

Masterthesis

Vor- und Zuname	Geb. am	in	Matr.-Nr.
Adrian Meier	██████████	██████████	██████████

Titel:

Eine Analyse der Auswirkungen der Mobilfunkgeneration 5G auf
Infrastructure-as-a-Service-Modelle im Hinblick auf die Clouddienste der Zukunft

Abgabedatum: 03.02.2022

Betreuender Professor: Prof. Dr. Rüdiger Weißbach

Zweite Prüferin: Prof. Dr. Andrea Zirm

Fakultät Wirtschaft und Soziales

Department Wirtschaft

Studiengang:

Marketing & Vertrieb

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	i
Abbildungsverzeichnis	iv
Tabellenverzeichnis	v
Abkürzungsverzeichnis	vi
Abstract	viii
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Zielsetzung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen des Cloud Computing und aktuelle Situation im IaaS-Markt	4
2.1 Definition	4
2.2 Unterscheidungsmerkmale	4
2.2.1 Service-Ebenen	4
2.2.2 Bereitstellungsmodelle	7
2.2.3 Standort	8
2.3 Wertschöpfungskette	9
2.4 Hauptakteure	10
2.5 Marktstrukturen	11
3 Grundlagen und aktuelle Situation des Mobilfunks	13
3.1 Definition	13
3.2 Entwicklung und Einordnung	14
3.3 Mobilfunkgeneration 4G	14
3.4 Mobilfunkgeneration 5G	16
3.4.1 Die Spezifizierung der fünften Mobilfunkgeneration	16
3.4.2 Lebenszyklus	17
3.4.3 Rollout und Netzbetreiber in Deutschland	18
3.4.4 Aktueller Stand der Mobilfunktechnik	20
3.4.5 Aktueller Stand der Mobilfunkleistung	22
4 Zukünftige Situation der fünften Mobilfunkgeneration	23
4.1 Leistungsprognosen	23
4.1.1 Enhanced Mobile Broadband (eMBB)	23
4.1.2 Low-Latency Communication (uRLLC)	25
4.1.3 Massive Machine-Type Communications (mMTC)	25
4.2 Mobilfunktechnik	26

4.2.1	Funkschnittstelle 5G New Radio	26
4.2.2	Virtualisierte 5G-Netzinfrastruktur	29
4.2.3	5G-Netzarchitektur	31
4.2.3.1	Netzwerk Slice	31
4.2.3.2	Campusnetze	32
4.2.4	Anwendungsszenarien	33
5	Auswirkungen auf die Clouddienste der Zukunft	38
5.1	Veränderung des Infrastructure-as-a-Service-Modells	38
5.1.1	Netzwerk-as-a-Service und Connectivity-as-a-Service	38
5.1.2	Einfluss auf die Hauptakteure	42
5.1.2.1	Mobilfunknetzbetreiber	42
5.1.2.2	Hyperscaler	43
5.1.2.3	IT-Anbieter	44
5.2	Cloudmodelle innerhalb der 5G-Infrastruktur	45
5.2.1	Übersicht neuer Cloudmodelle	45
5.2.1.1	Lokale Edge Cloud	48
5.2.1.2	Multi Access Edge Cloud	49
5.2.1.3	Central Office Cloud	50
5.2.1.4	Regionale Cloud	50
5.2.2	Vor- und Nachteile der Cloudmodelle	51
5.2.3	Potenzielle Nutzer der Cloudmodelle innerhalb der vertikalen Industrie	53
5.3	Neue Betreibermodelle im Kontext von 5G	60
5.3.1	Methodik	60
5.3.2	Modell 1: Netzwerk-Slice durch Kooperationen	61
5.3.3	Modell 2: Netzwerk-Slice durch Mobilfunknetzbetreiber	63
5.3.4	Modell 3: Hybrides Campusnetz durch viele Hauptakteure	65
5.3.5	Modell 4: Campusnetz durch Mobilfunknetzbetreiber	67
5.3.6	Modell 5: Campusnetz in Eigenbetrieb oder durch IT-Anbieter	69
5.4	Herausforderungen für die Hauptakteure	71
5.4.1	Technische Herausforderungen	71
5.4.2	Geschäftliche Herausforderungen	74
6	Weiterführende Betrachtung	77
6.1	Mobilfunkgeneration 6G	77
6.2	Alternative Szenarien	79
6.2.1	Status Quo: 5G hauptsächlich für private Endanwender	79
6.2.2	Einsatz von Konkurrenzsystemen	80
6.2.3	Edge Device und Post Cloud	81
6.3	Bewertung der Annahmen anhand der allgemeinen Trends im Cloudmarkt	83

6.3.1	Allgegenwärtige Cloud	83
6.3.2	Regionale Clouds	84
6.3.3	Nachhaltige Cloud	84
6.3.4	Automatisch programmierbare Cloud-Infrastruktur	85
7	Schlussbetrachtung	88
7.1	Zusammenfassung und Fazit	88
7.2	Ausblick	94
	Litertaturverzeichnis	96
	Eidesstattliche Erklärung	112

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Service-Ebenen des Cloud Computing	5
Abbildung 2: Lebenszyklus der Mobilfunkgenerationen	18
Abbildung 3: Modell der Anwendungsidentifizierung	34
Abbildung 4: IaaS-Dienste im 5G-Ökosystem	39
Abbildung 5: Cloudmodelle innerhalb der 5G-Netzinfrastruktur	48
Abbildung 6: Vor- und Nachteile von Cloudmodellen innerhalb der 5G-Infrastruktur	51
Abbildung 7: Cloudmodelle hinsichtlich ihrer Anwendungsgebiete	54
Abbildung 8: Ebenen des Cloud- und des mobilen Netzwerk-Ökosystems	60
Abbildung 9: Verantwortlichkeiten in Modell 1: Netzwerk-Slice durch Kooperationen	61
Abbildung 10: Verantwortlichkeiten in Modell 2: Netzwerk-Slice durch Mobilfunkbetreiber	63
Abbildung 11: Verantwortlichkeiten in Modell 3: Hybrides Campusnetz durch viele Hauptakteure	65
Abbildung 12: Verantwortlichkeiten in Modell 4: Campusnetz durch Mobilfunknetzbetreiber	67
Abbildung 13: Verantwortlichkeiten in Modell 5: Campusnetz in Eigenbetrieb oder durch IT-Anbieter	69

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von Modell 1: Netzwerk-Slice durch Kooperationen _____	61
Tabelle 2: Eigenschaften von Modell 2: Netzwerk-Slice durch Mobilfunknetzbetreiber _____	63
Tabelle 3: Eigenschaften von Modell 3: Hybrides Campusnetz durch viele Hauptakteure _____	65
Tabelle 4: Eigenschaften von Modell 4: Campusnetz durch Mobilfunknetzbetreiber _____	67
Tabelle 5: Eigenschaften von Modell 5: Campusnetz in Eigenbetrieb oder durch IT-Anbieter _____	69

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	Third Generation Partnership Project
AR/VR	Augmented Reality/Virtual Reality
API	Application Programming Interface
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
Bundesnetzagentur	Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
CaaS	Connectivity-as-a-Service
CNaaS	Campusnetz-as-a-Service
CO	Central Office
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung (Verordnung (EU) Nr. 2016/679)
DSS	Dynamic Spectrum Sharing
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen)
Gbit/s	Gigabit pro Sekunde
GHz	Gigahertz
IaaS	Infrastructure-as-a-Service
IoS	Internet der Dienste
IoT	Internet der Dinge
ITU	International Telecommunication Union
IT	Informationstechnik
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
LAN	Local Area Network
LTE	Long Term Evolution
MEC	Multi-access Edge Computing
Mbit/s	Megabit pro Sekunde
MHz	Megahertz
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output
ML	Maschinelles Lernen
mMTC	massive Machine-Type Communications
MNO	Mobile Network Operators (Mobilfunknetzbetreiber)
NaaS	Network-as-a-Service
NSaaS	Netzwerk-Slice-as-a-Service
NFV	Network Functions Virtualization
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
NIST	National Institute of Standards and Technology

NSA	Non-Stand-Alone-Netz
OTT	over-the-top (große Public Cloud Anbieter)
PaaS	Platform-as-a-Service
QoS/QoE	Quality of Service/Quality of Experience
RAN	Radio Access Network
SaaS	Software-as-a-Service
SA-Netz	5G Stand-Alone-Netz
SDN	Software-defined Networking
SLA	Service Level Agreement
SON	Self-Organizing Network
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UPF	User Plane Function
uRLLC	Ultra-Reliable and Low-Latency Communication
VPN	Virtual Private Network
VNF	Virtualized Network Function
WLAN	Wireless Local Area Network
ÖMaaS	Öffentliches-Mobilfunknetz-as-a-Service

Abstract

Die vorliegende Masterthesis beschäftigt sich mit den Auswirkungen der Mobilfunkgeneration 5G auf die Infrastruktur-as-a-Service-Modelle im Hinblick auf die Cloud-dienste der Zukunft. Aufbauend auf einer ausführlichen Beschreibung der technischen und marktorientierten Grundlagen, sowie der aktuellen und prognostizierten Situation von 5G, werden mit Hilfe von einer Vielzahl von Artikeln, Studien und Fachliteratur die Folgen für die Clouddienste der Zukunft abgeleitet. Der besondere Fokus liegt dabei auf der Veränderung des Cloud-Computing-Dienst Infrastruktur-as-a-Service, der Geschäftstransformation der involvierten Hauptakteure, neu erscheinenden Cloudmodellen und deren Einsatz in den Anwendungsmärkten. Die Arbeit zeigt auf, dass bei Infrastruktur-as-a-Service-Modellen die bisher vernachlässigte Netzwerkebene eine größere Aufmerksamkeit erfahren und zu neuen Geschäftsmodellen wie Netzwerk-Slice-as-a-Service und Campusnetz-as-a-Service führt. Die Cloudmodelle werden ausgehend von einem zentral ausgerichteten Standort zukünftig verteilter in der gesamten Netzinfrastruktur implementiert. Die Multi-Stakeholder-Umgebung wird ganz nach dem Konzept der Distributed Cloud eine Vielzahl von unterschiedlichen Leistungsanforderungen bereitstellen können. Abgeleitete praxisrelevante Betreibermodelle zeigen auf, dass vor allem für Mobilfunkbetreiber und IT-Anbieter Marktvorteile bestehen, trotzdem werden die Hyperscaler als Marktführer aktueller Clouddienste ihre Geschäftsdiversifikation auf das Mobilfunknetz ausrichten. Grundsätzlich können sehr weitreichende Auswirkungen auf zukünftige Clouddienste, die eingesetzte Infrastruktur und involvierte Stakeholder beobachtet werden.

Berücksichtigt wird in dieser Arbeit ebenso die dynamische Entwicklung der neuen Mobilfunkgeneration, die eine exakte Vorhersage unmöglich macht. Trotzdem zeigen die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse eine hohe zukünftige Relevanz.

Der Autor erhofft sich mit Arbeit einen wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn im Themenbereich Cloud Computing, speziell für Infrastruktur-as-a-Service-Modelle und der Mobilfunkgeneration 5G.

1. Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Ausgelöst durch die rasante technische Entwicklung der letzten Jahrzehnte ist die globale Gesellschaft digitalisierter und vernetzter als jemals zuvor. Einen großen Anteil daran hat die „Cloud“. Vor allem die Software- und IT-Infrastruktur der riesigen Rechenzentren großer amerikanischer Tech-Unternehmen wie Amazon, Google oder Microsoft ermöglichen einen unglaublichen Komfortgewinn für Privatkunden. Sie schaffen die Grundlage dafür, dass Dienste wie beispielsweise Dropbox oder Spotify überall und zu jeder Zeit genutzt werden können. Auch Unternehmen profitieren von der Cloud enorm. Das Auslagern von IT-Infrastruktur schafft nicht nur Effizienzsteigerungen, auch der Betriebsaufwand und damit die IT-Kosten sinken stark.¹ Für die Cloudbetreiber ist das informationsorientierte Internet zum Internet der Dienste (IoS) geworden, was sich in äußerst lukrativen Geschäftsmodellen wie Infrastruktur-as-a-Service widerspiegelt.

Die Cloud wird sich auch in Zukunft verändern und weiterentwickeln. Neue Technologien werden die digitale Transformation der globalen Gesellschaft weiter befeuern. Eine dieser Schlüsseltechnologien ist die neueste Mobilfunkgeneration 5G. Schon in der Vergangenheit ist die Einführung jeder Mobilfunkgeneration mit einem Hype verbunden gewesen. Mit 5G scheint dieser jedoch besonders groß zu sein. Denn 5G wird als erste Mobilfunktechnologie nicht nur für den privaten Endnutzer entwickelt, sein Potenzial zieht sich quer durch alle Branchen. Als neuer Kommunikationsstandard soll er Trends und Visionen, wie Industrie 4.0 oder das Internet der Dinge (IoT), vorantreiben. Die dafür eingesetzten Technologien benötigen besondere Leistungsanforderungen, die über die bloße Funkschnittstelle weit hinausgehen. Unter anderem wird das Konzept des Cloud Computing aufgegriffen. Tatsächlich wird sogar von einer Symbiose von 5G und dem Cloud Computing gesprochen. 5G kann sein komplettes Leistungspotenzial nur in Verbindung mit Cloud Computing abrufen.² Es ist jedoch unwahrscheinlich, dass sich

¹ Vgl. Hentschel/Leyh (2018), S. 15f.

² Vgl. Schiller et al. (2018), S. 1.

die Cloud- und Geschäftsmodelle der heutigen Dienstleister für einen Einsatz in einer Mobilfunkinfrastruktur eignen werden. Demzufolge werden sich aktuelle Geschäftsmodelle grundlegend wandeln müssen. Neue Cloudmodelle werden gebraucht, um den Leistungsanforderungen gerecht zu werden. Weiterhin kann davon ausgegangen werden, dass sich der Wettbewerb fundamental verändert, wenn die Wertschöpfungskette der Cloud- auf die der Mobilfunkdienste trifft. Für aktuell erfolgreich wirtschaftende Unternehmen in den Bereichen Netzwerk und Cloud bedeutet diese dynamische Entwicklung zum einen neue unerschlossene Märkte, andererseits ebenso das Risiko vom Wettbewerb abgehängt zu werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, die Auswirkungen der Mobilfunkgeneration 5G auf die Infrastructure-as-a-Service-Modelle (IaaS) im Hinblick auf die Clouddienste der Zukunft zu analysieren. Dazu soll insbesondere auf die Veränderungen der Infrastructure-as-a-Service-Modells, die involvierten Hauptakteure und das Erscheinen neuer Cloudmodelle eingegangen werden, um praxisnahe Betreibermodelle abzuleiten und zu beschreiben.

Im Rahmen dieser Arbeit werden keine eigenen empirischen Studien verwendet. Ein realistisches Entwicklungsszenario und dessen Bewertung werden mit vorhandener Literatur erreicht.

1.2 Aufbau der Arbeit

Aus der Mobilfunkgeneration 5G ergeben für die Infrastructure-as-a-Service-Modelle im Hinblick auf die Clouddienste der Zukunft Veränderungen, die in dieser Masterarbeit aufgezeigt werden sollen. Dazu werden zuerst in Kapitel 2 die Grundlagen des Cloud Computing erläutert. Ausgehend von einer kurzen Definition, werden die Merkmale aufgezeigt, durch die sich das Cloud Computing unterscheiden und einteilen lassen. Hierzu gehören die Service-Ebenen, Bereitstellungsmodelle und der Standort. Anschließend wird der IaaS-Markt beschrieben und genauer auf seine Wertschöpfungskette, seine involvierten Hauptakteure und die Marktstrukturen eingegangen.

Um eine einheitliche Wissensbasis aufzubauen, ist es außerdem notwendig die Grundlagen für den Mobilfunk zu erläutern. Einen Einblick in die bestehenden Mobilfunkgenerationen gibt Kapitel 3. Dazu wird der Stand der Entwicklung und des Rollouts, sowie

die aktuelle Technik und Leistung der fünften Mobilfunkgeneration beschrieben. Diese Einordnung ist erforderlich, um darauf aufbauend in Kapitel 4 die zukünftige Situation im Mobilfunk zu beschreiben: angefangen mit den Leistungsprognosen, über die dafür notwendige Mobilfunktechnik bis zu den Anwendungsszenarien.

Ausgehend von den vorherigen Kapiteln, behandelt Kapitel 5 die Auswirkungen von 5G auf die Clouddienste der Zukunft. Dabei wird aufgezeigt, wie sich die Service-Modelle verändern und welchen Einfluss dies auf die Hauptakteure hat. Weiterhin werden die voraussichtlich zu implementierenden Cloudmodelle aus der Fachliteratur herausgearbeitet und dargestellt. Speziell eingegangen wird auf die Vor- und Nachteile der einzelnen Cloudmodelle um anschließend eine Einordnung hinsichtlich potenzieller Märkte und Nutzer vorzunehmen. Die in diesem Kapitel gewonnenen Erkenntnisse werden anschließend dazu verwendet, neue praxisnahe Betreibermodelle im Rahmen von 5G abzuleiten und zu beschreiben. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit den in dieser Arbeit identifizierten technischen und geschäftlichen Herausforderungen.

Im vorletzten Kapitel 6 findet eine weiterführende Betrachtung statt. Dabei wird zuerst auf die nächste Mobilfunkgeneration 6G eingegangen und ein Blick in die weitere Zukunft gewagt. Um den Blickwinkel dieser Arbeit zu erweitern, werden danach alternative Szenarien aufgezeigt, die im Kontrast zu den Ergebnissen dieser Arbeit stehen. Nachfolgend findet am Ende dieses Kapitels eine Bewertung der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse statt. Um eine Diskussionsgrundlage zu schaffen, werden die allgemeinen Trends auf dem Public Cloud Markt aufgegriffen und mit den Thesen dieser Arbeit verglichen.

Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit werden in Kapitel 7 zusammengefasst, kritisch reflektiert und mit einem Ausblick abgeschlossen.

2 Grundlagen des Cloud Computing und aktuelle Situation im IaaS-Markt

2.1 Definition

Die Begriffe im Ökosystem des Cloud Computing bestehen aus einer großen Anzahl an Sinnbildern und Schlagwörtern. Schon der englische Marketing-Begriff „Cloud“, welcher übersetzt Wolke bedeutet, zeugt von der verwendeten Symbolik. Denn die Daten, die wir auf der Cloud ablegen, sind nicht wirklich in einer Wolke, sondern physisch gespeichert. Es ist für die Beantwortung dieser Arbeit wichtig die Schlagworte und Sinnbilder in diesem Kapitel zu erklären, um für den Leser eine einheitliche Wissensbasis zu schaffen. Nachfolgend werden dafür die Grundlagen zu Cloud-Computing und deren drei Unterscheidungsmerkmale als elementare Charakteristika erläutert.

Auch wenn die Fachliteratur viele Erklärungsansätzen von Cloud Computing hervorgebracht hat, wird häufig die Definition des National Institute of Standards and Technology (NIST) als Grundlage genutzt.^{3 4} Laut dieser Begriffserklärung lässt sich unter Cloud Computing ein Modell verstehen, das einen allgegenwärtigen, bequemen und bedarfsgerechten Netzzugang zu einem gemeinsamen Pool konfigurierbarer Computerressourcen (z. B. Netze, Server, Speicher, Anwendungen und Dienste) bietet, die mit geringem Verwaltungsaufwand oder minimaler Interaktion von einem Dienstanbieter schnell bereitgestellt werden können.⁵

2.2 Unterscheidungsmerkmale

2.2.1 Service-Ebenen

Cloud Computing lässt sich anhand von drei Unterscheidungsmerkmalen abgrenzen: der Service-Ebene, dem Bereitstellungsmodell⁶ und dem Cloudstandort.

³ Vgl. Lins et al. (2019), S. 5.

⁴ Vgl. Pelzl et al. (2014), S. 1.

⁵ Vgl. Mell/Grance (2011), S. 2.

⁶ Vgl. Pelzl et al. (2014), S. 1.

Die Service-Ebene unterscheidet die Integrationstiefe des Cloud-Service-Modells anhand von drei Stufen (siehe Abbildung 1).⁷

Die erste Ebene wird als Infrastructure-as-a-Service (IaaS) bezeichnet und wird in dieser Arbeit vornehmlich behandelt. Bei IaaS stellt der Anbieter lediglich die physische Infrastruktur zur Verfü-

gung. Darunter fallen Rechen-, Speicher- oder Netzressourcen. Außerdem ist eine Virtualisierungsschicht zum Erstellen und Verwalten von virtuellen Maschinen vorhanden. Das IaaS-Kerngeschäft beinhaltet außerdem die Sicherheit, Administration und den Support für die Infrastruktur, auf der ein Kunde beliebige Software einsetzen und ausführen kann. Der Kunde ist jedoch für die Installation und den Betrieb dieser Software selbst zuständig.^{8 9} Auch wenn der Kunde die zugrundeliegende Cloud-Infrastruktur nicht verwalten kann, hat er möglicherweise eine begrenzte Kontrolle über ausgewählte Netzkomponenten, wie Firewalls.¹⁰ Die Zielgruppe von IaaS sind IT-Architekten in Unternehmen, die beispielsweise die Infrastruktur der großen Datenzentren von Google, Amazon oder Microsoft nutzen.¹¹

Als Platform-as-a-Service (PaaS) wird ein Modell beschrieben, das auf IaaS aufbaut und dem Kunden neben der Bereitstellung der physischen IaaS-Infrastruktur die Möglichkeit bietet, selbstentwickelte oder erworbene Anwendungen zu installieren und anschließend zu betreiben oder anzubieten. Dafür hat der Kunde Zugriff auf Programmiersprachen, Programmbibliotheken oder ähnliche bereitgestellte Dienste und

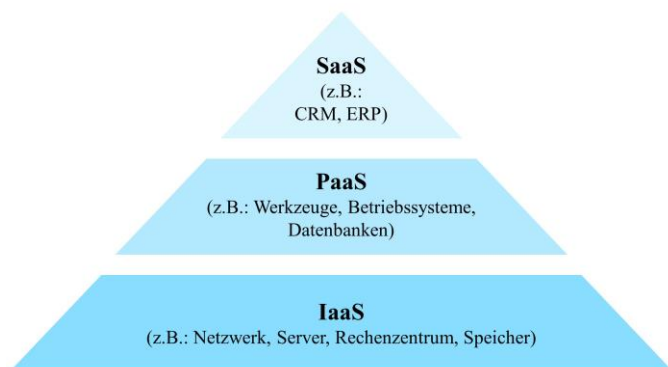


Abbildung 1: Die Service-Ebenen des Cloud Computing, Eigene Darstellung nach Herzwurm et al. (2011) zitiert nach Pelzl et al. (2014)

⁷ Vgl. Pelzl et al. (2014), S. 1.

⁸ Vgl. Lins et al. (2019), S. 8f.

⁹ Vgl. Mell/Grance (2011), S. 3.

¹⁰ Vgl. Lins et al. (2019), S. 8.

¹¹ Vgl. Lindner et al. (2020), 9f.

Werkzeuge.¹² Bei PaaS besteht die Zielgruppe aus Softwareentwicklern. Relevante Beispiele wären Google App Engine oder OpenShift.¹³

Die letzte und höchste Ebene wird als Software-as-a-Service (SaaS) bezeichnet und baut wiederum auf PaaS und IaaS auf. Dem Kunden wird hier eine komplette Softwareanwendungen angeboten, die außerdem als Kerngeschäft des Cloud-Anbieters fungiert. Zugang hat der Kunde durch eine Website oder ein Application Programming Interface (API).¹⁴ Fast alle Serviceleistungen der Software werden von dem Anbieter übernommen, hierzu zählen beispielsweise Betrieb, Administration, Wartungsarbeiten oder Updates der Software.¹⁵ Laut Pelzl werden bei SaaS „im Gegensatz zu IaaS und PaaS [...] die Leistungen nutzungsunabhängig abgerechnet.“¹⁶ Die Nutzergruppe sind Endanwender, die Softwareprogramme wie Office 365, Wordpress oder GitHub nutzen.¹⁷

Die drei Service-Ebenen Software, Plattform und Infrastruktur können als technischer Grundansatz des Cloud-Computing angesehen werden, jedoch findet sich in der Praxis und der Fachliteratur eine Vielzahl weitere Service-Modelle wie beispielsweise Testing as a Service oder Security as a Service. Meist können die Modelle einer der grundlegenden Service-Ebenen zugeordnet werden.

Relevant für diese Arbeit sind Network as a Service (NaaS) und Connectivity as a Service (CaaS). Beide Service-Modelle lassen sich in die Service Ebene von IaaS einordnen.¹⁸ Unter CaaS wird ein Dienst verstanden, der lediglich die Verbindung zu einem Endpunkt bereitstellt. Die Qualität des Services kann anhand von Anforderungen, wie beispielsweise die Bandbreite oder Latenz an den Eingangs- und Ausgangspunkten des Netzwerkes bestimmt werden. Alles, was innerhalb der Netzdomäne des Dienstansbieters abläuft ist für den Kunden nicht sichtbar. NaaS ermöglicht dem Kunden hingegen ein komplettes Netzwerk anzufordern und die Rechenkapazitäten, Routing-Protokolle, sowie weitere Anforderungen wie beispielsweise den physischen Standort oder

¹² Vgl. Mell/Grance (2011), S. 2.

¹³ Vgl. Lindner et al. (2020), S. 9f.

¹⁴ Vgl. Lins et al. (2019), S. 9.

¹⁵ Vgl. Pelzl et al. (2014), S. 1.

¹⁶ Pelzl et al. (2014), S. 1.

¹⁷ Vgl. Lindner et al. (2020), S. 8f.

¹⁸ Vgl. Lins et al. (2019), S. 8.

Sicherheitseigenschaften genau zu spezifizieren.¹⁹ CaaS und NaaS sind besonders wichtig, um relevante Anforderungen an die Cloud zu erfüllen und den „Flaschenhals“ Netzwerk zu überwinden.

2.2.2 Bereitstellungsmodelle

Zusätzlich zu den soeben beschriebenen Service-Modellen werden außerdem die vier grundlegenden Bereitstellungsmodelle Private-, Community-, Public- und Hybrid-Cloud unterschieden.²⁰

Die Infrastruktur der privaten Cloud wird lediglich durch eine Organisation genutzt. Die Verwaltung und der Betrieb der Infrastruktur erfolgt durch die Organisation selbst, Dritte oder eine Kombination aus beiden. Auch wenn die Infrastruktur privat genutzt wird, muss die Cloud nicht lokal bei der Organisation eingerichtet sein.

Eine Unterkategorie ist die Virtual-Private-Cloud, dessen Begriff von Amazon Web Services eingeführt wurde. Die Infrastruktur, der Betrieb und die Verwaltung wird von einem Cloud-Service-Anbieter für eine einzelne Organisation bereitgestellt, die anschließend die Kontrolle über die virtuelle Netzumgebung erhält. Der Zugriff erfolgt durch ein Virtual Private Network (VPN).²¹

Das nächste Bereitstellungsmodelle ist die Public Cloud. Die Fraunhofer-Allianz Cloud Computing definiert die Public Cloud oder öffentliche Cloud als „[...] ein Angebot eines frei zugänglichen Providers, der seine Dienste offen über das Internet für jedermann zugänglich macht.“²² Mehrere Kunden greifen also gemeinsam auf bedarfsabhängig verteilte Services zu und teilen sich die physische Infrastruktur.

Ein weiteres Bereitstellungsmodell ist die Community Cloud. Sie wird für die ausschließliche Nutzung durch mehrere Organisationen bereitgestellt, die gemeinsame Anliegen, Anforderungen und Dienste benötigen. Die Dienste sind nicht öffentlich, sondern auf den Nutzerkreis beschränkt.²³

¹⁹ Vgl. Soares et al. (2011), S. 119f.

²⁰ Vgl. Mell/Grance (2011), S. 3.

²¹ Vgl. Lins et al. (2019), S. 10.

²² Fraunhofer-Allianz Cloud Computing (online).

²³ Vgl. Lindner et al. (2020), S. 12.

Mit hybriden Clouds werden Mischformen der drei oben genannten Bereitstellungsmodelle bezeichnet. So laufen bestimmte Services bei öffentlichen Anbietern, während datenschutzkritische oder anforderungsbedürftige Anwendungen und Daten in privaten Clouds von der Organisation selbst betrieben und verarbeitet werden.²⁴

Weiterhin kann noch die Multi Cloud als Bereitstellungsmodell benannt werden, hier sieht Lins jedoch „die Unterscheidung zwischen einer Multi-Cloud und einer Hybrid-Cloud [...] schwierig und uneinheitlich [...]“.²⁵ Unterscheidungsansätze sehen bei einer hybriden Cloud-Infrastruktur zwei oder mehr verschiedene Bereitstellungsmodelle vereint, wie private und Public Clouds. Eine Multi-Cloud wiederum verbindet verschiedene Clouds desselben Typs, beispielsweise nur private Clouds.²⁶

2.2.3 Standort

Weitere Schlagwörter werden durch den geografischen Standort des Rechenzentrums geprägt. Wesentliche Begriffe sind das Edge und Fog Computing

Im Gegensatz zu großen zentralen Cloud-Rechenzentren, wird beim Edge Computing die Rechenressource direkt an den Rand (Edge) des Netzwerkes verlagert. Dort wo die Daten produziert und gebraucht werden, soll auch die Verarbeitung stattfinden.²⁷

Eine geografisch nahe Verarbeitung hat mehrere Vorteile. Zuerst wird die Verzögerungszeit (Latenz) zwischen dem Datenaustausch des Endgeräts und des Rechenzentrums verringert. Weiterhin können Unternehmen ihre Datenrate erhöhen und die Auslastung des Netzwerkes verringern, wenn Daten standortnah verarbeitet werden und nicht in das dahinterliegende Netzwerk gelangen. Letztendlich erhöht sich die Sicherheit, wenn Daten lokal bearbeitet werden und das Unternehmensnetzwerk nicht verlassen.²⁸

Aus Sicht der Cloud Service Provider müssen nicht alle Rechenzentren möglichst nah am Endverbraucher platziert werden. Meist ist die Platzierung der Rechenzentren abhängig von den Anforderungen der Anwendungen. Die dafür genutzte Standort-Ebene

²⁴ Vgl. Fraunhofer-Allianz Cloud Computing (online).

²⁵ Lins et al. (2019), S. 11.

²⁶ Vgl. Lins et al. (2019), S. 11f.

²⁷ Vgl. Iorga et al. (2017), S. 6.

²⁸ Vgl. Cisco (online).

wurde im Jahr 2014 von Cisco als Fog Computing bezeichnet. Laut dem National Institute of Standards and Technology deckt Fog Computing alle physikalischen und virtuellen Netzwerk- und Rechenressourcen ab, die sich zwischen den Endgeräten und den traditionellen Cloud-Datencentern befinden.²⁹

Auch wenn oftmals die Bezeichnungen Edge Computing und Fog Computing innerhalb der Fachliteratur einheitlich verwendet werden, unterscheidet das National Institute of Standards and Technology beide Begriffe. Beim Edge-Computing wird lediglich eine Datenberechnung unmittelbar am Netzwerkrand (Edge) in der Nähe zum physischen Ort der Datenerzeugung vollzogen. Das Fog-Computing hingegen deckt die komplette Berechnung und die Steuerung der Daten, sowie das Netzwerk zwischen dem Edge und der traditionellen Cloud ab.³⁰

2.3 Wertschöpfungskette

Petzl et al. beschreibt in seinem Sachbuch die von Porter geprägte Wertschöpfungskette³¹ von IaaS-Clouddiensten.³² An erster Stelle stehen bei ihm die Cloud Infrastructure Provider, welche „[...] die notwendige physische Cloud-Infrastruktur zur Verfügung stellen [...]“ und „[...] für den Betrieb der Hardwareplattform verantwortlich sind“.³³

Danach sind die IaaS Cloud Service Provider zu nennen. Sie verwalten die Dienste, die auf IaaS-Ebene anfallen. Dazu gehören Datensicherung und Datenwiederherstellung.

Vom sogenannten Aggregator werden die Dienste anschließend zu einem für den Kunden bietenden Mehrwert zusammenfasst und angeboten.

Vertrieben werden die IaaS-Dienste auf einem als „Marktplatz“ bezeichneten Vertriebs-Plattform. Hier werden Aufgaben wie die Definition der Service Level Agreements oder Leistungsabrechnung übernommen.

²⁹ Vgl. Iorga et al. (2017), S. 2.

³⁰ Vgl. ebd. (2017), S. 6.

³¹ Vgl. Porter (1985), S. 33ff.

³² Vgl. Pelzl et al. (2014), S. 5f.

³³ Pelzl et al. (2014), S. 6.

Direkt mit dem Kunden treten Consultants in Kontakt, die bei der Einführung und Integration beratend zur Seite stehen. Außerdem sind Integratoren an der Einführung der Cloud Lösung in die IT-Systeme des Unternehmens beteiligt. Zum Schluss gibt es den sogenannten Helpdesk, welcher mittels Kundensupport als langfristiger primärer Ansprechpartner fungiert.³⁴

Ein IaaS-Anbieter muss nicht alle Wertschöpfungsaktivitäten bearbeiten. Es ist außerdem möglich im Rahmen der eigenen Wettbewerbsstrategie mit einer reduzierten Wertschöpfungstiefe zu arbeiten und bestimmte Aktivitäten an Partner auszulagern, um sich intensiver auf die unternehmensinternen Kernkompetenzen zu konzentrieren.³⁵

2.4 Hauptakteure

Der Markt für IaaS wird international von wenigen Anbietern dominiert. Diese werden auch over-the-top (OTT) genannt, da sie Services auf dem heutigen Internet anbieten. Ebenso ist der Begriff „Hyperscaler“ geläufig. Dies bezieht sich auf die Kernkompetenz der Cloud-Anbieter, die Rechen-, Speicher- und Netzwerkressourcen so bereitzustellen und hinzuzufügen, dass die Skalierungseigenschaft als buchbarer Dienst nutzbar wird.³⁶ Die dafür notwendige Hardware ist in riesige Rechenzentren verbaut, die aus tausenden an einem Netz angeschlossenen Kleinstcomputern bestehen.³⁷ Führend, mit einem Marktanteil von fast 41 Prozent ist Amazon Web Service. Anschließend folgt Microsoft (20%), Alibaba (9,5%), Google (6,1%) und Huawei (4,2%).³⁸ Fast alle der marktführenden Hyperscaler sind amerikanische Unternehmen. Neben IaaS sind die Unternehmen mit einer umfangreichen Produktpalette auch im SaaS-Markt tätig, wie beispielsweise Amazons³⁹ und Alibabas⁴⁰ virtuelle Verkaufsplattformen, Microsofts Office 365 Anwendungen⁴¹ oder Googles Suchmaschine⁴².

³⁴ Vgl. Pelzl et al. (2014), S. 6f.

³⁵ Vgl. ebd. (2014), S. 14ff.

³⁶ Vgl. Guillen et al. (2021), S. 13.

³⁷ Vgl. Frank et al. (2019), S. 7.

³⁸ Vgl. Gartner (2021c) (online).

³⁹ Vgl. Amazon.de

⁴⁰ Vgl. Alibaba.com

⁴¹ Vgl. Office.com

⁴² Vgl. Google.com

Ionos ist der Marktführer unter den europäischen Cloud-Anbietern. Das Besondere an diesem Hyperscaler ist die Firmenverwandtschaft mit dem Mobilfunkbetreiber 1&1. Beide Unternehmen gehören zum United-Internet-Konzern.⁴³ Weiterhin sind viele kleine lokale Cloud-Anbieter in Europa aktiv. Meist wird eine Nische bearbeitet. Es gibt Spezialisierungen hinsichtlich vertikaler Industrien, sowie lokaler Infrastrukturlösungen. Die Nutzenversprechen zielen vor allem auf besonderes Knowhow, den Datenschutz oder die Einhaltung europäische Standards wie das DSGVO ab.⁴⁴ Um in dieser Arbeit die kleineren Cloud-Anbieter von den großen Marktführern abzugrenzen, wird für letztere durchgehend der Begriff „Hyperscaler“ verwendet.

2.5 Marktstrukturen

Der Markt für Cloud Computing ist sehr groß. Er hat ein Umsatzvolumen von mehr als 150 Milliarden US-Dollar im ersten Halbjahr 2019 und wächst kontinuierlich weiter. Für alle Cloud-Dienste zusammen hat die Synergy Research Group von 2018 bis 2019 ein Marktwachstum von 24 Prozent errechnet. Zu dieser Zeit hatten mit 44 Prozent IaaS und PaaS die höchsten Wachstumsraten aller Marktsegmente.⁴⁵ Laut Gartner ist der Wachstumstrend mit 41 Prozent auch 2019 bis 2020 ungebrochen. Verantwortlich für die starken jährlichen Wachstumsraten sind die Umsatzzuwächse von 10 bis 40 Prozent in Cloud-assoziierten Märkten. Die Cloud hat als Enabler und Accelerator neue sehr lukrative Technologien und Geschäftsmodelle⁴⁶ wie Netflix⁴⁷ oder Dropbox⁴⁸ ermöglicht.

Auch in Zukunft ist eine weitere Expansion vorstellbar. Gartner hat für 2019 weltweit 3,79 Billionen US-Dollar an IT-Ausgaben errechnet.⁴⁹ Ebenso hat Gartner vorhergesagt, dass bis zum Jahr 2024 mehr als 45 Prozent der IT-Ausgaben für Hard- und Softwareinfrastruktur an Cloudlösungen ausgegliedert werden.⁵⁰ Auch wenn die als „Cloud Shift“

⁴³ Vgl. United Internet (online).

⁴⁴ Vgl. Digital Business Cloud (2021) (online).

⁴⁵ Vgl. Synergy Research Group (2019) (online).

⁴⁶ Vgl. ebd. (2019) (online).

⁴⁷ Vgl. Netflix (2021) (online).

⁴⁸ Vgl. Dropbox (2021), S. 46.

⁴⁹ Vgl. Gartner (2019b) (online).

⁵⁰ Vgl. Gartner (2019a) (online).

betitelte Ausgliederung aktuell größtenteils die Software betrifft, wird in den nächsten Jahren ebenso die Infrastruktur separiert. Vor allem im Hinblick auf die dezentrale Computernutzung während der COVID-19-Krise werden sich die IT-Ausgaben für neue Cloudservices weiter erhöhen.⁵¹ Unter Berücksichtigung dieser Entwicklung prognostiziert Gartner, dass „[...] Cloud Computing zu einem der am stärksten disruptiven Kräfte auf den IT-Märkten seit den Anfängen des digitalen Zeitalters wird“.⁵²

Betrachtet man die einzelnen Bereitstellungsmodelle, machen die Public Clouds die Mehrheit aus. Laut dem Flexera „State of the Cloud“ Report nutzen 97 Prozent der befragten Unternehmen Public Clouds. Da auch 80 Prozent gleichzeitig eine private Cloud verwenden, liegt der Anteil an hybriden Clouds bei 78 Prozent.⁵³

⁵¹ Vgl. Gartner (2019b) (online).

⁵² Gartner (2019a) (online).

⁵³ Vgl. Flexera (2021) (online).

3 Grundlagen und aktuelle Situation des Mobilfunks

3.1 Definition

Laut Baun ist der Mobilfunk eine nichtleitungsgebundene Übertragungstechnik (drahtlose Übertragung) von Daten. Genutzt werden dafür elektromagnetische Wellen, die gerichtet und ungerichtet abgegeben werden.⁵⁴ Die elektromagnetischen Wellen unterscheiden sich in ihrer Wellenlänge und damit in ihrer Frequenz sowie durch ihren Energiegehalt.⁵⁵ Mit einer höheren Wellenlänge können mehr Daten übertragen werden. Dem liegt die physikalische Eigenschaft zugrunde, dass mit einer höheren Frequenz die nutzbare Bandbreite ansteigt. Problematisch ist, dass gleichzeitig der Streckenverlust aufgrund höherer Dämpfungseigenschaften ansteigt und damit die Reichweite verringert.⁵⁶ ⁵⁷ Demzufolge sind nutzbare Frequenzen endlich. Überschneidende Frequenzbereiche von Funkanwendungen stören sich gegenseitig. Somit werden die Frequenzbereiche staatlich reguliert und von der Bundesnetzagentur an die Anwender zugeteilt oder per Auktion vergeben.⁵⁸ Dadurch sind die nutzbaren Frequenzbereiche limitiert – wodurch die Mobilfunkbetreiber bereit sind, viel Geld für freie Spektren auszugeben.⁵⁹

Technisch gesehen bestehen Mobilfunknetze aus Basisstationen, die einen wabenförmigen Abdeckungsbereich bereitstellen. In diesem Bereich wählen sich mobile Endgeräte ein und empfangen bzw. senden Daten an die Basisstation.⁶⁰ Die für den physikalischen Funknetzzugang notwendigen Komponenten werden zusammengefasst Radio Access Network (RAN) genannt.⁶¹ Der RAN besteht aus Antenne, Software und Basisstationen, welche mit Glasfaser oder Richtfunk an das dahinterliegende leitungsgebundene Frontend angebunden ist, wodurch die Daten in das Kernnetz des Mobilfunkanbieter und darüber hinaus in das Internet gelangen.⁶²

⁵⁴ Vgl. Baun (2019a), S. 62.

⁵⁵ Vgl. BDBOS (online).

⁵⁶ Vgl. BMVI (2020), S. 10.

⁵⁷ Vgl. El-Shorbagy (2021), S. 123f.

⁵⁸ Vgl. Bundesnetzagentur (2021b) (online).

⁵⁹ Vgl. Bundesnetzagentur (2019) (online).

⁶⁰ Vgl. Bök et al. (2020), S. 30.

⁶¹ Vgl. Bök et al. (2020), S. 110.

⁶² Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 12.

3.2 Entwicklung und Einordnung

Angefangen hat die Mobilfunk-Evolution im Jahr 1958 mit der ersten Generation, die eine analoge Sprachübertragung zu mobilen Endgeräten ermöglichte.

Mehr als 30 Jahre später wurde im Jahr 1992 mit 2G die analoge von einer digitalen Sprachübertragung abgelöst. Neben dem Short Message Service-(SMS)-Dienst konnten außerdem erste Fotos und einfache Webseiten übertragen werden.

Im Jahr 2001 hat die Mobilfunkgeneration 3G, ausgelöst durch eine höhere Datenrate, die breitflächige mobile Nutzung des Internets ermöglicht.

2010 wurde die vierte Generation der Mobilfunknetze (4G) mit dem zugehörigen Standard LTE (Long Term Evolution) in Betrieb genommen. Der Fokus lag auch hier vornehmlich auf dem breitbandigen Ausbau für Endkunden, also einer wesentlich höheren Datenrate im Vergleich zur den Vorgängergenerationen. LTE zeichnet sich außerdem durch eine bessere Sprachqualität, geringeren Energieverbrauch für die Endgeräte und eine höhere Sicherheit aus. Heutzutage gestattet der Standard LTE Advanced theoretisch sogar maximale Übertragungsraten bis in den Gigabitbereich und reduziert Latenzzeiten auf circa zehn Millisekunden.⁶³

5G ist der Nachfolger von 4G (LTE) und bezeichnet die fünfte Generation des Mobilfunks. Im Gegensatz zu den vorherigen Mobilfunkgenerationen ist das Ziel von 5G nicht der breitbandige Ausbau für den Endkunden. Hauptsächlich soll 5G als neuer Standard für die Anwendungen vertikaler Industrien dienen und wird damit in Konkurrenz mit WiFi und Kabelverbindungen treten.⁶⁴

3.3 Mobilfunkgeneration 4G

Bevor man sich im Rahmen des Forschungsthemas den Gegebenheiten des zukünftigen Mobilfunks widmen kann, ist es zunächst notwendig, die aktuelle Mobilfunksituation in Deutschland zu ergründen. Es sind die Fragen zu klären, welche Mobilfunkgenerationen zurzeit eingesetzt werden, wo sich die Mobilfunkgenerationen in ihrem Lebenszyklus

⁶³ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 5.

⁶⁴ Vgl. Mennig et al. (2019), S. 8ff.

befinden, wie der Ausbau von 5G vorschreitet und welche besonderen 5G-Mobilfunk-techniken bisher eingesetzt werden.

Wie schon im vorherigen Abschnitt erwähnt, ist 4G eine jüngere Erscheinung in der Mobilfunkevolution. 4G wurde mit Release 8 im Jahr 2008 erstmals von der Mobilfunkstandardisierungsorganisation 3GPP beschrieben.⁶⁵ Mehr als zehn Jahre später, ist 4G mit seinem Mobilfunkstandard LTE in Deutschland die am häufigsten verwendete Mobilfunkgeneration und wird von Endverbrauchern millionenfach genutzt. LTE wurde wie die vorangegangenen Mobilfunkgenerationen vorwiegend für einen massenhaften Einsatz im Business to Consumer-Markt (B2C) entwickelt. In industrieller und bürospezifischer Konnektivität konnte sich LTE hingegen bis heute nicht durchsetzen. Hier werden vorwiegend Technologien wie WiFi 4/5 und Kabelverbindungen eingesetzt.⁶⁶ Durch kurze Innovationszyklen ist vor allem der Funkstandard WLAN bis heute kommerziell sehr erfolgreich.⁶⁷

Neben LTE wird 2G verwendet. 3G wiederum wird zum Jahresende 2021 in Deutschland abgeschaltet. Das Frequenzspektrum wird anschließend für 5G wiederverwendet. Um in ländlichen Gebieten ein Minimum an Mobilfunkempfang zu gewährleisten, wird 2G in Deutschland weiterhin betrieben, da hier niedrige, jedoch reichweitenstarke Frequenzen zum Einsatz kommen.⁶⁸

Der Ausbau von LTE ist weitestgehend abgeschlossen. Die Versorgung liegt in Deutschland bei 96,5 Prozent.⁶⁹ Eine Weiterentwicklung von 4G findet kaum noch statt. Mit Release 15 hat sich 3GPP Mitte 2019 hauptsächlich auf 5G konzentriert.⁷⁰ Daraus lässt sich schlussfolgern, dass sich LTE im Jahr 2022 im Produktlebenszyklus in der Reifephase befindet.

⁶⁵ Vgl. 3rd Generation Partnership Project (online b).

⁶⁶ Vgl. Fachausschuss Funkssysteme (2017), S. 21.

⁶⁷ Vgl. ebd. (2017), S. 32f.

⁶⁸ Vgl. BMVI (2020), S. 11.

⁶⁹ Vgl. Bundesregierung (2021) (online).

⁷⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 40.

3.4 Mobilfunkgeneration 5G

3.4.1 Die Spezifizierung der fünften Mobilfunkgeneration

Um einen Einblick in den Produktlebenszyklus von 5G zu erhalten, ist es von Bedeutung den Entwicklungsprozess von 5G genauer zu betrachten. Zuständig für den Fortschritt von 5G ist die Mobilfunkstandardisierungsorganisation 3GPP. Ihre Aufgabe ist es, ein einheitliches und fehlerfreies Funktionieren der Mobilfunktechnik auch über Ländergrenzen hinweg zu gewährleisten und die Entwicklung der Mobilfunkgenerationen voranzutreiben.⁷¹ Dazu spezifiziert 3GPP technische Standards in sogenannten Releases, die anschließend von den Akteuren aus dem Umfeld der Mobilfunktechnik in Produkte überführt werden. Bis diese Produkte auf dem Markt erscheinen vergehen in der Regel anderthalb bis zwei Jahre.

Die erste nennenswerte Veröffentlichung bei 5G war das sogenannte Release 15 von 3GPP. Es beschäftigte sich mit den Standards für den massenhaften 5G-Ausbau und soll erhöhte Datenraten im Sinne der Systemfunktion von Enhanced Mobile Broadband (eMBB) bereitstellen.⁷² Bis Ende 2018 beschreibt der erste Teil von Release 15 die Mobilfunkgeneration 5G als schnell zu implementierendes Non-Stand-Alone-Netz (NSA), welches noch auf das LTE-Kernnetz zurückgreift und lediglich die 5G-Funktechnik nutzt.⁷³ Dadurch konnte 5G in Deutschland in der Praxis eine weite Verbreitung erfahren, auch wenn ein großer Teil der Mobilfunkinfrastruktur, nämlich das komplette Kernnetz noch auf der Vorgängergeneration 4G basiert.

Um dem zu entgegnen, veröffentlichte 3GPP Ende 2018 den zweiten Teil von Release 15. Es standardisierte eine unabhängige 5G-Kernnetz-Architektur, auch Stand-Alone-Netz (SA) genannt, womit 5G ohne eine 4G-Basis existieren kann.⁷⁴ Zum heutigen Zeitpunkt, Anfang 2022, stellen die ersten Mobilfunkanbieter ihr Mobilfunk-Netz auf 5G-Standalone um.⁷⁵

⁷¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 37.

⁷² Vgl. ebd. (2020), S. 40.

⁷³ Vgl. ebd. (2020), S. 9.

⁷⁴ Vgl. ebd. (2020), S. 9.

⁷⁵ Vgl. Baumann (2021b) (online).

Release 16 wurde Mitte 2020 von 3GPP freigegeben und befindet sich zurzeit in der technischen Adaptionsphase der Mobilfunk- und Netzwerkhersteller. Es deckt über hundert unterschiedliche Spezifikationen ab.⁷⁶ Das vorrangige Ziel der Veröffentlichung ist die Standardisierung von technischen Spezifikationen, die einen Einfluss auf die Anwendungsmärkte haben. In Bezug auf Clouddienste beinhaltet es Funktionen für das SA-Netz, die von 5G-Anwendungen genutzt werden. Zu nennen wären Spezifikationen für den Einsatz von privaten 5G-Campusnetzen,⁷⁷ dem Erstellen von Netzwerk-Slices (siehe dazu das nachfolgenden Unterabschnitt 4.2.3) und ein geringeren Energieverbrauch für mobilfunkfähige Geräte.⁷⁸ Wenn mit einer durchschnittlichen Entwicklungszeit von 1 ½ bis 2 Jahren gerechnet werden kann, steht die Marktreife der Spezifikationen ab dem Jahr 2022 bevor.

Release 17 wird Anfang 2022 vollständig definiert sein. Es soll Spezifikationen von Releases 15 und 16 weiter verbessern, einschließlich dem Netzwerk-Slicing und privater 5G-Netzwerkfunktionen. Außerdem wird im Rahmen der massive Machine-Type Communications (mMTC) Standards beschrieben, die eine sehr hoch skalierte Anzahl von IoT-Sensoren und -Aktuatoren mit Maschinen unterstützt.⁷⁹

3.4.2 Lebenszyklus

In den vorherigen Abschnitten wurde die Evolution des Mobilfunks, die LTE-, sowie 5G-Releases und die anschließenden Entwicklungsbemühungen beschrieben. Daraus kann abgeleitet werden, in welcher Phase ihres Lebenszyklus sich die einzelnen Mobilfunkgenerationen befinden (siehe Abbildung 2).

⁷⁶ Vgl. 3rd Generation Partnership Project (online a).

⁷⁷ Vgl. Futurion 5G Catalysts (2021), S. 10.

⁷⁸ Vgl. Baumann (2021a) (online).

⁷⁹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 40.

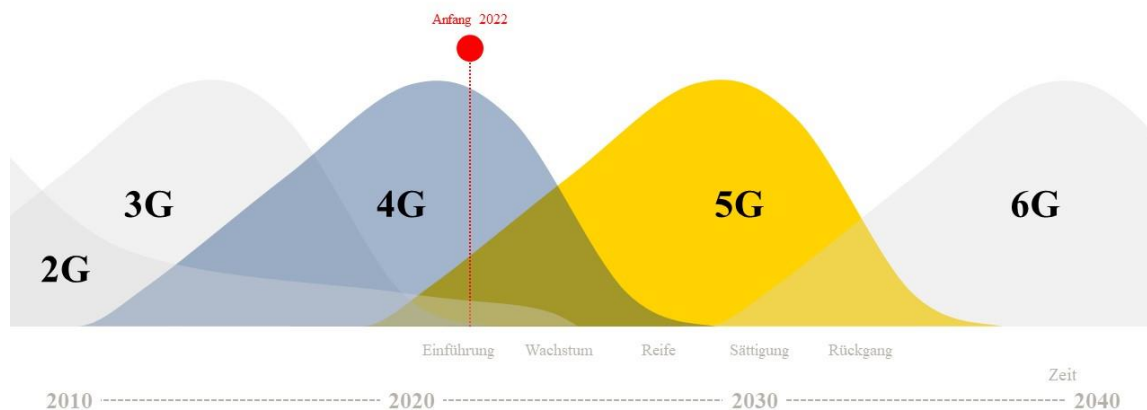


Abbildung 2: Lebenszyklus der Mobilfunkgenerationen, Eigene Darstellung

Aus der Marktreife der 5G-Releases ist ersichtlich, dass sich 5G in der Einführungsphase befindet. Von den älteren Mobilfunkgenerationen wurde 3G im Jahr 2021 abgeschaltet. LTE hat in Deutschland die Reifephase erreicht und wird in den nächsten Jahren in die Degenerationsphase übergehen. 2G befindet sich seit Jahren in der Degenerationsphase. Durch seine gute Netzabdeckung wird es jedoch weiterhin genutzt. In Anbetracht der Lebenszyklen vorheriger Mobilfunkgenerationen ist es wahrscheinlich, dass 5G im Jahr 2030 selbst in die Reifephase eintritt und sich die Spezifizierungsorganisationen anschließend der sechsten Mobilfunkgeneration widmen werden.

3.4.3 Rollout und Netzbetreiber in Deutschland

Um zu ergründen, wie sich in den nächsten Jahren die fünfte Mobilfunkgeneration entwickelt, ist es unerlässlich die aktuelle Situation in Deutschland zu beschreiben. Wie im vorherigen Abschnitt angemerkt, befindet sich 5G in der Einführungsphase und wird in Deutschland zurzeit großflächig ausgebaut.

Angefangen hat der Rollout vor etwa zwei Jahren. Im Juni 2019 hat die Bundesnetzagentur die Auktion der 5G Frequenzbänder im Bereich von 2.100 MHz und 3,5 GHz durchgeführt. Bei der Frequenzauktion haben die Mobilfunknetzbetreiber Deutsche Telekom, Vodafone, Telefónica Germany O2 und Drillisch Netz AG 1&1 Highband Frequenzen um 3,5 GHz erworben.⁸⁰ Diese Mobilfunkbetreiber sind unmittelbar am 5G-

⁸⁰ Vgl. Bundesnetzagentur (2019) (online).

Rollout in Deutschland beteiligt, haben jedoch unterschiedliche Fortschritte beim Ausbau vorzuweisen.

Die Deutsche Telekom erreicht Ende August 2021 nach eigenen Angaben 85 % der deutschen Bevölkerung und betreibt mehr als 50.000 Antennen. Auf Basis des NSA-Netzes sollen bis Ende 2021 90 Prozent der Bevölkerung 5G nutzen können. Eine eigene 5G-Kernnetzinfrastruktur wird lediglich in vier deutschen Städten betrieben.⁸¹ Die Deutsche Telekom benötigt für eine „eine komplette Umstellung [...] noch verschiedene Entwicklungsschritte.“⁸² Der Geschäftsführer der Deutschen Telekom im Bereich Technologie Walter Goldenits schätzt das Startjahr für ein vollständiges SA-Netz spätestens auf 2022. Abhängig ist dies von der Verfügbarkeit von Use Cases, die 5G SA-Netze voraussetzen.⁸³ Daraus lässt sich ableiten, dass die Deutsche Telekom noch kein „echtes“ 5G hat, wie es durch den zweiten Teil von Release 15 spezifiziert wurde.

Vodafone stellt Ende 2021 für ungefähr 30 bis 35 Mio. Einwohner der Bundesrepublik 5G zur Verfügung.⁸⁴ In der Abdeckung liegt Vodafone damit hinter der Deutschen Telekom. Führend ist Vodafone bei der Bereitstellung eines flächendeckenden SA-Netzes. Bis zum Ende des Geschäftsjahres 2022/2023 soll 5G SA in Deutschland vollständig ausgebaut und für 60 Mio. Menschen verfügbar sein.⁸⁵ Spezielle SA-Kernnetzfunktionen, wie ein virtuelles Teilnetz (Netzwerk-Slice) können schon bereitgestellt werden.⁸⁶

Telefónica Germany O₂ versorgt 30 Prozent der deutschen Bevölkerung mit 5G. Wie bei der Telekom basiert 5G auch bei O₂ auf dem LTE-Kernnetz. Eingesetzt werden die im Jahr 2019 ersteigerten Frequenzen bei 3,6 GHz. Damit ist 5G von Telefónica Germany O₂ überwiegend in städtischen Gegenden nutzbar.⁸⁷

Als einziger der vier deutschen Mobilfunknetzbetreiber besitzt Drillisch Netz AG 1&1 noch kein eigenes 5G-Netz. Der Ausbau startete später als bei den anderen Mobilfunkbetreibern, erst im Sommer 2021. Ende 2022 soll das 5G-Netz für die Kunden

⁸¹ Vgl. Telekom (2021c) (online).

⁸² Telekom (2021c) (online).

⁸³ Vgl. Telekom (2021a) (online).

⁸⁴ Vgl. DSLWEB (2021b) (online).

⁸⁵ Vgl. Baumann (2021c) (online).

⁸⁶ Vgl. Vodafone (online c).

⁸⁷ Vgl. Telefónica (online).

bereitstehen. Verwendung finden wie bei O₂ Telefónica Frequenzen aus der Auktion im Bereich von 3,6 GHz. Bis das eigene 5G-Netz genutzt werden kann, kooperiert Drillisch Netz AG 1&1 mit Telefónica Germany O₂.⁸⁸

Für die Beurteilung der Netzabdeckung ist man auf die Daten der Netzbetreiber angewiesen. Als unabhängige Quelle können die Daten der Bundesnetzagentur hinzugezogen werden. Daraus lässt sich ableiten, dass über 53 Prozent der Fläche der Bundesrepublik durch einen der oben genannten Anbieter mit 5G abgedeckt ist.⁸⁹

3.4.4 Aktueller Stand der Mobilfunktechnik

5G bedingt eine schrittweise Realisierung neuer Technologien. Entwickelt jedoch auch Technologien von LTE weiter. Es sind Neuerungen im Bereich der Funkschnittstelle, der virtualisierten Netzinfrastruktur sowie einer neuen Kernnetzarchitektur anzuführen.⁹⁰

Aktuell sind lediglich neue Technologien aus der Funkschnittstelle im Einsatz, da eine virtualisierte Netzinfrastruktur und damit neue Kernnetzarchitekturen ein funktionsfähiges SA-Kernnetz voraussetzen. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, haben alle Anbieter für einen schnelleren 5G-Rollout auf ein SA-Kernnetz verzichtet. Lediglich Vodafone hat ein SA-Kernnetz im größeren Umfang in Betrieb.⁹¹

Im Bereich der Funkschnittstelle wird auf alte und neuere Frequenzen zurückgegriffen. Heutzutage benutzt 5G die Low- und Midband-Frequenzen im Bereich von 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz und 2,6 GHz.⁹² Diese Frequenzspektren werden teilweise auch von LTE verwendet. Dass LTE und 5G die gleichen Frequenzen nutzt, ist laut der Bundesnetzagentur weit verbreitet. Bekannt ist dieses Verfahren als Dynamic Spectrum Sharing (DSS).⁹³ Wirklich neu für 5G ist der Einsatz von Highband-Frequenzen im Umfang von 3,4 bis 3,7 GHz.⁹⁴ Mit Highband-Frequenzen können höhere

⁸⁸ Vgl. DSLWEB (2021a).

⁸⁹ Vgl. Bundesnetzagentur (2021c).

⁹⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 9.

⁹¹ Vgl. Baumann (2021c).

⁹² Vgl. BMVI (2020), S. 11.

⁹³ Vgl. Bundesnetzagentur (2021c).

⁹⁴ Vgl. Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung (2019), S. 6f.

Datenraten realisiert werden, jedoch einhergehend mit einer niedrigeren Reichweite. Um dem entgegenzuwirken, wird aktuell ein dichteres Netz an Sendestandorten, sogenannten Small Cells eingerichtet.⁹⁵ Highband-Frequenzen kommen wegen ihrem geringen Abdeckungsradius vorwiegend in stark besiedelten oder frequentierten Gegenden zum Einsatz.⁹⁶

Aktuell erlangt 5G die höhere Datenrate vorwiegend durch das Zusammenlegen der Bandbreite von mehreren Frequenzen, was auch LTE-Frequenzen einschließt.⁹⁷ Das sogenannte Carrier Aggregation ist keine neue Technologie - neu ist lediglich das Mitnutzen der 5G Highband-Frequenzen.⁹⁸

Wie im vorherigen Abschnitt dargelegt, ist die 5G-Nutzerabdeckung mit fast 90 Prozent und Flächenabdeckung mit 53 Prozent schon sehr hoch.⁹⁹ ¹⁰⁰ Dennoch spielt 5G im Alltag der Endverbraucher eine untergeordnete Rolle. 5G wird allerdings in den meisten Mobilfunkverträgen ohne große Kostenaufschläge inkludiert.¹⁰¹ Daraus lässt sich schließen, dass sich die Nutzung in naher Zukunft mit einer Verbreitung von 5G-fähigen Mobiltelefonen schnell erhöhen kann.

Durch das fehlende SA-Netz werden 5G-Schlüsselspezifikationen wie Edge Computing oder das Netzwerk-Slicing erst in ausgewählte Forschungs- und Testlabore betrieben. Eine Ausnahme ist Vodafone, die das Netzwerk-Slicing auf ihrer Website schon anbietet.¹⁰² Privat und lokal betriebene 5G Netze, sogenannte Campusnetze, befinden sich zurzeit noch in der Einführungsphase. Hierfür wurden von der Bundesnetzagentur im Jahr 2020 Frequenzen im Bereich von 3700-3800 MHz an interessierte Unternehmen zugeteilt.¹⁰³

⁹⁵ Vgl. AT&T (2018), S. 9.

⁹⁶ Vgl. BMVI (2020), S. 11.

⁹⁷ Vgl. Weidner (2021) (online).

⁹⁸ Vgl. Wannstrom (2013) (online).

⁹⁹ Vgl. Telekom (2021c) (online).

¹⁰⁰ Vgl. Bundesnetzagentur (2021c).

¹⁰¹ Vgl. Bundesnetzagentur (2021d), S. 74.

¹⁰² Vgl. Vodafone (online c).

¹⁰³ Vgl. Bundesnetzagentur (2020) (online).

3.4.5 Aktueller Stand der Mobilfunkleistung

In den Medien wird 5G häufig mit Gigabit-Downloadgeschwindigkeiten assoziiert. Solche hohen Geschwindigkeiten sind zurzeit lediglich im Labor- und Testumgebungen möglich. Welche Downloadgeschwindigkeiten tatsächlich unter Echtbetrieb genutzt werden, hat das unabhängige Analyse-Unternehmen für Mobilfunk Opensignal in ihrem im September 2021 erschienenen Benchmarking-Report aufgezeigt.

Im weltweiten Vergleich erreichen hier die Südkoreaner mit 406,5 Mbit/s die schnellste durchschnittliche 5G-Download-Geschwindigkeit unter Endanwendern. Gefolgt von Taiwan (370,6 Mbit/s) und Norwegen (346,9). Auch wenn der 5G-Ausbau in der Welt unterschiedlich weit fortgeschritten ist, kann festgehalten werden, dass die durchschnittliche Downloadgeschwindigkeit im Echtbetrieb in keinem Land ein Gigabit erreicht hat. Die gemessenen Datenraten sind jedoch nur Momentaufnahmen. Allein seit April 2021 hat Südkorea in den letzten sechs Monaten seine durchschnittlichen 5G-Download-Geschwindigkeit um 40 Mbit/s gesteigert.¹⁰⁴ Bei einer gleichbleibenden Wachstumsrate wäre theoretisch in Südkorea ein Gigabit in fünf Jahren möglich.

Deutschland ist unter keiner der von Opensignal aufgeführten Kategorien in der Spitzengruppe. Die durchschnittlichen 5G-Download-Geschwindigkeit liegt in Deutschland bei 131,4 Mbit/s bei O₂, 110,1 Mbit/s bei der Deutschen Telekom und 98,5 Mbit/s bei Vodafone.¹⁰⁵ Zum Vergleich: die durchschnittliche LTE-Download-Geschwindigkeit lag im Jahr 2019 bei der deutschen Telekom bei 33,4 Mbit/s.¹⁰⁶ Im Download ist 5G somit durchschnittlich fast vier Mal so schnell wie LTE.

¹⁰⁴ Vgl. Fogg (2021) (online).

¹⁰⁵ Vgl. Rizzato (2021) (online).

¹⁰⁶ Vgl. Boyland (2019) (online).

4 Zukünftige Situation der fünften Mobilfunkgeneration

4.1 Leistungsprognosen

Verstärkt wurde die Begeisterung für und die Erwartungen an 5G in den letzten Jahren durch nahezu märchenhafte Leistungsparameter. Erstmals erwähnt wurden diese im Jahr 2017 von der Sonderorganisation der Vereinten Nationen für Informations- und Kommunikationstechnologien ITU. Das ITU spezifizierte damals die drei Kern-Systemfunktionen von 5G: Enhanced Mobile Broadband (eMBB), massive Machine-Type Communications (mMTC) und Ultra-Reliable and Low-Latency Communication (uR-LLC).¹⁰⁷ Und schürte damit die Erwartungen an die Technologie.

Heutzutage werden die drei Systemfunktionen in nahezu jeder 5G-spezifischen Literatur erwähnt, um die Leistung von 5G zu beschreiben. Häufig wird dabei der Grundgedanke dieser Systemfunktionen nicht stark genug hervorgehoben: Es sind Zielvorgaben und sie werden von dem heutzutage verfügbaren 5G im Echtbetrieb noch nicht ansatzweise erreicht (siehe Unterabschnitt 3.4.5 Aktueller Stand der Mobilfunkleistung).

Nichtsdestotrotz ist im Hinblick auf die Zukunft von 5G eine genaue Betrachtung dieser Zieleleistungen von besonderem Interesse. Umsetzen lassen sich die Leistungsparameter nur mit dem Einsatz neuer Technologien. Im besonderen Fokus steht hier das für die Arbeit relevante Edge und Cloud Computing.

4.1.1 Enhanced Mobile Broadband (eMBB)

Nach Baun gibt die „Bandbreite [...] an, wie viele Bits innerhalb eines Zeitraums über das Netzwerk übertragen werden können.“¹⁰⁸ Sie ist damit ein Indikator für die Datenrate in Form von Down- und Upload. Mit 5G Release 15 wurde eMBB erstmalig genauer spezifiziert. Es soll ein mobiles Breitband für Netzbetreiber bereitstellen und eine höhere Datenrate als die vorherige Mobilfunkgeneration 4G liefern.

¹⁰⁷ Vgl. ITU (2017) (online).

¹⁰⁸ Baun (2019b), S. 29.

In der 5G-Literatur wird meist die Ziel-Datenrate des IMT-2020-Standards der ITU zitiert. Demnach soll 5G maximale Datenraten von 10 Gbit/s,^{109 110} durchschnittliche Datenraten von 1 Gbit/s und Datenvolumina von 10 Tbit/s/km² ermöglichen.^{111 112} Literatur, die sich nicht auf die ITU bezieht, erwähnt sogar Datenraten von bis zu 20 Gbit/s.^{113 114}
¹¹⁵

Ob die maximalen Datenraten nur unter optimalen Bedingungen im Labor möglich werden oder im Echtbetrieb zu Verfügung stehen sollen, wird aus der Zielformulierung nicht ersichtlich. In der Literatur wird grundsätzlich keine Jahreszahl bei der voraussichtlichen Zielerreichung genannt.

Um zu bestimmen, wann die Ziel-Datenrate erreicht wird, kann die Entwicklung früherer Mobilfunkgenerationen wie 4G als Erfahrungswert hinzugezogen werden. Bei 4G wurde im Jahr 2008 von 3GPP eine Zieldatenrate von 300 Mbit/s vorhergesagt.¹¹⁶ Heutzutage, zehn Jahre später, ist dieser theoretische Maximalwert möglich und wird in Ballungsgebieten größerer Städte bereitgestellt.¹¹⁷ 5G könnte demnach seine maximale Datenrate von 10 Gbit/s in der Reifephase des 5G-Lebenszyklen in etwa 8 bis 10 Jahren, also im Jahr 2030, realisieren.

Die durchschnittliche Datenrate von 4G in Deutschland beträgt im Jahr 2018 um die 23 Mbit/s.¹¹⁸ Das sind 7,6 Prozent des vorhergesagten Maximalwertes. Sollte sich 5G ähnlich entwickeln wie 4G, kann 2030 mit einer durchschnittlichen Datenrate von mehr als 760 Mbit/s für Endanwender ausgegangen werden. In der vertikalen Industrie wären höhere Maximalwerte möglich, da sich industrielle Anwendungen die Bandbreite nicht mit anderen Nutzern teilen müssen.

¹⁰⁹ Vgl. Mennig et al. (2019), S. 11.

¹¹⁰ Vgl. Pham et al. (2020), S. 116976.

¹¹¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 11.

¹¹² Vgl. Dell Technologies (2019), S. 6.

¹¹³ Vgl. Futuriom 5G Catalysts (2021), S. 8.

¹¹⁴ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 5.

¹¹⁵ Vgl. Slalmi et al. (2020), S. 3854.

¹¹⁶ Vgl. Nohrborg (online).

¹¹⁷ Vgl. Telekom (2021b) (online).

¹¹⁸ Vgl. Opensignal (2018) (online).

4.1.2 Low-Latency Communication (uRLLC)

Die Latenz oder Latenzzeit ist die Zeit, die Daten in einem Netzwerk von der Quelle bis zu ihrem Ziel benötigen. Die Zeitdifferenz entsteht durch eine Verzögerung beim Durchlaufen der Koppel- und Übertragungselemente des Netzwerkes, sowie bei der Verarbeitung in den Komponenten des Computersystems.^{119 120} Zukünftig verspricht der Leistungsparameter uRLLC Einweg-Latenzen unter einer Millisekunde und soll damit eine realistische Alternative zu Kabelverbindungen bieten.¹²¹

Solch niedrige Latenzen im Bereich von Millisekunden sind nur im industriellen Kontext vorgesehen. Im Echtbetrieb soll die Latenz von 4G unterschritten werden. Aktuell ist dies in Deutschland nicht großflächig möglich, da sich 4G und 5G im Rahmen von Non-Stand-Alone die gleiche Netzinfrastruktur teilen und sich dementsprechend die Latenz ähneln. Erste Messungen der 5G-Latenz im Stand-Alone-Netz bestätigen eine niedrigere Latenz von unter 15 ms – hauptsächlich ausgelöst durch eine schnellere und schlankere 5G-Mobilfunkinfrastruktur im Backbone.¹²²

Weiterhin soll die Verfügbarkeit des Netzwerkdienstes bei 99,999 Prozent liegen – Ziel ist es, dass 5G höchstens 5 Minuten und 15 Sekunden im Jahr ausfällt und die Zuverlässigkeit von kritischen Anwendungen stark erhöht.¹²³

4.1.3 Massive Machine-Type Communications (mMTC)

Mit massive Machine-Type Communications soll 5G in den nächsten Jahren der steigenden Anzahl und Anforderungen des sogenannten „Internet der Dinge“ (Internet of Things = IoT) gerecht werden. Kubach beschreibt das Internet der Dinge als „[...] Objekte die untereinander oder mit IT-Systemen über Standard-Internet-Technologie verbunden“ sind.¹²⁴ LTE hat mit seinem Narrow-Band bzw. LPWA-Netz (Low-Power Wide-Area) eine sehr niedrige reichweitenstarke Frequenz, um diese Geräte an das

¹¹⁹ Vgl. Slalmi et al. (2020), S. 3856.

¹²⁰ Vgl. Bök et al. (2020), S. 13f.

¹²¹ Vgl. Guillen et al. (2021), S. 9.

¹²² Vgl. Weidner (2021) (online).

¹²³ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 11.

¹²⁴ Kubach (2020), S. 287.

Internet anzuschließen.¹²⁵ Es können mit der Frequenz jedoch lediglich 70.000 aktive IoT-Geräte pro Quadratkilometer verbunden werden.¹²⁶ 5G soll laut des IMT-2020-Standards der ITU die Geräte-Dichte auf eine Million IoT-Endgeräte pro Quadratkilometer steigern.¹²⁷

Weiterhin sollen im Rahmen von IoT, internetfähige Geräte und Sensoren kaum noch auf Netzteile zur Stromversorgung zurückgreifen müssen.¹²⁸ Ziel von mMTC ist es, den Energieverbrauch der IoT-Geräte beim Senden und Empfangen zu reduzieren, sodass eine längere Betriebszeit ohne notwendige Stromverbindung möglich wird.¹²⁹

4.2 Mobilfunktechnik

Um in Zukunft die Anforderungen der rasant fortschreitenden technologischen Entwicklung zu erfüllen, müssen darüber hinaus nicht nur bestehende Technologien bei der Mobilfunktechnik verbessert werden. Auch völlig neuartige Erfindungen stehen bei 5G im Mittelpunkt der Entwicklung.

Einteilen lassen sie sich in die drei Bausteine Luft- bzw. Funkschnittstelle 5G New Radio, 5G-Netzwerk-Architektur, sowie die Virtualisierung der Netzwerkinfrastruktur. In den folgenden Abschnitten werden die Schlüssel-Technologien dieser Bausteine kurz erklärt.

4.2.1 Funkschnittstelle 5G New Radio

Wie schon in Unterabschnitt 3.4.4 über den aktuellen Stand der 5G Mobilfunkleistung beschrieben, werden bei der Luft- bzw. Funkschnittstelle 5G New Radio höhere Frequenzen eingesetzt, wodurch eine größere Bandbreite zur Verfügung steht, mit der wiederum mehr Datenrate erreicht werden kann.

Mit den 3,5 GHz-Frequenzen aus der Frequenzauktion der Bundesnetzagentur verwenden die Mobilfunkbetreiber aktuell ein höheres Frequenzspektrum als LTE. Für

¹²⁵ Vgl. Fachausschuss Funkssysteme (2017), S. 31f.

¹²⁶ Vgl. Futuriom 5G Catalysts (2021), S. 8.

¹²⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 11.

¹²⁸ Vgl. Bök et al. (2020), S. 322.

¹²⁹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 11.

Datenraten im Gigabit-Bereich sind jedoch selbst die 3,5 GHz-Frequenzen nicht ausreichend.¹³⁰ Erforderlich sind noch höhere Spektren bis in den sogenannte Millimeterwellenbereich. Um die Millimeterwellen für die Entwicklung freizugeben, hat die Bundesnetzagentur in Deutschland den Frequenzbereich bei 26 GHz für die Allgemeinheit geöffnet.¹³¹

Noch ist die breite kommerzielle Nutzung des Millimeterwellenbereichs nur im Richtfunk möglich¹³² – ein Grund ist die physikalische Besonderheit von elektromagnetischen Wellen: Mit einer höheren Frequenz verschlechtern sich die Ausbreitungseigenschaften. Frequenzen über 24 GHz haben eine sehr geringe Reichweite von 100 bis 200 Metern.¹³³ Weil diese elektromagnetischen Wellen Hauswände nicht durchdringen können, benötigen sie außerdem eine Sichtverbindung. Sogar die Durchdringung von Bäumen oder starkem Regen ist problematisch.¹³⁴

Um dieser Herausforderung zu begegnen, sollen in Zukunft sogenannte „Small Cells“ genutzt werden. Es handelt sich hier um kleine Funkbasisstationen, die im geringen Abstand massenhaft verbaut werden, um so mit einer hohen Frequenz eine kleine Fläche abzudecken.¹³⁵ Für die Standortwahl dieser Small Cells kann auf gegebene Infrastruktur, wie Beleuchtungsmasten, Ampelanlagen, Verkehrsschilder oder Hauswände zurückgegriffen werden.¹³⁶ ¹³⁷ Eine Anbindung mit Glasfaser ist nicht zwingend notwendig, da die Small Cells mit Technologie „Integrated Access Backhaul“ wie ein WLAN-Repeater fungieren und als Anbindung an eine Makrozelle das 5G-Netz nutzen können.¹³⁸ ¹³⁹

Doch auch hohe Frequenzen werden in Zukunft nicht ausreichen, um den von Cisco vorhergesagten Anstieg der mobilen Datenrate um fast 46 Prozent im Jahr zu gewährleisten.¹⁴⁰ Der 5G-Ausbau erhöht darüber hinaus die 5G-fähigen Endgeräte, was dazu

¹³⁰ Vgl. BMVI (2020), S. 10.

¹³¹ Vgl. Bundesnetzagentur (2020) (online).

¹³² Vgl. Bundesnetzagentur (2021d), S. 226.

¹³³ Vgl. BMVI (2020), S. 10f.

¹³⁴ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 12.

¹³⁵ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 13.

¹³⁶ Vgl. BMVI (2020), S. 4.

¹³⁷ Vgl. El-Shorbagy (2021), S. 127f.

¹³⁸ Vgl. BMVI (2020), S. 16.

¹³⁹ Vgl. 5G Americas (2021), S. 23f.

¹⁴⁰ Vgl. Cisco (2019), S. 31.

führt, dass sich immer mehr Nutzer in einer Funkzelle die vorhandene Bandbreite teilen müssen.¹⁴¹ Dies verringert die verfügbare Bandbreite jedes einzelnen Endgerätes.¹⁴²

Abhilfe sollen die Schlüssel-Technologien Massive MIMO und Beamforming schaffen. Mit MIMO (Multiple-Input Multiple-Output) wird die Anzahl der Antennen pro Sendeeinheit erhöht. Während LTE meist nicht mehr als 16 Antennen nutzt, kann 5G mit der erweiterten Technologie Massive MIMO auf mehr als 128 Antennen zurückgreifen.¹⁴³ Ein Vorteil, um mehr Endgeräte gleichzeitig mit einer hohen Datenrate zu versorgen.¹⁴⁴ Jedoch können bei den gleichzeitig gesendeten Signalen Interferenzen entstehen. Die Antennen stören sich gegenseitig. Erst durch das sogenannte Beamforming kann Massive MIMO erfolgreich eingesetzt werden.

Beamforming schafft eine gebündelte und genaue Ausrichtung auf einen Empfänger. Somit ist es möglich, die Energie zum Senden und Empfangen einer Antenne auf einen kleinen Bereich zu fokussieren. Die gerichtete Abstrahlung verringert die Interferenzen der massenhaft eingesetzten Antennen des Massive MIMO. Weitere Vorteile sind eine erhöhte Reichweite, verbesserte Datenrate und eine stabilere Verbindung.¹⁴⁵

Als letzte Schlüssel-Technologie im Bereich der Funkschnittstelle 5G New Radio kann die Technologie Full Duplex genannt werden. Im Gegensatz zu den vorherigen Technologien befindet sich Full Duplex noch am Anfang der Entwicklung. Aktuell basieren Basisstationen und Endgeräte auf einer Kommunikationstechnik, die nicht gleichzeitig auf derselben Frequenz senden und empfangen kann. Hier werden entweder unterschiedliche Frequenzen verwendet, oder das Senden bzw. Empfangen wechselt sich auf der Frequenz ab, was als Half Duplex bezeichnet wird.¹⁴⁶ Werden die bisher noch ungelösten Herausforderungen bewältigt, könnte das gleichzeitige Empfangen und Senden der Full Duplex-Technologie eine fast doppelt so hohe Datenrate ermöglichen.¹⁴⁷

¹⁴¹ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 13.

¹⁴² Vgl. Cisco (2019), S. 3.

¹⁴³ Vgl. Qualcomm (2016), S. 9.

¹⁴⁴ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 9.

¹⁴⁵ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 14.

¹⁴⁶ Vgl. ebd. (2019), S. 15.

¹⁴⁷ Vgl. Stobbe et al. (2019), S. 10.

4.2.2 Virtualisierte 5G-Netzinfrastruktur

Ein weiterer wichtiger Baustein, von 5G ist die Virtualisierung des Mobilfunknetzes. Unter „Virtualisierung“ verbergen sich laut Baun „[...] unterschiedliche Ansätze, um Netzwerkressourcen zu logischen Einheiten zusammenzufassen oder aufzuteilen“.¹⁴⁸ Die Idee dahinter ist das Trennen und das Reduzieren von Funktionen aus der Hardware. Ihre Intelligenz soll die Hardware erst durch übergeordnete von der Firmware unabhängige Funktionen erhalten. Die Hardware kann dadurch flexibel und standortunabhängig mit Funktionen ergänzt werden, die bedarfsorientiert an den Anforderungen ausgerichtet werden.¹⁴⁹ Der Grund ist vorwiegend rein wirtschaftlicher Natur. Durch die virtuelle Nutzung von Hardwareressourcen, können diese besser ausgelastet werden, da sich die Anwendungen mehrerer virtuellen Netze ein Hardwaresystem teilen.¹⁵⁰ Durch das steigende Cyberrisiko¹⁵¹ sind auch datensicherheitsrelevante Aspekte durch separate Netze für Unternehmen von großer Bedeutung.¹⁵²

Viele Technologien der Netzwerkvirtualisierung werden schon seit Jahrzehnten in der Netzwerktechnik eingesetzt.¹⁵³ Auch 5G soll ab Release 16 mit den sogenannten LAN-Type-Services die traditionellen Varianten Virtual Private Networks (VPN) und Virtual Local Area Networks (VLAN) unterstützen.¹⁵⁴

Im Rahmen von 5G sind jedoch die beiden Netzwerkarchitekturkonzepte Software-Defined-Networking (SDN) und Network Function Virtualization (NFV) von herausragender Bedeutung. Mit ihnen soll die komplette Virtualisierung der Mobilfunkinfrastruktur von 5G durchgeführt werden, um neue Mobilfunkarchitekturen zu ermöglichen.¹⁵⁵

Normalerweise sind die für den Netzbetrieb wichtigen Funktionen, wie beispielsweise Firewall-, Loadbalancer-, Routing- oder Monitoring-Appliances, auf Hardware

¹⁴⁸ Baun (2019c), S. 213.

¹⁴⁹ Vgl. Bök et al. (2020), S. 294f.

¹⁵⁰ Vgl. ebd. (2020), S. 294.

¹⁵¹ Vgl. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (2021), S. 89.

¹⁵² Vgl. Baun (2019c), S. 213.

¹⁵³ Vgl. Bök et al. (2020), S. 293.

¹⁵⁴ Vgl. Jacob (2020) (online).

¹⁵⁵ Vgl. Stobbe et al. (2019), S. 11.

unterschiedlicher Hersteller installiert. Diese Hardware kann aus Switches oder Routern bestehen, die im Netzwerk dezentral verteilt sind. Um diese wichtigen Netzfunktionen überall und jederzeit im Netzwerk zur Verfügung zu stellen, wird das Netzwerkarchitekturkonzept Network Function Virtualization (NFV) verwendet. Bei diesem Konzept werden die Netzwerk-Funktionen von der Hardware gelöst und auf virtuellen Maschinen oder Containern beliebiger Standardserver bereitgestellt. Es ist damit nicht mehr notwendig die Funktionen umständlich vor Ort zu konfigurieren. Die Funktionen lassen sich nun über eine zentral gebündelte Software einrichten, updaten und steuern.^{156 157}

Im Gegensatz zu NFV virtualisiert Software-Defined-Networking (SDN) nicht die Netzfunktionen, sondern die Intelligenz eines Netzwerkes, da es die Kontrollschicht für alle Netzwerkkomponenten übergeordnet vereint. Dies ist möglich, weil SDN die drei logische Ebenen Data Plane, Control Plane und Application Plane, aus denen die Netzwerkkomponenten aufgebaut sind, voneinander trennt.¹⁵⁸ Um zu verstehen, wie das passiert, ist ein kurzer Einblick in die einzelnen Ebenen notwendig. Die Data Plane beinhaltet als unterste Ebene die virtuell oder physisch vernetzten Koppellemente, wie die Switches und Router, welche die Daten transportieren.¹⁵⁹ Wie sich die Koppellemente verhalten und Datenflüsse gesteuert werden, obliegt der Control Plane.¹⁶⁰ Diese steuert die Funktionen und Verhaltensweisen für die Data Plane. Die Befehle erhält die Control Plane durch Anwendungen (Apps) und Dienste über die oberste Ebene, der Application Plane.¹⁶¹

Ohne Virtualisierung sind die drei Ebenen in der Firmware von herkömmlichen Routern oder Switches eingebaut. Erst die Trennung der (Firm-)Software von der Hardware und die Aufsplittung in die drei Ebenen, ermöglicht dem Netzwerk-Administrator eine dezentrale und flexible Steuerung der Netzwerke, ohne vor Ort auf die einzelnen Switches zugreifen zu müssen.¹⁶² Die Ebenen kommunizieren untereinander und miteinander mittels standardisierter Schnittstellen, damit kann ein Netzwerk aus Komponenten

¹⁵⁶ Vgl. ETSI (2019b), S. 6ff.

¹⁵⁷ Vgl. Bök et al. (2020), S. 310ff.

¹⁵⁸ Vgl. ebd. (2020), S. 298.

¹⁵⁹ Vgl. ebd. (2020), S. 308f.

¹⁶⁰ Vgl. ebd. (2020), S. 307f.

¹⁶¹ Vgl. ebd. (2020), S. 303ff.

¹⁶² Vgl. Luber/Donner (2018) (online).

unterschiedlicher Hersteller und Lebenszyklen bestehen. Durch die programmierbare Steuerung ist das Netzwerk agiler und lässt sich besser verwalten.¹⁶³

Für Mobilfunkbetreiber sind die mit SDN und NFV logisch gestalteten und virtuell sowie zentral gesteuerten Mobilfunknetze der Ausgangspunkt für unabhängige, buchbare Netzwerk-Dienste wie Netzwerk-Slices oder Campusnetze.¹⁶⁴ Auch wenn NFV und SDN in der herkömmlichen IT schon eingesetzt wird, kann es noch ein paar Jahre dauern, bis eine komplette Virtualisierung des 5G-Mobilfunknetzes stattgefunden hat. Notwendig ist ein 5G-Stand Alone-Netz. Außerdem benötigt es für SDN noch Orchestrierungstools und Protokolle für offene Schnittstellen. Viele dieser Softwarekomponenten befinden sich zurzeit noch in der Entwicklungsphase.¹⁶⁵

4.2.3 5G-Netzarchitektur

4.2.3.1 Netzwerk Slice

Die virtualisierte Netzinfrastruktur ermöglicht 5G vollkommen neue Netzwerkarchitekturen. Im Gegensatz zu normalerweise in Netzwerken eingesetzten Techniken wie VPN und VLAN soll 5G massenhaft auf das sogenannte Netzwerk-Slicing setzen.

Beim Netzwerk-Slicing wird die physikalische Mobilfunkinfrastruktur in virtuell getrennte Netze aufgeteilt. Diesen virtuellen Teilnetzen können anschließend spezifische Eigenschaften zugewiesen werden.¹⁶⁶ Auch wenn sich die virtuellen Teilnetze die gleiche physische Infrastruktur teilen, beeinträchtigen sie sich gegenseitig nicht.¹⁶⁷

Damit Netzwerk-Slices den adressierten Anwendungsanforderungen gerecht werden können, werden zwei Grundmodelle unterschieden. Zuerst können für jeden der drei 5G-Leistungsparameter ein Slice bereitgestellt werden, welches den jeweiligen Anforderungen entspricht. Für den eMBB-Slice wäre es vorstellbar eine priorisierte Datenweiterleitung oder hohe Frequenzen zuzuweisen. Im URLLC würde das Ansprechen und Miteinbeziehen einer bestimmten Cloudinfrastruktur für eine schnelle

¹⁶³ Vgl. Bök et al. (2020), S. 299.

¹⁶⁴ Vgl. ebd. (2020), S. 298.

¹⁶⁵ Vgl. Winklhofer (2018) (online).

¹⁶⁶ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 8.

¹⁶⁷ Vgl. Slalmi et al. (2020), S. 3860.

Datenverarbeitung möglich sein. Zuletzt könnte der mMTC genannte Slice niedrigere Übertragungskapazität mit einer reichweitenstarken Frequenz nutzen.^{168 169}

Zweitens wäre es möglich, die Slices flexibel auf die Anforderung einer Anwendung zuzuschneiden und individuell auf die erforderlichen Leistungsparameter auszurichten.¹⁷⁰

Wie auch immer die Slices aufgebaut sind, grundsätzlich werden sie zum Ziel haben, die für spezielle Anwendungen benötigten Ressourcen zur Verfügung zu stellen. Dies wird erreicht, indem der Netzwerk-Slice die erforderlichen Mobilfunk-, Cloud- und Netzwerkressourcen und -funktionen bereitstellt.¹⁷¹

Das Konzept des Netzwerk-Slicing, in Zusammenhang mit der Ressourcenzuweisung, gilt als Hauptschwerpunkt bei der Weiterentwicklung von statischen in flexible Mobilfunknetze.^{172 173}

4.2.3.2 Campusnetze

In Deutschland können Unternehmen und Organisationen eigene 5G-Frequenzen bei der Bundesnetzagentur beantragen.¹⁷⁴ Möglich ist die Nutzung von Frequenzen in dem Umfang von 3,7 GHz bis 3,8 GHz und sogar Frequenzen im Millimeterwellen-Bereich von 26 GHz.¹⁷⁵

Mit einem eigenen Frequenzspektrum wird es Unternehmen und Organisationen möglich sein, selbst als Netzbetreiber aufzutreten und ein eigenes 5G-Kommunikationsnetz aufzubauen und zu betreiben. Da keine Integration mit dem öffentlichen Mobilfunknetz bestehen muss, agieren diese Netze autonom vom öffentlichen Mobilfunknetz und damit unabhängig von den großen Mobilfunkbetreibern.¹⁷⁶

¹⁶⁸ Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 22.

¹⁶⁹ Vgl. Liyanage et al. (2021), S. 133.

¹⁷⁰ Vgl. Zhang et al. (08232021), S. 12.

¹⁷¹ Vgl. Barakabitze et al. (2020), S. 9.

¹⁷² Vgl. Chavhan et al., S. 14.

¹⁷³ Vgl. Rabitsch et al., S. 21.

¹⁷⁴ Vgl. Bundesnetzagentur (2021e) (online).

¹⁷⁵ Vgl. Bundesnetzagentur (2020) (online).

¹⁷⁶ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 22f.

Die privaten und lokalen Mobilfunknetze werden Campusnetz oder Non-Public Network (NPN) genannt. Gründe für den Betrieb eines Campus-Netzes, sind hohe Sicherheitsanforderungen,¹⁷⁷ hohe Ansprüche das Leistungsniveau, sowie eine gewollte Eigenverantwortlichkeit der Verfügbarkeit, der Wartung und des Betriebs.¹⁷⁸

Mitte November 2021 testen und errichten in Deutschland 169 Unternehmen ein privates Netzwerk.¹⁷⁹ Die Anzahl an Campusnetzen wird sich mit zunehmendem Reifegrad von 5G weiter erhöhen, da davon auszugehen ist, dass zukünftige Anwendungen über spezielle Anforderungen verfügen, denen öffentliche Netze nicht gerecht werden können.¹⁸⁰

Weiterhin werden viele verschiedene hybride Mischformen entstehen, die den Übergang zu einem öffentlichen Netzwerk-Slice fließend machen. Sie können aus Netzkomponenten unterschiedlicher Betreiber vor Ort bestehen, aber auch von Komponenten des öffentlichen Mobilfunknetzes bereitgestellt werden.¹⁸¹

4.2.4 Anwendungsszenarien

Als erste Mobilfunkgeneration wurde 5G nicht speziell für den Endkunden, sondern vornehmlich für den Business-to-Business-Bereich entwickelt. 5G betrifft damit viele traditionelle Dienste und Geschäftsmodelle unterschiedlicher vertikaler Industrien.¹⁸²

Unter den Begriff „vertikale Industrie“ werden laut Grotepass et al. alle „Anwendungsfelder zusammengefasst, die über die Nutzung eines Smartphones hinausgehen“.¹⁸³ Der Begriff „vertikale Industrie“ bleibt schwer fassbar. Um ihn in der nachfolgenden Arbeit zu vermeiden, wird synonym der Begriff „Anwendungsmarkt“ verwendet.

Grundsätzlich lassen sich bei der Anwendung von 5G in den jeweiligen Märkten zwei Einsatzszenarien unterscheiden: Erstens können bestehende Geräte und Anlagen von Technologiestandards, wie beispielsweise WLAN, auf die fünfte Mobilfunkgeneration

¹⁷⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 24.

¹⁷⁸ Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 28.

¹⁷⁹ Vgl. Bundesnetzagentur (2021e), S. 2.

¹⁸⁰ Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 28.

¹⁸¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 26.

¹⁸² Vgl. Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G (2018), S. 4.

¹⁸³ Vgl. Grotepass et al. (2020), S. 257.

umgerüstet werden.^{184 185} Zweitens kann das Leistungspotenzial von 5G Innovationen von Schlüsseltechnologien fördern. Diese Schlüsseltechnologien beeinflussen Anwendungen, welche entweder evolutionär weiterentwickelt werden oder sogar zu neuen revolutionären Anwendungen führen.

Potenzielle Anwendungen von 5G gibt es hunderte. Für jede einzelne Branche werden dutzende von Anwendungsgebieten, Geschäftsmodellen und Innovationspotenzialen vorhergesagt.

Einen Eindruck von der möglichen Anzahl an Anwendungen, soll Abbildung 3 aufzeigen. Jeder Anwendungsmarkt, nutzt die von 5G ermöglichten Schlüsseltechnologien, um eine große Anzahl an Anwendungen zu entwickeln. Dabei steht der Markterfolg der Geschäftsmodelle keinesfalls fest.

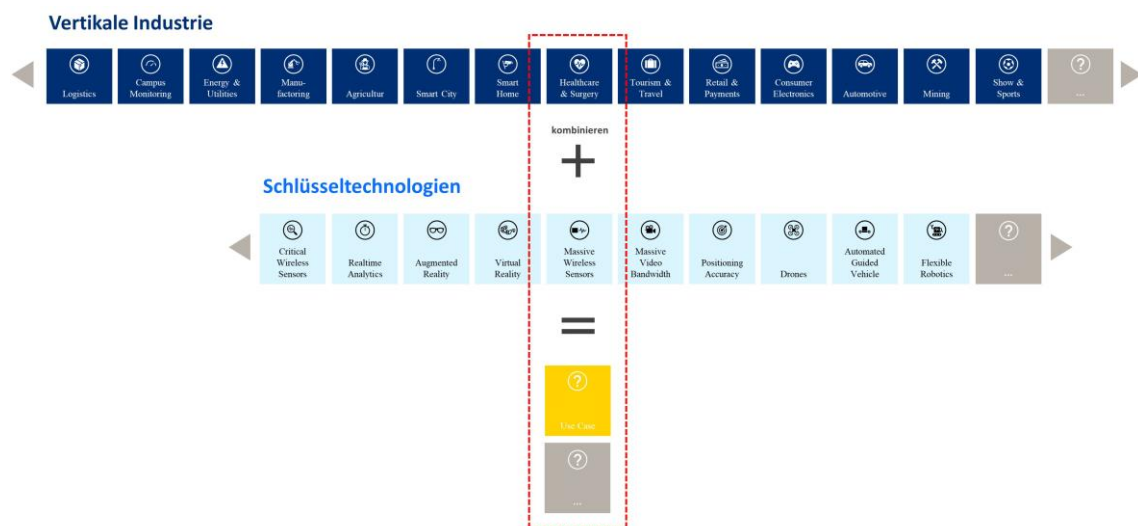


Abbildung 3: Modell der Anwendungsidentifizierung, Eigene Darstellung

Die große Anzahl an potenziellen Anwendungen macht eine vollständige Beschreibung schwierig. Nachfolgend werden daher nur die Schlüsselanwendungen der wichtigsten Märkte erläutert. Diese weisen die größten Chancen auf eine erfolgreiche technologische Weiterentwicklung auf und werden in der Literatur wiederkehrend beschrieben.

¹⁸⁴ Vgl. Grotepass et al. (2020), S. 262.

¹⁸⁵ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 22.

Laut dem Experteninterview des VDE wird „[...] das industrielle Umfeld [...] von den Experten einhellig als das vielversprechendste Anwendungsgebiet gesehen.“¹⁸⁶ Anwendungen im industriellen Umfeld werden in der Produktion, dem Campus Monitoring, sowie im Lager und der Logistik prognostiziert.¹⁸⁷

In der Produktion können die Anlagen und Maschinen mit hunderten von Sensoren und Aktuatoren ausgestattet werden, welche wiederum mit einem Mobilfunknetz kommunizieren. Dies soll nicht nur dem Personal vor Ort, sondern auch Bedienern aus der Ferne Sichtbarkeit und Kontrolle ermöglichen.¹⁸⁸

Weiterhin soll im Rahmen von Industrie 4.0 die statische Produktion durch ein räumlich flexibles Produktionssystem abgelöst werden. Eine kabellose und mobile Produktionsanlage benötigt ein stabiles und schnelles Kommunikationsnetz, das die hohen Systemanforderungen verlässlich erfüllt.¹⁸⁹

Durch das Sammeln von detaillierten Informationen ist es möglich, zahlreiche Aussagen über Industrieanlagen zu treffen, was als Campus Monitoring bezeichnet wird. Dafür werden die Maschinen mit kabellosen Sensoren ausgestattet. Möglich wird damit die frühzeitige Entdeckung von Ausfällen oder Anomalien.¹⁹⁰ Mit dem Wissen können Wartungszyklen verbessert und angepasst werden, um eine reibungslose Produktion und höhere Maschinenlebenszyklen zu gewährleisten.

Die industriellen Anwendungen im Lager und in der Logistik beziehen sich auf das Optimieren von Warendepots und dem Transport der Werkstücke.¹⁹¹ Genutzt werden dafür hauptsächlich mobile Geräte wie fahrerlose Transportsysteme (FTS), Drohnen, sowie kabellos verbundene Werkstücke oder Arbeiter.¹⁹²

Außerhalb der industriellen Fertigung sind im Einzelhandel Anwendungsmöglichkeiten von 5G zu finden. Mittels Sensoren ist der Einzelhandel in der Lage, enorme Datenmengen von Kunden und deren Verhalten zu sammeln. Dies ermöglicht beispielsweise

¹⁸⁶ Jacobfeuerborn et al. (2019), S. 2.

¹⁸⁷ Vgl. Jacobfeuerborn et al. (2019), S. 2.

¹⁸⁸ Vgl. Dell Technologies (2019), S. 7.

¹⁸⁹ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 19.

¹⁹⁰ Vgl. ebd. (2019), S. 18.

¹⁹¹ Vgl. AT&T (2018), S. 7.

¹⁹² Vgl. 5G Alliance for Connected Industries und Automation (2019), S. 15.

individuelle Produkte durch 3D-Druck oder personalisierte Werbung durch Augmented Reality (AR) oder Virtual Reality (VR). Exemplarisch wären hier virtuelle Modenschauen oder das virtuelle Umgestalten und Renovieren des eigenen Hauses.¹⁹³

Daneben ist in der Medien- und Veranstaltungsproduktion der Einsatz von 5G wahrscheinlich. Heutzutage findet schon hinsichtlich mobiler Audio- und Video-Systeme eine Entwicklung auf dem Markt der Veranstaltungs- und Konferenztechnik statt. Die eingesetzten Geräte können kabellos Produktionsmaterial aufnehmen und die Daten sofort über das 5G-Mobilfunknetz zur Weiterverarbeitung an eine Cloud leiten.¹⁹⁴

Weitere Anwendungsmöglichkeiten sind im automobilen Umfeld zu finden. Schon heute sind Funkanwendungen wie beispielsweise Notrufautomatik, Telematik, Routenplanung, Internet oder Diebstahlsschutz in Fahrzeugen implementiert. Das Fahrzeug der Zukunft wird noch weiter vernetzt sein. Die Mobilität steht dabei im Fokus. Teilautomatisierten, bis hin zu selbstfahrenden Mobilitätslösungen sollen mittel bis langfristige Ziele sein.¹⁹⁵

Die Digitalisierung der öffentlichen Infrastruktur wird in Zukunft weiter voranschreiten. Die Entwicklung wird als Smart City bezeichnet.¹⁹⁶ Hauptsächlich werden Umweltsensoren zum Einsatz kommen um IoT-Geräte wie Mülleimer, Straßenlaternen, Ampelanlagen oder Parkplätze zu überwachen. Diese IoT-Geräte sind dann mit dem 5G-Netz verbunden und sammeln Daten, die das öffentliche Leben verbessern und vereinfachen.¹⁹⁷

Wie im öffentlichen Raum werden die Gegenstände in den eigenen vier Wänden vernetzt sein. Als Sammelbegriff hat sich dafür die Bezeichnung Smart Home etabliert. Von Toastern bis zum Wasserzähler kann in alltäglichen Prozessen alles mit einem Mobilfunknetz verbunden sein und flexibel über tragbare Endgeräte gesteuert werden.¹⁹⁸

Außerhalb von Städten oder Wohngebieten digitalisiert und automatisiert die Landwirtschaft zunehmend ihre Prozesse. Optimierte mit einer großen Anzahl an vernetzten

¹⁹³ Vgl. AT&T (2018), 7f.

¹⁹⁴ Vgl. Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G (2018), S. 6.

¹⁹⁵ Vgl. ebd. (2018), S. 6.

¹⁹⁶ Vgl. Lynn et al. (2020), S. 81.

¹⁹⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 16.

¹⁹⁸ Vgl. Bök et al. (2020), S. 323f.

Sensoren werden beispielsweise die Fütterungszeiten der Tiere, Bodenanalysen, Bewässerung, Schädlingsbekämpfung sowie die Aussaat.¹⁹⁹

Zuletzt lassen sich im Gesundheitsmarkt Potenziale für 5G entdecken. Dort können die 5G-Anwendungen in die Bereiche von eHealth und Krankenhäusern aufgeteilt werden. Während im Rahmen von eHealth die Gesundheit des Patienten von tragbaren Geräten überwacht und der Gesundheitsdienstleister über mögliche Beschwerden oder Anomalien benachrichtigt wird, gehen die Trends in Krankenhäuser noch einen Schritt weiter. 5G soll vorwiegend in der Prozessautomatisierung und ferngesteuerten Chirurgie eingesetzt werden.²⁰⁰

¹⁹⁹ Vgl. Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung (2019), S. 9.

²⁰⁰ Vgl. AT&T (2018), S. 7.

5 Auswirkungen auf die Clouddienste der Zukunft

5.1 Veränderung des Infrastructure-as-a-Service-Modells

5.1.1 Netzwerk-as-a-Service und Connectivity-as-a-Service

In den vorherigen Kapiteln wurde der aktuelle Stand des Cloud Computing im Hinblick auf den Clouddienst IaaS beschrieben, anschließend die heutige und zukünftige Situation von 5G dargestellt. Auf dieser Grundlage wird jetzt die Zukunft der Clouddienste insbesondere im Hinblick auf IaaS abgeleitet.

Von besonderem Interesse ist die Entwicklung neuer Service-Modelle, die IaaS ergänzen. Im Rahmen von 5G können grundsätzlich die Service-Modelle Netzwerk-as-a-Service (NaaS) und Connectivity-as-a-Service (CaaS) unterschieden werden. In der Literatur werden beide Modelle als Unterkategorie der Service-Ebene von IaaS angesehen.²⁰¹ Die Kernidee von NaaS und CaaS beruht darauf, dass im Gegensatz zu früheren IaaS-Clouddiensten nicht nur die Hardware der Datenzentren, sondern auch die Netzwerkinfrastruktur eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung von Cloud-Services spielt. Um eine bestimmte Servicequalität (Quality of Service = QoS) oder Anwenderzufriedenheit (Quality of Experience = QoE) zu erreichen, sollten Cloud- und Netzressourcen demnach gemeinsam geplant werden. Dieser Grundgedanke trifft insbesondere auf 5G zu: In dem Kontext von 5G werden NaaS und CaaS dabei helfen, das schnelle Anbieten von Cloud-Ressourcen zu gewährleisten. Ebenso ist eine flexible und automatische Neukonfiguration der Netzinfrastruktur, ohne Unterbrechung des Betriebes und ohne spürbare Auswirkungen auf die laufenden Cloud-Anwendungen, möglich. Für die Umsetzung werden Netzarchitekturen wie Netzwerk-Slices und hybride oder private Campusnetze verwendet, welche wiederum Clouds inkludieren. Da die Clouds in das Netzwerk von 5G eingebettet werden und als Teil des Leistungsspektrums fungieren, ist es notwendig die Dienstmodelle IaaS, NaaS und CaaS gemeinsam zu betrachten.

Wie sich die Services von IaaS erweitern könnten, wird in der folgenden Abbildung 4 aufgezeigt. Grundsätzlich können drei NaaS- bzw. CaaS-Modelle unterschieden

²⁰¹ Vgl. Lins et al. (2019), S. 8.

werden: Öffentliches-Mobilfunknetz-as-a-Service, (ÖMaaS), Netzwerk-Slice-as-a-Service (NSaaS) und Campusnetz-as-a-Service (CNaaS).

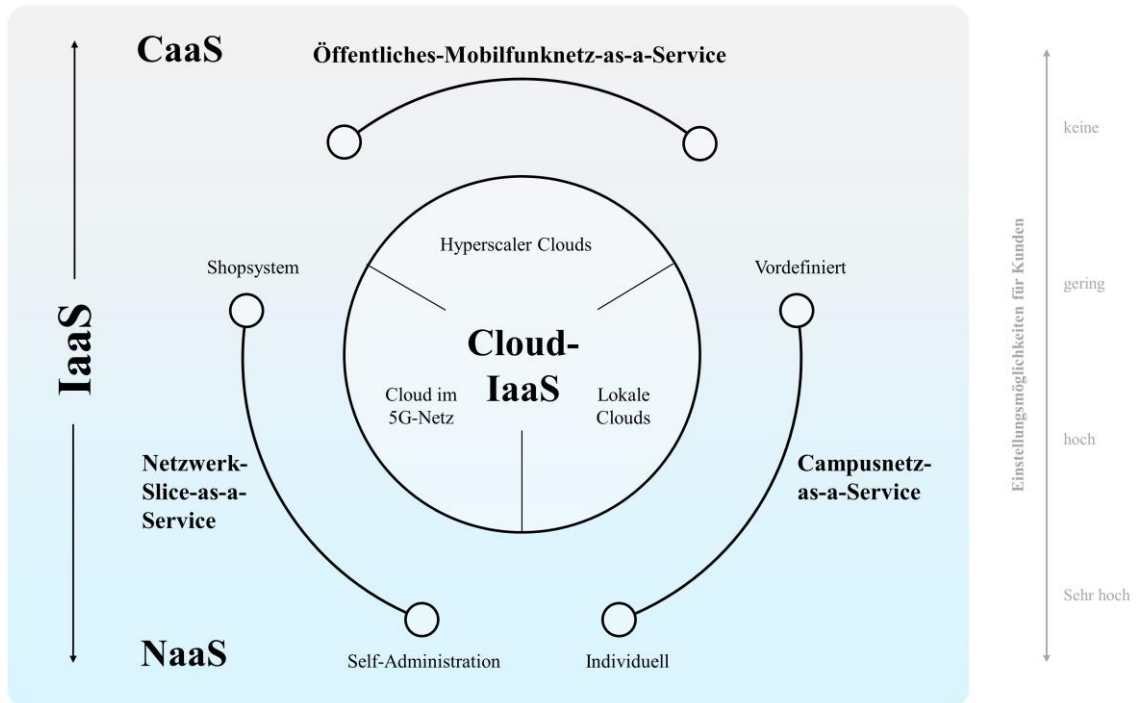


Abbildung 4: IaaS-Dienste im 5G-Ökosystem, Eigene Darstellung

Traditionell stellt der Mobilfunk für die Privatnutzer eine Telefon- oder Internetverbindung her. Dieser Service wird sich mit 5G nicht ändern. Ein solcher Netzwerkdienst kann als Öffentliches-Mobilfunknetz-as-a-Service (ÖMaaS) bezeichnet werden. Bei einem ÖMaaS wird lediglich die Konnektivität bereitgestellt. Einfluss auf die Leistung hat der Anwender nur in einem sehr geringen Ausmaß. Beispielsweise bei der Wahl des Datenvolumens oder der Datenrate. Trotzdem stagniert der Markt des ÖMaaS nicht. Auch ohne direkten Einfluss des Kunden wird der Mobilfunkbetreiber dazu angehalten, die Leistungen des ÖMaaS immer weiter zu verbessern. Nicht nur erhöhen sich die Anforderungen der Endverbraucher stetig, wie beispielsweise der Datenverbrauch,²⁰² auch sind die Betreiber dazu verpflichtet die 5G-Versorgungsaufgaben zu erfüllen.²⁰³ Während die Datenrate im ÖMaaS weiter steigt, stagniert die Entwicklung des

²⁰² Vgl. Cisco (2019), S. 3.

²⁰³ Vgl. Bundesnetzagentur (2021a) (online).

Endverbraucherpreises. Daraus lässt sich ableiten, dass er Preis für ein übertragenes Mbit beständig fällt.²⁰⁴ Mit technischem Fortschritt, wie mit der neuen 5G-Mobilfunktechnik, versuchen die Mobilfunkbetreiber die Kosten für das übertragene Mbit zu senken.

Fraglich ist, ob der ÖMaaS auch in Zukunft eigenständig existiert oder Teil des Netzwerk-Slicing wird. Bei einem solchen Szenario wäre der öffentliche Mobilfunk in Teilnetze platziert. So kann ein Slice für die Mobiltelefonie und ein Slice für bestimmte öffentliche Anwendungen wie das Streaming von Videokonferenzen bereitgestellt werden. Wie bei dem traditionellen öffentlichen Mobilfunk würden diese Slices weiterhin wenig konfigurierbar sein und dementsprechend dem CaaS zugeordnet werden.

In Zukunft wird es möglich sein, Netzwerk-Slices individuell auf die Systemanforderungen der Kunden auszurichten. Ein solcher Dienst kann Netzwerk-Slice-as-a-Service (NSaaS) bezeichnet werden. Der Produktkern eines separat angebotenen Netzwerk-Slice besteht aus der Funkabdeckung durch das Mobilfunknetz, sowie der Bereitstellung der Systemanforderungen der angeschlossenen Geräte und dem Erfüllen der notwendigen Performance (QoS/QoE) der Anwendungen.²⁰⁵ Bezogen wird eine Netzwerk-Slice durch einen sogenannten Marktplatz. Ablaufen kann dort die Bestellung eines Netzwerk-Slices entweder unter individuellen Bedingungen über ein Self-Administration Portal oder automatisiert anhand einer Art Shopsystems.

Bei einem Self-Administration Portal kann die Konfigurationen der Netzfunktionen freigewählt werden. Auch wenn der Kunde den Slice nicht selbst betreibt, hat er möglicherweise eine begrenzte Kontrolle über ausgewählte Netzfunktionen und kann sich seine Leistungsparameter damit selbst definieren und verwalten.²⁰⁶

Im Gegensatz dazu würden Shopsysteme dem Kunden lediglich die Möglichkeit bieten, einen Slice aus einer Vorauswahl direkt auszuwählen. Dieser würde vordefinierte Leistungsparametern, wie eMBB, URLLC, mMTC bereitstellen^{207 208} oder direkt 5G-

²⁰⁴ Vgl. Bundesnetzagentur (2021d), S. 73f.

²⁰⁵ Vgl. tmforum (2020), S. 29.

²⁰⁶ Vgl. ebd. (2020), S. 29.

²⁰⁷ Vgl. Slalmi et al. (2020), S. 3860.

²⁰⁸ Vgl. Samsung (2020), S. 7.

Anwendungen wie VR oder AR ansprechen.^{209 210} Der Kunde hätte dagegen wenig Möglichkeiten den Slice anzupassen. Damit wäre der Dienst im CaaS einzuordnen.

Die beiden unterschiedlichen NSaaS-Modelle würden eine große Zielgruppe abdecken. Während Self-Administration Portale im Rahmen von NaaS vornehmlich Unternehmen ansprechen, wäre die Zielgruppe eines Shopsystems heterogener. Denkbar wären neben Geschäftsmodellen im Bereich business to business (B2B) – auch Einsatzszenarien für Endverbraucher, wie business to consumer (B2C) oder business to home (B2H).²¹¹

Die Bundesnetzagentur stellt für 5G erstmalig einen Frequenzbereich für lokale Netze zur Verfügung. Für Organisationen und Unternehmen wird es damit möglich sein, ein privates 5G-Netz selbstständig zu implementieren und zu betreiben. Notwendig für einen kompletten Privatbetrieb ist eigenes Personal, besonders Spezialisten mit Fachwissen im Bereich Mobilfunk.²¹² Es ist unwahrscheinlich, dass sich Unternehmen das erforderliche Knowhow selbst aufbauen wollen. Bestätigt wird dies durch eine Umfrage der VDMA Usergroup 5G. Danach verfolgen nur 20 Prozent der befragten Unternehmen das Ziel, ihr Campusnetz selbstständig zu betreiben.²¹³ Daraus lässt sich folgern, dass zukünftig der Cloud- und Netzwerkdienst Campusnetz-as-a-Service (CNaaS) als neues Geschäftsmodell an Attraktivität gewinnt.

Für Serviceanbieter lassen sich im Rahmen von CNaaS grundsätzlich zwei Modelle bei der Bereitstellung eines Campusnetzes unterscheiden. Erstens eine vollkommen individuelle Lösung anhand der ermittelten und geplanten Leistungsparameter der Kundenanwendungen. Dieses Einsatzszenario wird durch individuelle Konfigurationsmöglichkeit bestimmt. Zweitens kann eine vordefinierte Version eines Campusmodells angeboten werden. Der Service beschränkt sich auf die Bereitstellung der Konnektivität. Der Kunde kann lediglich über begrenzte Einstellungsmöglichkeiten bestimmen.

²⁰⁹ Vgl. Barakabitz et al. (2020), S. 8.

²¹⁰ Vgl. Liyanage et al. (2021), S. 129.

²¹¹ Vgl. HKT Limited et al. (2019), S. 8.

²¹² Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 34.

²¹³ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 12.

5.1.2 Einfluss auf die Hauptakteure

Wie im vorherigen Abschnitt erwähnt, bedingt 5G das Zusammenwachsen von Cloud- und Netzwerkinfrastruktur. Um die daraus hervorgehenden NaaS- und CaaS-Modelle abzudecken, setzt es den Einsatz vieler involvierte Stakeholder voraus. Es sind nicht nur Akteure in der Wertschöpfungskette von IaaS involviert, sondern auch Stakeholder aus dem Bereich von Mobilfunk- und Netzwerktechnik. Diese Multi-Stakeholder-Umgebung löst Kooperation aus. Neben den in Abschnitt 2.3 beschriebenen Partnerschaften innerhalb der Wertschöpfungskette von IaaS, kommen weitere Kooperationen mit Drittanbietern aus der Netzwerksphäre hinzu. Zu nennen wären Partnerschaften aus dem Bereich der RAN- und SIM-Technologie, der Konnektivitätsgeräte und der Betriebsunterstützungssysteme.²¹⁴

Diese Drittanbieter werden lediglich beim Aufbau, der Planung und dem Betrieb der im vorherigen Abschnitt genannten Services unterstützend zur Seite stehen. Als unabhängige Betreiber der Netzwerk- und Clouddienste werden sie nicht auftreten. Dafür kommen im Ökosystem von 5G zukünftig drei Hauptakteure in Frage: die Mobilfunknetzbetreiber als Besitzer der öffentlichen Mobilfunkinfrastruktur, die Hyperscaler als IaaS-Marktführer und zuletzt die lokalen und regionalen IT-Anbieter, welche bis jetzt als Spezialisten der vertikalen Industrie in Erscheinung getreten sind.²¹⁵

Wenn zukünftig die Netzwerk- und Cloudmärkte zusammenwachsen, könnte bei den Mobilfunknetzbetreibern, den Hyperscalern und den IT-Anbietern eine Diversifikation hinsichtlich des weniger erschlossenen Netzwerk bzw. Cloudmarkt stattfinden. Um diese These näher zu betrachten, werden in den folgenden Abschnitten die drei Hauptakteure im Hinblick auf ihre angehende Geschäftstransformation betrachtet.

5.1.2.1 Mobilfunknetzbetreiber

Die Kernkompetenz der Mobilfunknetzbetreiber besteht daraus, um ihr öffentliches Mobilfunknetz herum Dienstleistungen für Privat- und Geschäftskunden anzubieten. Seit ein paar Jahren ist zu beobachten, dass sie ihr Geschäftsfeld auf Clouddienste ausweiten. Alle großen Mobilfunknetzbetreiber unterhalten seit mehreren Jahren

²¹⁴ Vgl. Amazon AWS (2021) (online).

²¹⁵ Vgl. Guillen et al. (2021), S. 13.

Rechenzentren und bieten Cloudlösungen im Rahmen von IaaS an. Die Deutsche Telekom betreibt eine Public Cloud in Bielefeld und Magdeburg.²¹⁶ Ebenso unterhält Vodafone die direkt am Kernnetz angeschlossene Vodafone Total Cloud in Frankfurt.²¹⁷ Der United-Internet-Konzern und Besitzer des Mobilfunknetzbetreibers 1&1 ist mit ihrer Tochtergesellschaft Ionos sogar der führende europäische Anbieter von Cloud-Infrastruktur, Cloud-Services und Hosting-Dienstleistungen.²¹⁸ Aus den Erkenntnissen kann abgeleitet werden, dass die Diversifikation hinsichtlich Cloud-Services bei den großen deutschen Mobilfunknetzbetreibern schon begonnen hat.

5.1.2.2 Hyperscaler

Anders als die Mobilfunkbetreiber agieren die Hyperscaler. Diese versuchen als Netzbetreiber in Erscheinung zu treten, um die Konnektivität zwischen dem Endkunden und der klassischen Cloud zu kontrollieren. Beobachtet lässt sich diese strategische Ausrichtung außerhalb des Mobilfunknetzes im internationalen Internetbackbone. Alle großen amerikanischen Hyperscaler besitzen mittlerweile interkontinentale Seekabel und verlegen neue: 80 Prozent der aktuellen Investitionen in Seekabel werden von Alphabet und dem SaaS-Anbieter Meta getätigt.²¹⁹

Es ist naheliegend, dass sich die Hyperscaler darum bemühen in den Mobilfunkmarkt einzutreten – das ist bisher jedoch noch nicht geschehen. Zwar ist Alphabet mit dem Tochterunternehmen Google Fi in den Vereinigten Staaten ein virtueller Mobilfunkbetreiber²²⁰, trotzdem sind die Hürden um auch als physikalischer Mobilfunknetzbetreiber aufzutreten zu hoch. Vor allem fehlende Frequenzspektren und die festen Wettbewerbsstrukturen sind für die Hyperscaler problematisch. Um sich trotzdem Zugang zum physikalischen Mobilfunkmarkt zu verschaffen, entwickeln sie neue Technologien, wie Googles Trenching (Google Fiber),²²¹ Alphabets Internet durch Ballons (Loon)²²² oder Amazons Internet durch Satelliten (Projekt Kuiper)²²³ zeigen. Bisher sind diese

²¹⁶ Vgl. Deutsche Telekom (2016) (online).

²¹⁷ Vgl. Vodafone (online d).

²¹⁸ Vgl. United Internet (online).

²¹⁹ Vgl. Prinsloo (2021) (online).

²²⁰ Vgl. Google Fi (online).

²²¹ Vgl. Google Fiber (2019) (online).

²²² Vgl. Westgarth (2021) (online).

²²³ Vgl. Amazon (2021) (online).

Aktivitäten noch nicht erfolgreich.²²⁴ ²²⁵ Trotzdem zeigen diese Projekte, dass sich die Hyperscaler langfristig eine eigene Netzinfrastruktur aufbauen wollen.

Konkrete Pläne für den deutschen Mobilfunkmarkt gibt es nicht. Die Vorteile für Hyperscaler hinsichtlich eigener Mobilfunknetze in Deutschland sind überschaubar: Im Gegensatz zu Entwicklungsländern haben Industrienationen eine sehr gute Internetanbindung, dementsprechend sind Cross-Selling-Potenziale hinsichtlich der traditionellen Cloud-Services gering.

Mit 5G werden mit NaaS und CaaS jedoch neue Geschäftsmodelle erscheinen, die wiederum für Hyperscaler interessante Service-Dienste hinsichtlich Edge und Fog Computing schaffen. Zukünftig könnten die Hyperscaler daher auf freiwerdende Frequenzspektren mitbieten und innerhalb der nächsten zehn Jahren eigene 5G-Netze betreiben. Bis dahin sind sie auf Kooperationen mit den Mobilfunknetzbetreibern und weiteren Marktteilnehmern angewiesen.

Unabhängig vom öffentlichen Mobilfunk, bilden sich um die 5G-Campusnetze ein komplett neues Geschäftsfeld. Private Campusnetze sind unabhängig von Frequenzspektren und der Netzinfrastruktur der Mobilfunknetzbetreiber. Die Hürden eines Markteintritts sind geringer. Es ist nur logisch, dass sich die Cloud-Betreiber bei Campusnetzen gegenüber den klassischen Netzanbietern als neue Konkurrenz positionieren.²²⁶

5.1.2.3 IT-Anbieter

Unternehmenseigene Netzwerke sind heutzutage keine Seltenheit. Neben virtuellen Netzwerken (VPN) auf öffentlicher Netzinfrastruktur, gibt es ebenso lokale oder hybride Varianten. Verbunden werden die Netzwerke mit Ethernet oder drahtlosen Netzwerkverbindungen wie WLAN.²²⁷ Teilweise müssen private Netzwerke auch heutzutage schon erhebliche Leistungsanforderungen zur Verfügung stellen. Besonders in der industriellen Kommunikation sind schnelle Reaktionszeiten und eine hohe Verfügbarkeit notwendig. Die soeben beschriebene unternehmensspezifische Netzwerkinfrastruktur wird meistens von lokalen, regionalen oder branchenspezifischen IT-Anbietern

²²⁴ Vgl. Google Fiber (2019) (online).

²²⁵ Vgl. Westgarth (2021) (online).

²²⁶ Vgl. Stobbe et al. (2019), S. 17.

²²⁷ Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 13.

bereitgestellt. Unter ihren Services fallen das Betreiben von Unternehmensnetzwerken, die Bereitstellung von Softwareanwendung oder das Implementieren von privaten Recheneinheiten. Ihr besonderer Marktvorteil zeichnet sich durch branchen- und industrie-spezifische Kenntnisse aus.^{228 229}

Sollte zukünftig der Bedarf nach 5G-Anwendungen innerhalb der als Kunden fungierenden Industrien steigen, werden die IT-Anbieter ihr Portfolio auf 5G-spezifische-Services erweitern.²³⁰ Da ihnen der Zugriff auf das öffentliche Mobilfunknetz verwehrt bleibt, sind Spezialisierungen und Nischenmärkte bezüglich privater Campusnetze und lokaler Cloudmodelle und damit eine Ausrichtung auf CNaaS wahrscheinlich. Um Zugriff auf erweiterte Netz- oder Cloudinfrastruktur zu bekommen, sind ebenso Kooperationen mit den beiden anderen Hauptakteuren denkbar.

5.2 Cloudmodelle innerhalb der 5G-Infrastruktur

5.2.1 Übersicht neuer Cloudmodelle

Wie im vorherigen Abschnitt angemerkt, fusionieren mit 5G die Dienstleistungen von Netzwerken und Clouds miteinander. Dadurch werden neue Cloud-Architekturen erforderlich, die innerhalb des 5G-Ökosystems erscheinen. Die Fachliteratur nennt diese „Cloudifizierung“ von 5G „Telco Cloud“. Bei diesem Marketingbegriff handelt es sich um die Transformation und Modernisierung des 5G-Netzwerkes in eine automatische, virtuelle, softwarebasierte Netzinfrastruktur, die Cloud-Computing-Services in der Nähe des Nutzers bereitstellt.²³¹

In dieser virtualisierten Netzwerkumgebung werden Clouds hinter der im Rahmen des NFV physikalisch entkoppelten User Plane implementiert.²³² Die User Plane verwaltet und prüft die Daten, bevor sie auf Grundlage der Datensteuerung, entweder direkt an die Clouds im 5G-Kernnetz oder in das Internet weitergeleitet werden.²³³ Die Clouds

²²⁸ Vgl. Guillen et al. (2021), S. 52.

²²⁹ Vgl. Futuriom 5G Catalysts (2021), S. 30.

²³⁰ Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 26.

²³¹ Vgl. Gloukhovtsev (2020), S. 32f.

²³² Vgl. Liyanage et al. (2021), S. 129ff.

²³³ Vgl. ETSI (2019a), S. 18f.

innerhalb der 5G-Infrastruktur befinden sich im sogenannten Fog - also dem Bereich zwischen dem Endgerät und der traditionellen Cloud im Internet. Wie in Unterabschnitt 4.2.2 beschrieben, werden die Clouds innerhalb der 5G-Infrastruktur virtualisiert und damit zentral steuerbar sein. Die Orchestrierung und Managementfunktionen, sowie die Anwendungsprogramme werden im Sinne von IaaS auf virtuellen Maschinen oder Containern bereitgestellt.²³⁴ Mit den Clouds innerhalb eines öffentlichen Teil- oder Hybridnetzes sollen die für 5G-Anwendungen erforderlichen Programme sehr schnell, zentralisiert und flexibel bereitgestellt werden.²³⁵

Durch die besondere Nähe zu den Endgeräten weisen die Clouds innerhalb der 5G-Infrastruktur drei elementare Vorteile auf. Erstens kann durch die naheliegende Verarbeitung der eingehende Datentransfer sofort verarbeitet werden und gelangt nicht in das dahinterliegende Netzwerk. Dadurch werden Kosten gespart und die Daten im Kernnetz oder im Internet reduziert. Als zweiter Vorteil kann die geringe Latenz genannt werden, die durch eine lokale Datenverarbeitung ermöglicht wird. Der dritte Vorteil ist die höhere Skalierung und erweiterte Lebensspanne von Endgeräten. Eine Vor-Ort-Rechenleistung, einhergehend mit einer steigenden Bandbreite, ermöglicht das gleichzeitige Kommunizieren vieler Endgeräte. Weiterhin wirkt sich eine geringe Datentransferzeit positiv auf die Energieersparnis von IoT-Geräten aus, da das Endgerät nur kurz aktiv auf eine Rückmeldung warten muss.²³⁶

Es ist offensichtlich, dass sich die soeben genannten Vorteile positiv auf die Leistungsparametern (siehe Abschnitt 4.1) von 5G auswirken. Es ist daher nicht verwunderlich, dass Edge Computing von dem Standardisierungsgremium 3GPP, als wichtiger technologischer Wegbereiter vieler späteren 5G-Anwendungen gesehen wird.²³⁷ Mit viel Aufwand werden die mobile Cloudarchitekturen von Organisationen wie die ETSI, 3GPP, GSMA und 5GAA standardisiert und definiert.²³⁸

Trotz der Bemühungen der zuständigen Mobilfunkorganisationen einheitliche Standards zu beschreiben, dominiert in der Fachliteratur keine gemeinsame Sichtweise im

²³⁴ Vgl. Reznik et al. (2018), S. 9.

²³⁵ Vgl. Sami et al. (2018), S. 8.

²³⁶ Vgl. Liyanage et al. (2021), S. 128f.

²³⁷ Vgl. Schiller et al. (2018), S. 1.

²³⁸ Vgl. Sprecher et al. (2020), S. 8ff.

Hinblick auf alle relevanten Cloud-Modelle. Um trotzdem einen Überblick über die Cloudmodelle aufzuzeigen, wurde in dieser Arbeit systematisch Fachliteratur zusammengetragen und analysiert. Grundsätzlich können vier Arten von Cloud-Plattformen benannt werden.^{239 240 241 242 243 244 245 246} Diese wurden in Abbildung 5 visualisiert. Dabei unterscheiden sich die Clouds hinsichtlich der Art ihrer Datenzentren, sowie ihrem Standort im Netzwerk. Auffallend ist die strukturiert verteilte Platzierung der Rechenzentren innerhalb des Fogs, was auch als Multi-Stakeholder-Umgebung bezeichnet werden kann. Es dominiert kein Cloudstandort. Vielmehr kann von einer gleichzeitigen oder gezielten Nutzung der Cloudmodelle ausgegangen werden. Der physische Standort im Netzwerk wird für den Dienst am Kunden explizit in den Service eingebunden. Die Clouds innerhalb der 5G-Infrastruktur greifen damit das Konzept der sogenannten Distributed Cloud auf.²⁴⁷ Es findet eine deutliche Verschiebung der normalerweise zentralisierten traditionellen Cloudressourcen näher zum Nutzer der Services statt.²⁴⁸

In den folgenden Abschnitten werden die einzelnen Cloudmodelle genauer beschrieben und anschließend ihre Vor- und Nachteile sowie ihr Einsatzpotenzial durch die Anwendungsmärkte bewertet.

²³⁹ Vgl. Telefónica (2019), S. 6.

²⁴⁰ Vgl. Sabella et al. (2021), S. 5.

²⁴¹ Vgl. Shen et al. (2020), S. 9.

²⁴² Vgl. Wang et al. (2017), S. 7.

²⁴³ Vgl. Sabella et al. (2017), S. 5.

²⁴⁴ Vgl. Gloukhovtsev (2020), S. 25.

²⁴⁵ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 9.

²⁴⁶ Vgl. Futurion 5G Catalysts (2021), S. 17.

²⁴⁷ Vgl. Costello (2020).

²⁴⁸ Vgl. Gloukhovtsev (2020), S. 29.

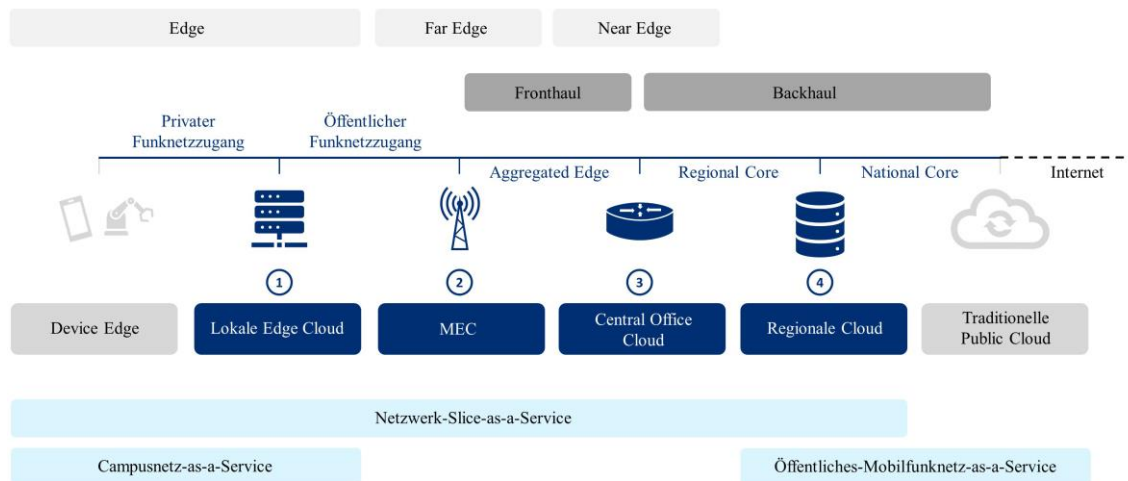


Abbildung 5: Cloudmodelle innerhalb der 5G-Netzinfrastruktur, Eigene Darstellung

5.2.1.1 Lokale Edge Cloud

On-Premise-Clouds, also lokale Rechenzentrum in Unternehmen, sind nicht neu, werden jedoch in Zukunft vermehrt in der Netzinfrastruktur von separaten und privaten 5G-Campusnetzen in Unternehmen integriert sein. Ziel der lokalen und unternehmenseigenen Datenzentren ist es, die Kommunikationsanforderungen der Anwendungen innerhalb des 5G-Campusnetzes zu gewährleisten. Der besondere Anforderungsfokus liegt laut dem BMWI auf „[...] einer hohen kommunikativen Auslastung mit vielen Systemen, sehr hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Kommunikationsdienste, sowie bei einem langfristigen Betrieb [...]“.²⁴⁹ Außerdem ist die private Netz- und Cloud-Infrastruktur auf erhöhte Datensicherheit und Datenhoheit ausgelegt.²⁵⁰ Campusnetze sind seit 2020 kommerziell verfügbar,²⁵¹ befinden sich jedoch noch in der Einführungsphase. Erst im Jahr 2025 soll das Marktpotenzial weitestgehend erschlossen werden.²⁵² Demnach kann auch bei einer lokalen Edge Cloud bis zu diesem Zeitpunkt mit einem gesteigerten Marktwachstum gerechnet werden.

Unabhängig von einem Campusnetz kann eine private Edge Cloud auch in hybriden Mischformen eines Netzwerk-Slices verbaut werden. Dafür wird eine lokale User Plane

²⁴⁹ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 23.

²⁵⁰ Vgl. ebd. (2020), S. 24.

²⁵¹ Vgl. ebd. (2020), S. 29.

²⁵² Vgl. Nokia zitiert nach Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 12.

angeschlossen, die den Traffic auswertet und gegebenenfalls an die unternehmenseigene Edge-Cloud weiterleitet.²⁵³

5.2.1.2 Multi Access Edge Cloud

Unter dem Begriff Multi-Access Edge Computing (MEC) wird eine neuartige Cloudtechnologie beschrieben. Zurzeit wird MEC von dem Europäischen Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) standardisiert.²⁵⁴ Auch wenn der Begriff „MEC“ vereinzelt in der Literatur für alle Clouds innerhalb der 5G-Infrastruktur Verwendung findet, wird in dieser Arbeit die Definition der Standardisierungsorganisationen ETSI genutzt: MEC-Plattformen befinden sich in der Nähe des Radio Access Network (RAN), entweder direkt am Rand des Mobilfunknetzwerkes an der Basisstation oder an den ersten Verbindungsstellen zum nachfolgenden Netzwerk.²⁵⁵ Beide Standort-Modelle werden in Netzwerk-Slices eingebunden. Verschiedene Slices teilen sich je nach erforderlichem Leistungsniveau im Sinne der Public Cloud einen MEC-Server. Es wird jedoch auch möglich sein, den MEC als private Cloud an bestimmten Nutzern zu vermieten.²⁵⁶

Der Vorteil von MECs am RAN ist die unmittelbare Nähe zu den Anwendern und Endgeräten. Es müssen jedoch tausende von MECs verbaut werden, um eine deutschlandweite Abdeckung zu ermöglichen. Ein Rollout wäre sehr aufwendig und teuer, dementsprechend würden nur kleinere Cloudlets, also Mini-Rechenzentren zum Einsatz kommen. Die Vielzahl an Fachartikeln und Publikationen zu dem Themenfeld zeigt jedoch die Relevanz dieses Cloudmodells für die zukünftige Mobilfunkgeneration in Bezug auf Leistungsparameter und Performance auf. Wann Kunden MECs nutzen können, ist der Literatur nicht zu entnehmen. Der Betrieb erfordert ein 5G-Stand-Alone-Netz samt virtualisierter Architektur.²⁵⁷ Auch ist die technische Entwicklung, sowie die anschließende Implementierung sehr aufwändig. Eine kommerzielle Verfügbarkeit ist daher vor dem Jahr 2024 unrealistisch.

²⁵³ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 26.

²⁵⁴ Vgl. ETSI (online).

²⁵⁵ Vgl. Gloukhovtsev (2020), S. 32.

²⁵⁶ Vgl. Mao et al. (2017), S. 3.

²⁵⁷ Vgl. Sami et al. (2018), S. 6f.

5.2.1.3 Central Office Cloud

Eine weitere Möglichkeit im Mobilfunknetz eine Cloud zu betreiben, ist der Einsatz eines Rechenzentrums im Central Office. Als Central Office Clouds werden Datenzentren bezeichnet, die direkt an dezentralen Knotenpunkten angeschlossen sind. An diesen dezentralen Knotenpunkten bzw. Central Offices läuft das Mobilfunk- und das Glasfasernetz zusammen.²⁵⁸ Sie befinden sich genau vor dem Kernnetz am Ende des Fronthauls. Damit sind die angeschlossenen Rechenzentren zwar weiter vom Kunden entfernt als die MECs, welche sich direkt am RAN befinden, jedoch noch näher als regionale Datenzentren. Die Clouds im Central Office werden durch einen Netzwerk-Slice an die Endgeräte angeschlossen.²⁵⁹ Die Hardwareeinheiten sind innerhalb eines sogenannten Server-Schranks verbaut, das verbessert das manuelle hinzufügen und entfernen physikalischer Rechen- und Speicherkapazität. Für einen flächendeckenden Betrieb werden hunderte Central Office Clouds in Deutschland notwendig sein.²⁶⁰

5.2.1.4 Regionale Cloud

Weiter von den Kunden entfernt befindet sich das „far edge“, hier sind die regionalen bzw. zentralen Clouds angesiedelt. Diese Art von Cloudmodell ist nicht neu.²⁶¹ Unabhängig vom Mobilfunk unterhalten alle Hyperscaler regionale Clouds.^{262 263 264 265} Neu ist lediglich die Anbindung an das 5G-Kernnetz. Dadurch werden die physikalischen Knotenpunkte verringert, welche die Daten zurücklegen müssen, was sich positiv auf die Leistung auswirkt. Wie auch die großen Public Clouds, bestehen die regionalen Clouds aus großen Rechenzentren mit vielen Serverschränken.²⁶⁶ In der Regel sind zwei bis drei Clouds pro Land implementiert, die jeweils eine Region abdecken.²⁶⁷

²⁵⁸ Vgl. Telefónica (2019), S. 6f.

²⁵⁹ Vgl. Gloukhovtsev (2020), S. 25.

²⁶⁰ Vgl. Telefónica (2019), S. 6.

²⁶¹ Vgl. ebd. (2019), S. 6.

²⁶² Vgl. Microsoft (2021).

²⁶³ Vgl. Google Cloud (online).

²⁶⁴ Vgl. Amazon AWS (online).

²⁶⁵ Vgl. Alibaba Cloud (online).

²⁶⁶ Vgl. Shen et al. (2020), S. 9.

²⁶⁷ Vgl. Telefónica (2019), S. 6.

Nicht betrachtet wurden in dieser Arbeit die Rechenzentren außerhalb der Mobilfunkinfrastruktur, wie die traditionellen Clouds der Hyperscaler im Internet. Da die höheren Datenraten von 5G zu mehr Datenverkehr im Internet führen,²⁶⁸ ist es wahrscheinlich, dass die Hyperscaler mit wachsenden Cloudauslastungen konfrontiert werden. Trotzdem können die gesteigerten Leistungsanforderungen nicht nur 5G zugeschrieben werden. Es ist ein weltweites Phänomen, welches nicht nur durch Technologien, datenbasierte Geschäftsmodelle, sondern auch Visionen, wie Industrie 4.0 oder IoT, ausgelöst werden. Demzufolge wurde auf die weitere Betrachtung traditioneller Cloudlösungen verzichtet.

5.2.2 Vor- und Nachteile der Cloudmodelle

Die soeben beschriebenen Cloudmodelle umfassen unterschiedliche Vor- und Nachteile für die zukünftigen Anwendungen. Nicht jedes Cloudmodell kann den notwendigen Anforderungen verschiedener Märkte gerecht werden. Bevor jedoch die Frage geklärt wird, welche Cloudmodelle für die jeweiligen Anwendungsmärkte relevant sind, ist es notwendig in diesem Abschnitt zuerst die Vor- und Nachteile der Cloudmodelle aufzulisten.

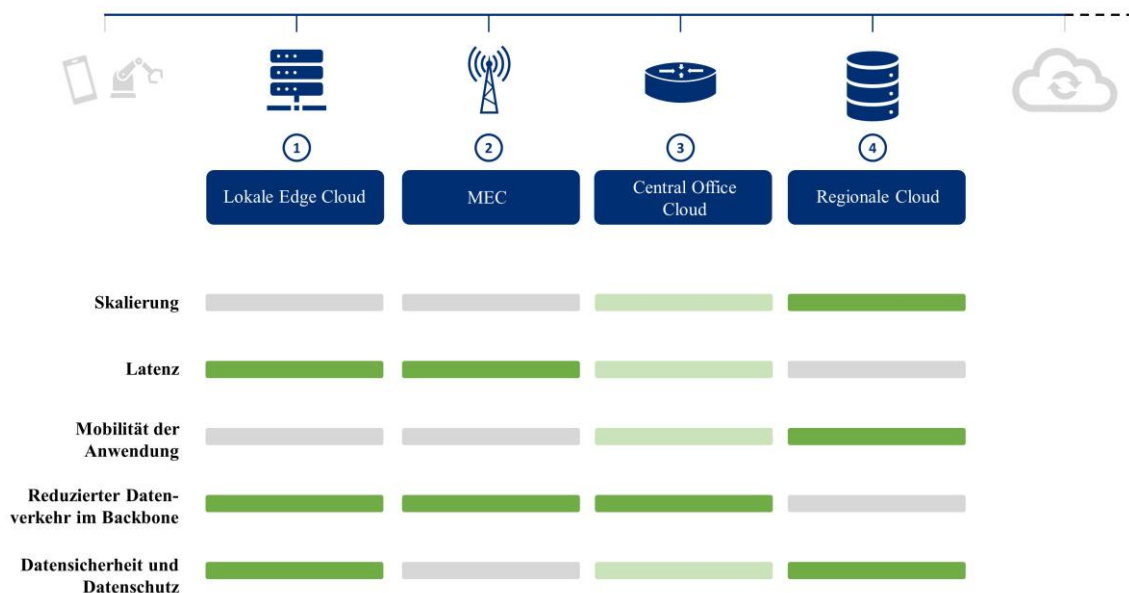


Abbildung 6: Vor- und Nachteile von Cloudmodellen innerhalb der 5G-Infrastruktur, Eigene Darstellung

²⁶⁸ Vgl. Cisco (2019), S. 3.

Skalierung

Hyperscaler nutzen abertausende Kleinstcomputer in riesigen Rechenzentren, die sie bei Bedarf zu- oder abschalten. Anforderungen nach neuen Speicher- und Rechensystem können dadurch schnell und flexibel bereitgestellt werden, was auch als „Skalieren“ von Computer-Ressourcen bezeichnet wird.²⁶⁹ Dies ist bei kleineren Rechenzentren oder sogar einzelnen Cloudlets schlecht möglich. Daraus kann abgeleitet werden, dass größere regionale Datenzentren besser skaliert werden können als Mini-Recheneinheiten im RAN oder lokal beim Kunden.

Latenz

Wie schon in Unterabschnitt 2.3.3 angedeutet, spielt der Standort der Datenzentren bei der Latenz eine entscheidende Rolle. Problematisch für die Latenz sind physikalische Beschränkungen: Weite Glasfaserwege und die Begrenzung durch die Lichtgeschwindigkeit, sowie die einzelnen Knotenpunkte des Netzwerkes erhöhen die Zeit einer Rückmeldung.²⁷⁰ Je näher das Rechenzentrum an den Endnutzer rückt, umso geringer ist die zurückgelegte Strecke und damit die End-zu-End-Verzögerung.²⁷¹ Daraus lässt sich ableiten, dass Clouds in der Nähe zum Endgerät die niedrigste Latenz aufweisen.

Mobilität der Anwendung

Die Intention des Mobilfunks ist die Möglichkeit flexibel innerhalb der Reichweite der Mobilfunkzellen zu agieren - also „mobil“ zu sein.²⁷² Während sich die Endgeräte automatisch in den jeweiligen Abdeckungsbereich ihres Mobilfunkanbieters einwählen,²⁷³ ist das Ansteuern einer lokalen Cloud problematisch. So können sich beispielsweise beim Autofahren die Edge Clouds von den Endgeräten entfernen. Umso näher also die Cloud am Nutzer ist, umso weniger weit kann er sich von ihr entfernen. Folglich eignen sich zentralisierte Clouds besser für mobile 5G-Anwendungen.

Reduzierter Datenverkehr im Backbone

²⁶⁹ Vgl. Frank et al. (2019), S. 7.

²⁷⁰ Vgl. Baun (2019b), S. 30f.

²⁷¹ Vgl. Bök et al. (2020), S. 253f.

²⁷² Vgl. Wang et al. (2017), S. 6769.

²⁷³ Vgl. Bök et al. (2020), S. 111.

Edge Computing ermöglicht eine Datenverarbeitung die nahe am Endgerät, also an der Quelle der Datenerhebung ist.²⁷⁴ Diese Daten werden von der User Plane Function (UPF) sofort ausgegliedert und gelangen damit nicht in das dahinterliegende Backbone- und Kern-Netzwerk.²⁷⁵ Datenverkehr in der Netzinfrastruktur wird reduziert – was sich besonders für Anwendungen mit hoher Datennutzung eignet. Sehr gut für die Reduzierung des Datenverkehrs eignen sich Clouds außerhalb des Backhails, wie lokale Edge Clouds und MECs oder Clouds am Central Office solange sie sich im sogenannten Fronthaul befinden.

Datensicherheit und Datenschutz

Datensicherheit und Datenschutz sind für die Betreiber von Cloud- und Netzwerkdiensten elementare Themen. Besonders öffentliche Mobilfunknetze sind anfällig gegenüber Cyberangriffen.²⁷⁶ Ebenso erfüllen die in diesem Kapitel genannten Cloudmodelle die Cybersicherheitsanforderungen unterschiedlich.

Hinsichtlich Datensicherheit und Datenhoheit sind vor allem Campusnetze mit privater Netzinfrastruktur und lokaler Edge Cloud unproblematisch.²⁷⁷ Außerdem können die Sicherheitsanforderungen in regionalen Clouds besser realisiert werden als in öffentlichen MECs am RAN oder Clouds im Central Office. In regionalen Datenzentren kann die Sicherheitssoftware zentral besser orchestriert und aktualisiert werden als in einer dezentralen Umgebung. Ebenso ist ein physischer Datenzugriff erschwert. Zuletzt sind an der Cloudinfrastruktur weniger Hersteller und Stakeholder beteiligt als am Betrieb von MECs,²⁷⁸ was das Abstimmen der Verantwortlichkeiten erleichtert und das Cyberrisiko verringert.

5.2.3 Potenzielle Nutzer der Cloudmodelle innerhalb der vertikalen Industrie

Auch wenn die Standardisierungsorganisation ETSI „eine Edge-Präsenz [...] als absolut notwendig erachtet, um bestimmte, für 5G definierte Anwendungsfälle, zu

²⁷⁴ Vgl. Gloukhovtsev (2020), S. 20.

²⁷⁵ Vgl. ETSI (2019a), S. 18.

²⁷⁶ Vgl. Rasheed et al. (2019), S. 4861.

²⁷⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 29.

²⁷⁸ Vgl. Sabella et al. (2021), S. 5f.

ermöglichen“²⁷⁹, ist eine Auflistung aller branchenweiten 5G-Anwendungen mit ihrem Einfluss auf die Clouddienste der Zukunft zum jetzigen Zeitpunkt nicht zielführend. Zum einen kann der Markterfolg der einzelnen Anwendungen nicht vorhergesagt, noch können die notwendigen Leistungsparameter der Anwendungen bzw. Cloudmodelle ausreichend bestimmt werden.

Interessant für diese Arbeit ist dennoch das Nutzerpotenzial der 5G Cloudmodelle hinsichtlich der übergeordneten Anwendungsmärkte. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, haben die einzelnen Cloudmodelle mehr oder weniger ausgeprägte Vor- und Nachteile. Diese sind teilweise für die Industrien und ihre Anwendungsfälle von großer Bedeutung. In Abbildung 7 wurde eine Einordnung der vertikalen Industrien hinsichtlich der möglichen Cloudmodelle vorgenommen.

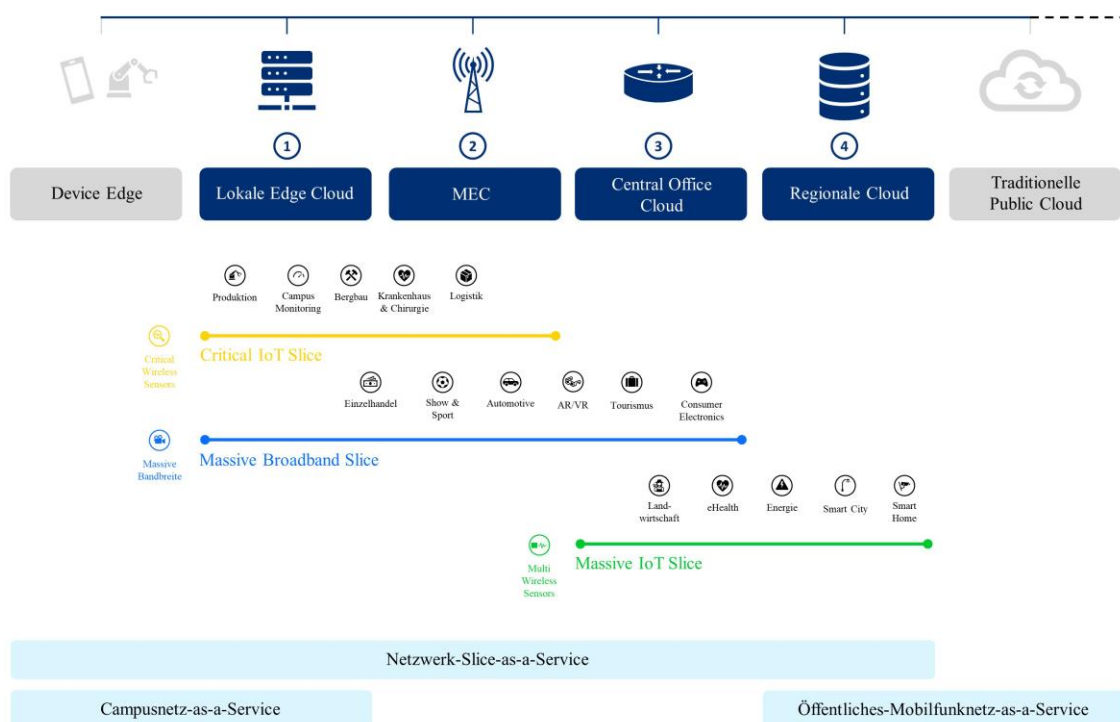


Abbildung 7: Cloudmodelle hinsichtlich ihrer Anwendungsgebiete, Eigene Darstellung

Anwendungsmärkte für lokale Edge-Cloud-Modelle

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, können lokale Edge Clouds den daran verbundenen Anwendungen sehr niedrige Latenzen bereitstellen. Der Datenverkehr wird

²⁷⁹ Reznik et al. (2018), S. 5.

reduziert und gelangt teilweise nicht in das öffentliche Mobilfunknetz. Die lokale Datenspeicherung ermöglicht den Betreiber die physische Hoheit über die Daten. Ebenso wird der Datenzugriff stark eingeschränkt, wenn die Konnektivität mit der Edge Cloud lediglich im Unternehmensnetz stattfindet, was die Cybersicherheit erhöht.²⁸⁰

Private Mobilfunknetze und lokale Clouds eignen sich besonders in der herstellenden Industrie. Durch die Verwendung kritischer Sensorik sind die Anwendungen in der Produktion sehr anspruchsvoll. So setzt eine speicherprogrammierbare Steuerung, sogenannte Regelkreise (Control-Loops),^{281 282} sowie die Bewegungsregelung (Motion Control)²⁸³ extrem niedrige Latenzen im Millisekunden-Bereich voraus. Solche Verzögerungen sind nur mit Edge Computing möglich. Unumgänglich ist ein autarker Betrieb des Mobilfunknetzes mit einer lokalen Cloud auch aus Haftungsgründen und als Gefahrenabwehr gegen Cyberangriffe.²⁸⁴

Auch wenn die „vorausschauende Wartung“ im Bereich des Campus Monitoring zum gegenwärtigen Zeitpunkt schon eingesetzt wird, soll mit 5G die Überwachung in Echtzeit mit einer stark erhöhten Anzahl angeschlossener Sensoren erfolgen. Durch die standortnahe Analyse der Daten sollen Trends und Vorhersagen getroffen werden,²⁸⁵ um proaktive Maßnahmen wie einen rechtzeitigen Austausch oder eine Wartung einzuleiten.^{286 287} Obwohl die Datenrate und Latenz keine besonders hohen Ansprüche an das Mobilfunknetz stellt, ist die eingesetzte Gerätedichte sehr hoch.²⁸⁸ Aus Haftungs- und Cybersicherheitsgründen dürfte auch hier wie in der Produktion eine private Cloud- und Mobilfunkinfrastruktur erforderlich sein.

Mobile Geräte wie Drohnen oder fahrerlose Transportsysteme²⁸⁹ agieren in einer begrenzten Reichweite. Hier ist die Mobilität besonders wichtig. Gleichzeitig müssen für immer mehr autonom agierende Geräte wie mobile Roboter eine niedrige Latenz und

²⁸⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 29.

²⁸¹ Vgl. Dell Technologies (2019), S. 7.

²⁸² Vgl. Mennig et al. (2019), S. 39f.

²⁸³ Vgl. Fachausschuss Funksysteme (2017), S. 16.

²⁸⁴ Vgl. Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G (2018), S. 5f.

²⁸⁵ Vgl. Abbas et al. (2020), S. 2f.

²⁸⁶ Vgl. Mennig et al. (2019), S. 34f.

²⁸⁷ Vgl. Fachausschuss Funksysteme (2017), S. 15.

²⁸⁸ Vgl. ebd. (2017), S. 18.

²⁸⁹ Vgl. 5G Alliance for Connected Industries und Automation (2019), S. 15.

eine hohe Datenrate möglich sein – was eine Edge Cloud voraussetzt.²⁹⁰ Heutzutage meist eingesetzte WLAN-Kommunikationsnetze sollen durch 5G substituiert werden. Ebenso könnte sich jedoch der neue Wifi Standard 6 durchsetzen, der teilweise sehr hohe Anforderungen bereitstellt.²⁹¹ Um aber eine unterbrechungsfreie Kommunikation mit einer hohen Reichweite zu gewährleisten, ist ein 5G-Netz unumgänglich.²⁹² Als logische Kommunikationslösung könnte im Unternehmen ein privates Campusnetz mit lokaler Recheneinheit implementiert sein. Um die Mobilität der Geräte zu erhöhen, könnte außerdem auf die Reichweite des öffentlichen Mobilfunknetzes zurückgegriffen werden.

Neben der herstellenden Industrie werden Campusnetze und private Clouds in Branchen eingesetzt, die für das öffentliche Netz schwer zugänglich sind oder sehr widerstandsfähige Netzwerkkomponenten benötigen, wie beispielsweise im Bergbau, auf Bohrinself.²⁹³

Weiterhin ist der Einsatz einer privaten Netz- und IT-Infrastruktur in Krankenhäusern wahrscheinlich. Prozessautomatisierung und Anomalieerkennung benötigt sehr hohe Systemanforderungen. Die ferngesteuerte Chirurgie erfordert gar Echtzeitanwendungen.²⁹⁴ Ein Ausfall der IT-Infrastruktur kann ernsthafte Folgen für den Patienten oder die Patientin haben. Die Cybersicherheit in Krankenhäusern sollte unbedingt gewährleistet sein. Dieser Umstand wird lediglich durch den Einsatz von Campusnetzen und lokalen Clouds sichergestellt.²⁹⁵

Anwendungsmärkte für dezentralisierte Edge-Cloud-Modelle

Dezentralisierte Edge Modelle wie MEC oder Central Offices werden sich für diejenigen Anwendungsmärkte eignen, für die beispielsweise aus Komplexitäts- und Kostengründen kein Campusnetz mit lokaler Cloud infrage kommt, aber trotzdem relativ anspruchsvolle Systemanforderungen erforderlich sind.

So werden besonders bei Großveranstaltungen dezentralisierte Edge-Cloud-Modelle zum Einsatz kommen. Medien- und Veranstaltungsproduktionen agieren in einer Multi-

²⁹⁰ Vgl. Abbas et al. (2020), S. 2.

²⁹¹ Vgl. Mennig et al. (2019), S. 6.

²⁹² Vgl. Jacobfeuerborn et al. (2019), S. 2.

²⁹³ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 17.

²⁹⁴ Vgl. AT&T (2018), S. 7.

²⁹⁵ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 17.

Stakeholderumgebung, die sich aus Akteuren der Audio- und Video-Produktion, Presse, Veranstalter, Gewerbetreibende und dem Publikum zusammensetzen. Dies führt zu einem örtlichen Bedarf unterschiedlicher Anforderungen, die meist eine hohe Datenrate und zuverlässiger Latenz erfordern. Um dem zu begegnen, werden sinnvolle Kombinationen aus Netzwerk-Slices und privaten Mobilfunknetzen angeboten werden.²⁹⁶ Beispielsweise können durch die Nutzung hybrider Cloudmodelle Audio- und Video-Dateien kabellos aufgenommen, lokal abgespeichert und direkt bearbeitet werden, ohne das Backbone zu belasten. Gleichzeitig kann eine dezentrale Cloudinfrastruktur auch für Publikumsanwendungen verwendet werden. Denkbar wären Endgerät-Services wie beispielsweise Videowiederholungen inklusive verschiedener Blickwinkel, ohne das öffentliche Mobilfunknetz mit dem Datenvolumen zu belasten.

Der Einsatz der Technologien Virtual (VR) und Augmented Reality (AR) wird in sehr vielen Märkten und Branchen vorgesehen. Die Anwendungsgebiete sind umfangreich. Beispielsweise können Arbeitnehmer im industriellen Umfeld mit AR unterstützt werden oder in der Forschung und Entwicklung Produkte virtuell konstruieren.²⁹⁷ Mit VR wird es möglich sein, im Tourismus und Einzelhandel personalisiertes Marketing zu betreiben.²⁹⁸ Im Büroalltag könnten virtuelle Konferenzen stattfinden.²⁹⁹ Ebenso können AR- und VR-Anwendungen von Endanwendern für das Streamen von Video- oder Spielmateriale eingesetzt werden.³⁰⁰ Aus der Vielzahl von Anwendungen ist ersichtlich, dass eine unabhängige Behandlung der Technologie notwendig ist, um die Ergebnisse der einzelnen Märkte nicht zu beeinflussen. Noch berechnen die meisten AR- und VR-Anwendungen ihre Daten auf dem Gerät selbst. Dementsprechend groß sind die Brillen, um die erforderliche Rechenleistung zu verarbeiten.³⁰¹ Sollte in Zukunft die Datenbearbeitung extern stattfinden und nur noch mittels einem Stream zur Verfügung gestellt werden, könnte sich die Größe der Brillen reduzieren. Benötigt werden Datenraten von mehreren hundert Mb/s. Außerdem ist eine niedrige Latenz notwendig, um der

²⁹⁶ Vgl. Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G (2018), S. 6.

²⁹⁷ Vgl. Mennig et al. (2019), S. 27f.

²⁹⁸ Vgl. HKT Limited et al. (2019), S. 24.

²⁹⁹ Vgl. ebd. (2019), S. 31.

³⁰⁰ Vgl. Ganchev et al. (2018), S. 37f.

³⁰¹ Vgl. Abbas et al. (2020), S. 3.

sogenannten „Virtual Reality Sickness“ zu begegnen.³⁰² Die hohen Rechenanforderungen machen eine edge-nahe Verarbeitung, beispielsweise in einer lokalen Cloud, unumgänglich. Das AR- und VR-Anwendungen künftig ebenso auf einer MEC installiert werden sollen, zeigt eine Studie der ETSI.³⁰³ Besonders im privaten oder mobilen Gebrauch ist dies erforderlich. Hier werden keine privaten Clouds genutzt und es ist erforderlich auf die öffentliche Mobilfunkinfrastruktur sowie den MECs zurückzugreifen.

Automatisiertes oder teilautomatisiertes Fahren bedingen hohe Anforderungen. Jedes Fahrzeug ist mit sehr vielen Sensoren ausgestattet, was eine hohe Datenlast impliziert. Die globale, industrieübergreifende Organisation 5GAA aus dem Bereich Kraftfahrzeuge als auch der Kommunikationsindustrie schätzen den Datenverbrauch eines automatisierten Fahrzeugs auf 4.000 GB am Tag. Das wären mehr als 3000 Personen am Tag verbrauchen würden.³⁰⁴ Um auf Umweltgegebenheiten zu reagieren, müssten Rückmeldung von den Rechensystemen in Echtzeit erfolgen. Auch wenn in der Literatur automatisiertes Fahren als 5G-Anwendungsgebiet genannt wird,^{305 306} ist es unwahrscheinlich, dass 5G einen großen Einfluss auf die Entwicklung ausübt. In Zukunft wird es nicht auf jeder Straße die Mindestqualität an Funk- und Cloud-Verbindung geben können, um automatisiertes Fahren durch 5G zu ermöglichen. Hier wird die Berechnung mit großer Wahrscheinlichkeit in den Fahrzeugen stattfinden. Jedoch wird das sogenannte „Platooning“, also das teilautomatisierte Fahren im Fahrzeugverbund,³⁰⁷ sowie erweiterte Fahrassistenz und Anwendungsfälle im Bereich der Sicherheit von 5G profitieren.³⁰⁸ Auch hier werden großen Datenmengen verarbeitet, die das Kernnetz überfordern könnten – eine edge-nahe Datenverarbeitung innerhalb des Fronthauls ist anzunehmen.

Anwendungsmärkte für regionale Cloud-Modelle

Die Einbindung von regionalen Clouds in die Mobilfunkinfrastruktur schafft eine sehr hohe virtuelle Skalierung, wodurch die Cloudressourcen bei Bedarf schnell erhöht oder

³⁰² Vgl. Dell Technologies (2019), S. 9.

³⁰³ Vgl. Hu et al. (2015), S. 8f.

³⁰⁴ Vgl. Sabella et al. (2017), S. 12.

³⁰⁵ Vgl. Nokia (2016), S. 7.

³⁰⁶ Vgl. Birch (2019) (online).

³⁰⁷ Vgl. Jacobfeuerborn et al. (2019), S. 2.

³⁰⁸ Vgl. Sabella et al. (2017), S. 7f.

verringert werden können. Außerdem bieten regionale Clouds eine entsprechende Datensicherheit und bringt den Anwendungen eine gewisse Mobilität. Auch wenn die Latenz höher ist als bei den anderen Cloudmodellen, wird sie immer noch geringer ausfallen als bei den heutzutage durch das Internet angeschlossenen traditionellen Clouds.³⁰⁹

Der massenhafte Einsatz von Anwendungen, die kostengünstige und energieeffiziente Sensoren voraussetzen, sind in den Märkten von Smart City,³¹⁰ Smart Home, eHealth und Energie zu finden. Diese Sensoren werden niedrige Datenraten verwenden. Eine hohe Latenz ist nicht ungewöhnlich.³¹¹ Entscheidend ist vielmehr eine massenhafte Vernetzung, sowie eine gute Abdeckung und Reichweite durch eine niedrige Frequenz. Lokale Datenverarbeitung ist zweitrangig. Auch wenn beispielsweise im Rahmen von Smart Home oder eHealth der Datenschutz äußerst sensibel ist, lässt die Ausdehnung des abzudeckenden Gebietes am Einsatz eines Campusnetzes zweifeln. Auf dem Energiemarkt prognostiziert das Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G den Einsatz eines mMTC Netzwerk-Slice, um regionale Energienetzstrukturen zu verbinden.³¹² In Verbindung mit einer datensicheren regionalen Cloud wäre es ein mögliches Szenario auch für Smart City, Smart Home und eHealth.³¹³ Fraglich ist, ob ein massiver Einsatz von IoT-Geräten und Sensoren das Kernnetz überlasten würde. Tatsächlich zeigt die Publikation von Liyanage den Einsatz von IoT in einer MEC auf.³¹⁴ Jedoch könnte durch den Einsatz von Edge-Clouds zwei Probleme entstehen. Erstens wäre eine flexible Skalierung der Hardware bei steigendem Ressourcenbedarf, also einer steigenden Anzahl von IoT-Geräten, nicht so einfach umsetzbar wie bei einer regionalen Cloud. Weiterhin wäre die Datensicherheit schwer realisierbar. Ob der Einsatz von anforderungsgeringen IoT-Anwendungen unbedingt MECs bzw. Clouds am Central Office voraussetzt oder regionale Clouds ebenso die Anforderungen abdecken können, muss weiter beobachtet werden und ist ein guter Ansatzpunkt für weiterführende Forschung.

³⁰⁹ Vgl. Aviatrix Systems (2021a) (online).

³¹⁰ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 6.

³¹¹ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 19.

³¹² Vgl. Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G (2018), S. 6.

³¹³ Vgl. Liyanage et al. (2021), S. 129.

³¹⁴ Vgl. ebd. (2021), S. 133.

5.3 Neue Betreibermodelle im Kontext von 5G

5.3.1 Methodik

Trotz der in den vorherigen Abschnitten detailliert beschriebenen Service- und Cloudmodelle ist weiterhin fraglich, wie genau die Betreibermodelle der Cloud- und Netzinfrastruktur in der Praxis aussehen können. Diese Frage soll nun beantwortet werden.

Dafür werden den grundsätzlichen Ebenen des Cloud- und Netzwerkökosystems methodisch Hauptakteure mit unterschiedlichen Verantwortlichkeiten zugewiesen, Betreibermodelle abgeleitet und anschließend diskutiert.

Welche Ebenen genau betrachtet werden, zeigt Abbildung 8 auf. Für das Ökosystem des Mobilnetzes kann normalerweise das grundlegende Modell des ETSI herangezogen werden.³¹⁵ Dies beschränkt sich jedoch ausschließlich auf NFV. Um gleichfalls SDN und damit die speziellen 5G-Services wie Netzwerk-Slicing abzudecken, wurde es um das Modell von Murillo et al. erweitert³¹⁶ und für eine bessere Darstellung in seiner Komplexität abstrahiert.

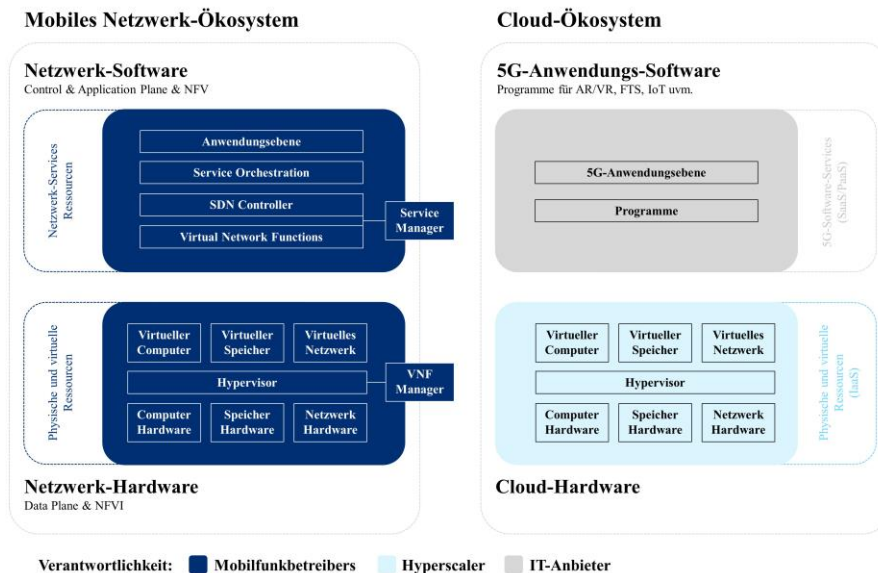


Abbildung 8: Ebenen des Cloud- und des mobilen Netzwerk-Ökosystems, Eigene Darstellung nach ETSI (2019b) und Murillo et al. (2017)

³¹⁵ Vgl. ETSI (2019b), S. 6f.

³¹⁶ Vgl. Murillo et al. (2017), S. 6.

5.3.2 Modell 1: Netzwerk-Slice durch Kooperationen

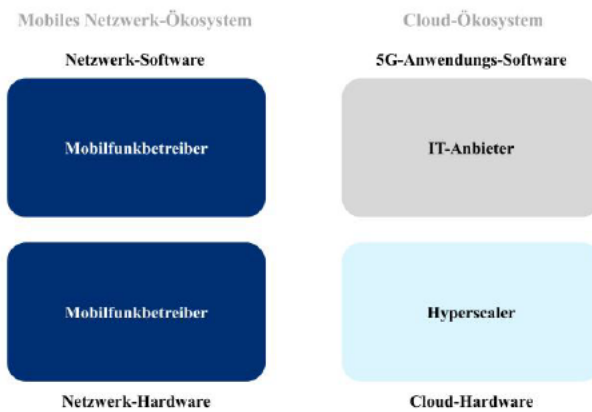


Abbildung 9: Verantwortlichkeiten in Modell 1: Netzwerk-Slice durch Kooperationen, Eigene Darstellung

Betreiber:	Mobilfunknetzbetreiber und Hyperscaler
Aggregator und Marktplatzbesitzer	Mobilfunknetzbetreiber und Hyperscaler
Cloudmodell:	Cloud am Public Office, Regionale Cloud
Service-Modell:	Netzwerk-Slice-as-a-Service
Anwendungsmärkte:	eHealth, Smart Home, Smart City, Energie, Landwirtschaft
Voraussichtliche kommerzielle Verfügbarkeit	2023
Voraussichtliche Reifephase	2028

Tabelle 1: Eigenschaften von Modell 1: Netzwerk-Slice durch Kooperationen, Eigene Darstellung

Das erste Betreibermodell zeigt auf, dass alle Hauptakteure bei ihren Kernkompetenzen bleiben können: Die Mobilfunkbetreiber besitzen das Netzwerk, die Hyperscaler unterhalten die Hardware der Clouds und die IT-Anbieter werden im Rahmen von SaaS die Software für die 5G-Anwendungen auf der Cloud bereitstellen.

Ein wahrscheinliches Betriebsszenario wäre ein im öffentlichen Mobilfunknetz des Mobilfunkbetreibers eingerichteter Netzwerk-Slice. Für dieses Bereitstellungsmodell werden Kooperationen zwischen dem Mobilfunkbetreiber und dem Hyperscalern geschlossen, um den externen Clouds den Zugang zum Mobilfunknetz zu ermöglichen. Denkbar sind Edge-Cloud-Standorte von Hyperscalern am Central Office sowie größere Rechenzentren an strategisch wichtigen regionalen oder zentralen Positionen.

Während die Mobilfunkbetreiber den Slice mittels eines Self-Administration Portals beziehungsweise Shopsystem anbieten, ist ein solcher Zugang auch für die Kunden der Public Cloud-Betreiber möglich. In diesem Szenario werden die Mobilfunknetzbetreiber ihre Netzwerk-Slices direkt an den Hyperscaler vermieten. Dieser kann als Aggregator die Netzwerk- und Clouddienste selbst zu einem Mehrwert zusammenfassen und auf einer eigenen Vertriebsplattform anbieten. Möglich ist damit eine Geschäftsbeziehung in Form von B2B2X.

Fraglich ist nun, wie wahrscheinlich ein solches Betreibermodell sein wird. Tatsächlich besitzen unabhängig von 5G alle Hyperscaler regionale Clouds fast überall auf der Welt. Beispielsweise unterhält Microsoft Azure 61 regionale Datenzentren,³¹⁷ Google betreibt 28 regionale Cloud-Standorte,³¹⁸ Amazon unterhält Rechenzentren in 25 Regionen,³¹⁹ auch Alibaba ist in 25 Regionen aktiv.³²⁰ Die Standortwahl der großen Cloud-Betreiber, die normalerweise auf niedrige Energie- und Stromkosten ausgelegt sind, wird von den Vorteilen eines regionalen Standorts überwogen. Nur in regionalen Clouds können Datenschutz oder industrielle Richtlinien umgesetzt und Protektionismus begegnet werden.³²¹ Ein weiteres starkes Wachstum regionaler Rechenzentren ist anzunehmen. Allein Google hat neun weitere regionale Cloud-Standorte angekündigt.³²²

Es ist anzunehmen, dass die Hyperscaler ihre Services auch weiter an der Edge skalieren wollen. So ist aktuell schon zu beobachten, dass sich die Hyperscaler an Netzwerkknoten einmieten. Google hat mittlerweile 148 Edge Standorte,³²³ Amazon 265³²⁴ und Alibaba hat Edge-Datenzentren an über 2800 Edge-Knoten.³²⁵ Denkbar wären also auch Clouds im Central Offices die von Hyperscalern betrieben werden.

Damit die Clouds Zugang zum Netzwerk-Slices und damit eine direkte Anbindung an den Kunden bekommen, werden Kooperationen zwischen den Mobilfunknetzbetreibern und Hyperscalern für das hier dargestellte Betreibermodell unausweichlich. Solche Kooperationen werden aktuell auch schon unabhängig von der fünften Mobilfunkgeneration geschlossen. So hat beispielsweise Vodafone eine Geschäftsvereinbarung mit Alibaba, um die Rechenzentren in ihre Services mit einzubinden.³²⁶ Weitere Kooperationen sind daher im Hinblick von 5G anzunehmen.

³¹⁷ Vgl. Microsoft (2021) (online).

³¹⁸ Vgl. Google Cloud (online).

³¹⁹ Vgl. Amazon AWS (online).

³²⁰ Vgl. Alibaba Cloud (online).

³²¹ Vgl. Kommerskollegium National Board of Trade (2012), S. 11.

³²² Vgl. Google Cloud (online).

³²³ Vgl. ebd. (online).

³²⁴ Vgl. Amazon AWS (online).

³²⁵ Vgl. Alibaba Cloud (online).

³²⁶ Vgl. Vodafone (online a).

5.3.3 Modell 2: Netzwerk-Slice durch Mobilfunknetzbetreiber

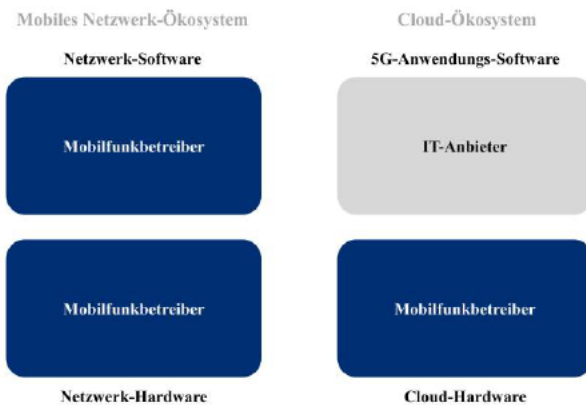


Abbildung 10: Verantwortlichkeiten in Modell 2: Netzwerk-Slice durch Mobilfunkbetreiber, Eigene Darstellung

Im Gegensatz zu dem vorherigen Betreibermodell, kann der Mobilfunkbetreiber seine eigene Cloudinfrastruktur an den Netzwerk-Slice anbinden. Somit unterliegt die komplette Verantwortung der Netzwerk- und Cloud-Hardware dem Mobilfunkbetreiber. Lediglich die Software der 5G-Anwendungen werden von einem Drittanbieter bereitgestellt.

Welche Cloudmodelle im zweiten Betreibermodell eingesetzt werden obliegt der strategischen Ausrichtung des Mobilfunkbetreibers. In Form einer Multi-Cloud-Strategie sind ebenso mehrere Cloudmodelle gleichzeitig denkbar.

Relativ unproblematisch, kann eine regionale Cloud direkt an das Kernnetz angeschlossen werden. Wie in Unterabschnitt 5.1.2.1 über die Geschäftstransformation der Hauptakteure ersichtlich wurde, besitzt jeder große Mobilfunkbetreiber mindestens ein eigenes Cloudzentrum. Da Vodafone lediglich ein Datacenter in Frankfurt besitzt³²⁷ und die deutsche Telekom nur jeweils eines in Biele und Magdeburg³²⁸ unterhält,

Betreiber:	Mobilfunknetzbetreiber
Aggregator und Marktplatzbesitzer	Mobilfunknetzbetreiber
Cloudmodell:	MEC, Cloud am Central Office, Regionale Cloud
Service-Modell:	Netzwerk-Slice-as-a-Service
Anwendungsmärkte:	eHealth, Smart Home, Smart City, Energie, Landwirtschaft, Logistik, Einzelhandel, AR & VR, Consumer Electronics, Automotive, Show und Sport, Tourismus
Voraussichtliche kommerzielle Verfügbarkeit	2023, mit MEC 2025
Voraussichtliche Reifephase	2028, mit MEC 2030

Tabelle 2: Eigenschaften von Modell 2: Netzwerk-Slice durch Mobilfunknetzbetreiber, Eigene Darstellung

³²⁷ Vgl. Vodafone (online d).

³²⁸ Vgl. Deutsche Telekom (2016) (online).

könnten weitere regionale Datenzentren entstehen. Möglich wäre zusätzlich eine dezentralisierte Ausrichtung an wichtigen Netz-Knotenpunkten, den Central Offices.

Ein weiteres Betriebsszenario wäre die Nutzung der MECs nahe oder direkt am RAN. Dieses Betreibermodell ist im Rollout mit Abstand das aufwändigste. Es müssten tausende von MECs verbaut werden, um eine deutschlandweite Abdeckung zu gewährleisten. Die Kosten dafür könnten ähnlich hoch sein, wie der jetzige 5G-Ausbau. Trotzdem zeigen zahlreiche Publikationen und Studien zu dem Thema eine erhebliche zukünftige Relevanz. Ein Betriebsszenario, in dem fast jeder Antennenstandort Zugang zu einem oder mehreren MECs hat, würde zumindest theoretisch die von der ITU definierten niedrigen Latenz flächendeckend bereitstellen können.

Welches Cloudmodell tatsächlich eine weite Verbreitung erfährt, ist wie schon angemerkt, stark von der Strategie der Mobilfunkbetreiber abhängig. Berücksichtigt werden sollten nicht nur der Aufwand für den Ausbau der Cloud-Infrastruktur, ebenso relevant ist der zukünftige Markterfolg der 5G-Anwendungen. Daher ist es dringend erforderlich die Marktentwicklung zu beobachten, um Rückschlüsse auf die benötigte Cloud-Infrastruktur zu erhalten. Als größter europäischer Cloudbetreiber hat die Drillisch Netz AG 1&1 bei seiner eigenbetriebenen Cloudlösung den größten Marktvorteil. Jedoch ist der 5G-Ausbau bei 1&1 im Gegensatz zu dem der vier anderen Mobilfunknetzbetreiber am wenigsten weit fortgeschritten.³²⁹

Der große Vorteil einer eigenbetrieblichen Lösung, liegt in der unabhängigen Bereitstellung des QoS bzw. QoE, der als Rahmenvertrag mittels eines Service Level Agreement (SLA) abgeschlossen wird. Ohne weitere involvierte Parteien kann der darin definierte Leistungsumfang leichter bereitgestellt werden, ohne dass Unterverträge notwendig sind.

³²⁹ Vgl. DSLWEB (2021a) (online).

5.3.4 Modell 3: Hybrides Campusnetz durch viele Hauptakteure

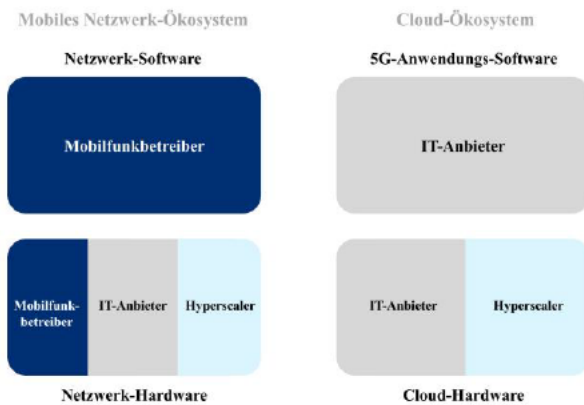


Abbildung 11: Verantwortlichkeiten in Modell 3: Hybrides Campusnetz durch viele Hauptakteure, Eigene Darstellung

Abbildung 11 soll darstellen, dass neben dem Netzwerk-Slice im öffentlichen Mobilfunknetz und dem privaten Campusnetz im Eigenbetrieb zahlreiche Mischformen an Servicemodellen existieren, die sich teilweise überschneiden und sich in unterschiedlichen Betreibermodellen ausdrücken.

Bei der ersten hybriden Variante werden nur Teile der Mobilfunkinfrastruktur vom Mobilfunkbetreiber gestellt und durch Teile anderer Betreiber ergänzt. Beispielsweise durch Funkbasisstationen, um die Abdeckung und Reichweite zu erhöhen. Beim sogenannte Small-Cell-Gateway-Modell werden hier Small Cells hinzugefügt.³³⁰

Umgekehrt könnte nur die Funkbasisstationen von dem Mobilfunknetzbetreiber bereitgestellt werden. Beispielsweise wenn das 5G-Kernnetz und die Cloudinfrastruktur von einem IT-Anbieter oder Hyperscaler betrieben wird. Dieses Einsatzszenario wird als RAN-Sharing-Modell bezeichnet.³³¹

Betreiber:	Mobilfunkbetreiber, Hyperscaler und IT-Anbieter
Aggregator und Marktplatzbesitzer	Mobilfunknetzbetreiber oder IT-Anbieter
Cloudmodell:	Lokale Edge Clouds, MEC, Cloud am Public Office, Regionale Cloud
Service-Modell:	Hybrides Campusnetz-as-a-Service
Anwendungsmärkte:	eHealth, Smart Home, Smart City, Energie, Landwirtschaft, Logistik, Einzelhandel, AR & VR, Consumer Electronics, Automotive, Show und Sport, Tourismus
Voraussichtliche kommerzielle Verfügbarkeit	2020, mit MEC 2025
Voraussichtliche Reifephase	2025, mit MEC 2030

Tabelle 3: Eigenschaften von Modell 3: Hybrides Campusnetz durch viele Hauptakteure, Eigene Darstellung

³³⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 28.

³³¹ Vgl. ebd. (2020), S. 27.

Bei einem hybriden Campusnetz ist es ebenso möglich, dass das Unternehmen oder ein IT-Anbieter den Betrieb der kompletten Infrastruktur selbst übernimmt. Dies kann beispielsweise bei größeren Unternehmen mit eigener IT-Abteilung geschehen. Jedoch kann der Netzsteuerungsverkehr, also die Software im Netzwerk, vom Mobilfunknetzbetreiber gemanagt werden.³³² Dieser wird mit den Netzfunktionen seiner Slices wie dem Unified Data Management (UDM) oder dem User Plane Function (UPF) schon das Knowhow eines erfolgreichen Betriebes besitzen. Zu diesem Betreibermodell schreibt das BMWI, dass „die Anlagen die Vorteile des örtlichen 5G-Campusnetzes (eine völlig eigenständige Kommunikationsinfrastruktur) mit dem Komfort eines extern gemanagten Systems verbindet.“³³³

Auch das Ökosystem der Cloud kann zahlreiche Mischformen an Betriebsakteuren hervorbringen. Anzumerken ist hier, dass aktuell das Knowhow bei Anbietern von Netzwerk- oder Cloudtechnik ungleich verteilt ist, und daher mutmaßlich von unterschiedlichen Akteuren betrieben wird. Dies führt in der Praxis zu neuen Partnerschaften, die teilweise auch schon geschlossen wurden: Beispielsweise bietet Microsoft mit seiner Cloud-Computing-Plattform Azure eine private MEC an. Um diese lokale Cloud-Plattform in Unternehmen zu implementieren, wird auf die Fachkenntnisse von Mobilfunkbetreibern zurückgegriffen, welche den Betrieb der Mobilfunkinfrastruktur übernehmen. Microsoft hat dafür Kooperationen in Europa mit Telefónica und Vodafone geschlossen.³³⁴ Weiterhin werden Hyperscaler und Mobilfunkbetreibern ebenso mit IT-Anbieter zusammenarbeiten. Insbesondere da IT-Anbieter spezielles Knowhow, lange Partnerschaften und umfassende Verträge mit den Unternehmen der Anwendermärkte unterhalten. Tätig werden die IT-Anbieter auch als sogenannter „neutral host“. Bei diesem Betreibermodell agieren die IT-Anbieter als Vermittler zwischen der Organisation bzw. dem Unternehmen und öffentlichen Netzbetreibern und sind für die Integration von lokaler, sowie öffentlicher Infrastruktur verantwortlich.³³⁵

Der individuelle Charakter der hybriden Betreibermodelle erlaubt es, branchenspezifische Anforderungen und Lösungen bereitzustellen. Jedoch sollten Kommunikations-

³³² Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 26ff.

³³³ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 27.

³³⁴ Vgl. Microsoft Azure (2021) (online).

³³⁵ Vgl. Grotepass et al. (2020), S. 281.

und Datensicherheitsanforderungen in Form von Dienstgütereinbarung mit jedem Partner abgestimmt werden - was bei der Multistakeholder-Umgebung kein einfaches Unterfangen ist.

5.3.5 Modell 4: Campusnetz durch Mobilfunknetzbetreiber

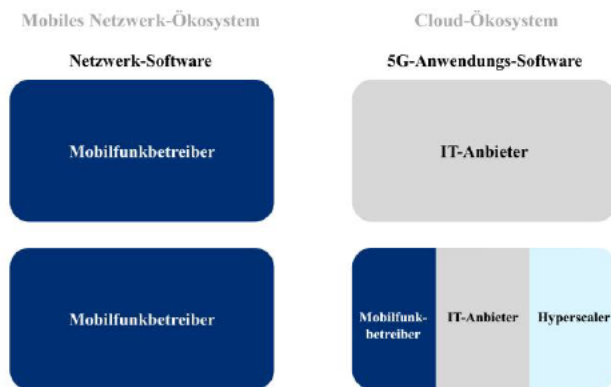


Abbildung 12: Verantwortlichkeiten in Modell 4: Campusnetz durch Mobilfunknetzbetreiber, Eigene Darstellung

Die beiden letzten Betreibermodelle 4 und 5 werden im Rahmen des Campusnetz-as-a-Service angeboten. Bei Modell 4 wird die Mobilfunk- und Cloudinfrastruktur sowie die virtualisierte Netzsoftware vollständig von einem Mobilfunkbetreiber verwaltet. Darunter fällt die Hard- und Software des Netzwerkes, der Funknetzzugang, das Transportnetz, das Kernnetz und die virtualisierte Steuerungs- und Managementebene.³³⁶ Es ist ebenso möglich eine lokale Funklizenz zu verwenden jedoch nicht dringend erforderlich.³³⁷

Fraglich ist, wie wahrscheinlich ein Szenario sein wird, bei dem der Mobilfunkanbieter den Aufbau und Betrieb eines Campusnetz-Service übernimmt. Tatsächlich betitelt sich 1&1 auf ihrer Website bei „lokalen 5G-Lösungen als führend“.³³⁸ Auch andere etablierte

Betreiber:	Nur Mobilfunkbetreiber oder in Kooperation mit Hyperscalern und IT-Anbietern
Aggregator und Marktplatzbesitzer	Mobilfunknetzbetreiber
Cloudmodell:	Lokale Edge Cloud, MEC
Service-Modell:	Campusnetz-as-a-Service
Anwendungsmärkte:	Produktion, Campus Monitoring, Mining, Krankenhaus, Logistik, Einzelhandel, AR & VR, Show & Sport, Tourismus
Voraussichtliche kommerzielle Verfügbarkeit	2020, mit MEC 2025
Voraussichtliche Reifephase	2025, mit MEC 2030

Tabelle 4: Eigenschaften von Modell 4: Campusnetz durch Mobilfunknetzbetreiber, Eigene Darstellung

³³⁶ Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 28.

³³⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 22f.

³³⁸ Vgl. Telefónica (online).

Mobilfunkanbieter, wie die Deutsche Telekom, sind daran interessiert neben dem Betrieb der Netzwerk-Slices auch den der privaten 5G-Campusnetze inklusive der lokalen MECs zu übernehmen. Die Senior Vice Präsidentin für 5G-Campusnetze der Deutschen Telekom Antje Williams sprach in einem Interview mit Mobile World Live davon, dass der Aufbau und Betrieb eines 5G-Campusnetzes das Portfolio des Unternehmens erweitern soll. Mit dem bloßen Anbieten von Knowhow und als Zwischenhändler für Hardware will sich die Deutsche Telekom nicht zufriedengeben.³³⁹ Auch Vodafone hat das Betreibermodell für sich entdeckt. Mit „Business Campus Isolated“ bietet Vodafone Modell 4 schon an.³⁴⁰ Es lässt sich daraus ableiten, dass die Mobilfunknetzbetreiber nicht nur im öffentlichen, sondern ebenso im privaten Mobilfunk die Marktführerschaft anstreben.

Weiterhin ist die Frage ungeklärt, ob die Mobilfunkbetreiber auch die Cloudhardware bereitstellen und betreiben. Es wird hier drei Möglichkeiten geben. Zuerst könnten bestehende lokale Rechenzentren, die vom Unternehmen selbst oder IT-Anbietern betrieben werden, in das Campusnetz mit eingebunden werden. Zweitens ist es möglich, dass die Mobilfunkbetreiber Rechenzentren zur Verfügung stellen. Dies ist sowieso notwendig, um die virtualisierten Netzwerk-Services zu betreiben. Und drittens können Kooperationen mit Hyperscalern geschlossen werden, um Cloudlösungen, wie beispielsweise die private MEC von Microsoft Azure,³⁴¹ in die Campusnetze mit einzubinden.

³³⁹ Vgl. Antje Williams (2021) (online).

³⁴⁰ Vgl. Vodafone (online b).

³⁴¹ Vgl. Microsoft Azure (2021) (online).

5.3.6 Modell 5: Campusnetz in Eigenbetrieb oder durch IT-Anbieter

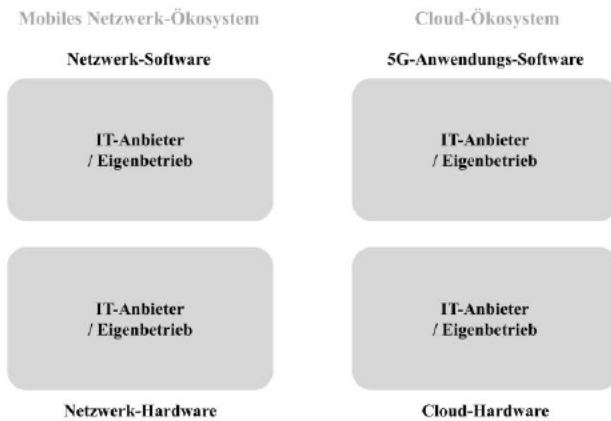


Abbildung 13: Verantwortlichkeiten in Modell 5: Campusnetz in Eigenbetrieb oder durch IT-Anbieter, Eigene Darstellung

Das letzte Betreibermodell ist vom Aufbau und Betrieb von den traditionellen Mobilfunkbetreibern oder Hyperscalern komplett unabhängig. Eine Integration des öffentlichen Mobilfunknetzes wird nicht stattfinden. Implementiert wird das Campusnetz inklusive Cloud-Hardware entweder vom Unternehmen selbst oder von einem lokalen, regionalen oder spezialisierten IT-Anbieter. Eine eigene Funklizenz ist bei diesem Modell notwendig.

Dass Unternehmen ihre IT-Infrastruktur selbstständig aufbauen und betreiben, ist vor allem bei großen Unternehmen nichts Ungewöhnliches. Es ist jedoch technisches Wissen im Bereich des Mobilfunks für ein 5G-Campusnetz notwendig. Dies kann durch externe Unterstützung bereitgestellt und nachfolgend internalisiert werden. Zudem könnten Wartung und Betrieb nach einer erfolgreichen Implementierung an einen Dienstleister übergeben werden.³⁴²

Alternativ könnte ein Campusnetz komplett von einem IT-Anbieter aufgebaut und betrieben werden. Ein Vorteil besteht in dem branchen- und unternehmensspezifischen Knowhow des Anbieters. Idealerweise wurden schon andere IT-Infrastrukturen von dem Anbieter implementiert. So könnten bereits Konzepte, Wartung und

Betreiber:	IT-Anbieter oder eigenbetrieb durch das Unternehmen
Aggregator und Marktplatzbesitzer	IT-Anbieter
Cloudmodell:	Lokale Edge Cloud
Service-Modell:	Campusnetz-as-a-Service
Anwendungsmärkte:	Produktion, Campus Monitoring, Mining, Krankenhaus, Logistik, Einzelhandel, AR & VR
Voraussichtliche kommerzielle Verfügbarkeit	2020
Voraussichtliche Reifephase	2025

Tabelle 5: Eigenschaften von Modell 5: Campusnetz in Eigenbetrieb oder durch IT-Anbieter, Eigene Darstellung

³⁴² Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 22f.

Betriebsverträge existieren, die einen Rollout erleichtern. Auch Vertrauen spielt bei der Wahl des Anbieters eine entscheidende Rolle. In den nächsten Jahren ist daher davon auszugehen, dass IT-Anbieter ihr Wissen in Bezug auf Mobilfunktechnik erweitern werden, um spezifische Lösungen rund um das Thema 5G bereitzustellen.

Aus den beiden Campusnetz betreffenden Betreibermodellen lässt sich ableiten, dass sich alle drei Hauptakteure auf dem Markt der Campusnetze positionieren werden. Während die Hyperscaler vermehrt auf Partnerschaften und Kooperationen setzen, um ihre IaaS im Bereich der Edge Clouds zu skalieren, werden sich IT-Anbieter und Mobilfunkbetreiber strategisch auf den kompletten Betrieb ausrichten. Der Markt der Campusnetze und lokalen Edge-Clouds wird in Zukunft stark wachsen. Auch wenn bisher nur 169 Campusnetze im Rahmen der lokalen Frequenzvergabe der Bundesnetzagentur geplant bzw. eingerichtet wurden,³⁴³ schätzt Nokia bis 2025 ein Marktpotenzial von 5.000 bis 10.000 5G-Campusnetzen in Deutschland.³⁴⁴ Von den Unternehmen, die in den nächsten Jahren ein Campusnetz im Unternehmen integrieren wollen, streben laut dem VDMA etwa die Hälfte einen eigenen Aufbau an. Jedoch wollen nur 20 Prozent ihr Campusnetz selbst betreiben. Das ist ein hohes Marktpotenzial für zukünftige Betreiber. Die Mehrzahl von Campusnetzen soll in KMUs zum Einsatz kommen.³⁴⁵ Darüber hinaus wurde in Unterabschnitt 5.2.3 über die Nutzer der 5G-internen Cloudmodelle aufgezeigt, dass Campusnetze besonders für die herstellende Industrie mit integrierter lokaler Cloudinfrastruktur sinnvoll wären. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Daten der Bundesnetzagentur. Dort machen Unternehmen aus der herstellenden Industrie den größten Anteil unter den Antragstellenden bezüglich privater 5G-Frequenzen aus, um damit anschließend ein Campusnetz aufzubauen.³⁴⁶

Von allen in den vorherigen Abschnitten aufgezeigten Betreibermodelle fallen die Kosten für den Aufbau eines privaten Campusnetzes für das einführende Unternehmen am höchsten aus.³⁴⁷ Wie teuer ein Campusnetz genau ist, lässt sich nicht sagen. Zu

³⁴³ Vgl. Bundesnetzagentur (2021e), S. 2.

³⁴⁴ Vgl. Nokia zitiert nach Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 12.

³⁴⁵ Vgl. VDMA (2020) zitiert nach Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 12.

³⁴⁶ Vgl. Bundesnetzagentur (2021d), S. 203.

³⁴⁷ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 23.

unterschiedlich werden die Anforderungen an das System sein. Selbst wenn ein Campusnetz wie Kai Grunwitz, CEO von NTT Germany sagt, „nicht mehr als ein paar hunderttausend Euro kostet“,³⁴⁸ kann das Marktpotenzial auf über eine Milliarde Euro geschätzt werden.

5.4 Herausforderungen für die Hauptakteure

Wie in den vorangegangenen Abschnitten aufgezeigt, ermöglicht 5G im Rahmen von IaaS komplett neue Cloud- und Service-Modelle. Die Hauptakteure sind mit Geschäftsdiversifikation, einem dynamischen Marktumfeld und komplett neuartigen Technologien konfrontiert. Das bringt Probleme und Herausforderungen mit sich. In diesem Abschnitt werden die technischen, sowie geschäftlichen Herausforderungen zusammengefasst, die in den vorherigen Abschnitten in Erscheinung getreten sind.

5.4.1 Technische Herausforderungen

Im Rahmen dieser Arbeit werden vor allem technische Herausforderungen behandelt, die das Netzwerk- und die Cloud-Technik betreffen.

Die Einrichtung und der Betrieb eines 5G Stand-Alone-Netzes mit seiner virtualisierten Steuerungs- und Managementebene, welches die Netz-Architektur wie das Netzwerk-Slicing erst ermöglicht, wird für die Mobilfunkbetreiber eine nicht zu unterschätzende Herausforderung. Noch ist es mit erheblichem Aufwand verbunden, die Netzfunktionen innerhalb der Slices zu platzieren. Es erfordert neue Konzepte und Methoden, um das Management und die Orchestrierung einfach, effektiv und automatisiert zu gestalten. Ebenso sind intelligente Planungsalgorithmen erforderlich, um die Ressourcen den Slices sinnvoll zuzuweisen.³⁴⁹

Die Königdisziplin wird es sein, dem Kunden ein Managementsystem zur Verfügung zu stellen in dem er seine eigenen Network-Slices und Clouddienste flexibel, schnell und selbstständig definieren kann – ohne dass der Betreiber manuell eingreifen muss.

³⁴⁸ Husmann (2021) (online).

³⁴⁹ Vgl. Barakabitze et al. (2020), S. 31.

Automatisierungen sollten nicht nur in der Betriebs-, sondern auch schon in der Designphase implementiert werden.³⁵⁰

Zukünftige 5G-Anwendungen im Unternehmensumfeld werden um ein Vielfaches höhere Leistungsanforderungen besitzen – und diese müssen zu jeder Zeit erfüllt werden. Die QoE bzw. QoS-Überwachung wird für die zukünftigen Betreiber von Cloud- und Mobilfunkinfrastruktur ein ausgesprochen wichtiges Aufgabenfeld.^{351 352} Eine besondere Herausforderung besteht darin, den Systemanforderungen der Anwendungen zu entsprechen und gleichzeitig die genutzten Ressourcen bestmöglich zu optimieren.³⁵³ Auch wenn sich Netzwerk-Slices grundsätzlich nicht gegenseitig beeinflussen können, ist es mit Blick auf die gesamte Mobilfunk und Cloud-Infrastruktur notwendig, die Gesamtauswirkung der Slices zu überwachen. Es muss sichergestellt sein, dass Kapazität für die traditionellen B2C-Anwendungen wie beispielsweise Videotelefonie übrigbleibt.³⁵⁴

Nicht nur bei der Netzwerktechnik, sondern auch im Cloud-Ökosystem werden Herausforderungen auf die Hauptakteure zukommen.

Wie in Unterabschnitt 5.2.2 beschrieben, können mit den unterschiedlichen Cloudmodellen unterschiedliche Anforderungspotenziale ausgeschöpft werden. Kein Cloudmodell kann die Bedürfnisse aller Anwendungsmärkte erfüllen. Die Implementierung von verschiedenen Cloudmodellen wird notwendig sein, jedoch ungleiche Aufwände erfordern. Beispielsweise kann ein Cloud-Standort am RAN angeschlossen werden, oder am Central Office - letzteres Einsatzmodell ist kostengünstiger, jedoch wird die Latenz höher ausfallen. Für Aufwands- und Leistungsprognosen im Zusammenhang mit den zukünftigen 5G-Anwendungen werden die Hauptakteure noch längere Zeit benötigen. Viele der später erforderlichen Systemanforderungen können heutzutage noch nicht geschätzt werden. Dementsprechend wird es schwer sein, Standort- und Strategiebeschlüsse für zukünftigen Cloudmodelle zu treffen.³⁵⁵ Eine gut durchgeplante Entscheidung ist jedoch essentiell. Der Aufwand für eine MEC-Infrastruktur wird in den

³⁵⁰ Vgl. ETSI (2019b), S. 5.

³⁵¹ Vgl. Barakabitze et al. (2020), S. 33.

³⁵² Vgl. Baraković/Skorin-Kapov (2013), S. 2ff.

³⁵³ Vgl. Baresi et al. (2019), S. 4.

³⁵⁴ Vgl. ETSI (2014), S. 29.

³⁵⁵ Vgl. Reznik et al. (2018), S. 7.

nächsten Jahren ein großer Kostentreiber sein – vor allem bei einer kleinzelligen Realisierung. Hier ist es besonders wichtig den Markt der 5G-Anwendungen³⁵⁶ zu beobachten, da ein aufwändiger Rollout tausender MECs nur mit vernünftigen Marktpotenzial zu rechtfertigen ist.

Trotzdem bleibt das sogenannte „Henne-Ei-Problem“ bestehen. Ohne das Angebot, also eine leistungsfähige Cloud- und Mobilfunkinfrastruktur, besteht keine Nachfrage nach 5G-Anwendungen und es findet keine technologische Entwicklung statt. Bei 5G müssen Angebot und Nachfrage gleichzeitig geschaffen werden. In diesem Dilemma verfolgen die Mobilfunkbetreiber unterschiedliche Strategien. Während Vodafone als First Mover schon ein Stand Alone-Netz anbietet, obwohl sich die Nachfrage in Grenzen halten dürfte, wartet die Telekom, bis es ausreichend Anwendungen gibt.³⁵⁷ Nichtsdestotrotz sollten die Hauptakteure für diese Problematik eine Lösung finden. Beispielsweise können schon Mobilfunknetze mit Cloudinfrastruktur für Testanwendungen geöffnet werden. Ebenso wäre es möglich, dass 5G-Labs oder Campusnetze entstehen, in denen Entwickler ihre Anwendungen testen können. Darüber hinaus wären Partnerschaften zwischen den Hauptakteuren und Unternehmen der vertikalen Industrie vorteilhaft, um eine beidseitige technische Entwicklung zu stimulieren.

Die zukünftig in 5G integrierten Cloudmodelle sollten in einer Multistakeholder-Umgebung betrieben werden. Dies ist notwendig, da viele unterschiedliche Cloudmodelle eingesetzt werden, um die sehr unterschiedlichen Leistungsparameter der 5G-Anwendungen zu erfüllen. Die Koexistenz der Cloud-Plattformen ist für die Betreiber jedoch herausfordernd. Erstens müssen die Cloudplattformen verschiedener Anbieter nicht nur nebeneinander, sondern miteinander funktionieren. Weiterhin müssen die Entwicklungs- und Integrationsanstrengungen orchestriert werden.³⁵⁸ Zuletzt ist es notwendig, dass trotz einer Multistakeholder-Umgebung Sicherheitsstandards und Prozesse regulatorischen und rechtlichen Besonderheiten entsprechen und es eindeutige

³⁵⁶ Vgl. Sauter (2018) (online).

³⁵⁷ Vgl. Telekom (2021a) (online).

³⁵⁸ Vgl. Mao et al. (2017), S. 28.

Verantwortlichkeiten gibt.³⁵⁹ Besondere Relevanz hat dies in Zukunft beim Einsatz offener Systeme³⁶⁰ und der immer größer werdenden Cyberbedrohung.³⁶¹

In zukünftigen 5G-Netzwerken wird die Datenverarbeitung näher an den Anwendern verlagert. Viele der 5G-typischen Anwendungen werden dadurch erst ermöglicht. Trotzdem bringt ein vor Ort befindliches Rechenzentrum erhebliche Herausforderungen mit sich. Speziell für eine Technik deren Hauptaufgabe auf die Mobilität ihrer Anwendung und Benutzer ausgelegt ist. Mit fortgeschrittener Beweglichkeit der Anwendung, muss ebenso die Edge-Cloud mobil werden. Beispielsweise muss die Software der Anwendung folgen und sich automatisch auf dem nächsten MEC installieren. Auch wenn es mit den Follow Me- und Mobi-Cloud-Modellen schon Entwicklungsbestrebungen hinsichtlich einer Selbstinstallation der Software gibt,³⁶² wird vor allem die Orchestrierung der Anwender-Software und Verteilung der Daten auf vielen unterschiedlichen Cloudmodellen eine Herausforderung.

Edge-Clouds bestehen aus kleinen Mini-Rechenzentren. Meist nicht größer als eine kleine Box. Eine solche Hardwarearchitektur hat Vorteile. Besonders der Aufwand und die Kosten bei der Implementierung sind geringer als größere Recheneinheiten. Solche kleine Datenzentren können jedoch schlecht skaliert werden. Während bei großen Datenzentren einfach bei Bedarf eine neue Rechen- oder Speichereinheit in den Server Rack implementiert wird, ist es bei Edge-Clouds eine Herausforderung zusätzliche Hardware schnell und flexibel bereitzustellen. Insbesondere, da Clouds wie MECs massenhaft im RAN verbaut und damit schwer zugänglich sein werden.³⁶³

5.4.2 Geschäftliche Herausforderungen

Die traditionellen homogenen Netzwerk-Dienste für Endnutzer werden durch heterogene, 5G-orientierte Dienste für industrielle Märkte erweitert. Diese Dienste, wie Netzwerk-Slices und Campusnetze, müssen entwickelt und geplant werden. Mit der neuen Mobilfunkgeneration wird sich die Gewinn- und Umsatzberechnungen ändern.

³⁵⁹ Vgl. Sabella et al. (2021), S. 5f.

³⁶⁰ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 42.

³⁶¹ Vgl. Allianz (2021) (online).

³⁶² Vgl. Wang et al. (2015), S. 19ff.

³⁶³ Vgl. Liyanage et al. (2021), S. 135.

Während sich die Preisgestaltung traditioneller Mobilfunkdienste überwiegend an dem verbrauchten Datenvolumen orientiert, wird der individuelle Service für industrielle Anwendermärkte eine neue Preismodellierung erfordern.^{364 365} Dafür müssen neue Key Performance Indicators (KPI) gebildet werden, welche die Leistungen und Ziele beschreiben, die später abgerechnet werden. Die KPIs können beispielsweise Ziel-Latenzen, oder eine bestimmte Datenraten umfassen. Im Gegensatz zu der Preisgestaltung heutiger traditioneller IaaS der Hyperscaler muss in Zukunft der Zusammenhang von Preis und Performance viel stärker im Mittelpunkt stehen.³⁶⁶ Bei NSaaS kann die Preisgestaltung entweder individuell nach den definierten Anforderungen geschehen, oder eine vormodellierte Preistabelle anhand vorgefertigter Slices angeboten werden.³⁶⁷ Bei Campusnetzen wird die Preisgestaltung noch komplexer. Oft sind die Preise individuell auf die Anforderungen des Kunden ausgelegt. Weitaus komplizierter wird die Leistungsabrechnung bei Hybriden-Campusnetzen, die mehrere Stakeholder umfassen. Wie auch immer die spätere Preisgestaltung aussehen wird, die größte Herausforderung wird es sein, die Netzwerk- und Cloudinfrastruktur so auf die Kunden auszurichten, dass die geforderten Leistungsanforderungen bedient werden, die Infrastruktur optimal zugewiesen ist und trotzdem noch wirtschaftlich betrieben werden kann.

Es wurde schon dargestellt, dass die unterschiedlichen Akteure der Betreibermodelle Probleme haben werden, die notwendigen QoS bereitzustellen. Neben der im vorherigen Unterabschnitt aufgezeigten schwierigen QoE bzw. QoS-Überwachung bei einer steigenden Anzahl an Stakeholdern, wird auch die Verantwortungsbestimmung bei Haftungsfragen anspruchsvoll werden. Wie die Studie von Son et al. aufzeigt, sind besonders in einer wachsenden Multi-Cloud-Umgebung neue überarbeitete Konzepte für Rahmenverträge wie dem SLA notwendig.³⁶⁸ Das ist besonders im Rahmen von hybriden Betreibermodellen relevant, wenn ein Akteur alleine nicht alle geforderten Kompetenzen im Bereich Cloud- beziehungsweise Netzwerktechnik abdecken kann. So könnte die in Abschnitt 2.3 beschriebene IaaS-Wertschöpfungstiefe von unterschiedlichen Drittanbietern bearbeitet werden. Werden die Services über verschiedene Ebenen zu einem

³⁶⁴ Vgl. Barakabitze et al. (2020), S. 32.

³⁶⁵ Vgl. Rasheed et al. (2019), S. 4859f.

³⁶⁶ Vgl. Büst (online).

³⁶⁷ Vgl. tmforum (2020), S. 29.

³⁶⁸ Vgl. Son et al. (2017), S. 1ff.

Produkt zusammengefasst, wird es nicht notwendig sein, dass der Cloud-Betreiber seine Leistungen selbst auf einem „Marktplatz“ anbietet. Dies kann der Mobilfunkbetreiber übernehmen. Das gleiche gilt für die Kundenberatung oder dem Anbieten eines Help-Desks für den Kundensupport. Hier verlangt es ein tiefgehendes Verständnis der eigenen Kompetenzen, der strategischen Ausrichtung und den Beziehungen zu anderen Stakeholdern. Wenn die Wertschöpfungskette verkürzt wird, sollten auch hier besonders umfassende Leistungsverträge unter den Service-Anbietern geschlossen werden, um die Anforderungen der ausgelagerten Aktivitäten bestmöglich zu definieren.

6 Weiterführende Betrachtung

6.1 Mobilfunkgeneration 6G

In Zukunft werden die Anforderungen an den Mobilfunk immer größer. Erweiterte Anwendungen findet der Mobilfunk durch Milliarden an verbundenen Menschen und Geräten, mobile Roboter für den Privatgebrauch und den Einsatz Drohnen. Es werden nicht nur Terabytes, sondern Zettabytes an Daten verursacht.³⁶⁹ Erwartet werden außerdem neuartige Technologien wie haptic communications oder eXtended Reality (XR), dessen Systemanforderung noch nicht mal geschätzt werden können.³⁷⁰

Die Leistung der fünften Mobilfunkgeneration wird für die technologische Entwicklung nicht ausreichen. Für die auf 5G folgende sechste Mobilfunkgeneration sollen daher viele der Leistungsparameter (siehe Abschnitt 4.1) um den Faktor 10 erhöht werden. Mit einem jährlichen Anstieg des Datenverkehrs um 50 bis 100 Prozent soll das zukünftige Mobilfunknetz Datenvolumina von 150 Tbit/s/km² bereitstellen. Ebenso ist die Erhöhung der durchschnittlichen Datenrate von 1 Gbit/s auf 10 Gbits/s vorgesehen. Die Latenz soll dauerhaft gering bei 1 ms bleiben. Die ausführbare Dichte an verbundenen Endgeräten steigt von einer Million auf 10 Million pro km². Einen großen Entwicklungsschritt um den Faktor 300 soll 6G bei der Energieeffizienz erfahren. An die gesellschaftlichen Herausforderungen angepasst, soll 6G grüne Technologien und Anwendungen fördern und selbst umweltfreundlich betrieben werden.³⁷¹ Weiterhin soll die neue Mobilfunkgeneration immer verfügbar, sehr sicher, umweltfreundlich und flexibel skalierbar sein.³⁷²

Um die Leistungsparameter zu erfüllen, sollen die in 5G eingesetzten Frequenzen von maximal 24 GHz auf über 100 GHz erhöht werden. Die dadurch weiter reduzierte Reichweite soll durch den Einsatz neuer Technologien und Materialien begegnet werden. Beispielsweise sind hier Verbesserungen der schon aus 5G bekannten Massive MIMO Antennentechnologie oder des Full Duplex-Verfahrens vorgesehen. Außerdem

³⁶⁹ Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 20.

³⁷⁰ Vgl. Saad et al. (2020), S. 135f.

³⁷¹ Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 6f.

³⁷² Vgl. ebd. (2021), S. 20.

werden neue Kodierungs- und Modulationsprozesse erforderlich sein, um die hohen Leistungsparameter zu ermöglichen.³⁷³

Bis jetzt sind bei 6G lediglich Forschungsaktivitäten zu beobachten. Diese werden noch bis zum Jahr 2025 fortgesetzt. Dann werden von den Standardisierungsorganisationen erste Releases veröffentlicht, was wie bei den vorherigen Mobilfunkgenerationen höchstwahrscheinlich Jahre andauern wird. Erst im Jahr 2030 wird mit einem kommerziellen Rollout gerechnet.³⁷⁴

Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, werden bei 5G neue Cloudmodelle im Rahmen des Konzeptes der Distributed Cloud am Rand und im Fog des 5G-Netzwerkes entstehen, sowie regionale Clouds direkt an das Kernnetz angeschlossen. 6G nimmt dieses Konzept der verteilten Cloud auf - geht aber noch einen Schritt weiter. Die Clouds sollen mit 6G nach der Vision des Allgegenwärtigen Rechnens (Ubiquitous Computing) gestaltet sein.³⁷⁵ Das bedeutet, Clouds werden unsichtbar im Hintergrund des Handlungsfeldes der Anwender ausgeführt. Die Netzwerke- und Cloudsysteme, sowie die darauf installierten Anwendungen stehen allgegenwärtig zur Verfügung und können jederzeit und überall genutzt werden.³⁷⁶ In der Praxis würden die netzinterne Datenverarbeitung zwischen dem Benutzer- bzw. Endgerät und regionalen Clouds zu einem einzigen Datenverarbeitungskontinuum verschmelzen. Heutzutage ist bei der Entwicklung von 5G zu beobachten, dass Netzwerk- und Cloudinfrastruktur, sowie Dienste im Rahmen von NaaS und IaaS zusammenwachsen. Mit 6G wird dieses Szenario noch weiter vorangetrieben – Netzwerk und Cloudinfrastruktur könnten in Zukunft kaum noch getrennt werden. Eine solche Situation benötigt sehr weit entwickelte Management-, Orchestrierungs- und Virtualisierungstechnologien.

Edge Computing würde unter Ubiquitous Computing in seiner jetzigen Form als eigenständiges Konzept nicht mehr existieren, sondern mit anderen Cloudmodellen verschmelzen. Zählen würde nur noch die Bereitstellung der Anwendung unter den erforderlichen Qualitätsbedingungen. Dienste in Form von NaaS und IaaS könnten weniger

³⁷³ Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 17f.

³⁷⁴ Vgl. Bayern Innovativ/Münchener Kreis (2021), S. 6f.

³⁷⁵ Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 15f.

³⁷⁶ Vgl. Wiegerling (2013), S. 375.

werden und von Geschäftsmodellen wie Function as a Service (FaaS) oder Software as a Service (SaaS) abgelöst werden.³⁷⁷

6.2 Alternative Szenarien

Im vorherigen Kapitel wurde aufgezeigt, dass 5G eine neue dezentrale Cloudstruktur benötigt, um die erforderlichen Systemanforderungen zu erfüllen. Diese erstrecken sich von der Edge in der Nähe des Anwenders bis in die regionalen Gebiete. Cloudstrukturen innerhalb des Mobilfunknetzes vergrößern die Netzdomäne des Diensteanbieters. Dem Netzwerk wird im Rahmen von IaaS ein höherer Wert zugeschrieben. Das bedeutet, dass IaaS um neue Services wie CaaS und NaaS erweitert wird, die neuen Dienste wie Netzwerk-Slicing und Campusnetze ermöglichen.

Da in dieser Arbeit die Zukunft betrachtet wird, bleibt natürlich eine Grundunsicherheit. Die im vorherigen Kapitel ausgeführten Situationen müssen nicht eintreten. Fraglich ist daher, welche realistischen Szenarien stattdessen eintreten könnten. Diese werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

6.2.1 Status Quo: 5G hauptsächlich für private Endanwender

Zuerst wäre es möglich, dass sich im Bereich der neuen Mobilfunkgeneration nicht viel ändern wird. Dies hört sich in Zusammenhang mit der steigenden technischen Entwicklung unrealistisch an. Trotzdem darf nicht vergessen werden, dass die älteren Mobilfunkgenerationen für Endkunden konzipiert wurden. Der Einsatz speziell im Bereich B2B war bei früheren Mobilfunkgenerationen nicht vorgesehen und ist bei 5G vollkommen neu. Der Eintritt in neue Märkte ist immer mit einem gewissen Risiko verbunden. Wann genau die 5G-spezifischen Anwendungen ihre Marktreife erreichen ist schwer vorherzusehen. So wird beispielsweise eine für AR-Anwendungen gesondert eingerichtete Cloud laut Gartner erst nach der Markteinführung von 6G prognostiziert.³⁷⁸ Ebenso ist es keinesfalls gewiss, dass die mit 5G verbundenen Anwendungen auf ihrem Markt auch erfolgreich sein werden und tatsächlich dafür 5G vorausgesetzt wird. Beispielsweise funktionieren Technologien wie VR auch ohne die neue Mobilfunkgeneration.

³⁷⁷ Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 15f.

³⁷⁸ Vgl. Gartner (2021a) (online).

Dies wird von der Vielzahl an frei käuflichen VR-Brillen eindeutig aufgezeigt.³⁷⁹ 5G würde demnach eine revolutionäre Anwendung, in den Medien auch „Killerapplikation“ genannt, schlichtweg fehlen.³⁸⁰ Aus solchen Überlegungen kann ein Szenario abgeleitet werden, dass den in 5G integrierten Cloudmodellen keine große Nachfrage prognostiziert, da es der vertikalen Industrie an erfolgsversprechenden 5G-Anwendungen mangelt. 5G würde hauptsächlich von privaten Endanwendern im Rahmen des ÖMaaS genutzt werden. Spezielle NaaS- und CaaS-Dienste sowie Cloudmodelle könnten weniger zum Einsatz kommen.

6.2.2 Einsatz von Konkurrenzsystemen

Die Anwendungsmärkte, in die 5G eintreten wird, sind keinesfalls frei von Konkurrenz. Es gibt mit WLAN und Bluetooth auch heutzutage schon bewährte und häufig genutzte Mobilfunkstandards.³⁸¹ Diese werden vor allem in industrie- und bürospezifischen Anwendungen eingesetzt. Auch wenn WLAN und sein aktueller Standard Wifi 5 die für 5G vorausgesagten Leistungsparameter nicht erreichen kann, so steht mit Wifi 6 eine konkurrenzfähige Alternative bereit. Der Standard kann auch in industriellen Umgebungen eingesetzt werden.³⁸² Wifi 6 schafft mit einer Datenrate von mehr als 1 Gbit/s und einer theoretischen Latenz von 10 ms annähernd so hohe Leistungsparameter wie 5G.³⁸³ Mit dem in der Entwicklung befindlichen Standard „Wifi 7“ sollen theoretisch maximale Spitzendatenrate von 30 Gbit/s möglich sein, außerdem wird eine Latenz von 5 ms unterstützt.³⁸⁴ Ein weiterer Vorteil von WLAN gegenüber 5G sind die reduzierten Kosten. Beim Aufbau und Betrieb eines 5G-Campusnetzes können diese erheblich höher ausfallen.³⁸⁵ Dass industrielle Anwender direkt auf 5G umsteigen, wenn Alternativen vorhanden sind, steht nicht fest. Daher sollte ein Szenario in Betracht gezogen werden, in dem sich die Zielgruppe abwartend verhält und sich neue technische Entwicklungen ebenso problemlos mit Konkurrenzsystemen wie WLAN realisieren lassen.

³⁷⁹ Vgl. Ziesecke (2021) (online).

³⁸⁰ Vgl. Duden (online).

³⁸¹ Vgl. Fachausschuss Funkssysteme (2017), S. 21.

³⁸² Vgl. ebd. (2017), S. 33.

³⁸³ Vgl. VDMA/Fraunhofer-Institut (2020), S. 21.

³⁸⁴ Vgl. ebd. (2020), S. 30.

³⁸⁵ Vgl. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 30.

Doch nicht nur industrielle Kunden können auf bestehende Kommunikationsalternativen zurückgreifen. Auch bei Privatanwendern ist fraglich, ob sie spürbar von 5G profitieren werden. Häufig genutzte Anwendungen auf privaten Endgeräten funktionieren heutzutage auch mit LTE oder WLAN. Auch für zukünftige Privatanwendungen wird sich der neue Standard LTE Advanced eignen. Um die Leistung von 5G im Privatumsfeld auszuschöpfen, benötigt es neue Anwendungen wie AR oder hochauflösend gestreamte Online-Spiele, dessen Marktdurchbruch noch nicht vorhergesehen werden kann.³⁸⁶

Wie jede neue Technologie hängt der Erfolg von 5G von der Akzeptanz seiner Anwender ab. Tatsächlich ist 5G hier nicht unumstritten. Besonders der Einsatz hoher Frequenzen wird kontrovers diskutiert. Sogenannte ionisierende Strahlung, wie Röntgen oder Gamma-Strahlung kann tatsächlich einen negativen Effekt auf den Körper haben. Doch selbst die in Entwicklung befindlichen Frequenzen im Millimeterwellenbereich (um die 26 GHz) sind noch weit vom Spektrum der ionisierenden Strahlung entfernt. In der Praxis dringen diese Strahlen nicht in den Körper ein. Doch selbst, wenn viele Einwendungen um die Gesundheitsrisiken von vornherein haltlos sind, ist weitere Forschungsarbeit notwendig. Insbesondere beim Einsatz sehr hoher Frequenzen im Terahertzbereich die bei 6G zum Einsatz kommen sollen, müssen jegliche Risiken wissenschaftlich ausgeräumt werden. Nichtsdestotrotz können Ängste die Akzeptanz der Anwender reduzieren und damit als nicht zu unterschätzendes Hindernis bei einer erfolgreichen Markteinführung von 5G gesehen werden.³⁸⁷

6.2.3 Edge Device und Post Cloud

Auch wenn das Cloud Computing, wie in Abschnitt 2.5 beschrieben, seit einigen Jahren ein zunehmendes Wachstum erfährt, ist ebenso der Trend zu beobachten, dass sich die Datenverarbeitung in Richtung der Endgeräte verlagert.

Das exponentielle Wachstum der Rechenleistung nach dem Mooreschen Gesetz zeigt auf, dass sich die Rechenleistung etwa alle 18 bis 24 Monate verdoppelt. Diesen Fortschrittsphänomen hat sich bis heute weitestgehend bewahrheitet.³⁸⁸ Selbst kleine

³⁸⁶ Vgl. Leidinger et al. (2019), S. 24.

³⁸⁷ Vgl. ebd. (2019), 24f.

³⁸⁸ Vgl. Plass et al. (2013), S. 21.

Recheneinheiten sind heutzutage leistungsstark und können eine schnelle Berechnung durchführen. Diese Erkenntnis ermöglicht neue Cloudmodelle, welche zu den im vorherigen Kapitel beschriebenen Modellen in Konkurrenz treten könnten. Mini-Rechenzentren, sogenannte Cloudlets, können schnell und einfach an ein Netzwerk angeschlossen werden und zeitweise oder dauerhaft eine mobile Cloud bereitstellen.

Weiterhin wird es möglich sein am Netzwerk angeschlossene Geräte als Cloud-Host flexibel mitzubeneutzen. Für eine solche Situation eignen sich mobile Endgeräte. Diese sind zum einen fast überall verfügbar und zum anderen leistungstechnisch mittlerweile sehr gut ausgestattet. Die Idee für ein solches Szenario kann dem Artikel „Mobile Personal Multi-Access Edge Computing Architecture Composed of Individual User Devices“ von Lee et al. entnommen werden.³⁸⁹ Zwar wird dort das Cloudmodell der MECs lediglich durch mobile Endgeräte erweitert – trotzdem zeigt die Idee gut auf, dass es möglich ist, vorhandene Hardware als Cloud-Host in das Netzwerk einzubinden. Wenn man das Prinzip weiterdenkt kann zumindest theoretisch jedes Objekt zur Edge Cloud werden oder eine Cloud virtuell erweitern. Dieses Prinzip sympathisiert stark mit der von 6G vorhergesagten Vision des allgegenwärtigen Rechnens (Ubiquitous Computing). Es löst damit die Idee der individuellen Cloudmodelle ab – wichtig wird nur noch sein, die notwendigen Systemanforderungen bereitzustellen.

Wie Jon Markman in seinem Artikel im Forbes beschreibt, würden Millionen von autonomen smarten Geräten, die Daten in Echtzeit durch das 5G-Netz austauschen, Cloudmodelle verdrängen.³⁹⁰ Ob ein solches, als „Post Cloud“ bezeichnetes Zeitalter tatsächlich eintritt, ist unwahrscheinlich. Problematisch sind nicht nur Sicherheitsbedenken, sondern ebenso Hindernisse bei der Orchestrierung und des Managements vieler herstellerunterschiedlicher Geräte. Trotzdem zeigt dieses extreme Szenario sehr gut auf, in welcher Symbiose sich 5G und Cloud Computing befinden.

³⁸⁹ Vgl. Lee et al. (2020), S. 1ff.

³⁹⁰ Vgl. Markman (2019) (online).

6.3 Bewertung der Annahmen anhand der allgemeinen Trends im Cloudmarkt

Die in dieser Arbeit dargestellten Szenarien und alternativen Thesen sind Vorhersagen. Sie sind stark von der Entwicklung der Mobilfunkgeneration 5G abhängig. Grundsätzlich wäre mit Blick auf eine Ergebnisüberprüfung interessant, ob die Szenarien mit den allgemeinen Trends im Cloudmarkt übereinstimmen. In diesem Abschnitt wird daher eine Bewertung durchgeführt und die Trends mit den Ergebnissen dieser Arbeit verglichen. Dafür werden die vier von Gartner prognostizierten Trends für den Public Cloud Markt genutzt.³⁹¹

6.3.1 Allgegenwärtige Cloud

Nach Gartner ist zurzeit ein Trend hinsichtlich einer allgegenwärtigen Cloud-Nutzung zu beobachten. Das bedeutet, dass die Leistung der Netzwerke- und Cloudsysteme, sowie die darauf installierten Anwendungen allgegenwärtig zur Verfügung stehen und jederzeit und überall genutzt werden können.³⁹² Dafür werden Cloudmodelle vielfältiger ausfallen. Hybrid und Multi-Clouds sowie Edge-nahe Rechenzentren erfahren einen Wachstumsschub. Gartner spricht diesen Trend den Fortschritten bei der drahtlosen Kommunikation zu, speziell 5G und seinen Releases 16 und 17.

In dieser Arbeit konnte der von Gartner beschriebene Trend hinsichtlich des hybriden Einsatzes von Multi-Clouds auch beobachtet werden. Trotzdem ist die vorausgesagte allgegenwärtige Cloud-Nutzung noch zu visionär, um sie mit 5G in Verbindung zu bringen. 5G wird vielmehr das Konzept der Distributed Cloud einsetzen: Standortunterschiedliche Cloudmodelle werden zusammen die Einhaltung der notwendigen Leistungsanforderungen erfüllen.

Das Konzept der Distributed Cloud ist ein erster Schritt, um die Cloudnutzung allgegenwärtig zu machen. Es benötigt in der Praxis jedoch einen flächendeckenden Ausbau der Cloudinfrastruktur. Für das Edge Computing müssen Hindernisse wie Skalierung und Sicherheitsproblematiken überwunden werden. Es ist wahrscheinlich, dass die

³⁹¹ Vgl. Gartner (2021b) (online).

³⁹² Vgl. Wiegerling (2013), S. 375.

Vision der allgegenwärtigen Cloud erst in ferner Zukunft mit der nächsten sechsten Mobilfunkgeneration vollumfänglich umgesetzt werden kann.

6.3.2 Regionale Clouds

Weiterhin beobachtet Gartner einen Trend zu regionalen Clouds. Getrieben wird dieser Trend durch fortschreitenden Protektionismus und die Einhaltung von Branchenvorschriften. Damit sollen die steigenden Anforderungen verschiedener Industrien erfüllt werden.

Dieser Trend konnte in dieser Arbeit bestätigt werden. Alle Hyperscaler bauen ihre regionale Cloudinfrastruktur aus. Ihr Ziel ist es, jede wichtige Region mit einem Datenzentrum abzudecken. Normalerweise sind höhere Leistungsparameter, wie eine niedrige Latenz, nicht typisch für große Rechenzentren. Mit 5G wird es jedoch möglich sein, die Rechenzentren direkt an die Mobilfunkinfrastruktur anzubinden, sofern sie regional verfügbar sind. Diese direkte Verbindung zum Anwender kann die End-zu-End-Verzögerung bei der Datenübertragung tatsächlich verringern. Dieser Vorteil ist ein Grund für die Hyperscaler, ihre Datenzentren nicht nur regional zu erweitern, sondern durch Kooperationen Zugang zum 5G-Mobilfunknetz zu erhalten. Ebenso werden die Mobilfunkbetreiber ihr Geschäftsfeld um regionale Clouds erweitern. Hier ist schon zu beobachten, dass jeder Mobilfunknetzbetreiber mindestens eine regionale Cloud unterhält. In Zukunft könnten sie ihre regionale Cloudinfrastruktur weiter ausdehnen und in ihre 5G-Services einbinden.

6.3.3 Nachhaltige Cloud

Der Klimaschutz ist mittlerweile in Unternehmen angekommen. Vermehrt verlangen Unternehmen CO₂-neutrale Wertschöpfungsketten. Nach Gartner inkludiert diese Forderung den Betrieb nachhaltiger Clouds, welche energieeffizient und ressourcenschonend betrieben werden sollten.

Dieser Trend hat keine Auswirkungen auf die Clouddienste im Zusammenhang mit 5G. Der Aufbau und Betrieb von klimaneutralen Cloudmodellen innerhalb der 5G-Infrastruktur wurde in der Literatur nicht behandelt. Tatsächlich wird sich die Energienutzung mit dem Betrieb einer dezentralen Cloudinfrastruktur kurzfristig sogar erhöhen, da eher zentrale Cloudstrukturen dafür geschaffen sind, nach den Prinzipien der

Kreislaufwirtschaft umweltfreundlich zu agieren. Beispielsweise können regenerative Energieanlagen besser eingespeist, Kühlwasser reduziert oder ausrangierte Hardware besser recycelt werden.³⁹³ Weiterhin werden Edge-nahe Cloudmodelle eher tagsüber betrieben, somit entfällt auch die Nutzung von Nachtstrom.³⁹⁴

Voraussichtlich wird ab der nächsten Mobilfunkgeneration 6G der Betrieb der dezentralen Cloudstrukturen ressourcenschonender. Im Rahmen von 6G wurde Nachhaltigkeit als übergeordnetes Ziel definiert. 6G soll das Dilemma lösen, dass der zunehmende Datenverkehr nur mit einem Anstieg des Energieverbrauchs bewältigt werden kann. Neue Kennzahlen werden entstehen, wie der Energieverbrauch pro Datenbit. Langfristig soll 6G den Energie- und Ressourcenverbrauch minimieren, Emissionen verringern und die sozialen Aspekte in seinen Anwendermärkten verbessern.³⁹⁵

6.3.4 Automatisch programmierbare Cloud-Infrastruktur

Gartner erwartet, dass die Cloud-Infrastruktur der Hyperscaler automatisch verwaltet wird. Unterstützt wird dies durch Technologien wie künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen (ML). Die heutzutage auftretende operative Belastung soll verringert werden.

Die Arbeit konnte aufzeigen, dass mit SDN und NFV auch im Ökosystem von 5G eine virtualisierte und programmierbare Infrastruktur eingerichtet werden soll. Die Mobilfunkarchitektur soll leistungsfähige Teilnetze automatisch nach Bedarf bereitstellen, welche auch eine Cloudnutzung inkludieren. Dies benötigt erweiterte Orchestrierungs- und Managementsysteme, die sich zurzeit noch in der Entwicklung befinden und teilweise bereits standardisiert wurden.³⁹⁶ Fraglich ist, ob 5G den Einsatz von künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen (ML) nutzen wird. Das BMWI geht davon aus, dass in Zukunft „wichtige Prozesse wie Planung, Konfiguration und Optimierung in 5G-Campusnetzen“ durch KI automatisiert und vereinfacht wird.³⁹⁷ Um auch bei zunehmender Komplexität der Entwicklung die Leistungsindikatoren zu optimieren, hat 3GPP

³⁹³ Vgl. Kak et al. (2022), S. 48f.

³⁹⁴ Vgl. Ganchev et al. (2018), S. 35.

³⁹⁵ Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 11.

³⁹⁶ Vgl. ETSI (2019b), S. 8f.

³⁹⁷ Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2020), S. 41.

in Release 17 eine Studie für KI und ML im RAN gestartet. Der Aufgabenschwerpunkt von KI und ML liegt in der Selbstorganisation von Netzen (Self-Organizing Networks, SON). Mit SON passt das Netz die Leistungsparameter je nach den verschiedenen Funk- und Verkehrsbedingungen selbst an und nimmt dem Betreiber die Last der manuellen Optimierung ab.³⁹⁸ Im zweiten Quartal 2022 wird die Studie beendet sein.³⁹⁹ Eine Standardisierung von KI und ML findet jedoch erst mit Release 18 statt, welche Anfang 2024 freigegeben wird.⁴⁰⁰ Das KI und ML tatsächlich im öffentlichen Mobilfunk eingesetzt wird, kann also noch etwas dauern. Angesichts der technischen Entwicklungszeit vergleichbarer Technologien ist eine praktische Anwendung vor dem Jahr 2026 unwahrscheinlich.

Einen größeren Stellenwert wird KI und ML in der 6G-Architektur erfahren. So soll 6G schon von vornherein KI-gestützte Orchestrierungs- und Managementsysteme beinhalten. Diese sollen jegliche Art von Netzen, ob terrestrisch oder nicht-terrestrisch, abdecken und ebenso die kompletten Cloudmodelle, lokale sowie verteilte Rechenkapazitäten, umfassen. KI soll praktisch überall eingesetzt werden, um die Leistung und Kosteneffizienz im immer komplexer werdenden Mobilfunknetz zu verbessern.⁴⁰¹

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die allgemeinen Trends im Public Cloud Markt nicht grundsätzlich mit den Ergebnissen dieser Arbeit übereinstimmen. Obwohl Gemeinsamkeiten hinsichtlich regionaler, hybrider und Multi-Cloudinfrastrukturen sichtbar werden, gibt es signifikante Unterschiede in Bezug auf einen nachhaltigen Cloudbetrieb und Technologien wie KI und ML. Während 5G vornehmlich einen Einfluss auf den massenhaften Ausbau neuartiger Cloudmodelle und Services hat, wird ein nachhaltiger Cloudbetrieb einem schnellen Rollout untergeordnet. Weiterhin sind Technologien wie KI und ML für Cloudmodelle innerhalb der 5G Infrastruktur schlichtweg zu revolutionär. So sind noch bei der Orchestrierung und Steuerung der Multi-Cloudinfrastruktur viel trivialere Hindernisse zu überwinden, bevor an einen Einsatz wie KI und ML gedacht werden kann. Sehr gut zeigt die Gegenüberstellung von Trends und Ergebnissen

³⁹⁸ Vgl. Masini et al. (2021) (online).

³⁹⁹ Vgl. 3rd Generation Partnership Project (2019) (online).

⁴⁰⁰ Vgl. 3rd Generation Partnership Project (2021) (online).

⁴⁰¹ Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 9.

dieser Arbeit jedoch auf, dass sich viele Trends mit der Vision der nächsten Mobilfunkgeneration 6G überschneiden. Explizit wird bei 6G die allgegenwärtige Cloud-Nutzung (Ubiquitous Computing),⁴⁰² eine nachhaltige Netz- und Cloudinfrastruktur⁴⁰³ und der Einsatz von KI- und MI basierten Management- und Orchestrierungsfunktionen in der gesamten Wertschöpfungskette genannt.⁴⁰⁴ Es kann daher gesagt werden, dass 5G lediglich als Zwischenschritt dient, um die Trends auf dem Cloudmarkt innerhalb einer Mobilfunkinfrastruktur zu ermöglichen. Ganzheitlich umgesetzt werden die Trends jedoch frühestens mit der Einführung von 6G in zehn Jahren.

⁴⁰² Vgl. Bernardos/Uusitalo (2021), S. 15f (online).

⁴⁰³ Vgl. ebd. (2021), S. 11f (online).

⁴⁰⁴ Vgl. ebd. (2021), S. 14f (online).

7 Schlussbetrachtung

7.1 Zusammenfassung und Fazit

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Auswirkungen der Mobilfunkgeneration 5G auf Infrastructure-as-a-Service-Modelle im Hinblick auf die Clouddienste der Zukunft zu analysieren.

Dafür wurden zuerst die Begriffe des Cloud Computing und seine Unterscheidungsmerkmale aufgeführt. Anschließend wurde ein Überblick über die aktuelle Situation in dem IaaS-Markt gegeben. Ausgehend von der aktuellen technischen Entwicklung und der Lebenszyklen der Mobilfunkgenerationen wurde darauf aufbauen die augenblickliche Situation auf dem Mobilfunkmarkt, sowie der 5G-Mobilfunktechnik und -leistung aufgeführt. Für die Zielerreichung ist es notwendig, auch die zukünftige Situation von 5G zu betrachten. Zu diesem Zweck wurden die zukünftigen Leistungsprognosen von 5G dargestellt, und die dafür notwendige neue oder verbesserte Mobilfunktechnik thematisiert. Mit der Funkschnittstelle 5G New Radio, der virtualisierten Netzinfrastruktur und einer neuen Netzarchitektur konnten dafür drei technische Bausteine beschrieben werden. Anders als vorherige Mobilfunkgenerationen wurden die Leistungsanforderungen vornehmlich für neue industrielle Anwendungen geschaffen. Folglich war es notwendig die Anwendungsmärkte zu beschreiben, um einen Einblick in die Zielgruppe von 5G zu erhalten.

Die soeben aufgezählten Kapitel und ihre Abschnitte sind die Grundlage, um die Clouddienste im Hinblick auf die zukünftigen Services, Hauptakteure, Anwendungsmärkte, sowie Cloud- und Betreibermodelle zu analysieren und anschließend einer weiterführenden Betrachtung und Bewertung zu unterziehen.

Das Ziel wurde durch eine umfangreiche Analyse der vorliegenden Literatur, Fachartikel sowie Studien erreicht. Eine so neuartige Technologie wie 5G bedingt dabei ausschließlich die Verwendung aktueller Quellen.

Grundsätzlich lässt sich im Rahmen dieser Arbeit feststellen, dass mit 5G der Cloud-dienst IaaS nicht mehr unabhängig von der Netzinfrastruktur betrachtet werden kann. Neben der Cloudinfrastruktur wird zukünftig die Netzwerkinfrastruktur eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung eines bestimmten Leistungsniveaus spielen. Im

Umfeld von 5G werden die Cloud- und Netzwerkservices wie Connectivity-as-a-Service, Netzwerk-as-a-Service und Infrastruktur-as-a-Service zusammenwachsen. Die neuen 5G-Architekturen werden Clouds inkludieren und zu neuen Diensten wie dem Netzwerk-Slice-as-a-Service oder dem Campusnetz-as-a-Service führen, welche die traditionellen Services des öffentlichen Mobilfunks für Privat- und Geschäftskunden erweitern.

Das Zusammenwachsen der Wertschöpfungsketten von Cloud- und Netzwerk-Diensten bedingt eine Vielzahl involvierter Stakeholder. Von zukünftig besonderer Relevanz sind die Mobilfunkbetreiber, Hyperscaler und IT-Anbieter. Auch wenn andere Akteure als Dienstleister und Betreiber in Frage kommen könnten, zeichnen sich die drei Hauptakteure als Marktführer im Mobilfunk- und Cloudgeschäft aus. Weiterhin können sie auf technisches oder branchenspezifisches Wissen und Knowhow zurückgreifen, um zukünftige Dienstleistungen besser und schneller bereitzustellen.

Mit 5G wird sich die betriebene Cloudinfrastruktur im Rahmen von IaaS verändern. Anstatt der zentral eingerichteten traditionellen Cloudressourcen im Internet, werden neue standortnahe Cloudmodelle erscheinen, um spezielle Leistungsparameter bereitzustellen. Mit 5G wird der physische Standort der Cloud explizit in den Service mit eingebunden, was auch als Distributed Cloud bezeichnet wird. Dafür benötigt es eine sogenannte Multi-Cloud-Umgebung, also die gleichzeitige und gezielte Nutzung mehrerer Cloudmodelle. Grundsätzlich wurden in dieser Arbeit vier unterschiedliche Cloudmodelle identifiziert: Lokale Edge Clouds, Multi Access Edge Clouds, Central Office Clouds und Regionale Clouds.

In dieser Arbeit wurde aufgezeigt, dass die Cloudmodelle innerhalb der 5G-Infrastruktur unterschiedliche Leistungsparameter und Anforderungen erfüllen. Lokale Clouds und MECs werden durch ihre standortnahe Datenberechnung und -haltung sehr niedrige Latenzen bereitstellen und das Datenvolumen in den nachlaufenden Netzwerken verringern. Währenddessen fallen Central Office Clouds und Regionale Clouds durch ihre bessere Skalierbarkeit und Datensicherheit auf. Die in dieser Arbeit aufgelisteten Vor- und Nachteile sind Anhaltspunkte. Zum aktuellen Zeitpunkt ist es noch nicht möglich exakte Leistungsparameter vorherzusagen. Beispielsweise werden in der Literatur für

Regionale Clouds Latenzen im Bereich von 20 ms vorhergesagt.⁴⁰⁵ Dies steht im Widerspruch zu den gemessenen Latenzen der Cloudregionen von Amazon AWS und Google Cloud. Hier wird bei Amazon AWS nur eine Latenz von 9 ms für Westeuropa gemessen⁴⁰⁶ und für Google Cloud sogar nur 6,6 ms.⁴⁰⁷ Daraus lässt sich folgern, dass sogar regionale Clouds theoretisch in der Lage sind, sehr geringe Latenzen bereitzustellen. Ob diese Leistungen später auch mit 5G abgerufen werden können, ist fraglich. Es hätte jedoch einen großen Einfluss auf die strategische Auswahl der Cloudmodelle. Demzufolge sollten zukünftige Arbeiten die Leistungsparameter der Cloudmodelle genauer betrachten.

Bei der Auswahl der Cloudmodelle und der Netzwerk-Services werden in Zukunft die Märkte für 5G-Anwendungen eine zentrale Rolle einnehmen. In dieser Arbeit wurde daher eine Einordnung der Leistungsanforderungen ausgewählter Anwendungsmärkte hinsichtlich der notwendigen Cloudmodelle vorgenommen. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass sich lokale Clouds wegen ihrer Echtzeitberechnung, Datensicherheit und privaten Netzabdeckung für die industrielle Fertigung im Bereich der Produktion, dem Campusmonitoring und der Logistik eignen. Auch für leistungsstarke und datensensible Anwendungen in Krankenhäusern und in Gebieten mit einer schlechten öffentlichen Mobilfunkabdeckung, wie im Bergbau oder auf Ölplattformen, werden lokale Clouds notwendig sein. Anwendungen, welche durch hohe Leistungsanforderung auffallen, gleichzeitig dennoch auf die Reichweite von öffentlichen oder hybriden Mobilfunknetzen angewiesen sind, werden eine Mischung aus lokalen Clouds, MECs und Clouds am Central Office einsetzen. Diese hybriden Cloudmodelle werden vornehmlich für VR und AR, im Tourismus und Einzelhandel, beim autonomen Fahren oder bei Video- und Audio-Produktionen von Sport- und anderen Veranstaltungen eingesetzt. Zuletzt konnte in der Arbeit aufgezeigt werden, dass regionale Rechenzentren und Clouds am Central Office hauptsächlich für zukünftige IoT-Anwendungen relevant werden. Die Leistungsanforderungen zeichnen sich durch eine niedrige Datenrate und einer unwesentlichen Latenz aus. In den IoT-Markt kann die Landwirtschaft, eHealth, Energie, Smart City und Smart Home eingeordnet werden. Trotz der großen Bedeutung für die späteren

⁴⁰⁵ Vgl. Shen et al. (2020), S. 9.

⁴⁰⁶ Vgl. Aviatrix Systems (2021a) (online).

⁴⁰⁷ Vgl. ebd. (2021b) (online).

Cloud- und Servicemodelle kann in dieser Arbeit zum heutigen Zeitpunkt lediglich eine erste Klassifizierung hinsichtlich der Anwendungsmärkte und ihrer notwendigen Cloudmodelle stattfinden. Die dynamische Entwicklung der zukünftigen Anwendungen lässt darauf schließen, dass die Leistungsanforderungen noch nicht endgültig feststehen. Weiterhin ist problematisch, dass der Markterfolg späterer Anwendungen noch nicht vorherzusagen ist. Zudem ist eine überscheidungsfreie Einordnung der von den Anwendungsmärkten eingesetzten Schlüsseltechnologien nicht immer möglich. Beispielsweise wäre nicht nur der massenhafte Einsatz von IoT-Sensoren in der Landwirtschaft denkbar, sondern ebenso Drohnen, um beispielsweise den Pflanzenbestand zu überwachen. Drohnen besitzen wiederum andere Leistungsanforderungen als der massenhafte Einsatz von IoT-Sensoren. Zuletzt sollte erwähnt werden, dass ebenso die Wahl der eingesetzten Kommunikationstechnologien noch nicht prognostiziert werden kann. Für nachfolgende Arbeiten sollte es zukünftig möglich sein, genauere Schlussfolgerungen für die Cloudmodelle und -dienste der Zukunft abzuleiten und damit an die Erkenntnisse dieser Studie anzuknüpfen.

Letztendlich konnten in dieser Arbeit ein Überblick über die Entwicklung der Cloud- und Netzwerk-Services, der involvierten Hauptakteure, der eingesetzten Cloudmodelle und der Anwendungsmärkte gegeben werden. Dessen Erkenntnisse wurden anschließend in Betreibermodellen verdichtet. Auffallend ist, dass die Mobilfunkbetreiber und die IT-Anbieter einen Marktvorteil besitzen. In der momentanen Situation sind die Hyperscaler bis auf weiteres auf Kooperationen angewiesen, um ihre Clouddienstleistungen im 5G-Netzwerk zu skalieren. Im öffentlichen und privaten Mobilfunk können vor allem die Mobilfunkbetreiber den kompletten und unabhängigen Betrieb der Netzwerk- und Clouddienste übernehmen, da sie schon heute auf beiden Geschäftsfeldern tätig sind. Weiterhin ist es durch die Vergabe lokaler Frequenzen auch den IT-Anbietern möglich auf dem neu erscheinenden Markt der Campusnetz-Services als unabhängige Betreiber aufzutreten. Ihr spezielles Wissen hinsichtlich branchenspezifischer Netz-, Cloud- und Softwarelösungen macht eine Geschäftstransformation zu 5G-Diensten besonders wahrscheinlich. Die daraus resultierenden Geschäftsmodelle können als Wettbewerbsvorteil gegenüber der Konkurrenz angesehen werden. Noch ist ungewiss, welche der Betreibermodelle sich zukünftig durchsetzen werden. Einfluss darauf haben nicht nur der Erfolg von Service-Diensten, Cloudmodellen und Anwendungen, ebenso

spielt die strategische Ausrichtung und die Kooperationsbereitschaft der Hauptakteure eine große Rolle. Auf lange Sicht wäre es sogar möglich, dass die Hyperscaler zukünftig als Mobilfunkbetreiber in Erscheinung treten. Zumindest die finanziellen Mittel für neue revolutionäre Mobilfunk-Technologien, den Erwerb eigener Funkspektren oder sogar den Ankauf bestehender Telekommunikationsunternehmen sind gegeben. Es ist daher für weitere Forschungsaktivitäten von großem Interesse, wie sich die Hyperscaler zu dem Themenfeld Mobilfunk zukünftig verhalten werden und welche strategischen Investitionen sie tätigen.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Service-, Cloud- und Betreibermodelle stehen noch am Anfang ihrer Lebenszyklen und zeichnen sich durch neuartige Technologien in einem sehr dynamischen Marktumfeld aus. In dieser Arbeit konnten vorwiegend technische Herausforderungen für die Hauptakteure identifiziert werden, wie das Management, die Orchestrierung, die QoE bzw. QoS-Überwachung und das automatische Bereitstellen der Netzwerk- und Cloudressourcen. Darüber hinaus wird die Transformation des traditionellen Mobilfunks in neue Geschäftsfelder ein Umdenken in der Preisgestaltung und der KPIs verlangen. Auch die Steuerung von Aufgaben und Verantwortlichkeiten in einer so umfangreichen Multi-Stakeholder-Umgebung wird als große Herausforderung auf die Hauptakteure zukommen. Natürlich können weitere Hindernisse, vor allem technischer Art, identifiziert werden. In dieser Arbeit wurde sich aber an den im Rahmen dieser Arbeit eindeutigen Problematiken gehalten.

Wie alle prognostizierten Szenarien, bleiben auch die in dieser Arbeit beschriebenen Auswirkungen auf die Clouddienste der Zukunft spekulativ. Denn ebenso können alternative Szenarien eintreten. Es ist keinesfalls gegeben, dass sich 5G im industriellen Anwendungsbereich durchsetzen wird. Mit leistungsstarken Konkurrenzsystemen wie WLAN gibt es auf dem Markt der Kommunikationstechnologien Gegenlösungen. Auf der anderen Seite ist es ebenso möglich, dass sich 5G zwar durchsetzen wird, jedoch standortnahe Rechenzentren nicht benötigt werden - oder die Datenberechnung weiter in Richtung Endgeräte verlagert wird. In jenem Maße, dass die zukünftigen Edge-Clouds so mobil und systemoffen sind, dass die genannten Cloudmodelle obsolet werden. Nichtsdestotrotz bleiben die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse das wahrscheinlichste Szenario, denn sie sind größtenteils übereinstimmend mit den allgemeinen Trends im Public Cloud Markt. Trotzdem sollte erwähnt werden, dass die Trends auch

teilweise vom Mobilfunk beeinflusst wurden und keine Aussagen über die tatsächlichen Services, Anwendungen und Cloudmodelle aufzeigen.

Grundsätzlich wurde in dieser Arbeit festgestellt, dass die Leistungsparameter von 5G mit dem traditionellen IaaS nicht umgesetzt werden können. Veränderungen der Cloud-dienste und -ressourcen werden daher unumgänglich. Der Cloudmarkt unterzieht sich durch 5G einem bedeutenden Wandel.

Die homogene Leistungsebene von IaaS wird sich zukünftig vergrößern. Für IaaS typische Vorteile, wie die Skalierung oder die Kostenreduktion, werden um neue Parameter wie Latenz, Sicherheit und Mobilität erweitert. Ebenso wird der Standort der Cloud eine entscheidende Rolle bei der Bereitstellung unterschiedlicher Services spielen und sukzessiv näher an den Kunden implementiert.

Während die IaaS aktuell von großen weltweit agierenden Anbietern in einem bereitgestellt werden, bedingt im Gegensatz dazu die Einbeziehung der 5G-Netzwerkinfrastruktur viele unterschiedliche Stakeholder. Um die für 5G prognostizierten Leistungsparameter bereitzustellen, benötigt es ein Mobilfunknetz, erweitertes Knowhow in der Cloud- und Mobilfunktechnik und neue dezentrale Cloudmodelle. Einzelne Anbieter können die erweiterte IaaS-Wertschöpfungskette kaum gerecht werden. Dieser Umstand wird neue Anbieter anlocken, die sich mit ihren Services auf den Markt positionieren. In dieser komplexen Multi-Stakeholderumgebungen werden neue Kooperationen entstehen, um die Dienste wie Netzwerk- und Campusnetz-as-a-Service innerhalb neuer Betreibermodelle zu ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit konnte aufzeigen, dass erstmals in der Mobilfunktechnik eine Symbiose zwischen einer Mobilfunkgeneration und Cloudressourcen stattfinden wird. Zukünftig werden Netzwerk- und Clouddienste miteinander verschmelzen und der IaaS zu einer Vielzahl neuer Dienste führen. Dessen Erfolg wird jedoch maßgeblich von der bevorstehenden strategischen Ausrichtung der Hauptakteure abhängen. Folglich sind wegen der enormen finanziellen Aufwendungen, aber auch als wichtiger Weichensteller zukünftiger Innovationen, eine Vielzahl weiterer wissenschaftlicher Artikel und Studien geboten.

7.2 Ausblick

Die nächsten zehn Jahre werden zeigen, ob und wie die in dieser Arbeit dargelegten Auswirkungen eintreten. Da 5G noch am Anfang seiner Einführungsphase steht, wird es sich rasant weiterentwickeln. Wie dynamisch die Entwicklung der fünften Mobilfunkgeneration ist, zeigt sich anhand des Fortschritts des 5G-Rollouts während des Verfassens dieser Arbeit. So hatte zu Beginn der Arbeit noch kein Mobilfunknetzbetreiber ein Stand-Alone-Netz. Am Ende des Schreibprozesses, hat Vodafone ein eigenständiges 5G-Kernnetz in Betrieb genommen und die Telekom erste Städte testweise angeschlossen. Ein unabhängiges und virtualisierte 5G-Netzwerk ist der erste Schritt, um Clouds für 5G nutzbar zu machen. Doch auch danach gibt es zeitliche Unterscheide. Während regionale Clouds einfach an das Kernnetz angeschlossen werden können, sind für MECs und Clouds im Central Office ein aufwändiger Rollout notwendig. Vor 2024 wird dieser wahrscheinlich nicht abgeschlossen sein. Cloud- und Netzwerkdienste wie IaaS sind an die Cloudmodelle geknüpft und stark von den späteren Anwendungen abhängig. Zum jetzigen Zeitpunkt ist ein Erfolg späterer Anwendungen noch nicht abzusehen. Dieses Thema sollten zu einem späteren Zeitpunkt nachfolgende Publikationen weiterverfolgen.

Es kann davon ausgegangen werden, dass IaaS erst in Campusnetzen angeboten und anschließend eine immer stärkere Verbreitung in Netzwerk-Slices stattfinden wird. Mit dem Beginn der Reifephase von 5G, im Jahr 2025, werden die Auswirkungen für IaaS größtenteils sichtbar werden. Spätestens mit der Einführung der neuen Mobilfunkgeneration 6G im Jahr 2030 sollte eine Multi-Cloud-Architektur im Mobilfunknetz implementiert sein, um die Visionen für der sechsten Mobilfunkgenerationen umsetzen zu können. Doch auch die neue Mobilfunkgeneration wird kein Garant dafür sein, dass die in dieser Arbeit aufgezeigten Cloudmodelle und -Services tatsächlich eintreten. Vielmehr wird auch im Mobilfunkmarkt die Nachfrage das Angebot bestimmen. Cloud-dienste werden sich ändern, wenn die zukünftigen Technologien und Anwendungen es voraussetzen. In diesem Kontext bedarf es, zeitnah die exakten Leistungsanforderungen der Anwendungen zu identifizieren und den Parametern der Cloudmodelle gegenüberzustellen. Weiterhin sollten schnellstmöglich Testumgebungen und Labore geschaffen werden. Entwickler müssen die Software ihrer 5G-spezifischen Anwendungen unter

Echtzeitbedingungen testen und anschließend anbieten zu können, um damit die Nachfrage nach Clouddiensten innerhalb der 5G-Infrastruktur zu stimulieren.

Litertaturverzeichnis

3rd Generation Partnership Project (online a), 3GPP Specification Set: 5G, in:

<https://www.3gpp.org/dynareport/SpecList.htm?release=Rel-16&tech=4&ts=1&tr=1>, abgerufen am 16.12.2021.

3rd Generation Partnership Project (online b), LTE, in: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, abgerufen am 24.10.2021.

3rd Generation Partnership Project (2019), Release 17, in: <https://www.3gpp.org/release-17>, abgerufen am 10.1.2022.

3rd Generation Partnership Project (2021), Release 18, in: <https://www.3gpp.org/release18>, abgerufen am 10.1.2022.

5G Alliance for Connected Industries and Automation (2019), A 5G Traffic Model for Industrial Use Cases, Frankfurt am Main.

5G Americas (2021), 3GPP Releases - 16 & 17 & beyond.

Abbas, Murtaza/Henke, Leonhard/Stratmann, Lukas/Leidinger, Christine/Knebel, Alexander/Seelmann, Vasco (2020), 5G für vernetzte Industrie, Bonn.

Alibaba Cloud, Die globale Infrastruktur von Alibaba Cloud, in: <https://www.alibabacloud.com/de/global-locations>, abgerufen am 5.11.2021.

Allianz (2021), Allianz Risiko Barometer 2021: Covid-19-Trio an der Spitze der Unternehmensrisiken, in: <https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/news/allianz-risk-barometer-2021-de.html>, abgerufen am 12.12.2021.

Amazon (2021), Project Kuiper announces plans and launch provider for prototype satellites, in: <https://www.aboutamazon.com/news/innovation-at-amazon/project-kuiper-announces-plans-and-launch-provider-for-prototype-satellites>, abgerufen am 8.12.2021.

Amazon AWS, Globale Infrastruktur. Warum eine Cloud-Infrastruktur so wichtig ist, in: <https://aws.amazon.com/de/about-aws/global-infrastructure/>, abgerufen am 2.12.2021.

- Amazon AWS** (2021), Privates Multi-Access Edge Computing in Azure: Partnerlösungen, in: <https://docs.microsoft.com/de-de/azure/private-multi-access-edge-compute-mec/partner-programs>, abgerufen am 4.12.2021.
- Antje Williams** (2021), Antje Williams, Deutsche Telekom, in: <https://mobileinsights.mobileworldlive.com/themed-weeks/interview-deutsche-telekom-2/>, abgerufen am 12.1.2021.
- AT&T** (2018), The dawn of the 5G world. How 5G technology will ultimately alter the DNA of the digital experience.
- Aviatix Systems** (2021a), AWS Inter Region Latency, in: https://docs.aviatrix.com/HowTos/inter_region_latency.html, abgerufen am 11.1.2022.
- Aviatix Systems** (2021b), Google Cloud Inter Region Latency, in: https://docs.aviatrix.com/HowTos/gcp_inter_region_latency.html, abgerufen am 11.1.2022.
- Barakabitze, Alcardo Alex/Ahmad, Arslan/Mijumbi, Rashid/Hines, Andrew** (2020), 5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges, *Computer Networks*, 167. Jg., S. 106984.
- Baraković, Sabina/Skorin-Kapov, Lea** (2013), Survey and Challenges of QoE Management Issues in Wireless Networks, *Journal of Computer Networks and Communications*, 2013. Jg., S. 1–28.
- Baresi, L./Mendonça, D. F./Garriga, M./Guinea, S./Quattrocchi, G.** (2019), A Unified Model for the Mobile-Edge-Cloud Continuum, *ACM Transactions on Internet Technology*, 19. Jg., Nr. 2, S. 1–21.
- Baumann, Janette** (2021a), Europa-Premiere in Frankfurt: Vodafone startet 5G Standalone für die Echtzeit-Kommunikation, in: <https://www.vodafone.de/featured/inside-vodafone/europa-premiere-in-frankfurt-vodafone-startet-5g-standalone-fuer-die-echtzeit-kommunikation/>, abgerufen am 27.10.2021.
- Baumann, Janette** (2021b), Vodafone schaltet auf 5G Standalone: Startschuss für das modernste 5G-Netz Europas, in: <https://www.vodafone.de/featured/innovation-technologie/netz/vodafone-schaltet-auf-5g-standalone-startschuss-fuer-das-modernste-5g-netz-europas/>, abgerufen am 9.1.2022.

- Baumann, Janette** (2021c), Vodafone schaltet auf 5G Standalone: Startschuss für das modernste 5G-Netz Europas, in: <https://www.vodafone.de/featured/innovation-technologie/netz/vodafone-schaltet-auf-5g-standalone-startschuss-fuer-das-modernste-5g-netz-europas/>, abgerufen am 19.12.2021.
- Baun, Christian** (2019a), Bitübertragungsschicht. In: **Baun, C.** (Hrsg.), Computer Networks / Computernetze, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 45–90.
- Baun, Christian** (2019b), Grundlagen der Computervernetzung. In: **Baun, C.** (Hrsg.), Computer Networks / Computernetze, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 15–33.
- Baun, Christian** (2019c), Netzwerkvirtualisierung. In: **Baun, C.** (Hrsg.), Computer Networks / Computernetze, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 213–217.
- Bayern Innovativ/Münchener Kreis** (2021), Sechs Fragen zu 6G.
- BDBOS**, Funkübertragungen. Nieder- und hochfrequente elektromagnetische Felder, in: https://www.bdbos.bund.de/DE/Digitalfunk_BOS/Umwelt_und_Gesundheit/Funkuebertragung/funkuebertragung_node.html, abgerufen am 22.12.2021.
- Bernardos, Carlos J./Uusitalo, Mikko A.** (2021), European Vision for the 6G Network Ecosystem.
- Birch, Stuart** (2019), 5G cellular-enabled test infrastructure for autonomous vehicles launched at U.K.'s Millbrook, in: <https://www.sae.org/news/2019/05/5g-cellular-installed-at-uks-millbrook>, abgerufen am 1.11.2021.
- BMVI** (2020), Mitnutzungspotentiale kommunaler Trägerinfrastrukturen für den Ausbau der nächsten Mobilfunkgeneration 5G. Eine Handreichung der AG Digitale Netze des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur.
- Bök, Patrick-Benjamin/Noack, Andreas/Müller, Marcel/Behnke, Daniel** (2020), Computernetze und Internet of Things, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden.

- Boyland, Peter** (2019), Germany: Mobile Network Experience Report May 2019, in: <https://www.opensignal.com/reports/2019/05/germany/mobile-network-experience>, abgerufen am 3.11.2021.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik** (2021), Die Lage der IT-Sicherheit in Deutschland 2021, Bonn.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie** (2020), Leitfaden 5G-Campusnetze – Orientierungshilfe für kleine und mittelständische Unternehmen. Konzepte, Begriffe, Betreibermodelle und Auswahlkriterien für Produktion und Logistik mit Übertragbarkeit auf weitere Domänen wie Medizin-Campus/Krankenhäuser, Häfen, Bergbau, Baustellen und Landwirtschaft, Berlin.
- Bundesnetzagentur** (2019), Frequenzauktion 2019. Az: BK1-17/001, in: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Breitband/MobilesBreitband/Frequenzauktion/2019/Auktion2019.html, abgerufen am 30.10.2021.
- Bundesnetzagentur** (2020), Regionale und lokale Netze, in: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/lokalenetze-node.html, abgerufen am 28.10.2021.
- Bundesnetzagentur** (2021a), Deutliche Fortschritte bei Mobilfunkversorgung auf Hauptverkehrswegen, in: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/20211129_Versorgungsaufgabe.htmlhttps://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/20211129_Versorgungsaufgabe.html, abgerufen am 3.10.2021.
- Bundesnetzagentur** (2021b), Frequenzplan. gemäß § 54 TKG über die Aufteilung des Frequenzbereichs von 0 kHz bis 3000 GHz auf die Frequenznutzungen sowie über die Festlegungen für diese Frequenznutzungen.
- Bundesnetzagentur** (2021c), Mobiles Breitband. Mobilfunkmonitoring, in: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze-node.html, abgerufen am 20.12.2021.

- Bundesnetzagentur** (2021d), Tätigkeitsbericht. Telekommunikation 2020/2021.
- Bundesnetzagentur** (2021e), Übersicht der Zuteilungsinhaber für Frequenzzuteilungen für lokale Frequenznutzungen im Frequenzbereich 3.700-3.800 MHz, Berlin.
- Bundesregierung** (2021), 5G – Eine kurze Geschichte der Mobilfunkgenerationen, in: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/deutschland-spricht-ueber-5g-1832800>, abgerufen am 9.12.2021.
- Büst, René**, Infrastructure-as-a-Service (IaaS): Performance ist alles! Nicht ganz..., in: <https://de.cloudflight.io/expert-views-de/infrastructure-as-a-service-iaas-performance-ist-alles-nicht-ganz-4104/>, abgerufen am 11.1.2022.
- Chavhan, Suresh/Ramesh, Punid/Chhabra, Rishi Raj Singh/Gupta, Deepak/Khanna, Ashish/Rodrigues, Joel J. P. C.**, Visualization and performance analysis on 5G network slicing for drones. In: Proceedings of the 2nd ACM 09252020, 2020, S. 13–19.
- Cisco**, Was ist Edge-Computing?, in: https://www.cisco.com/c/de_de/solutions/computing/what-is-edge-computing.html, abgerufen am 26.11.2021.
- Cisco** (2019), Cisco Visual Networking Index: Forecast and Trends, 2017–2022.
- Costello, Katie** (2020), Der CIO-Leitfaden zur Distributed Cloud, in: <https://www.gartner.de/de/artikel/der-cio-leitfaden-zur-distributed-cloud>, abgerufen am 11.11.2021.
- Dell Technologies** (2019), Dell Technologies and 5G. Analysis and strategy to capture the 5G mobile opportunity.
- Deutsche Telekom** (2016), Die Open Telekom Cloud ist live!, in: <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/die-open-telekom-cloud-ist-live-351686>, abgerufen am 5.12.2021.
- Digital Business Cloud** (2021), Europäische Cloud-Anbieter: Warum sie gefragt denn je sind, in: <https://www.digitalbusiness-cloud.de/europaeische-cloud-anbieter-warum-sie-gefragter-denn-je-sind/>, abgerufen am 28.12.2021.
- Dropbox** (2021), Jahresbericht, in: <https://dropbox.gcs-web.com/static-files/ad964ecc-1f04-444b-ba51-8c0d9425422f>, abgerufen am 9.1.2022.

- DSLWEB** (2021a), 1&1 5G Verfügbarkeit. Erster Ausblick auf die 1&1 5G Netzabdeckung, in: <https://www.dslweb.de/1und1-5g-verfuegbarkeit.php>, abgerufen am 20.12.2021.
- DSLWEB** (2021b), Vodafone 5G Verfügbarkeit. So steht es um die Vodafone 5G Netzabdeckung, in: <https://www.dslweb.de/vodafone-5g-verfuegbarkeit.php>.
- Duden**, Killerapplikation, in: <https://www.duden.de/rechtschreibung/Killerapplikation>, abgerufen am 2.1.2022.
- El-Shorbagy, Abdel-moniem** (2021), 5G Technology and the Future of Architecture, *Procedia Computer Science*, 182. Jg., S. 121–131.
- Ergebnisdokument der Fokusgruppe 5G** (2018), 5G-Anwendermodelle für industrielle Kommunikation.
- ETSI**, Multi-access Edge Computing (MEC), in: <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing/mec>, abgerufen am 26.11.2021.
- ETSI** (2014), Mobile-Edge Computing – Introductory Technical White Paper.
- ETSI** (2019a), Multi-access Edge Computing (MEC); Support for network slicing, Sophia Antipolis Cedex, France.
- ETSI** (2019b), Network Transformation; (Orchestration, Network and Service Management Framework), Sophia Antipolis, France.
- Fachausschuss Funksysteme** (2017), Funktechnologien für Industrie 4.0, Frankfurt am Main.
- Flexera** (2021), State of the Cloud Report, in: <https://info.flexera.com/CM-REPORT-State-of-the-Cloud>, abgerufen am 22.12.2021.
- Fogg, Ian** (2021), Benchmarking the Global 5G Experience — September 2021, in: <https://www.opensignal.com/2021/09/09/benchmarking-the-global-5g-experience-september-2021>, abgerufen am 3.11.2021.
- Frank, Roland/Schumacher, Gregor/Tamm, Andreas** (2019), Cloud-Transformation. Wie die Public Cloud Unternehmen verändert, Wiesbaden, Springer Gabler.

Fraunhofer-Allianz Cloud Computing, Was bedeutet Public, Private und Hybrid Cloud?, in: <https://www.cloud.fraunhofer.de/de/faq/publicprivatehybrid.html>, abgerufen am 21.10.2021.

Futurion 5G Catalysts (2021), 5G Catalysts: Telco Cloud and Edge Trends.

Ganchev, Ivan/van der Mei, R. D./van den Berg, Hans (2018), Autonomous Control for a Reliable Internet of Services, Cham, Schweiz, Springer International Publishing.

Gartner (2019a), Cloud Shift Impacts All IT Markets, in: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/cloud-shift-impacts-all-it-markets>, abgerufen am 22.12.2021.

Gartner (2019b), Gartner Says Global IT Spending to Grow 1.1 Percent in 2019, in: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2019-04-17-gartner-says-global-it-spending-to-grow-1-1-percent-i>, abgerufen am 22.12.2021.

Gartner (2021a), 5 Impactful Technologies. Emerging Technologies and Trends Impact Radar for 2022, in: <https://www.gartner.com/en/articles/5-impactful-technologies-from-the-gartner-emerging-technologies-and-trends-impact-radar-for-2022>, abgerufen am 6.1.2022.

Gartner (2021b), Gartner Says Four Trends Are Shaping the Future of Public Cloud, in: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-08-02-gartner-says-four-trends-are-shaping-the-future-of-public-cloud>, abgerufen am 7.1.2022.

Gartner (2021c), Gartner Says Worldwide IaaS Public Cloud Services Market Grew 40.7% in 2020. Amazon, Microsoft and Alibaba Led the 2020 Race to the Cloud, in: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-06-28-gartner-says-worldwide-iaas-public-cloud-services-market-grew-40-7-percent-in-2020>, abgerufen am 7.11.2021.

Gloukhovtsev, Mikhail (2020), How 5G transforms Cloud Computing.

Google Cloud, Cloud-Standorte, in: <https://cloud.google.com/about/locations>, abgerufen am 2.12.2021.

Google Fi, Get better coverage, 5G included, in: <https://fi.google.com/about/>, abgerufen am 8.12.2021.

- Google Fiber** (2019), Saying Goodbye to Louisville, in: <https://fiber.google.com/blog/2019/saying-goodbye-to-louisville/>, abgerufen am 8.12.2021.
- Grotepass, Jürgen/Eichinger, Joseph/Voigtländer, Florian** (2020), Mit 5G zu neuen Potentialen in Produktion und Logistik. In: **Hompel, M. ten/Bauernhansl, T./Vogel-Heuser, B.** (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 251–284.
- Guillen, David Artuñedo/Sayadi, Bessem/Bisson, Pascal/Wary, Jean Philippe/Lonsethagen, Håkon/Antón, Carles/La Oliva, Antonio de/Kaloxylou, Alexandros/Frascolla, Valerio** (2021), Edge computing for 5G networks - white paper.
- Hentschel, Raul/Leyh, Christian** (2018), Cloud Computing: Status quo, aktuelle Entwicklungen und Herausforderungen. In: **Reinheimer, S.** (Hrsg.), Cloud Computing. Die Infrastruktur der Digitalisierung, Wiesbaden, Springer Vieweg, S. 3–20.
- HKT Limited/GSA Secretariat/Huawei Technologies** (2019), Indoor 5G Scenario Oriented White Paper, 3. Aufl.
- Hu, Yun Chao/Patel, Milan/Sabella, Dario/Sprecher, Nurit/Young, Valerie** (2015), Mobile Edge Computing - A key technology towards 5G, Sophia Antipolis, France.
- Husmann, Nele** (2021), Wie der Flughafen Köln-Bonn die Telekom abhängt, in: <https://www.wiwo.de/unternehmen/dienstleister/eigenes-5g-netz-wie-der-flughafen-koeln-bonn-die-telekom-abhaengt/27851580.html>, abgerufen am 4.1.2021.
- Iorga, Michaela/Feldman, Larry/Barton, Robert/Martin, Michael J/Goren, Nedim/Mahmoudi, Charif** (2017), The NIST Definition of Fog Computing, NIST Special Publication 800-191 (Draft), Gaithersburg, MD.
- ITU** (2017), ITU agrees on key 5G performance requirements for IMT-2020. 5G mobile systems to provide lightning speed, ultra-reliable communications for broadband and IoT, in: <https://www.itu.int/en/mediacentre/Pages/2017-PR04.aspx>, abgerufen am 12.11.2021.

Jacob, Harry (2020), „Work in Progress“: Wie sich 5G weiterentwickelt, in: <https://fuenf-g.de/2020/11/12/work-in-progress-wie-sich-5g-weiterentwickelt/>, abgerufen am 9.1.2022.

Jacobfeuerborn, Bruno/Schuster, Sigurd/Müller, Andreas/Schotten, Hans Dieter (2019), 5G-Technologie: Faktencheck 5G, in: <https://www.vde.com/resource/blob/1877380/6d8f4a4d6b68f205739f18ed21327881/faktencheck-5g-data.pdf>, abgerufen am 30.11.2021.

Kak, Sanna Mehraj/Agawal, Parul/Alam, M. Ashfar (2022), Energy Minimization in a Sustainably Developed Environment Using Cloud Computing. In: **Agarwal, P./Mittal, M./Ahmed, J./Idrees, S. M.** (Hrsg.), Smart Technologies for Energy and Environmental Sustainability, Cham, Springer International Publishing, S. 39–52.

Kommerskollegium National Board of Trade (2012), How Borderless is the Cloud? An introduction to cloud computing and international trade.

Kubach, Uwe (2020), Device Clouds. Cloud-Plattformen schlagen die Brücke zwischen Industrie 4.0 und dem Internet der Dinge. In: **Hompel, M. ten/Bauernhansl, T./Vogel-Heuser, B.** (Hrsg.), Handbuch Industrie 4.0, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 285–303.

Lee, Juyong/Kim, Jeong-Weon/Lee, Jihoon (2020), Mobile Personal Multi-Access Edge Computing Architecture Composed of Individual User Devices, Applied Sciences, 10. Jg., Nr. 13, S. 4643.

Leidinger, Christine/Seelmann, Vasco/Maasem, Christian (2019), 5G - Evolution oder Revolution? Whitepaper.

Lindner, Dominic/Niebler, Paul/Wenzel, Markus (2020), Der Weg in die Cloud. Ein Leitfaden für Unternehmer und Entscheider, Wiesbaden, Springer Gabler.

Lins, Sebastian/Schneider, Stephan/Sunyaev, Ali (2019), Cloud-Service-Zertifizierung. Ein Rahmenwerk und Kriterienkatalog zur Zertifizierung von Cloud-Services, 2. Aufl., Berlin, Springer Gabler.

- Liyanage, Madhusanka/Porambage, Pawani/Ding, Aaron Yi/Kalla, Anshuman** (2021), Driving forces for Multi-Access Edge Computing (MEC) IoT integration in 5G, *ICT Express*, 7. Jg., Nr. 2, S. 127–137.
- Luber, Stefan/Donner, Andreas** (2018), Was ist Software-Defined Networking (SDN)?, in: <https://www.ip-insider.de/was-ist-software-defined-networking-sdn-a-657442/>, abgerufen am 23.12.2021.
- Lynn, Theo/Mooney, John G./Lee, Brian/Endo, Patricia Takako** (2020), *The Cloud-to-Thing Continuum*, Cham, Schweiz, Springer International Publishing.
- Mao, Yuyi/You, Changsheng/Zhang, Jun/Huang, Kaibin/Letaief, Khaled B.** (2017), A Survey on Mobile Edge Computing: The Communication Perspective, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19. Jg., Nr. 4, S. 2322–2358.
- Markman, Jon** (2019), Supersonic 5G Wireless Could Kill The Cloud, in: <https://www.forbes.com/sites/jonmarkman/2019/01/27/supersonic-5g-wireless-could-kill-the-cloud/?sh=639448b12207>, abgerufen am 6.1.2022.
- Masini, Gino/Gao, Yin/Sirotkin, Sasha** (2021), Artificial Intelligence and Machine Learning, in: https://www.3gpp.org/news-events/2201-ai_ml_r3, abgerufen am 10.1.2022.
- Mell, P. M./Grance, T.** (2011), *The NIST definition of cloud computing*, Gaithersburg, MD.
- Mennig, Dr. Julius/Hajek, Laura/Münder, Philipp** (2019), *White Paper: 5G in Production*, Aachen.
- Microsoft** (2021), Microsoft global network, in: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/networking/microsoft-global-network>, abgerufen am 2.12.2021.
- Microsoft Azure** (2021), Privates Multi-Access Edge Computing in Azure: Partnerlösungen, in: <https://docs.microsoft.com/de-de/azure/private-multi-access-edge-compute-mec/partner-programs>, abgerufen am 4.12.2021.
- Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung** (2019), *5G-Mobilfunkstrategie des Landes Nordrhein-Westfalen*, Düsseldorf.

Murillo, Andrés F./Rueda, Sandra Julieta/Morales, Laura Victoria/Cardenas, Alvaro A. (2017), A Survey of SDN and NFV Security and Challenges for their Integration.

Netflix (2021), Results and Forecast, in: https://s22.q4cdn.com/959853165/files/doc_financials/2021/q3/FINAL-Q3-21-Shareholder-Letter.pdfhttps://s22.q4cdn.com/959853165/files/doc_financials/2021/q3/FINAL-Q3-21-Shareholder-Letter.pdf, abgerufen am 9.1.2022.

Nohrborg, Magdalena, LTE, in: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte><https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>, abgerufen am 12.11.2021.

Nokia (2016), 5G use cases and requirements.

Opensignal (2018), The State of LTE (February 2018), abgerufen am 12.11.2021.

Pelzl, Norman/Helferich, Andreas/Herzwurm, Georg (2014), Wertschöpfungsnetzwerke deutscher Cloud Anbieter, Wiesbaden, Springer Vieweg.

Pham, Quoc-Viet/Fang, Fang/Ha, Vu Nguyen/Piran, Md. Jalil/Le, Mai/Le, Long Bao/Hwang, Won-Joo/Ding, Zhiguo (2020), A Survey of Multi-Access Edge Computing in 5G and Beyond: Fundamentals, Technology Integration, and State-of-the-Art, IEEE Access, 8. Jg., S. 116974–117017.

Plass, Christoph/Rehmann, Franz Josef/Zimmermann, Andreas/Janssen, Heiko/Wibbing, Philipp (2013), Megatrends in der IT – Was Entscheider wissen müssen. In: **Plass, C./Rehmann, F. J./Zimmermann, A./Janssen, H./Wibbing, P.** (Hrsg.), Chefsache IT, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 21–55.

Porter, Michael E. (1985), Competitive Advantage. Creating and sustaining superior performance, The Free Press.

Prinsloo, Loni (2021), Facebook to Expand Planned Undersea Cable Network in Africa, in: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-08-16/facebook-to-expand-planned-undersea-cable-network-in-africa>, abgerufen am 8.12.2021.

Qualcomm (2016), Exploring 5G New Radio: Use Cases, Capabilities & Timeline.

- Rabitsch, Alexander/Xilouris, George/Anagnostopoulos, Themistoklis/Grinnemo, Karl-Johan/Sarlas, Thanos/Brunstrom, Anna/Alay, Özgü/Caso, Giuseppe,** Extending network slice management to the end-host. In: Brunstrom, Han (Ed.) 2021 – Proceedings of the 1st Workshop, S. 20–26.
- Rasheed, Arslan/Han Joo Chong, Peter/Wang-Hei Ho, Ivan/Jun Li, Xue/Liu, William** (2019), An Overview of Mobile Edge Computing: Architecture, Technology and Direction, KSII Transactions on Internet and Information Systems, 13. Jg., Nr. 10, S. 4849–4863.
- Reznik, Alex/Murillo, Luis Miguel Contreras/Fang, Yonggang/Featherstone, Walter/Filippou, Miltiadis/Fontes, Francisco/Giust, Fabio/Huang, Qiang/Li, Alice/Turyagyenda, Charles/Wehner, Christof/Zheng, Zhou** (2018), Cloud RAN and MEC: A Perfect Pairing, Sophia Antipolis, France.
- Rizzato, Francesco** (2021), Germany: Report zum 5G-Nutzererlebnis August 2021, in: <https://www.opensignal.com/de/reports/2021/08/germany/mobile-network-experience-5g>, abgerufen am 3.11.2021.
- Saad, Walid/Bennis, Mehdi/Chen, Mingzhe** (2020), A Vision of 6G Wireless Systems: Applications, Trends, Technologies, and Open Research Problems, IEEE Network, 34. Jg., Nr. 3, S. 134–142.
- Sabella, Dario/Maloor, Kishen/Reznik, Alex/Baskaran, Sheeba Backia Mary/Nayak, Kamal Ranjan/Cominardi, Luca/Lopez, Diego/Costa, Cristina/Li, Fei/Graneli, Fabrizio/Kleber, Ulrich/Gazis, Vangelis/Leadbeater, Alex/Ennesser, Francois/Gu, Xi** (2021), MEC security: Status of standards support and future evolutions, Sophia Antipolis, France.
- Sabella, Dario/Moustafa, Hassnaa/Kuure, Pekka/Kekki, Sami/Zhou, Zheng/Li, Alice/Thein, Christoph/Fischer, Edwin/Vukovic, Ivan/Cardillo, John/Young, Valerie/Jin Tan, Soo/Park, Vince/Vanderveen, Michaela/Runeson, Stefan/Sorrentino, Stefano** (2017), Toward fully connected vehicles: Edge computing for advanced automotive.
- Sami, Kekki/Walter, Featherstone/Fang, Yonggang/Kuure, Pekka/Li, Alice/Anurag, Ranjan/Purkayastha, Debashish/Jiangping, Feng/Frydmann,**

- Danny/Verin, Gianluca/Wen, Kuo-Wei/Kim, Kwihoon/Arora, Rohit/Odgers, Andy/Contreras, Luis/Scarpina, Salvatore** (2018), MEC in 5G networks, Sophia Antipolis, France.
- Samsung** (2020), Technical White Paper: Network Slicing.
- Sauter, Martin** (2018), Grundkurs Mobile Kommunikationsgeräte. LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth, 7. Aufl., Wiesbaden, Springer Vieweg.
- Schiller, E./Nikaein, N./Kalogeiton, E./Gasparyan, M./Braun, T.** (2018), CDS-MEC: NFV/SDN-based Application Management for MEC in 5G Systems, Computer Networks, 135. Jg., S. 96–107.
- Shen, Jane/Eng, Doug/Gu, Su/Huang, Rong/Brower, Jeff** (2020), Cloud Interfacing at the Telco 5G Edge.
- Slalmi, Ahmed/Chaibi, Hasna/Chehri, Abdellah/Saadane, Rachid/Jeon, Gwanggil/Hakem, Nadir** (2020), On the Ultra-Reliable and Low-Latency Communications for Tactile Internet in 5G Era, Procedia Computer Science, 176. Jg., S. 3853–3862.
- Soares, J./Carapinha, J./Melo, M./Sergento, S. (Hrsg.)** (2011), The Fifth International Conference on Advanced Engineering Computing and Applications in Sciences. ADVCOMP 2011 : November 20-25, 2011, Lisbon, Portugal, Wilmington, DE, USA.
- Son, Seokho/Choi, Hyun-Hwa/Oh, Byeong Thae/Kim, Sun Wook/Kim, Byoung Seob** (2017), Cloud SLA relationships in multi-cloud environment. In: Proceedings of the 8th International Conference on Computer Modeling and Simulation - ICCMS '17, New York, New York, USA, ACM Press, S. 1–6.
- Sprecher, Nurit/Elloumi, Omar/Martin, Jesus/Shen, Jane/Feng, Jiangping/Kuure, Pekka/Adrian, Neal/Garcia, Juan Carlos/Soloway, Alan/Yamamoto, Kenicki** (2020), Harmonizing standards for edge computing. A synergized architecture leveraging ETSI ISG MEC and 3GPP specifications, Sophia Antipolis, France.

- Stobbe, Lutz/Kemkes, Michael/Mager, Thomas/Oberthür, Simon/Schomaker, Gunnar** (2019), White Paper. 5G Charakterisierung, SICP – Universität Paderborn, Paderborn.
- Synergy Research Group** (2019), Half-Yearly Review Shows \$150 billion Spent on Cloud Services and Infrastructure, in: <https://www.srgresearch.com/articles/half-yearly-review-shows-150-billion-spent-cloud-services-and-infrastructure>, abgerufen am 7.11.2021.
- Telefónica**, Mit 5G bieten wir Kunden neue Perspektiven. Telefónica Deutschland / O2 schafft mit 5G mobile Freiheit, in: <https://www.telefonica.de/5g.html>, abgerufen am 20.12.2021.
- Telefónica** (2019), Telefónica Open Access and Edge Computing.
- Telekom** (2021a), Das Netz fragt Walter Goldenits, in: <https://www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/das-netz-fragt-walter-goldenits-634314>, abgerufen am 30.10.2021.
- Telekom** (2021b), LTE: Wie es funktioniert. Was es kann. Wo es verfügbar ist., in: <https://www.telekom.com/de/konzern/details/die-neun-wichtigsten-fakten-zu-lte-604990>, abgerufen am 14.11.2021.
- Telekom** (2021c), Telekom liegt beim 5G- und Glasfaser-Ausbau voll im Plan, in: <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/telekom-beim-5g-und-glasfaser-ausbau-voll-im-plan-634836?>, abgerufen am 30.10.2021.
- tmforum** (2020), 5G for vertical Industries. Catalyst - Digital transformation World 2020.
- United Internet**, 1&1, in: <https://www.united-internet.de/marken/1und1.html>, abgerufen am 22.12.2021.
- United Internet**, Ionos by 1&1, in: <https://www.united-internet.de/marken/ionos.html>, abgerufen am 12.12.2021.
- VDMA/Fraunhofer-Institut** (2020), 5G im Maschinen- und Anlagenbau. Leitfaden für die Integration von 5G in Produkt und Produktion.

- Vodafone** (online a), Alibaba Cloud, in: <https://www.vodafone.de/business/loesungen/alibaba-cloud.html>, abgerufen am 5.12.2021.
- Vodafone** (online b), Campus-Netze, in: <https://www.vodafone.de/business/loesungen/campus-netz.html>, abgerufen am 20.12.2021.
- Vodafone** (online c), Vodafone Business Campus Flex, in: <https://www.vodafone.de/business/loesungen/campus-flex.html>, abgerufen am 11.11.2021.
- Vodafone** (online d), Vodafone Total Cloud Managed Hosting, in: <https://www.vodafone.de/business/loesungen/total-cloud-managed-hosting.html>, abgerufen am 5.12.2021.
- Wang, Kaiqiang/Shen, Minwei/Cho, Junguk/Banerjee, Arijit/van der Merwe, Jacobus/Webb, Kirk** (2015), *MobiScud: A Fast Moving Personal Cloud in the Mobile Network*, New York, United States.
- Wang, Shuo/Zhang, Xing/Zhang, Yan/Wang, Lin/YANG, Juwo/Wang, Wenbo** (2017), *A Survey on Mobile Edge Networks: Convergence of Computing, Caching and Communications*.
- Wannstrom, Jeanette** (2013), Carrier Aggregation explained, in: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>, abgerufen am 14.12.2021.
- Weidner, Markus** (2021), Test: Das "echte" 5G-Netz von Vodafone in der Praxis, in: <https://www.teltarif.de/5g-standalone-vodafone-test/news/84682.html?page=all>, abgerufen am 14.11.2021.
- Westgarth, Alastair** (2021), Saying goodbye to Loon, in: <https://blog.x.company/loon-draft-c3fceb11f3f>, abgerufen am 8.12.2021.
- Wiegerling, Klaus** (2013), Ubiquitous Computing. In: Grunwald, A./Simonidis-Puschmann, M. (Hrsg.), *Handbuch Technikethik*, Stuttgart, J.B. Metzler, S. 374–378.
- Winklhofer, Stefan** (2018), SDN – die Königsklasse der Netzwerk-Automatisierung, in: <https://www.hcd-consulting.de/sdn-die-koenigsklasse-der-netzwerk-automatisierung/>, abgerufen am 23.12.2021.

Zhang, Zhi-Li/Dayalan, Udhaya Kumar/Ramadan, Eman/Salo, Timothy J.

(08232021), Towards a Software-Defined, Fine-Grained QoS Framework for 5G and Beyond Networks. In: Proceedings of the ACM SIGCOMM 2021 Workshop on Network-Application Integration, New York, NY, USA, ACM, S. 7–13.

Ziesecke, Dennis (2021), Die beste Virtual-Reality-Brille, in: <https://www.allesbeste.de/test/die-beste-vr-brille/>, abgerufen am 15.12.2021.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

In manchen Fällen ist ein spezieller Wortlaut durch Richtlinien der Hochschule oder des Unternehmens vorgegeben.

Erklärung – Einverständnis

Ich erkläre mich damit

einverstanden,

nicht einverstanden

dass ein Exemplar Master-Thesis in die Bibliothek des Fachbereichs aufgenommen wird; Rechte Dritter werden dadurch nicht verletzt.

Großhansdorf, 03.02.2022

A solid black rectangular box used to redact the student's signature.

Unterschrift des Studierenden