ausgewählte Inhalte der Releases 15 bis 17 sind in Abbildung 8 dargestellt.

8.5.1 Release 15

In Release 15 lag der Fokus primär auf breitbandigen, kommerziellen Anwendungen (eMBB), daher sind nur wenige Funktionen enthalten, die für industrielle Anwendungen relevant sind. Allerdings wurden mit kürzeren Sendeintervallen (sTTI, short TTI), Paket Duplication (PD) und der Möglichkeit für Semi-Persisten Scheduling (SPS, reduziert den Overhead) erste wichtige Funktionen für eine Kommunikation mit hoher Verlässlichkeit und geringer Latenz in den Standard aufgenommen.

8.5.2 Release 16

Dies ändert sich mit Release 16, in dem neben 5G als Technologie im Allgemeinen (5G efficiency) nun auch industrielle Anwendungen (5G enhancements) stark im Fokus stehen. Neben der Weiterentwicklung und Einführung neuer Funktionen für das autonome und vernetzte Fahren (Cellular-V2X, C-V2X) sind besonders die Erweiterungen im Bereich Industrial IoT und URLLC sowie die Nutzung von 5G NR (New Radio) in unlizenzierten Bändern für industrielle Anwender interessant. Die allgemeinen Weiterentwicklungen umfassen vor allem Optimierungen im Bereich des Stromverbrauches sowie im Umgang mit Interferenzen im Funk-Netz sowie MIMO-Ansätze.

Für Release 16 wurden Arbeitspakete (sog. Work Items) definiert, in denen geplante Änderungen und Weiterentwicklungen niedergeschrieben sind. Auf Basis einiger ausgewählter Arbeitspakete wird nachfolgend ein Ausblick auf Release 16 gegeben.

Betreibermodell	Eigenen Leistungen	Fremde Leistungen	Personalaufbau
Eigenbetrieb	Alarm Monitoring Service Monitoring Maintenance Operation	Entsendung von Technikern im Fehlerfall	Eigenes Personal mit umfangreichen Mobilfunkkenntnissen sowie Produktkenntnissen zu Antennen, BBU und Core werden für den lokalen Betrieb von RAN und Core benötigt
Teilbetrieb	Maintenance Operation	Alarm Monitoring Service Monitoring Entsendung von Technikern im Fehlerfall	Eigenes Personal mit Mobilfunk-Expertise für Monitoring, Alarmierung, 1st Level Fehlerbehebung
Vollständig ausgelagerter Betrieb (Managed Services)	Systemzugang	Alarm Monitoring Service Monitoring Maintenance Operation Entsendung von Technikern im Fehlerfall	Steuerung der Subunternehmen kann durch eigene IT-Abteilung übernommen werden

Tabelle 8: Beispiele möglicher Betreibermodelle für ein NPN.

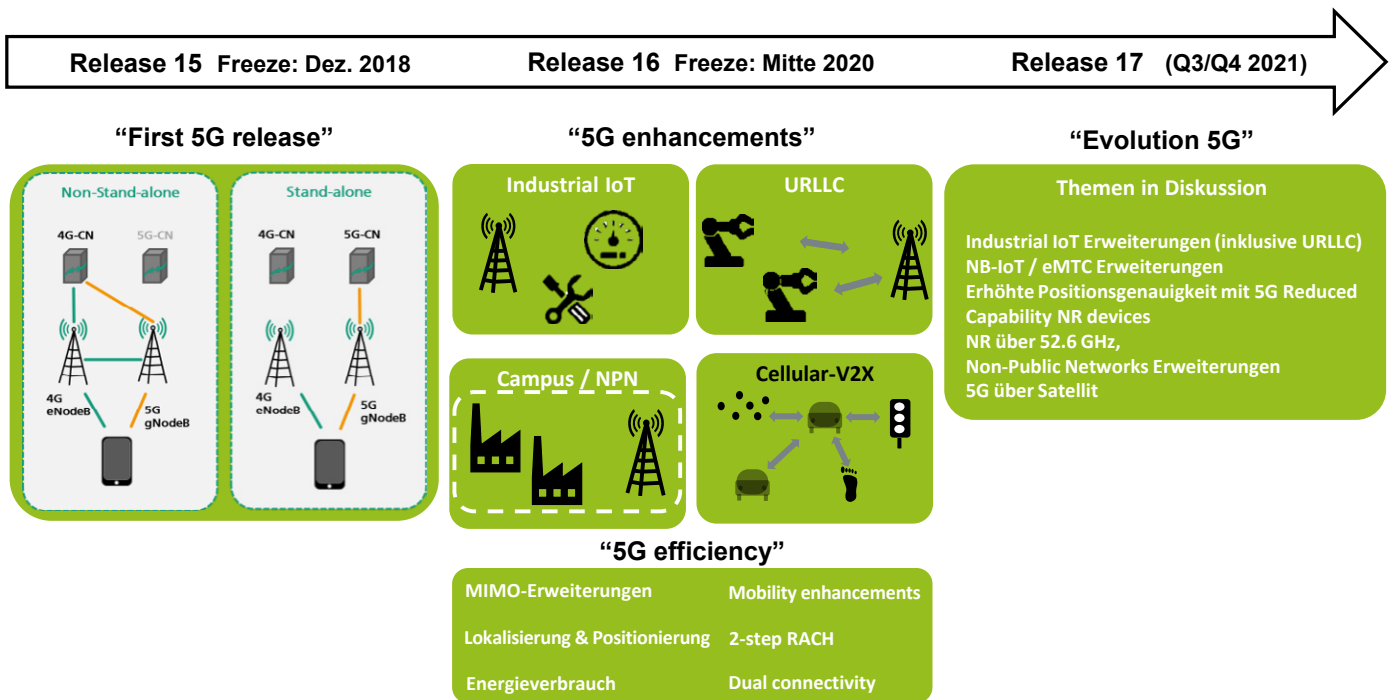


Abbildung 8: 5G Timeline und Themen der Releases, 4Q/2019.

Work Item:**Support of NR****Industrial Internet of Things (IoT)³⁰**

Ziel des Arbeitspaketes ist es, auf Basis von Protokollerweiterungen die Latenz und Zuverlässigkeit von 5G weiter zu verbessern, um die Anforderungen von industriellen Anwendungen erfüllen zu können. Durch Release 16 soll die Unterstützung für folgende Use Cases ermöglicht werden:

- Factory Automation
- Transport Industry
- Electrical Power Distribution

Die adressierten Use Cases sind in den Beschreibungen der Work Items bisher nur sehr allgemein definiert. Technische Zielwerte (KPIs) sind nicht enthalten, sodass momentan keine konkreten Aussagen hinsichtlich der Leistungsziele für Latenz und Zuverlässigkeit getroffen werden können.

Die Verbesserungen bei Latenz und Zuverlässigkeit sollen u.a. durch eine höhere Effizienz bei der Nutzung von Ressourcen im Up- und Downlink (duplication enhancements, PDCP), durch die Nutzung redundanter Netzpfade (higher-layer multi-connectivity) oder durch die Unterstützung von Time-Sensitive Communication (z.B. Ethernet header compression) erreicht werden.

30 https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_86/Docs/RP-192590.zip

Work Item:**Physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency communication (URLLC)³¹**

In Release 15 wurde die grundlegende Funktionalität spezifiziert, jedoch noch ohne Anpassungen für Anwendungen jenseits des eMBB, wie z.B. in der Fabrik-Automatisierung. Diese Erweiterungen wiederum werden in Release 16 spezifiziert, um Verbesserungen im Bereich Latenz und Zuverlässigkeit zu erreichen. Die Erweiterungen umfassen u.a. verbesserte Kontrollinformationen im Up- und Downlink sowie Erweiterungen von Scheduling (Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ). Die gesetzten Ziele bauen auf Empfehlungen von Studien innerhalb des 3GPP auf, bspw. TR 38.824³² („Study on physical layer enhancements for NR ultra-reliable and low latency case (URLLC) Rel.16“). Darin enthaltene Beispiele für Use Cases definieren teils sehr strikte Anforderungen. Für Factory Automation (Motion Control) wird z.B. eine Ende-zu-Ende-Latenz (E2E) von 2 ms bei einer Zuverlässigkeit von 99,9999 % angegeben. Es kann in Summe davon ausgegangen werden, dass durch Release 16 mit Steigerungen der Leistung hinsichtlich Latenz und Zuverlässigkeit zu rechnen ist, definierte Zielwerte (bspw. 2 ms E2E-Latenz bei spezifizierter Zuverlässigkeit) gibt es aktuell jedoch nicht.

Work Item:**NR-based Access to Unlicensed Spectrum³³**

Ziel des Work Items ist es mit NR-U (New Radio – Unlicensed) eine auf 5G NR basierende, weltweit einsetzbare Lösung zu entwickeln, welche die Nutzung eines unlizenziierten Frequenzspektrums ähnlich wie bei WLAN oder Bluetooth ermöglicht. Auch wenn für 5G (und Mobilfunk im Allgemeinen) die Nutzung von lizenziertem Spektrum Priorität bleibt, so ermöglicht die Nutzung von unlizenziiertem Spektrum auch einige Vorteile. So kann z.B. die kombinierte Nutzung

von lizenziertem und unlizenziiertem Spektrum eine deutliche Steigerung der Datenrate ermöglichen und für die Umsetzung von Use Cases mit besonders hohem Bedarf an Bandbreite von Vorteil sein. Aktuell wird an der Nutzung des 6 GHz-Bandes (für Europa möglicherweise im Bereich von 5,925 – 6,425 GHz, bzw. Teilen davon) gearbeitet. In späteren Releases wäre auch eine Nutzung von deutlich höheren Frequenzbereichen (> 52,6 GHz) denkbar. Bei der Entwicklung wird besonders darauf Wert gelegt, dass eine Koexistenz zwischen NR-U und bestehenden WLANs ermöglicht wird.

Work Item:**Private Network Support for NG-RAN**

Campus-Netze sind kein ausschließliches Thema des deutschen Marktes. Durch die Bereitstellung von dedizierten, lokalen Frequenzen im Bereich 3,7 – 3,8 GHz durch die BNetzA erfährt dieses Thema aber gerade in Deutschland besonders hohe Relevanz. In diesem Work Item geht es vor allem um die Unterstützung von NPNs und deren Implementierung auf der RAN-Seite. Dies beinhaltet u.a. die Einführung neuer Methoden zur Identifizierung von NPNs und Geräten sowie die Unterstützung notwendiger Funktionen (z.B. Access Control).

Work Item:**NR Positioning Support**

Darüber hinaus wird die Positionsbestimmung in 5G-Netzen ohne GNSS (Satelliten-basierte Lokalisierung) unterstützt. Eine horizontale wie vertikale Positionsgenauigkeit von bis zu 3 m soll dabei mit Release 16-konformer Hardware in Zukunft erreicht werden.

8.5.3 Release 17

Im Dezember 2019 wurden beim 86. 3GPP RAN Plenary die Inhalte für das Release 17 beschlossen³⁴. Release 17 soll bis September 2021 abgeschlossen sein, erste Implementierungen daraus in kommerziell verfügbaren 5G-Produkten sind dementsprechend ab Herbst 2022 zu erwarten.

31 https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_84/Docs/RP-191584.zip

32 <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3498>

33 https://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_86/Docs/RP-192926.zip

34 Quelle: <https://www.3gpp.org/news-events/2019-12-17-release-17-%E2%80%93-strong-radio-evolution>

Wichtige Arbeitspakete umfassen die generelle Verbesserung der Effizienz, Performanz und Abdeckung von 5G. Darüber hinaus befasst sich 3GPP in Studien (Study Items) u.a. mit der Nutzung von höheren Frequenzspektren im Bereich von 52,6 GHz bis zu 71 GHz. Des Weiteren wird an der Erweiterung von AR/VR in Form von extended Reality und der Verwendung sowohl von 5G als auch von LTE NB-IoT/eMTC über Satelliten gearbeitet (IoT over NTN – IoT über Non-Terrestrial/Satellite-Networks).

Für industrielle Anwender sind vor allem die nachfolgenden Arbeitspakete von Interesse:

Work Item:

Enhanced Industrial Internet of Things (IIoT) and URLLC support³⁵

Wie bereits in Release 16 wird es weitere Verbesserungen in Bezug auf Latenz und Zuverlässigkeit geben, um die Anforderungen von industriellen Anwendungen erfüllen zu können. Die Anwendungen sind in der Arbeitspaketbeschreibung aktuell sehr allgemein definiert, KPIs sind bisher nicht enthalten.

In Release 17 soll zum einen das Feedback des UE zum Netz erweitert werden, um mit verbessertem HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) und verbesserter Auswahl der Modulation und Coderate die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Zum anderen werden Erweiterungen aus Release 16 hinsichtlich ihrer Eignung in unlicenzierten Frequenzbänder, z.B. in Fabrikumgebungen, untersucht und gegebenenfalls angepasst. Letztendlich soll die Zeitsynchronisation in 5G zur Unterstützung von Time Sensitive Networks (TSN) erweitert werden. Details sind in der Work Item Description nicht enthalten, aber es wird dort auf Voruntersuchungen zur notwendigen Zeitsynchronisierung der Geräte im 3GPP Netz in der SA2-Arbeitsgruppe verwiesen (TR 23.734)³⁶.

Work Item:

NB-IoT / eMTC enhancements³⁷

NB-IoT und LTE-MTC wurden in Release 13 eingeführt. Ziel war die Unterstützung von Anwendungen, deren Anforderungen eher in Richtung Abdeckung oder Gerätedichte gehen und in denen Übertragungsgeschwindigkeiten oder Latenz eine untergeordnete Rolle spielen. In den nachfolgenden Releases wurden die Technologien kontinuierlich verbessert und erweitert, u.a. hinsichtlich einer höheren Datenrate oder eines geringeren Energieverbrauchs. Diese kontinuierliche Verbesserung wird auch in Release 17 fortgesetzt. So sollen neue Funktionen eingeführt werden, um ein größeres Spektrum an Anwendungen abdecken zu können. Dabei sollen vor allem die praktischen Erfahrungen von ersten Installationen in die Arbeiten einfließen.

Work Item:

Support of Reduced Capability

NR Devices³⁸

Neben den 5G-Anwendungsszenarien eMBB, URLLC und mMTC wurde mittlerweile eine weitere Kategorie identifiziert, die sogenannte „Time Sensitive Communication“. Entsprechende Geräte können für industrielle Sensornetze, z.B. für Videoüberwachungen und diverse Arten von industriellen Sensoren oder auch für eHealth-Anwendungen, eingesetzt werden.

Sie zeichnen sich durch eine moderate Datenrate (angesiedelt zwischen eMBB und mMTC), kleine Abmessungen und einen geringen Stromverbrauch aus. Zu diesem Zweck startet in Release 17 eine Studie für die sogenannten „Reduced capability NR devices“ (vorher auch NR-light genannt), gefolgt von einem Work Item zur deren Spezifikation. Diese Geräte sollen auch koexistent mit eMBB, URLLC und mMTC in einem Netz kommunizieren können.

35 Quelle: ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_86/Docs/RP-193233.zip

36 Quelle: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3487>

37 Quelle: ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_86/Docs/RP-193264.zip

38 Quelle: ftp://ftp.3gpp.org/tsg_ran/TSG_RAN/TSGR_86/Docs/RP-193238.zip

Work item:**Positioning**

Bei der Positionsbestimmung mit 5G ist für Release 17 eine horizontale Positionsgenauigkeit von 1 m angestrebt.

8.5.4 Release 18

Themen für Release 18 wurden in 3GPP innerhalb der RAN-Arbeitsgruppen bisher noch nicht diskutiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass allgemeine Verbesserungen (z.B. MIMO, Interferenz-Koordinierung) zum effizienteren Betrieb von landesweiten Netzen spezifiziert werden. Darüber hinaus werden vermutlich wichtige Themen für die Industrie weiterentwickelt werden, z.B. V2X, URLLC / Industrial IoT, Reduced capability NR devices und andere. Innerhalb der SA1-Arbeitsgruppe, die für die Ausarbeitung der service requirements zuständig ist, werden im Laufe des Jahres 2020 die Anforderungen für Release 18 erarbeitet. Aktuell sind unter anderem bereits Studien zur Verwaltungskonfiguration zwischen verbundenen MCX-Systemen (MCX, mission critical communication) und zu Leistungsanforderungen von Künstlicher Intelligenz (KI)/ Maschinelles Lernen (ML) an 5G-Systeme angelaufen.

Für Release 18 gibt es innerhalb der 3GPP-Standardisierung Bestrebungen, eine dm-genaue Positionsbestimmung als Zielwert festzuschreiben.

9 5G im Produkt

Beim Einsatz von 5G in den Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus kann zwischen Anwendungen mit sehr hoher Datenrate (z.B. für Software-Betankung) und IoT-Anwendungen unterschieden werden. Bei den IoT-Anwendungen unterscheidet man dabei zusätzlich zwischen den folgenden Ausprägungen:

- **Industrial IoT (URLLC)**

Dies ist mit Release 15 erstmalig standardisiert worden und soll der lokalen Vernetzung von Geräten mit hoher Verlässlichkeit und niedriger Latenz dienen, z.B. innerhalb einer Produktionshalle oder Betriebsfläche. Erst mit Release 16 bzw. Release 17 werden aber alle notwendigen URLLC-Funktionen spezifiziert sein. Es wird erwartet, dass die für die industrielle Vernetzung im Standard definierten Funktionen für die Anwendung im Industrial IoT ggf. mit Unterstützung von TSN (Time Sensitive Networks), frühestens ab 2021 in ersten Mobilfunk-Produkten auf UE- und Netz-Seite verfügbar sein werden. Hierfür werden in Deutschland im Rahmen von NPNs vor allem die neuen 5G-Frequenzen zwischen 3,7 bis 3,8 GHz genutzt werden. Auf noch längere Sicht könnte auch das mmWave-Frequenzband (FR2) für diese Anwendung zum Einsatz kommen. Die dafür erforderlichen eingebetteten Komponenten werden allerdings neue Anforderungen an deren Integration in ein Gerät stellen. So wird es dort z.B. nur noch in das Funkmodul integrierte Antennen geben, was besonders beim Einbau in eine Maschine oder Anlage neue Ansätze erfordern wird.

- **Massive IoT (mMTC)**

Massive IoT steht für großflächige, weitreichende Netze von Geräten, oft mit geringer zur Verfügung stehender Energie, die mit sehr geringer Bandbreite bzw. Datenrate (wenige kHz/MHz, wenige kbit/s)³⁹ kommunizieren.

Die genutzten Frequenzen liegen wegen der deutlich besseren Ausbreitungseigenschaften im Bereich unter 1 GHz. Die Latenz im Uplink kann hier im Sekunden-Bereich liegen. Abhängig von der Netz- und Gerätekonfiguration ist die Erreichbarkeit der Geräte im Downlink durch erweiterte Energiesparmodi eingeschränkt. Diese Netze werden als LPWA-Netze (Low Power Wide Area) bezeichnet. Seitens der 3GPP wurden hier bereits in Release 13 und 14 die beiden Technologien LTE-M und NB-IoT standardisiert.

Im Gegensatz zum 5G Industrial IoT (URLLC) gibt es schon heute viele Mobilfunk-Produkte und Komponenten für 5G Massive IoT (mMTC) Anwendungen. Aktuelle Implementierungen basieren auf LTE Release 13 bzw. 14. Mit Release 15 wurden weitere Verbesserungen standardisiert.⁴⁰ Was davon in Mobilfunk-Produkte implementiert wird ist noch nicht klar. Ein Zusammenwachsen der Funktionslisten von 5G und LTE-M/NB-IoT wird frühestens für Release 17 erwartet.

9.1 Entwicklung eines mit 5G vernetzten Produktes

9.1.1 Notwendige Komponenten

Im Hinblick auf UEs können 5G-Komponenten für den industriellen Einsatz je nach Integrationsgrad und Formfaktor in drei verschiedene Kategorien eingeteilt werden: Chipsatz (im Mobilfunk-Kontext oft als Modem bezeichnet), Modul und Customer Premises Equipment (CPE).

39 200 kHz für NB-IoT, 1,4 MHz bis 20 MHz bei LTE-M.

40 Quelle: https://www.itu.int/en/ITU-R/study-groups/rsg5/rwp5d/imt-2020/Documents/S02-1_3GPP%20IMT-2020.pdf

- **Chipsatz:** Der Chipsatz ist eine wichtige elektronische Komponente eines Mobilfunk-Endgerätes (UEs), welche den Zugang zum Mobilfunknetz ermöglicht. Es werden dabei üblicherweise verschiedene Generationen von Mobilfunknetzen unterstützt. Der Chipsatz wird auf eine Leiterplatte gelötet und benötigt für den ordnungsgemäßen Betrieb eine zusätzliche Schaltung (z.B. Speicher, HF-Bauteile, ggf. Mikroprozessor).

Es gibt hier einerseits reine Modem-Chips, die für höhere Protokoll-Schichten noch eine separate Central Processing Unit (CPU) benötigen (Split Stack), als auch komplette System-on-Chip (SoC) Lösungen mit höherem Integrationsgrad (Full Stack). Vor allem in Smartphones, aber auch in Modulen, werden Chipsätze direkt verbaut.

- **Modul:** Dies ist eine elektronische Baugruppe, die in ein Mobilfunk-Endgerät eingebettet werden kann, um den Zugriff auf ein Mobilfunknetz zu ermöglichen. Das Modul besteht aus einem Chipsatz auf einer Leiterplatte und einer Zusatzschaltung. Im Unterschied zum reinen Chipsatz kann für ein Modul vorab eine Zertifizierung nach den jeweiligen länder-/regionsspezifischen Konformitätsanforderungen vom Hersteller des Moduls durchgeführt werden, wodurch sich der Marktzugang für eine Maschine bzw. eine Anlage mit einer 5G-Funklösung erheblich erleichtert. Das Modul kann mit integrierten Antennen oder Anschlüssen zur Anbindung externer Antennen ausgestattet werden. Diese Baugruppe aus Komponenten kann direkt auf die Leiterplatte eines Gerätes eingelötet werden (vereinfachtes Gerätedesign), oder z.B. über den PCI Express Mini Card oder den M.2-Steckverbinder (Erweiterung der Gerätefunktionalität) in ein Endgerät eingesteckt werden.

Auch Module können den vollen (Full Stack) oder nur einen Teil (Split Stack) des drahtlosen Protokollstapels unterstützen. Im Falle einer nur teilweisen Unterstützung müssen die nicht im Modul enthaltenen Protokollschichten in einer externen CPU implementiert werden.

- **Customer Premises Equipment (CPE) bzw. 5G-Router/5G-Gateway:** Hierbei handelt es sich um ein elektronisches Endgerät mit einem direkt eingebetteten Chipsatz oder einem Chipsatz, der in einem Modul enthalten ist. Dies ermöglicht es einem Benutzer oder einer Maschine, sich mit dem Mobilfunknetz zu verbinden und dieses zu nutzen. Ein CPE ist eine tragbare Vorrichtung, die an einem bestimmten Ort mit eingeschränkter Mobilität verwendet werden kann, die z.B. durch die Stromversorgung limitiert ist. Es kann als Router betrieben werden, welcher andere IP-taugliche Geräte mit dem 5G-Netz über LAN oder WLAN verbindet. Als Gateway setzt ein CPE andere, nicht IP-basierte Kommunikationsprotokolle auf das 5G-Netz um. Wie derzeit schon für LTE wird es zukünftig auch industriell einsetzbare CPEs für 5G geben, die in speziellen Gehäusen für den Schaltschrankbau bzw. die Hutschiene erhältlich sein werden.

Je nach gewählter Integrationstiefe (Chipsatz, Modul, CPE) werden weitere Komponenten benötigt, um eine Maschine oder eine Anlage an ein 5G Netz anzuschließen:

- Die Stromversorgung für die Funkeinheit
- Ein Gehäuse, eine Trägerplatine
- Die Datenschnittstelle zur Maschine/zur Anlage
- Eine oder mehrere Antennen mit geeigneten Einbauorten

9.1.2 Komponenten-Anbieter für 5G im Produkt

5G-fähige UEs (Smartphones, Chipsatz-basiert) für die Anwendung eMBB sind seit 2019 in wachsender Anzahl auf dem Markt vorhanden. Auch gibt es für eMBB einige CPEs für Büro-umgebungen und Entwicklungszwecke.

Erste 5G-fähige Module (Release 15, NSA und SA) sind seit Anfang 2020 auf dem Markt verfügbar.

Da die wichtigen Chipsatzhersteller vorerst den viel größeren Consumer-Markt für Smartphones bedienen und unterstützen werden, folgen die

industriellen UEs erfahrungsgemäß mit mehreren Monaten Verzögerung. Mit 5G-fähigen CPEs für die industrielle Anwendung ist in hohen Stückzahlen ab 2021 zu rechnen.

Zum Jahresbeginn 2020 waren über 200 5G-Geräte angekündigt oder verfügbar. In dieser Zahl sind auch Geräte enthalten, die nur in regionalen Varianten vorliegen sowie Prototypen, deren Vermarktung nicht erwartet wird. Eine Datenbank über die angekündigten und verfügbaren 5G Geräte führt die Global Mobile Suppliers Association (GSA) einsehbar unter: <https://gsacom.com/technology/5g/>.

9.1.3 Höhe des Integrationsgrades

Entsprechend der am Markt verfügbaren 5G-Komponenten für UEs sind zunächst unterschiedliche Optionen für eine Integration denkbar:

- **Direkte Integration eines Chipsatzes in die Maschine:** Hierfür ist mit Abstand das größte Maß an technischem Know-how nötig, welches sowohl die Protokoll-Seite als auch die HF-Seite umfasst. Die direkte Integration eines Chipsatzes scheitert dabei oft auch am Geschäftsmodell und den Stückzahlvorstellungen der Chipsatzhersteller, die ausschließlich sehr große OEMs beliefern und beim Design-In unterstützen. Technische Unterstützung durch Distributoren findet bei Mobilfunkchipsätzen so gut wie nicht statt. Auch von Seiten der Zertifizierung nach den jeweiligen nationalen/regionalen Zulassungsregimes birgt die Konformitätsprüfung eines eigenen Designs auf Basis eines Chipsatzes den absolut größten Aufwand. Dasselbe gilt für die Interoperabilitätstests mit der Netzausrüstung unterschiedlicher Hersteller. Ein Second Source Prinzip ist bei dieser Variante nicht einzuhalten. Die Verwendung eines alternativen Chipsatzes erfordert ein vollständiges Neudesign des UE. Aus den genannten Gründen ist daher eine direkte Integration des Chipsatzes in eine Maschine bzw. Anlage nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Bei dieser Option stehen sehr hohe Entwicklungskosten sehr geringen Stückkosten gegenüber.
- **Integration eines Moduls in die Maschine bzw. in die Steuerungseinheit der Maschine:**
Das notwendige technische Wissen beschränkt sich hier vor allem auf die HF-Seite. In diesem Zusammenhang muss eine technisch korrekte Antennenkonfiguration entwickelt werden. Weiterhin sind die elektrischen und mechanischen Schnittstellen zum Funkmodul bereitzustellen. Bei einem Split Stack Modul muss außerdem auf einer CPU in der Maschine ein Teil des Protokoll-Stacks abgearbeitet werden. Dies erfordert gewisse Echtzeitbedingungen in der Verarbeitung, denen Rechnung getragen werden muss. Funkmodule und Support sind bei Herstellern und Distributoren auch bei Abnahme kleiner bis mittlerer Stückzahlen erhältlich. Konformitätsprüfungen und Interoperabilitätstests hat der Modulhersteller bereits durchgeführt, sodass meist nur noch ein deutlich reduzierter Umfang an Konformitätstests, v.a. bezüglich der Antennenintegration, abzuarbeiten ist. Nur bei Modulen mit standardisierter Schnittstelle ist ein Second Source Prinzip ohne höheren Entwicklungsaufwand einzuhalten. Bei der Integration eines Moduls kann von mittleren Entwicklungskosten und mittleren Stückkosten ausgegangen werden.
- **Einsatz eines industriellen Mobilfunk-Routers bzw. Gateways (CPE):** Diese Variante birgt den geringsten technischen Aufwand bei der Integration von 5G in die Maschine. Das industrielle CPE hat bereits alle erforderlichen Konformitätsprüfungen seitens des Herstellers durchlaufen, die Schnittstellen des CPE sind standardisiert und somit leicht nutzbar. Die Anforderungen, die durch einen industriellen Einsatz entstehen, hat der Hersteller des Modems/Gateways im optimalen Fall bereits berücksichtigt. Die Verfügbarkeit in allen Stückzahlen ist gegeben, ein gewünschtes Second Source Prinzip ist vergleichsweise leicht einzuhalten. Die Entwicklungskosten beschränken sich hier auf einen überschaubaren Integrationsaufwand, die Stückkosten dieser Variante sind aber am höchsten.

9.1.4 Herausforderung bei der Implementierung von 5G in Produkten

Für 5G-Mobilfunknetze werden, so wie schon bei allen bisherigen Mobilfunkgenerationen, unterschiedliche Frequenzbänder je nach Land bzw. globaler Region genutzt und von den jeweiligen Regulierungsbehörden lizenziert. Abbildung 9 gibt einen Überblick zu den 5G Frequenzen im Bereich unter 6 GHz (FR1) und im mmWave-Bereich (FR2).

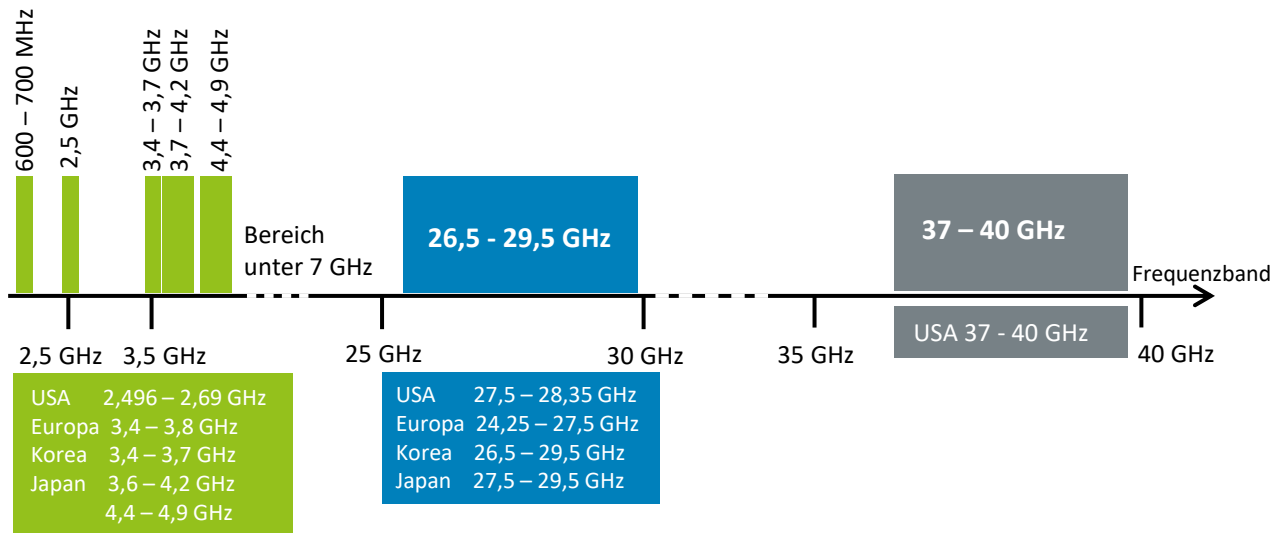
Es müssen daher hinsichtlich des Landes bzw. der Region, in der die Maschine oder die Anlage eingesetzt werden soll, entsprechend geeignete Funktechnik-Komponenten ausgewählt werden. Mobilfunkmodule werden üblicherweise für spezielle Regionen, Länder und oft sogar Netzbetreiber spezifiziert und auf Konformität und Interoperabilität mit den lokalen Infrastrukturen getestet. Nur so ist sichergestellt, dass ein technisch und rechtlich einwandfreier Betrieb der Funklösung möglich ist.

Auch bei NPNs ohne externen Netzbetreiber muss zumindest für jedes Land, in dem die Maschine bzw. die Anlage betrieben werden soll, eine Zulassungsprozedur durchlaufen worden sein. Oft ist hier einerseits eine Modulzulassung erforderlich (diese erfolgt normalerweise durch den Modulhersteller), andererseits muss aber auch eine Konformitätserklärung für die gesamte Maschine bzw. Anlage abgegeben werden. Unterstützung hierfür können spezielle Dienstleister bieten, die sich auf den internationalen Marktzugang von Funkprodukten spezialisiert haben.

Auch die lizenzrechtliche Seite muss beachtet werden: Der 5G-Standard enthält nach einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie eine Vielzahl an Patentanmeldungen, die im Zusammenhang mit dem 5G-Standard angemeldet wurden. Ob entsprechende Schutzrechte für das eigene Unternehmen bzw. das eigene Vorhaben lizenziert werden müssen, ist im Einzelnen zu prüfen.

Weitere Punkte, die bei der Implementierung von Mobilfunkkomponenten in eine Maschine bzw. eine Anlage zu beachten sind:

- Ist die Maschine oder Anlage mobil (global, regional, Campus-intern) oder stationär?
- Welche Energieversorgung kommt in Frage?
- Wird Roaming zwischen NPNs oder zu öffentlichen Netzen gebraucht?
- Wurden Interoperabilitätstests mit dem Hersteller der jeweiligen Netz-Infrastruktur durchgeführt?
- Gibt es genügend Platz und eine geeignete Stelle für die Antennen?
- Gibt es Pin-kompatible Versionen einer Modulfamilie beim selben Hersteller, um z.B. andere Funktionalitäten oder Regionen leicht unterstützen zu können?
- Ist das Funkmodul des CPE austauschbar?
- Ist das Unternehmen auf direkten Hersteller-Support angewiesen, oder kann man als Unternehmen auch Unterstützung bei der Integration der Komponente durch spezialisierte Distributoren erhalten? Ist ein Entwicklungs-Kit (Developer Kit) für Module verfügbar?
- Wie wird die Mobilfunkkomponente verbaut? In ein Metallgehäuse (Schaltschrank)? In ein Kunststoffgehäuse? Anbau an ein bestehendes Gehäuse? Aus welchem Material besteht dieses Gehäuse? Sind Abschirmeffekte durch die Umgebung des Geräts zu erwarten?
- Unter welchen Umgebungsbedingungen soll das Produkt bzw. die Anlage und somit die Funk-Komponenten eingesetzt werden? Im Innen- oder Außenbereich, Feuchtigkeit, Hitze, Chemikalien, Vibrationen, starke elektromagnetische Felder, Radioaktivität, etc.?
- Bei Modulen: Wieviel Platz steht zur Verfügung? Modul-Formfaktor LGA (Land Grid Array; Hersteller-proprietär) oder Standard-Interface (PCI Express Mini Card oder M.2)? Passt die I/O-Spannung des Moduls zur Systemumgebung?
- Soll ein Full Stack (Smart Module) oder Split Stack genutzt werden?
- Welche älteren Standards sollen unterstützt werden (2G, 3G, 4G, LTE-M, NB-IoT)? Soll auch Sprache übertragen werden?
- Welche Datenrate muss übertragen werden? Welche Latenzzeit wird gefordert? Welche Anforderungen an die zeitlichen Eigenschaften der Übertragung werden gestellt (z.B. bei TSN)?

Abbildung 9: Auswahl 5G-Frequenzen (weltweit), Stand Q4/2019. ⁴¹

9.1.5 Zertifizierung

Zur grundsätzlichen Einteilung der benötigten und empfehlenswerten Tests und Prüfungen von Mobilfunktechnik vor der Verwendung im Produkt kann man zum Beispiel die Kategorien des Global Certification Forum (GCF) betrachten. Das GCF ist eine Zertifizierungsorganisation, in der sich Hersteller, Netzbetreiber und Testlabore mit der Einhaltung von Standards und Vorgaben von Geräten im Mobilfunknetz befassen. Das GCF teilt den Zertifizierungsprozess von Mobilfunk-Ausrüstung in folgende Kategorien ein:

- **Konformitätsprüfung:** Diese umfasst die erforderlichen regulatorischen Prüfungen des Produkts als Voraussetzung für den Marktzugang in der jeweiligen Zielregion.
- **Feldversuche:** Hiermit werden das Verhalten und die Kompatibilität von Endgeräten in einem installierten Mobilfunknetz getestet und bewertet.

- **Interoperabilitätstests:** Darin sind die Tests des funktionalen Verhaltens und der Leistung des gesamten Kommunikationssystems (E2E) beinhaltet.

Während die beiden letztgenannten Kategorien als Gesamtsystemtests zum Zweck der Qualitätssicherung verstanden werden müssen, ist eine Konformitätsprüfung üblicherweise ein gesetzlich vorgeschriebener Komponententest, der z.B. auch von einem Modulhersteller bzw. dem Hersteller eines CPE übernommen werden kann.

Die Konformitätsprüfung ist normalerweise vor der Markteinführung von 5G-Komponenten unerlässlich. Hersteller und Lieferanten von Produkten, die z.B. für den europäischen Wirtschaftsraum bestimmt sind, müssen die Konformität mit der Radio Equipment Directive (RED) durch eine Baumusterprüfung, die auf einer technischen Dokumentation (TD) basiert, oder einer Konformitätserklärung (Declaration of Conformity, DoC) und einer CE-Kennzeichnung nachweisen.

⁴¹ Angelehnt an: <https://gsacom.com/5g-spectrum-bands/>

Die RED legt für den Binnenmarkt grundlegende Anforderungen an Sicherheit und Gesundheit, elektromagnetische Verträglichkeit und die effiziente Nutzung des Funkspektrums fest. Die Konformität eines Produktes mit der RED kann, beim Vorliegen sogenannter harmonisierter Normen, vom Hersteller selbst durch das Anbringen des CE-Zeichens und der Abgabe einer Konformitätserklärung bestätigt werden. Mobilfunkstandards sind bzw. werden üblicherweise zu harmonisierten Normen, sodass für gewöhnlich keine Baumusterprüfung notwendig sein sollte.

Allerdings sollte auch vor Abgabe einer Konformitätserklärung die Konformität mit den Standards durch entsprechende Messungen überprüft werden. Dazu sind für den Mobilfunkbereich sehr umfassende Kenntnisse in Hochfrequenztechnik und zu den Mobilfunkprotokollen und -standards notwendig. Außerdem ist umfangreiche Funk- und Hochfrequenz-Messtechnik (bis in den hohen zweistelligen GHz-Bereich) erforderlich. Hier sind unter anderem Protokoll- und Netzwerk-Simulatoren, Signalgeneratoren und -analysatoren sowie Messantennen und reflexionsfreie, geschirmte Räume zu nennen.

Dieses hohe Maß an hoch spezialisierter und kostenintensiver Ausrüstung und besonderem Fachwissen wird meist nicht von den Herstellern der Funktechnik-Komponenten selbst vorgehalten, sondern ist bei externen Dienstleistern vorhanden und wird von diesen angeboten. Die notwendigen Testdienstleistungen umfassen beispielsweise:

- HF- und Protokollprüfungen
- Leitungsgebundene Tests nach RED
- SIM / USIM / USAT (USIM Application Toolkit) Prüfungen
- Over-the-Air (OTA) Antennenleistungsprüfung
- Messung der ungewollten Störstrahlung (Radiated Spurious Emissions, RSE)
- Vermessung der EMV-Eigenschaften (Elektromagnetische Verträglichkeit), z.B. der Störfestigkeit gegen elektrostatische Entladungen als auch gegen HF-Einstrahlung

- Bei Bedarf Tests zur spezifischen Absorptionsrate (SAR), bei denen die Einhaltung der minimalen Wechselwirkung mit dem menschlichen Körper gemessen wird. Bei internationalem Einsatz, z.B. der Prüfung nach FCC- und ISED-Standards, Prüfung nach ARIB-Normen

Das Gesamtsystem, also das 5G-Netz in Verbindung mit den verwendeten Komponenten (Maschinen, Sensoren etc.), kann nur im aufgebauten Zustand getestet werden. Nur so können in spezifischen Tests z.B. die Latenz, die Datenrate und die Koexistenz etc. geprüft werden. Demnach sollte hier der Betreiber des Industriestandortes die Messungen vor Ort durchführen, auch um eine Beeinflussung durch andere Geräte bzw. Maschinen zu erkennen und zu vermeiden. Ist eine Messung vor Ort nicht möglich, so können dafür auch entsprechend ausgerüstete Testanordnungen oder Testbeds, die z.B. eine typische Industrieumgebung nachbilden, genutzt werden.

Für Gesamtsystemtests sind folgende Prüfkategorien relevant:

- Interoperabilitäts-Tests (IOP)
- Feldversuche nach GCF
- Feldprüfung für Qualitätssicherung
- Gebrauchstauglichkeit-Tests
- Leistungstest (z.B. Latenz, Datenrate)
- Anwendungstests
- Netzbetreiberabnahmeprüfung (bei Bedarf)

9.2 Nachrüstung von 5G (Retrofit)

Je nach gegebener Modularität der bisherigen Steuereinheit der Maschine bzw. Anlage sind unterschiedliche Ansätze denkbar:

- Austausch einer drahtlosen Netzwerkkarte (z.B. von WLAN zu 5G)
- Anschaltung eines 5G-Routers als Kabelersatz für IP-basierte Schnittstellen (z.B. Ethernet)
- Anschaltung eines 5G-Gateways als Kabelersatz für sonstige Schnittstellen (z.B. USB, RS232)

In allen Fällen müssen aber auch hier zunächst die meisten Fragen aus dem vorangegangenen Kapitel beantwortet werden.

9.3 Erwartungen an 3GPP Release 16

Die vor allem für den IoT-Bereich von 5G-relevanten, für das Release 16 vorgesehenen Features (detaillierte Beschreibung siehe Kapitel 8.5.2) sind:

- Nutzung von allgemein zugeteilten Frequenzbändern (Unlicensed Spectrum, unlizenzierten Spektrum), auch ohne 4G/5G-Ankernetz
- Optimierung des Stromverbrauchs
- Erweitertes Industrial-IoT, URLLC wird erst mit Release 16 und folgende vollständig spezifiziert
- Positionsbestimmung im 5G Netz ohne GNSS-Unterstützung
- Besserer Umgang mit Interferenzen

Mit ersten Implementierungen von Release 16 ist ab Mitte des Jahres 2021 zu rechnen. Es ist zu beachten, dass die Hersteller von 5G-Komponenten entscheiden, welche Features wann kommerzialisiert werden.

Die weiteren Planungen für 3GPP Release 17 und folgende Releases sind in Kapitel 8.5 erläutert.

10 Glossar

5G NR: Die vollständige Bezeichnung der aktuellen Mobilfunkgeneration 5G lautet 5G New Radio (NR). Umgangssprachlich und in den Medien wird meist nur die Kurzform 5G verwendet. Zur Vereinfachung wird auch in diesem Leitfaden nur 5G verwendet:

Access Point Name (APN): Gateway zwischen dem Kernnetz und dem öffentlichen Netz.

Beamforming: Beamforming meint eine Bündelung und genaue Ausrichtung von Sendesignale auf einen auch beweglichen Empfänger. Dies kann durch Massive Multiple Input Multiple Output (MIMO) ermöglicht werden.

Campus-Netz: Gemeint sind Funknetze, die innerhalb der logischen und geographischen Grenzen eines Campus, z.B. Firmengelände, Krankenhaus, errichtet werden.

Cloud⁴²: Cloud-Services werden in Public Clouds, Private Clouds, Hybrid Clouds und Community Clouds unterschieden. **Public Cloud** oder öffentliche Cloud ist ein Angebot eines frei zugänglichen Mobilfunkanbieters, der seine Dienste offen über das Internet für jedermann zugänglich macht. **Private Clouds** werden aus Gründen des Datenschutzes sowie der IT-Sicherheit von Unternehmen eingesetzt, um ihre IT-Dienste weiterhin selbst zu betreiben und ausschließlich ihren eigenen Mitarbeitern über Webbrowser zugänglich zu machen. Bei **Hybrid Clouds** laufen bestimmte Dienste bei öffentlichen Anbietern über das Internet, während datenschutzkritische Anwendungen und Daten im Unternehmen betrieben und verarbeitet werden. **Community Clouds** bezeichnet Cloud-Infrastrukturen, die von

mehreren Unternehmen – z.B. im Rahmen eines gemeinsamen Projekts – genutzt und bereitgestellt werden. Diese sind jedoch nicht öffentlich verfügbar, sondern beschränken sich auf einen definierten Nutzerkreis.

Customer Premises Equipment (CPE):

Das CPE ist ein elektronisches Endgerät mit einem eingebetteten Chipsatz oder einem Chipsatz, der in einem Modul enthalten ist, das sich mit dem Mobilfunknetz verbinden kann.

Dedicated Short Range Communication (DSRC):

DSRC wird in den USA und Europa unterschiedlich verwendet. In Europa wurde speziell für Verkehrskommunikationsanwendungen in einspurigen oder mehrspurigen Hochgeschwindigkeitsumgebungen entwickelt und bezieht sie sich auf die europäischen CEN-DSRC-Normen, die auf dem 5,8 GHz-Frequenzband arbeiten. In Europa ist DSRC die De-facto-Norm für elektronische Mautsysteme. In den USA handelt es sich um eine automatische Fahrzeug-Fahrzeug- oder auch Fahrzeug-Sendestationen-Kommunikation (V2V, V2I), die ein Fahrzeug-Ad-hoc-Netz bilden, wenn zwei V2X-Sender in die Reichweite des jeweils anderen kommen. Das Datenvolumen dieser Meldungen ist sehr gering. Die Funktechnologie ist Teil der WLAN IEEE 802.11-Standardfamilie und in Europa ist diese Technologie für V2V und V2I als Intelligent Transport System (ITS-G5) bekannt, wobei der Begriff „G5“ lediglich das Frequenzbetriebsband von 5,9 GHz benennt.

Enhanced Mobile Broadband (eMBB):

eMBB stellt in 5G große Datenraten von bis zu 20 Gbit/s für Endgeräte zur Verfügung.

E2E Latenz: siehe Latenz (Kommunikation)

Energieverbrauch (Kommunikation):

Elektrische Energie, die zur Erzeugung kommunikationsrelevanter Daten benötigt wird (in mW).

⁴² Die Bundesregierung hat unter dem Arbeitstitel „GAIA-X“ ein Konzept zum Aufbau einer offenen, souveränen und vernetzten Dateninfrastruktur für Europa vorgestellt. Weitere Informationen unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/EN/Publikationen/Digitale-Welt/project-gaia-x.pdf?__blob=publicationFile&v=4

Energieverbrauch (Lokalisierung):

Elektrische Energie, die zur Erzeugung positionsrelevanter Daten benötigt wird (in mW; siehe 3GPP TR 22.872).

Frequency Hopping Spread-Spectrum

(FHSS): FHSS wird zur zuverlässigen Kommunikation für WirelessHART genutzt. Hierbei werden Funkkanäle, die eine Störung aufweisen, erkannt und anschließend nicht mehr für die Kommunikation genutzt. Hierdurch werden Störungen mit anderen Funkteilnehmern im ISM-Band vermieden und eine zuverlässigere Kommunikation ermöglicht.

Frequency Range 1 (FR1): FR1 beschreibt den Frequenzbereich unterhalb von 6 GHz. Für 5G sind in diesem Frequenzbereich maximal 100 MHz Bandbreite vorgesehen.

Frequency Range 2 (FR2): FR2 beschreibt den Frequenzbereich oberhalb von 6 GHz. Für 5G sind in diesem Frequenzbereich 400 MHz Bandbreite vorgesehen.

Genauigkeit (Lokalisierung): Abweichung der gemessenen Position eines UEs von seiner tatsächlichen Position (in m). Die Genauigkeit kann sich dabei auf die absolute oder relative Position des UEs beziehen. Zudem kann zwischen der horizontalen Position auf einer zweidimensionalen Ebene und der vertikalen Position in der Höhe unterschieden werden. Hinzuzufügen ist immer die Wahrscheinlichkeit, mit der die Genauigkeit erreicht werden kann (in %).

HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request):

HARQ wird im Rahmen von LTE verwendet, um auf effiziente Weise eine hohe Robustheit zu erreichen.

Industrial Frequency Hopping (iHOP):

Durch eine kontinuierliche Analyse der Funkkanäle ist es Empfangsstationen möglich, Funkkanäle bei einer Störung zeitweilig zu löschen und mit den verbundenen UEs auf störungsfreie Kanäle zu wechseln. Hierdurch kann die Zuverlässigkeit der Verbindung zwischen Empfangsstation und den verbundenen UEs verbessert werden.

Industrial Point Coordination Function

(iPCF): Das iPCF Protokoll regelt die Verteilung der Sende- und Empfangszeiten in einem industriellen WLAN. Es legt dabei für jede Empfangsstation zyklische Sende- und Empfangszeiten fest und kann damit zeitkritische Anwendungen priorisieren, um für diese Anwendungen eine Datenübertragung mit der notwendigen niedrigen Latenz zu garantieren. Darüber hinaus ermöglicht das Protokoll das sog. Rapid Roaming, das die Übergabe eines UEs zwischen zwei Empfangsstationen in bis zu 30 - 50 ms ermöglicht.

Jitter: Jitter ist die maximale Abweichung eines Zeitparameters in Relation zu einem Referenz- oder Zielwert (in ms), z.B. in Relation zur Ende-zu-Ende Latenz (siehe 3GPP TR 22.804).⁴³

Key Agreement: Bei der Anmeldung eines Mobilfunkteilnehmers am Mobilfunknetz wird dessen Identifier, der auf der SIM-Karte hinterlegt ist, zuerst verschlüsselt und dann verschlüsselt übertragen. In der UDM-Funktion (Unified Data Management) wird diese dann entschlüsselt und mit einem hinterlegten Schlüssel verglichen. Damit erfolgt die Authentifizierung. Zusätzlich ist die Kommunikation über die Control Plane verschlüsselt. Um an den jeweils benötigten Stellen wieder entschlüsseln zu können, müssen innerhalb des Netzes Schlüssel ausgetauscht werden. Da in einem Roaming-Szenario, beginnend von der Stelle, an der die Schlüssel gespeichert sind, zu der nächsten Stelle, immer weniger vertraut wird, erfolgt in jedem der einzelnen relevanten Sicherheitsfunktionen die Erzeugung eines neuen Schlüssels auf Basis des von der Vorgängerfunktion übertragenen Schlüssels. Dadurch entsteht eine Schlüsselhierarchie, die dazu führt, dass keine weiterverarbeitende Funktion die ursprünglichen Schlüssel kennt.

⁴³ Anforderungen zu Jitter wurde in der FS_CAV Studie TR 22.804 gesammelt. Anforderungen an den Jitter wurde aber nicht in der 3GPP Spezifikation TS 22.104 mit aufgenommen, sondern nur ein Kapitel zur Clock Synchronisation. In der 3GPP Spezifikation TS 23.501 (System architecture for the 5G System (5GS)) steht in den QoS-Profilen keine Anforderung an den Jitter. In den enthaltenen Kapiteln zu Time Sensitive Communication (TSC) und Time Sensitive Networks (TSN) wird der Jitter aber behandelt.

Diesen Mechanismus nennt man Key Agreement, also Vereinbarung der Schlüssel. Es können das 5G AKA (Authentication and Key Agreement Verfahren) oder alternativ das EAP AKA (Authentication and Key Agreement Extensible Authentication Protocol) genutzt werden. Die Nutzung eines der beiden Protokolle ist in 5G zwingend vorgeschrieben.

Kosten: Investitions- und Betriebskosten, die durch die 5G Installation für einen spezifischen Use Case anfallen (in €).

Latenz (Kommunikation, Ende-zu-Ende, E2E): Zeitdauer (in ms) zwischen dem Senden einer Information von einer Quelle zu einem Ziel. Im Falle von 5G ist die angegebene E2E-Latenz die Obergrenze der Zeitdauer an der Kommunikationsschnittstelle zwischen einem UE und der User Plane Function (UPF) an der Schnittstelle N6 zum Datennetz (sog. Packet Delay Budget (PDB) in 3GPP TS 23.501, siehe auch Abbildung 6).

Latenz (Lokalisierung): Latenz ist die vergangene Zeit zwischen dem Ereignis, das die Sammlung von positionsrelevanten Daten ausgelöst hat und der Verfügbarkeit dieser Daten an der Schnittstelle des Lokalisierungssystems (in ms).

LTE-M: LTE-M steht für LTE Machine Type Communication und ist ein von 3GPP entwickelter Standard für LPWAN-Funktechnologien (Low Power Wide Area Network, Niedrigenergie-Weitverkehrsnetz).

LTE-Cat-NB1: LTE-Cat-NB1 ist eine Spezifikation der 3GPP und auch unter den Begrifflichkeiten NarrowBand-IoT (NB-IoT) und NB-LTE bekannt. LTE-Cat-NB1 arbeitet im Bereich von 800- und 900-MHz um gleichzeitig eine großflächige Abdeckung und guter Durchdringung von Gebäudewänden zu erzielen.

Massive MIMO: Multiple Input Multiple Output (MIMO) Systeme verwenden mehr als eine Sendeanenne und Empfangsantenne, um ein Signal auf einer Frequenz zu senden bzw. zu empfangen. Mit massive MIMO wird das Potenzial von MIMO noch einmal und massiv gesteigert mit 8x8, 16x16, 64x64 128x128 oder 384x384 verwendeten Sende- und Empfangsantennen.

Mean Time Between Failures (MTBF):

Mittlerer Erwartungswert der Betriebsdauer zwischen zwei aufeinander folgenden Ausfällen (in Tagen (d), Jahren (a).) Siehe DIN IEC 60050-191.

Multi-Access Edge Computing (MEC): Multi-Access Edge Computing (MEC), früher Mobile Edge Computing, ist ein ETSI-definiertes Netzwerkarchitekturkonzept, das Rechenzentrum und Cloud-Funktionen (IT-Service-Umgebung) am Rande des Mobilfunknetzes ermöglicht und meist nahe der Basisstation angesiedelt werden. In zentralen Rechenzentren (Cloud) werden die mobilen Komponenten des Kernnetzes, die mit der CPF (Control Plane Function) verknüpft sind, gehostet. In kleinen und verteilten MEC-Rechenzentren werden hingegen sowohl virtualisierte RAN-Komponenten wie die CU, als auch mobile Kernnetz-Komponenten, die mit der UPF (User Plane Function) assoziiert sind, gehostet. Die Grundidee von MEC besteht darin, dass Anwendungen und Rechenkapazitäten näher am Mobilfunkkunden und speziell am UE liegen und hierdurch lange Kommunikationswege vermieden werden. Durch die kurzen Kommunikationswege wird eine Überlastung des Core Netzes vermieden. Somit werden Reaktionszeiten und somit die Latenz verringert und der Weg zu Echtzeitanwendungen im ms-Bereich geebnet.

massive Machine Type Communication

(mMTC): mMTC ist die Kommunikation zwischen Maschinen (Geräte, Sensoren, Komponenten) und Anwendungen. Man spricht hier von Machine-to-Machine-Kommunikation (M2M). 5G verspricht einer Kommunikationsdichte von bis zu 1 Mio. Geräte pro Quadratkilometer. Der Gedanke zu mMTC wurde bereits im Rahmen der 3GPP Release 13 und 14 unter dem Synonym „Low Power Wide Area“ (LPWA) entwickelt, auch bekannt unter dem Namen NB-IoT bekannt.

mmWave: Elektromagnetische Wellen mit einer Wellenlänge von ca. 1–10 mm, was einer Frequenz von 300–30 GHz entspricht (z.B. FR2)

Mean Time To Repair (MTTR): Durchschnittszeit, die benötigt wird, um etwas nach einem Ausfall zu reparieren.

Non-3GPP InterWorking Function (N3IWF):

Die N3IWF regelt die Zusammenarbeit zwischen nicht vertrauenswürdigen Netzen und dem 5G Core. Als solches unterstützt N3IWF sowohl die N2-Schnittstelle als auch die N3-Schnittstelle zum Kern (N2, N3 siehe Abbildung 6).

Narrow Band IoT (NB-IoT):

Siehe auch mMTC.

Network Slicing: Network Slicing ist eine Methode, die auf derselben physischen Netzinfrastruktur virtuell und voneinander unabhängigen logischen Netze ermöglicht. Jedes Network-Slice ist ein isoliertes Ende-zu-Ende-Netz, das auf die unterschiedlichen Anforderungen einer bestimmten Anwendung zugeschnitten ist. Die verfügbare Netzinfrastruktur wird prozentual auf den virtuellen Slices verteilt. Mit Network Slices lassen sich bestimmte Merkmale bereitstellen, wie z.B. Latenz.

Non-Public Network (NPN): NPNs sind Funknetze, die innerhalb der logischen und geographischen Grenzen eines Campus, z.B. Firmengelände, Krankenhaus, errichtet werden. Siehe auch Campus-Netze.

Original Equipment Manufacturer (OEM):

Hersteller von Komponenten, die nicht durch den Hersteller selbst im Handel angeboten werden.

Quality of Service (QoS): Quality of Service ist die Möglichkeiten, bestimmte Anwendungen und Nutzer/Endgeräte zu priorisieren und je nach deren Bedürfnissen mit einer bestimmten Qualität der bereitgestellten Services zu bedienen, unabhängig von der Auslastung des Netzes. Wichtige Services sind z.B. Latenz, Zuverlässigkeit sowie Datenrate.

Paketfehlerrate (Packet Error Rate):

Innerhalb von 3GPP sind Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit nicht spezifiziert, sondern nur die Paketfehlerraten. Die Paketfehlerrate berücksichtigt auch das Delay. In 3GPP ist die Paketfehlerrate eines QoS-Profiles definiert als die obere Grenze der übermittelten Paketverluste auf der Radioschnittstelle. Sie ist

gleich für den Uplink und den Downlink. Für die latenzkritischen QoS-Profile werden auch Pakete als Verlust gezählt, die nach dem sogenannten „Paket Delay Budget“ des QoS-Profiles empfangen werden. Die detaillierte Definition der Paketfehlerrate für 5G ist in der 3GPP TS 23.501 zu finden (Table 5.7.4-1: Standardized 5QI to QoS characteristics mapping).

Reichweite: Mindestreichweite (in m), innerhalb derer das System mit UEs Kommunikationsdaten austauschen kann, sodass der geforderte QoS gewährleistet werden kann.

Richtungsgenauigkeit (Bearing Accuracy):

Abweichung der gemessenen Richtung des UEs von seiner tatsächlichen Richtung (in °). Die gemessene sowie tatsächliche Richtung werden in einem gewöhnlichen Basiskoordinatensystem beschrieben unter Berücksichtigung der Längs-, Quer- und Vertikalachse (TR 22.872).

Robustheit: Robustheit (z.B. mechanische Robustheit bei Kabelverbindungen, Robustheit gegen Funkstörer bei drahtlosen Kommunikationssystemen) bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, Veränderungen ohne Anpassung seiner Strukturen standzuhalten. Die Leistungsfähigkeit eines robusten Systems wird dabei nicht oder nur wenig von äußeren Einflüssen beeinträchtigt.

Small Cells⁴⁴: Small Cells sind Basisstationen mit geringer Ausgangsleistung in Mobilfunknetzen und umfassen Femtozellen (Innerhalb von Gebäuden, 10 m - 50 m Reichweite), Picozellen (Innerhalb von Gebäuden und auf Grundstücken, 100 m – 250 m Reichweite) und Mikrozellen (Ballungsgebiete, Flughäfen, Bahnhöfe, Hallen, 0,5 km – 2 km Reichweite). Der Begriff „Small“ bezieht sich dabei auf die relative Größe im Vergleich zu großen Makrozellen, wie sie in Mobilfunknetzen zur Versorgung größerer Bereiche vorkommen. Small Cells werden vor allem dazu verwendet, die Kapazität eines Mobilfunknetzes in räumlich

44 Quelle: <https://www.5g-anbieter.info/technik/smart-cells.html>

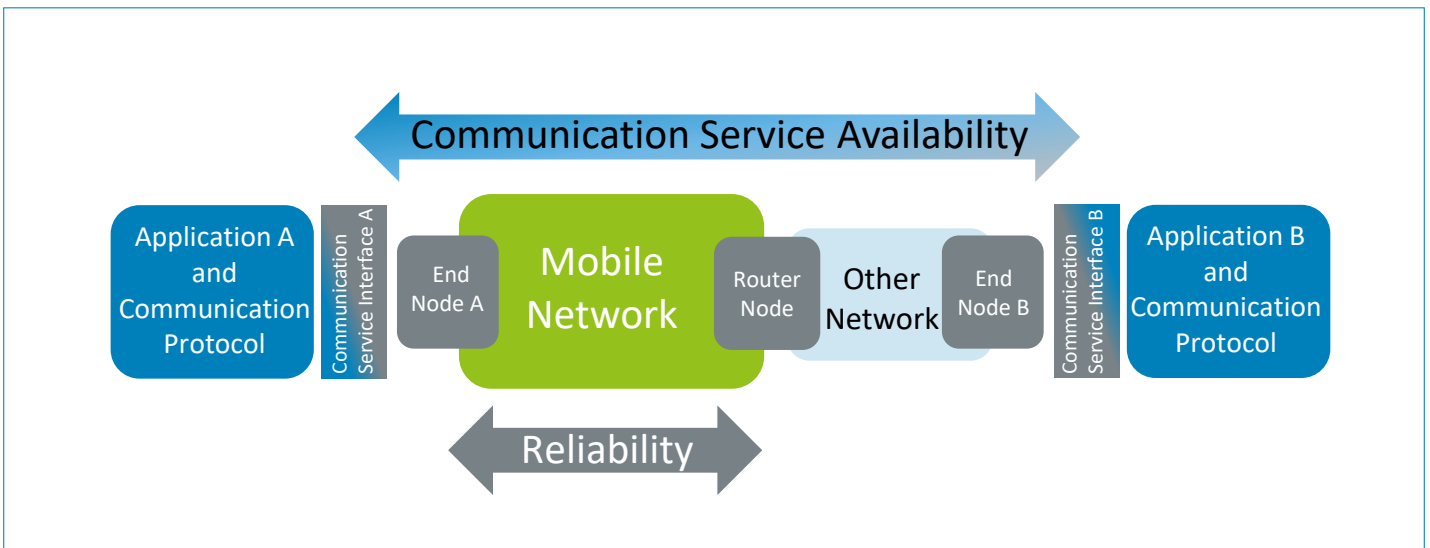


Abbildung 10: Darstellung der Beziehung zwischen Verfügbarkeit (Availability) und Zuverlässigkeit (Reliability). In Anlehnung an 3GPP TS 22.261, Annex C (Informative).

eng bestimmten Bereichen, wie in urbanen Gebieten, Werksgeländen oder Bürogebäuden, mit gleichzeitig vielen Netzteilnehmern, zu erhöhen. Im Gegensatz hierzu hat eine Makrozelle bis zu 50 km Reichweite bzw. Versorgungsradius.

Short Transmit Time Interval (sTTI):

LTE-Technologie mit verkürzten Übertragungszeitintervallen für niedrigere Latenz.

Survival Time: Die Zeit, die eine Anwendung, die einen Kommunikationsdienst in Anspruch nimmt, ohne eine erwartete Nachricht fortsetzt (in ms).

Subträgerabstand (SCS): Frequenzabstand der Unterträger in einem Mehrträgerverfahren wie z.B. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex).

Time To First Fix (TTFF): TTFF ist die vergangene Zeit zwischen der erstmaligen Auslösung eines Ereignisses, welches positionsrelevante Daten erzeugt und der Verfügbarkeit der positionsrelevanten Daten an der Lokalisierungsschnittstelle. TTFF ist dabei größer als oder gleich der Latenz (in ms) (TR 22.872).

Time Sensitive Networking (TSN): Standards der Time-Sensitive Networking Task Group (IEEE 802.1), welche die Datenübertragung mit geringer Latenz sowie hoher Verfügbarkeit garantieren sollen, insb. für Echtzeit-Anwendungen.

User Equipment (UE): Ein Gerät, mit dem ein Benutzer auf Netzdienste zugreifen kann.

UE Dichte (pro km²): Anzahl der UEs pro km².

UE Dynamik: UEs können statisch und/oder beweglich sein. Für bewegliche UEs sollten noch weitere Attribute beschrieben werden, z.B. die maximale Geschwindigkeit in km/h.

Umgebungsbedingungen: Physikalische Umgebung, innerhalb derer das System betrieben wird. Beschrieben wird die direkte Umgebung (z.B. Gebäude) sowie übergeordnete Einflüsse, welche die Signalausbreitung der Radiowellen sowie die Lokalisierung beeinflussen können (z.B. weite und offene Flächen vs. bestückter Hallen, Luft, Vororte vs. dicht bebaute Innenstädte, Innenräume). Falls das System in mehreren unterschiedlichen Umgebungen genutzt wird, sollte für die Beurteilung einer Anwendung beschrieben werden, in welchen der Umgebungen der Use Case nahtlos durchgeführt werden kann.

Ultra Reliable and Low Latency

Communications (URLLC): URLLC bringt zum Ausdruck, dass die Kommunikation zuverlässig ankommt bzw. zugestellt wird, sowie Antwortzeiten sehr schnell erfolgen. Die Zeit, die zwischen Anfrage und Antwort verstreicht, nennt man Latenz.

Use Case: Use Cases (Anwendungen) beschreiben, was die Umwelt von einem System erwartet. Ein Akteur möchte ein bestimmtes Ziel mit Hilfe des Systems erreichen, wobei ein Use Case alle Szenarien berücksichtigt, die bei der Zielerreichung eintreten können. Für den Use Case zentrale Kriterien/Indikatoren (Key Performance Indicators, KPI) werden gesammelt und an konkreten Beispielen detailliert beschrieben. Auf Basis der KPIs kann ein Abgleich der Anforderungen des Use Cases/ mit der Anwendung erfolgen.

Verfügbarkeit/Availability

(Kommunikation): Verfügbarkeit ist der prozentuale Wert der Zeitdauer, innerhalb derer der Ende-zu-Ende Kommunikationsservice in Einklang mit dem zugestimmten Quality of Service (QoS) übertragen wurde, geteilt durch die Zeitdauer innerhalb derer erwartet wird, dass das System den Ende-zu-Ende Service unter Berücksichtigung der Spezifikationen eines bestimmten Gebietes überträgt (siehe auch Abbildung 10). Die Verfügbarkeit eines Gerätes ist mathematisch gesehen $MTBF / (MTBF + MTTR)$. Innerhalb von 3GPP sind Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit nicht spezifiziert, sondern nur die Paketfehlerraten. Siehe daher auch Paketfehlerrate.

Verfügbarkeit (Lokalisierung): Anteil an der Zeit, in der das Lokalisierungssystem in der Lage ist, die geforderten positionsbezogenen Daten innerhalb der Leistungsziele oder -anforderungen bereitzustellen.

Zuverlässigkeit/Reliability

(Kommunikation): Fähigkeit des Kommunikationsdienstes sich so zu verhalten, wie es in einem bestimmten Zeitintervall unter bestimmten Voraussetzungen erwartet wird (siehe auch Abbildung 10). Zuverlässigkeit kann durch angemessene Einheiten ausgedrückt werden, z.B. durch MTBF. Innerhalb von 3GPP sind Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit nicht spezifiziert, sondern nur die Paketfehlerraten. Siehe daher auch Paketfehlerrate.

Zuverlässigkeit (Lokalisierung): Fähigkeit eines Lokalisierungssystems (in %), positionsrelevante Daten unter bestimmten Bedingungen über eine spezifische Zeitdauer bereitzustellen.

11 Empfohlene Literatur

5G Alliance for Connected Industries and Automation (5G-ACIA):

5G-ACIA White Paper, 5G for connected Industries and Automation, www.5g-acia.org

5G-ACIA White Paper, Integration of Industrial Ethernet Networks with 5G networks, www.5g-acia.org

5G-ACIA White Paper, 5G Non-Public Networks for Industrial Scenarios, www.5g-acia.org

5G-ACIA White Paper, Security Aspects of 5G for Connected Industries and Automation, www.5g-acia.org

Dokumente innerhalb der Standardisierung (3GPP):

3GPP TS 22.104 Service requirements for cyber-physical control applications in vertical domains

3GPP TR 22.804 Study on Communication for Automation in Vertical Domains

3GPP TS 22.261 Service requirements for the 5G system

3GPP TR 23.734 Study on 5GS Enhancement support of Vertical and LAN Services

3GPP TS 23.501 System Architecture for the 5G System (5GS)

3GPP TR 37.910 Study on self-evaluation towards IMT-2020 submission

3GPP TS 23.203 Policy and charging control architecture

3GPP TS 33.401 3GPP System Architecture Evolution (SAE); Security architecture

3GPP TS 33.501 Security architecture and procedures for 5G System

3GPP TR 38.801 Study on new radio access technology: Radio access architecture and interfaces

Next Generation Mobile Networks (ngmn):

Overview on 5G RAN Functional Decomposition, www.ngmn.org

5G E2E Technology to Support Verticals URLLC Requirements, www.ngmn.org

5G RAN CU - DU Network Architecture, Transport Options and Dimensioning, www.ngmn.org

Projektpartner / Impressum

VDMA

Elektrische Automation

Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main
Telefon +49 69 6603-1849
Internet ea.vdma.org

Projektleitung

Dr. Reinhard Heister,
Geschäftsführer VDMA Elektrische Automation

Lenkungskreis

Dr. Hermann Buitkamp, VDMA Landtechnik
Dr. Miriam Solera, VDMA Elektrische Automation
Karin Loidl, Fraunhofer IIS

Inhaltliche Beiträge

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS
Karin Loidl
Bernhard Niemann
Thomas von der Grün
Martin Tittel
Kenan Seba
Thomas Heyn
Matthias Förster
Marco Steglich
Peter Heusinger
Moritz Loske
Julian Popp

Beteiligte Firmen

AGCO GmbH – Fendt
(Carsten Koch, Thomas Buchart)
Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH
(Dr. Arnd Menschig, Tobias Ischen, Michael Rodewald)
CETECOM GmbH
(Rachid Acharkaoui, Dr. Peter Nevermann)
Grenzbach Maschinenbau GmbH
(Stefan Gayr, Philip Marb)
HAHN Group GmbH
(Dr. Martin Bleider)
KION GROUP AG – Still GmbH
(Ansgar Bergmann)
MASCHINENBAU KITZ GmbH
(Rainer Forster)
RITTAL GmbH & Co. KG
(Dietrich Malzacher)
SEW-EURODRIVE GmbH & Co. KG
(Eike Lyczkowski)
SICK AG
(Soner Yamen)
U.I. Lapp GmbH
(Dr. Susanne Krichel, Ralf Moebus)
Weidmüller Interface GmbH & Co. KG
(Annika Gregorz, Dimitri Block)

Design und Layout

VDMA Verlag GmbH

Verlag

VDMA Verlag GmbH
Lyoner Straße 18
60528 Frankfurt am Main
Telefon +49 69 6603-1580
E-Mail: verlag@vdma.org
Internet: www.vdma-verlag.com

Erscheinungsjahr

2020

Copyright

VDMA und Partner

Bildnachweis

Titelbild: Carlos Amarillo/Shutterstock,
bearbeitet vom VDMA Verlag
alle anderen: siehe Bildunterschriften

Hinweis

Die zum Teil in dieser Publikation aufgeführten Produktnamen sind teilweise eingetragene Marken der Hersteller.
Die Verbreitung, Vervielfältigung und öffentliche Wiedergabe dieser Publikation bedarf der Zustimmung des VDMA und seiner Partner. Auszüge der Publikation können im Rahmen des Zitatrechts (§ 51 Urheberrechtsgesetz) unter Beachtung des Quellenhinweises verwendet werden.

VDMA**Elektrische Automation**

Lyoner Straße 18

60528 Frankfurt am Main

Telefon +49 69 6603-1849

E-Mail ea@vdma.org

Internet ea.vdma.org

Fraunhofer-Institut**für Integrierte Schaltungen IIS**

Am Wolfsmantel 33

91058 Erlangen

Bereich Lokalisierung und Vernetzung

Nordostpark 84

90411 Nürnberg

Telefon +49 911 58061-0

E-Mail info@iis.fraunhofer.de

Internet www.iis.fraunhofer.de