

Wissner, Matthias; Elbanna, Ahmed; Sörries, Bernd; Plückerbaum, Thomas

Working Paper

Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen

WIK Diskussionsbeitrag, No. 478

Provided in Cooperation with:

WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH, Bad Honnef

Suggested Citation: Wissner, Matthias; Elbanna, Ahmed; Sörries, Bernd; Plückerbaum, Thomas (2021) : Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, WIK Diskussionsbeitrag, No. 478, WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste, Bad Honnef

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/248434>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen

Autoren:

Matthias Wissner
Ahmed Elbanna
Bernd Sörries
Thomas Plückebaum

Bad Honnef, Dezember 2021

Impressum

WIK Wissenschaftliches Institut für
Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik.org
www.wik.org

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin und Direktorin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor	Alex Kalevi Dieke
Direktor Abteilungsleiter Netze und Kosten	Dr. Thomas Plückebaum
Direktor Abteilungsleiter Regulierung und Wettbewerb	Dr. Bernd Sörries
Leiter der Verwaltung	Karl-Hubert Strüver
Vorsitzende des Aufsichtsrates	Dr. Daniela Brönstrup
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder. WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.
ISSN 1865-8997

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	II
Tabellen	II
Abkürzungsverzeichnis	III
Zusammenfassung	V
Summary	VI
1 Einleitung	1
2 Motivation von Open RAN	2
3 Technisches Konzept von Open RAN	3
3.1 Architektur von Mobilfunknetzen	4
3.2 Das grundsätzliche Konzept von Open RAN	5
3.3 Die heutige RAN-Architektur	6
3.4 O-RAN-Referenzarchitektur	9
3.5 Weitergehende Überlegungen zur O-RAN-Architektur	11
3.6 Sicherheitsaspekte von Open RAN	14
3.7 Open-RAN-Organisationen	15
3.8 Zwischenfazit zum technischen Teil	19
4 Stand der Entwicklung	19
4.1 Open RAN-Aktivitäten im internationalen Bereich	20
4.2 Kommerzielle Einführungen und Pilotprojekte in Deutschland	22
5 Ökonomische Aspekte	25
5.1 Lock-in-Effekte	25
5.2 Marktconstellation und Wettbewerbsentwicklung	27
5.3 Kostensituation	31
5.4 Innovationen	33
5.5 Auswirkungen auf Produktdifferenzierung	35
5.6 Digitale Souveränität und Sicherheit	36
6 Situation in 5G-Campusnetzen	38
7 Ergebnisse und Handlungsempfehlungen	39
Literatur	41

Abbildungen

Abbildung 3-1:	Traditionelle Mobilfunknetz-Architektur	4
Abbildung 3-2:	4G-Standort	8
Abbildung 3-3:	4G- vs 5G-Netzarchitektur	8
Abbildung 3-4:	O-RAN-Architektur	10
Abbildung 3-5:	Decentralized vs Centralized RAN	12
Abbildung 3-6:	vRAN vs. Open RAN	14
Abbildung 4-1:	Globale Open-Ran-Einsätze und Versuche	20
Abbildung 5-1:	Lock-in und Pfadabhängigkeit	26
Abbildung 5-2:	Weltweite Marktanteile am Aufbau von RAN (3. Quartal 2020)	28
Abbildung 5-3:	Zahl der aktiven SIM-Karten nach Mobilfunknetzbetreibern inkl. M2M-SIM-Karten (Schätzung für 2020)	28
Abbildung 5-4:	Preisentwicklung verschiedener IT-Services	32
Abbildung 5-5:	Ausschluss von Huawei beim Aufbau von 5G weltweit	37

Tabellen

Tabelle 3-1:	C-RAN vs. Open RAN	13
Tabelle 5-1:	HHI für die Angebots- und Nachfrageseite im Mobilfunkmarkt	29
Tabelle 5-2:	Anzahl der Lösungsmöglichkeiten in einer Open-RAN-Umgebung	31
Tabelle 5-3:	Fragen und Antworten für erfolgreiche Innovationen im Bereich Open RAN	34
Tabelle 7-1:	SWOT-Analyse: Open RAN aus volkswirtschaftlicher Sicht	39

Abkürzungsverzeichnis

3G	Dritte Mobilfunkgeneration
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Vierte Mobilfunkgeneration
5G	Fünfte Mobilfunkgeneration
5GC	5C Core-Network
6G	Sechste Mobilfunkgeneration
AAU	Active Antenna Units
BBU	Baseband Unit
BS	Basisstation
CoMP	Coordinated Multi-Point
COTS	Commercial Off-The-Shelf
CPRI	Common Public Radio Interface
C-RAN	Centralized/Cloud Radio Access Network
CU	Centralized Unit
CU-CP	Centralized Unit-Control plane
CU-UP	Centralized Unit-User plane
D-RAN	Dezentralen-RAN
DT	Deutsche Telekom
DU	Distributed Unit
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
EPC	Evolved Packet Core
HW	Hardware
IMS	IP Multimedia Subsystem
IoT	Internet of Things, Internet der Dinge
IP	Internet-Protokoll
ISP	Internet Service Provider
KI	Künstliche Intelligenz
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
mMTC	massive Machine-Type Communications
MNO	Mobile Network Operator
Near-RT RIC	Near-RealTime Radio Intelligence Controller
NFV	Network Functions Virtualization
NFVI	Network Functions Virtualization Infrastructure
Non-RT-RIC	Non-RealTime Radio Intelligence Controller
NR	New Radio
NSA	Non-StandAlone
O-Cloud	O-RAN Cloud
OCN	Open Core Network
OEM	Original Equipment Manufacturer
OPEX	Operational Expenditure
O-RAN	Open-Radio Access Network

OSC	O-RAN Software Community
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network
RAT	Radio Access Technology
RCF	Radio Control Functions
RCP	Rakuten Communications Platform
RCS	Rich Communication Services
RF	Radio Frequenz
RoE	Radio over Ethernet
RRHs	Remote Radio Heads
RRU	Remote Radio Unit
SA	StandAlone
SCF	Small Cell Forum
SDN	Software Defined Networks
SFG	Security Focus Group
SMO	Service Management and Orchestration-Framework
SW	Software
TCP	Transmission Control Protocol
TIP	Telecom Infra Project
UE	User Equipment
UK	United Kingdom, Vereintes Königreich
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
URLLC	Ultra-reliable and Low Latency Communications
VoLTE	Voice over LTE
VoNR	Voice over New Radio
vRAN	virtual Radio Access Networks

Zusammenfassung

Derzeit wird weltweit die fünfte Mobilfunkgeneration (5G) von den Mobilfunknetzbetreibern eingeführt. Parallel dazu haben die Arbeiten an der sechsten Mobilfunkgeneration (6G) begonnen. Beide Mobilfunkgenerationen zeichnen sich dadurch aus, dass sie Entwicklungen wie Software Designed Networks (SDN) und Network Function Virtualisation (NFV) beinhalten, wodurch sich die Hardware im jeweiligen Mobilfunknetz auf die Kernaufgabe der Übertragung und deren Steuerung konzentriert und die Software für die Steuerung der maßgeblichen Prozesse aus den Netzknoten herausgenommen, generalisiert und (perspektivisch) auf allgemein verfügbare IT-Systeme verlagert werden soll.

Diese Entwicklung beinhaltet auch eine unter Marktteilnehmern teilweise kontrovers gesehene Öffnung von Schnittstellen im Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN). Unter dem Begriff „Open RAN“ wird eine neue, disaggregierte Infrastruktur im RAN diskutiert und ihre jeweiligen Komponenten entwickelt. Durch softwaregetriebene Prozesse können einzelne Netzwerkfunktionen auf zentraler Ebene des RAN kontrolliert und gesteuert werden. Mit Open RAN verfolgen die Mobilfunknetzbetreiber das Ziel, Netzelemente einfacher durch Hardware-Komponenten eines anderen Herstellers austauschen zu können (Multi-Vendor-Umfeld). Es wird insoweit auf das Ziel hingearbeitet, ein neues Ökosystem zu etablieren, in dem im Vergleich zum Status quo mehr Hersteller unterschiedliche Komponenten eines Netzwerks einschließlich der notwendigen Software liefern können. Mobilfunknetzbetreiber versprechen sich davon eine höhere Wettbewerbsintensität auf Herstellerseite und einen verstärkten Innovationswettbewerb.

Eine wesentliche Herausforderung von Open RAN besteht in der vergleichsweise komplexen Integration der angestrebten Multi-Vendor-Umgebung. Zwar können mit Open RAN bestehende Lock-in-Effekte hinsichtlich des Bezugs von Netzwerkkomponenten bei einzelnen Herstellern verringert werden. Fraglich ist aber, ob nicht neue Lock-in-Effekte entstehen, wenn die Integration der neuen Komponenten in den Funkzugangsnetzen abgeschlossen ist. Des Weiteren stellen die angestrebten offenen Schnittstellen zwischen den einzelnen Netzwerkkomponenten eine größere Angriffsfläche für Cyber-Angriffen dar, womit eine weitere Herausforderung genannt ist. Während auf der politischen Ebene mit Open RAN auch ein Mehr an digitaler Souveränität in Europa verbunden wird, wird die Standardisierung ganz maßgeblich von Unternehmen aus anderen Kontinenten vorangetrieben. Im Ergebnis ist nach akutem Kenntnisstand offen, ob Open RAN die mit dem Konzept verbundenen Versprechen auch tatsächlich einhalten können. Es zeichnet sich zudem ab, dass in künftigen Funkzugangsnetzen die Betreiber von Cloud-Infrastrukturen eine zunehmend wichtigere Rolle einnehmen werden. Zusammenfassend besteht noch ein weiterer Forschungsbedarf, um die Wirkungen von Open RAN ganzheitlich einschätzen zu können.

Summary

The fifth mobile communications generation (5G) is currently being rolled out by mobile network operators worldwide. In parallel, research work has begun on the sixth generation of mobile communications (6G). Both mobile communications generations are characterized by the fact that they include developments such as Software Designed Networks (SDN) and Network Function Virtualization (NFV), whereby the hardware in the respective mobile communications network is to concentrate on the core task of transmission and its control and the software for controlling the relevant processes is to be removed from the network nodes, generalized and (in the long term) transferred to generally available IT systems.

This development also includes an opening of interfaces in the radio access network (RAN), which is sometimes viewed controversially among market participants. Under the term "Open RAN", a new, disaggregated infrastructure in the RAN is being discussed and its respective components developed. Through software-driven processes, individual network functions can be controlled and managed at the central level of the RAN. With Open RAN, mobile network operators are pursuing the goal of being able to replace network elements more easily with hardware components from another manufacturer (multi-vendor environment). In this respect, the aim is to establish a new ecosystem in which, compared with the status quo, more manufacturers can supply different components of a network, including the necessary software. Mobile network operators expect this to increase the intensity of competition on the manufacturer side and intensify competition for innovation.

A major challenge of Open RAN is the comparatively complex integration of the desired multi-vendor environment. It is true that Open RAN can reduce existing Lock-in effects with regard to the procurement of network components from individual manufacturers. However, it is questionable whether new Lock-in effects will not arise once the integration of the new components in the radio access networks has been completed. Furthermore, the open interfaces envisaged between the individual network components represent a larger attack surface for cyber attacks, which is a further challenge. While at the political level Open RAN is also associated with greater digital sovereignty in Europe, the standardization is being driven quite significantly by companies from other continents. As a result, it remains to be seen whether Open RAN will actually be able to fulfill the promises associated with the concept. It is also becoming apparent that cloud infrastructure operators will play an increasingly important role in future radio access networks. In summary, there is still a need for further research in order to be able to assess the effects of Open RAN holistically.

1 Einleitung

Derzeit wird weltweit die fünfte Mobilfunkgeneration (5G) von den Mobilfunknetzbetreibern eingeführt.¹ Parallel dazu haben die Arbeiten an der sechsten Mobilfunkgeneration (6G) begonnen.² Beide Mobilfunkgenerationen zeichnen sich dadurch aus, dass sie Entwicklungen wie Software Designed Networks (SDN) und Network Function Virtualisation (NFV) beinhalten, wodurch die Hardware im jeweiligen Mobilfunknetz sich auf die Kernaufgabe der Übertragung und deren Steuerung konzentriert und die Software für die Steuerung der maßgeblichen Prozesse aus den Netzknoten herausgenommen, generalisiert und (perspektivisch) auf allgemein verfügbare IT-Systeme verlagert wird bzw. verlagert werden soll.

Diese Entwicklung beinhaltet auch eine unter Marktteilnehmern teilweise kontrovers gesehene Öffnung von Schnittstellen im Funkzugangnetz (Radio Access Network, RAN). Unter dem Begriff „Open RAN“ wird eine neue, disaggregierte Infrastruktur im RAN diskutiert und entwickelt. Durch softwaregetriebene Prozesse können einzelne Netzwerkfunktionen auf zentraler Ebene des RAN kontrolliert und gesteuert werden. Die Netzkomponenten, die in der Fläche beispielsweise an den Mobilfunkstandorten vorkommen, verlieren insoweit an Rechenkapazität („Intelligenz“). Damit soll den Mobilfunknetzbetreibern ermöglicht werden, die jeweiligen Netzelemente einfacher durch Hardware-Komponenten anderer Hersteller auszutauschen. Es wird insoweit auf das Ziel hingearbeitet, ein neues Ökosystem zu etablieren, in dem im Vergleich zum Status quo mehr Hersteller unterschiedliche Komponenten eines Netzwerks liefern können. Mobilfunknetzbetreiber versprechen sich davon eine höhere Wettbewerbsintensität auf Herstellerseite und einen verstärkten Innovationswettbewerb.

Dieser Diskussionsbeitrag widmet sich der Frage, ob und inwiefern Open RAN die mit dem Konzept assoziierten Erwartungen rechtfertigen kann. Nach einer kurzen Diskussion zur Motivation von Open RAN wird dazu im ersten Teil der Analyse ein Überblick über die technischen Aspekte von Open RAN gegeben. Dabei wird auf die Funktionsweise von Open RAN vor dem Hintergrund verschiedener Mobilfunkstandards eingegangen. Weiterhin erfolgt ein Überblick über die wesentlichen aktuellen Initiativen und Akteure im Bereich Open RAN sowie die wesentlichen bereits bekannten Umsetzungen in der Praxis. Hierbei wird auch die Frage nach der Sicherheit von Open RAN diskutiert.

Im zweiten Teil des Diskussionsbeitrags wird auf ökonomischen Aspekte im Zusammenhang mit Open RAN eingegangen. Dazu wird die Frage diskutiert, inwiefern heute Lock-in-Effekte der Mobilfunknetzbetreiber bezüglich der Hersteller bestehen und ob diese nach Öffnung der Netzarchitektur und damit des Marktes möglicherweise durch neue Abhängigkeiten ersetzt werden. Daneben werden die aktuelle Marktconstellation analysiert und die Anreize für Innovationen diskutiert. Die Kosten, etwaige Produktdifferenzierungen und Fragen der digitalen Souveränität von Open RAN werden ebenfalls

¹ Ericsson Mobility Report (2021), S. 2.

² Godlovitch et al. (2019), S. 78 ff.

beleuchtet. Schließlich wird zum Ende des Diskussionsbeitrags noch Open RAN im Kontext von 5G-Campusnetzen betrachtet. Der Diskussionsbeitrag schließt mit einer SWOT-Analyse zu Open RAN, in der die wesentlichen diskutierten Aspekte noch einmal gegenübergestellt werden und leitet entsprechende Handlungsempfehlungen ab.

2 Motivation von Open RAN

Die Initiative hinsichtlich der Entwicklung, Standardisierung und Implementierung von Open RAN ging in erster Linie von Mobilfunknetzbetreibern aus. Sie versprechen sich einerseits niedrigere Kosten im RAN und andererseits die Erleichterung von technischen Differenzierungen im RAN zur Realisierung neuer Anwendungen. Die damit verbundenen betriebswirtschaftlichen Vorteile sollen aus einem wettbewerbsfähigeren und dynamischeren Hersteller-Ökosystem mit kürzeren Innovationszeiten resultieren.³ Im Jahr 2018 wurde zur Forcierung dieser Ziele von fünf Unternehmen die „O-RAN ALLIANCE“ gegründet.⁴

Gleichzeitig wird die Diskussion über Open RAN auch auf politischer Ebene geführt. Die deutsche Bundesregierung hat angekündigt, zukünftige Kommunikationstechnologien, unter anderem Open RAN, mit zwei Mrd. Euro zu fördern.⁵ Dies geschieht vor dem Hintergrund einer Debatte über die digitale Souveränität in Europa. So empfiehlt die Europäische Kommission ihren Mitgliedstaaten im Hinblick auf den Aufbau von 5G-Netzen, „die Risikoprofile der Anbieter [zu] bewerten und in der Folge auf Anbieter, die als mit einem hohen Risiko behaftet gelten, einschlägige Beschränkungen an[zuzuwenden, darunter den Ausschluss von Anbietern zur wirksamen Minderung der Risiken für wichtige Anlagen und Einrichtungen, die in der EU-weit koordinierten Risikobewertung als kritisch und anfällig eingestuft wurden (z. B. Kernnetzfunktionen, Netzverwaltungs- und Koordinierungsfunktionen sowie Zugangsnetzfunktionen).“⁶ Des Weiteren sollen die Mitgliedstaaten „sicherstellen, dass jeder Betreiber über eine angemessene herstellerneutrale Strategie verfügt, um eine größere Abhängigkeit von einem einzigen Anbieter (oder Anbietern mit ähnlichem Risikoprofil) zu vermeiden oder zu begrenzen, für ein angemessenes Gleichgewicht zwischen den Anbietern auf nationaler Ebene sorgen und eine Abhängigkeit von Anbietern vermeiden, die als mit einem hohen Risiko behaftet gelten; dazu muss auch jede feste Bindung („lock-in“) an einen einzigen Anbieter vermieden werden, unter anderem durch die Förderung einer größeren Interoperabilität der Anlagen und Ausrüstungen.“⁷

Open RAN wird vor allem im Zusammenhang mit dem Aufbau von 5G- (und zukünftig auch 6G-) Netzen gesehen. Anwendungen („use cases“) von 5G in vielen unterschiedlichen Sektoren führen zu sehr ausdifferenzierten technischen Anforderungen hinsicht-

³ O-RAN ALLIANCE, <https://www.o-ran.org/about>, zuletzt abgerufen am 20.04.2021.

⁴ O-RAN ALLIANCE, <https://www.o-ran.org/about>, zuletzt abgerufen am 20.04.2021.

⁵ Deutscher Bundestag (2021), S. 6.

⁶ EU-Kommission (2020), S. 1

⁷ EU-Kommission (2020), S. 1 ff.

lich Latenz, Übertragungskapazitäten und Verbindungsdichte. Der Einsatz von Open RAN soll das Ziel unterstützen, diesen individuellen Anwendungen funktechnisch effizient und effektiv gerecht zu werden, indem eine neue RAN-Architektur mit zusätzlichen Netzelementen eine noch differenzierte Allokation von Funkressourcen ermöglicht.

Vor dem Hintergrund stabiler Umsätze pro Kunde und dem Erfordernis, der weiterhin steigenden Nachfrage nach mobilen Datendiensten zu entsprechen, sind Mobilfunknetzbetreiber bestrebt, ihre Kostenstruktur weiter zu optimieren. Da das RAN bis zu 70 % der Investitionsausgaben eines Betreibers ausmachen kann⁸, liegt es nahe, die entsprechenden Netzkomponenten hinsichtlich ihres Beitrags zu den Gesamtkosten zu überprüfen:

- Die hohe Marktkonzentration bei den Netzwerkausrüstern (vgl. dazu Abschnitt 5.2) könnte dafür sprechen, dass die Preise für die RAN-Ausrüstungen höher liegen als bei einem Wettbewerb von einer Vielzahl von Herstellern.
- Zudem könnte die bestehende Marktstruktur ein Hemmnis für Innovationen im RAN sein, weil etablierte Hersteller mit Innovationen ihre eigene Marktstellung angreifen könnten, woran sie ggf. kein Interesse haben. Infolgedessen könnten die Anbieter zu geringe Anreize haben, Innovationen, die die bisherige Systemarchitektur nachhaltig verändern, zu entwickeln.
- Aufgrund der Anforderungen der Mobilfunknetzbetreiber im Hinblick auf den Energieverbrauch haben die etablierten Hersteller von RAN-Komponenten optimierte Netzkomponenten mit geringen Betriebskosten entwickelt, in denen die Hardware und Software aus Sicht der Hersteller möglichst effizient aufeinander abgestimmt sind. Daraus folgt dann jedoch, dass die Hardware nicht ohne Weiteres durch Hardware anderer Hersteller ausgetauscht werden kann. Daraus entstehen dann Lock-in-Effekte.

Vor diesem Hintergrund soll Open RAN aus Sicht der Mobilfunknetzbetreiber durch seine offene und flexible Architektur eine vielversprechende und kosteneffiziente Lösung für neue RAN liefern, um künftig mehr Flexibilität für neue Anwendungen zu erhalten und gleichzeitig (Investitionen) Kosten zu senken.⁹

3 Technisches Konzept von Open RAN

In diesem Kapitel wird das technische Konzept von Open RAN vorgestellt. Zunächst wird ein Überblick über die Architektur von Mobilfunknetzen gegeben. Danach werden das Open-RAN-Ökosystem sowie die relevanten Marktteilnehmer erläutert. Darüber

⁸ Plantin (2021).

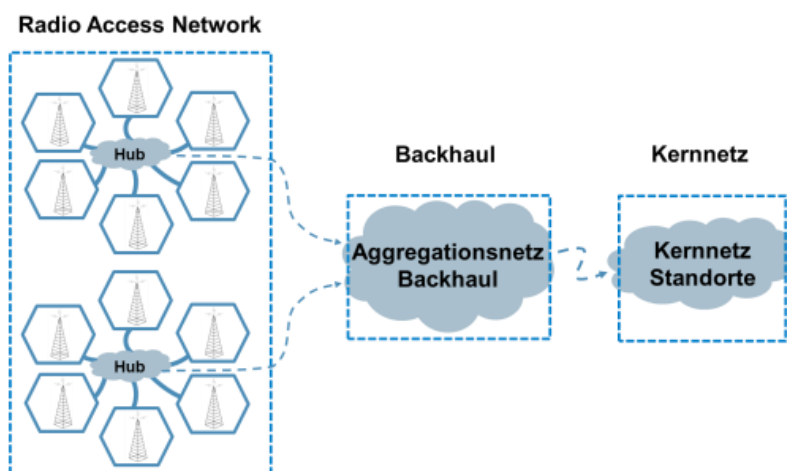
⁹ Telefonica (2020), Vgl. z. B. <https://www.telefonica.de/news/corporate/2020/12/telefonica-o2-setzt-erfolgreich-open-ran-im-o2-netz-ein.html>, zuletzt abgerufen am 15.12.2020.

hinaus wird die O-RAN-Architektur¹⁰ erörtert und schließlich werden einige architektonische Überlegungen in Hinblick auf die wesentlichen 5G-RAN-Trends aufgeführt.

3.1 Architektur von Mobilfunknetzen

Mobilfunknetze sind in drei Netzabschnitte gegliedert: Funkzugangnetz (Radio Access Network, RAN), Backhaul-Netz und Kernnetz. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 3-1 dargestellt.

Abbildung 3-1: Traditionelle Mobilfunknetz-Architektur



Quelle: WIK.

3.1.1 RAN

Das Radio Access Network (RAN) verfügt über Basisstationen (BS), welche die Funkübertragung sowie einige digitale Verarbeitungsfunktionen der Signale übernehmen. Die Hauptfunktion des RAN besteht darin, den Nutzer über die sogenannte „Luftschnittstelle“ zwischen dem mobilen Endgerät und der BS mit dem Mobilfunknetz zu verbinden. Darüber hinaus führt das RAN einige übergeordnete Funkzugriffsfunktionen wie Radio Ressource Management (RRM) aus.¹¹

¹⁰ Im Zusammenhang mit der O-RAN-Alliance (vgl. Abschnitt 3.4) wird die Schreibweise mit Bindestrich (O-RAN) benutzt. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass es sich bei den beschriebenen Zusammenhängen nur um eine mögliche Ausprägung im weiter gefassten Umfeld von Open RAN handelt.

¹¹ Unter RRM versteht man das Management auf Systemebene von Gleichkanalstörungen, Funkressourcen und anderen Funkübertragungseigenschaften in drahtlosen Kommunikationssystemen.

3.1.2 Backhaul

Das Backhaul-Netz ist für die Verkehrsaggregation und den Transport von Daten zwischen dem RAN und dem Kernnetz zuständig. Die Architektur und Implementierung des Backhaul-Netzes können in Bezug auf Funkzugang und Kernnetzarchitekturen nahezu unabhängig sein und fallen somit nicht unter Radio-Access-Technology¹²- (RAT) Standards. Eine ausreichende Transportkapazität und die Einhaltung von QoS-Anforderungen (z. B. Latenzzeiten) müssen gewährleistet sein.

3.1.3 Kernnetz

Schließlich ist das Kernnetz für alle übrigen und nicht funkbasierten Funktionen zuständig und fungiert als Gateway zu den anderen Mobil- und Festnetzen, d. h. auch zum Internet. Einige Kernfunktionen und Schnittstellen des Netzwerks sind ebenfalls standardisiert und entsprechen in den meisten Fällen der angenommenen RAT.

3.2 Das grundsätzliche Konzept von Open RAN

Open RAN ist ein Konzept, das Interoperabilität offener Hardware, offener Software und offener Schnittstellen umfasst. Es soll durch die Trennung von Software und Hardware derart umgesetzt werden, dass die RAN-Software auf jeder marktüblichen Hardwareplattform ausgeführt werden kann. Mit anderen Worten: Beim Netzaufbau soll die RAN-Funktionalität von der Hardware getrennt und eine "offene" Schnittstelle geschaffen werden. Diese offenen Schnittstellen für Funkausrüstung (radio equipment), Basisstationen und Netzelemente können auf standardisierter commercial off-the-shelf (COTS) laufen.

In einem herkömmlichen RAN kann ein Mobilfunknetzbetreiber nicht "nur" eine Software von Hersteller B auf einer Funkausrüstung von Hersteller A ersetzen, sondern muss die gesamte Ausrüstung austauschen. Die "Dissaggregation" und "Offenheit" des offenen RAN ermöglichen jedoch die Interoperabilität mit mehreren Anbietern, was bedeutet, dass ein Betreiber seine SW oder HW ersetzen kann, ohne die einzelnen Komponenten der SW/HW ersetzen zu müssen. Die Software für die offene RAN-Plattform kann auf offenen Quellcodes oder auf dem Code von Programmierern (Einzelpersonen oder Unternehmen) basieren, die zu ihrer Entwicklung beitragen können. Die offene Softwareplattform kann für die Realisierung aller RAN-Funktionen verwendet werden. Das offene RAN ermöglicht ein Multivendor-Ökosystem. Dies ermöglicht den Übergang

¹² RAT ist die zugrunde liegende physikalische Verbindungsmethode für ein funkbasiertes Kommunikationsnetz. Viele moderne Mobiltelefone unterstützen mehrere RATs in einem Gerät wie Bluetooth, Wi-Fi und GSM, UMTS, LTE oder 5G NR

von proprietären Lösungen zu COTS-basierten und offenen, softwarebasierten Lösungen sowie die Schaffung einer breiteren Anbieterkette.¹³

Obwohl RAN-Schnittstellen auch bei den herkömmlichen Systemen eigentlich offen sein sollten, da sie auf 3GPP-Standards basieren, bleiben Software und Schnittstellen bei den herkömmlichen RAN-Implementierungen entweder proprietär oder werden von den einzelnen Anbietern „geschlossen“ und sind zumeist an die zugrunde liegende Hardware desselben Anbieters gebunden. Dies bedeutet, Mobilfunknetzbetreiber können nicht "einfach nur" eine Software von Hersteller B auf einer Funkausrüstung von Hersteller A ersetzen, sondern müssen in diesem Fall die gesamte Ausrüstung austauschen, da nicht nur eine einzelne Komponente der alten RAN-Installation ersetzt werden können. Jegliche Software-Upgrades sind an die installierte Basis gebunden. Dies kann aufgrund der proprietären, herstellerspezifischen Produktrealisierung der Schnittstellenspezifikation zu einem Vendor-Lock-in-Effekt führen (vgl. dazu ausführlich Abschnitt 5.1).

Es ist daher einfacher und günstiger, die Funkausrüstung von Hersteller A auf dem Funkmast zu belassen und die Software von Hersteller A durch die Software von Hersteller B zu ersetzen. So muss auf dem Funkmast keine Installation vorgenommen werden. COTS-basierte Hardware hingegen kann am Fuß des Mastes belassen werden und kann aufgerüstet und in ihren Funktionen erweitert werden. Genau dies ist es, was Open RAN ermöglicht: Mischen und Anpassen von Software und Hardware (Funkgeräte und COTS-Server/Hardware), ohne dass ein aufwendiger Austausch der vollständigen Systeme vor Ort erforderlich ist.

Letztendlich kann ein Open-RAN-Ansatz im Kontext von 5G RAN zusätzliche Flexibilität bieten, um die Anforderungen von 5G-Anwendungen zu erfüllen. Insbesondere unterstützt 5G vertikale Anwendungen mit unterschiedlichen Netzanforderungen an Leistung, Kapazität, Latenz usw. Beispiele sind u. a. Anwendungen wie Ultra-Reliable Low-Latency Communication (URLLC) und Massive Machine-Type Communication (mMTC), für die 4G-Netze nicht konzipiert sind. Diese erfordern eine flexible, softwareprogrammierbare RAN-Architektur, um verschiedene vertikale Anwendungen zu unterstützen. Mit offenen, programmierbaren RAN-Schnittstellen kann eine zentralisierte und virtualisierte Hardware beispielsweise gepoolte, virtualisierte Netzwerkfunktionen bereitstellen, die verschiedene Ressourcen durch Network-Slicing dynamisch zuweisen können. Dies ermöglicht, die Architektur nach Bedarf effizient und effektiv zu gestalten und an die Anforderungen der verschiedenen Anwendungen anzupassen.

3.3 Die heutige RAN-Architektur

Die Architekturen der Funkzugangsnetze (RAN) sind geeignet, die Anforderungen der heutigen Netzbetreiber und Endnutzer zu erfüllen. Die Infrastruktur des RAN ist aus

¹³ Parallel Wireless (2020), S. 12.

Sicht der Netzbetreiber proprietär, teuer in der Skalierung, schwer zu programmieren und umständlich bei der Einführung neuer Geschäftsanwendungen, die über die Konnektivität hinausgehen¹⁴. Um die O-RAN-Architektur und ihre Vorteile zu verstehen, geben wir einen Überblick über die aktuellen RAN-Architekturen.

3.3.1 4G-Netzarchitektur

Im traditionellen 4G-RAN umfasst die Basisstation zwei Modelle:

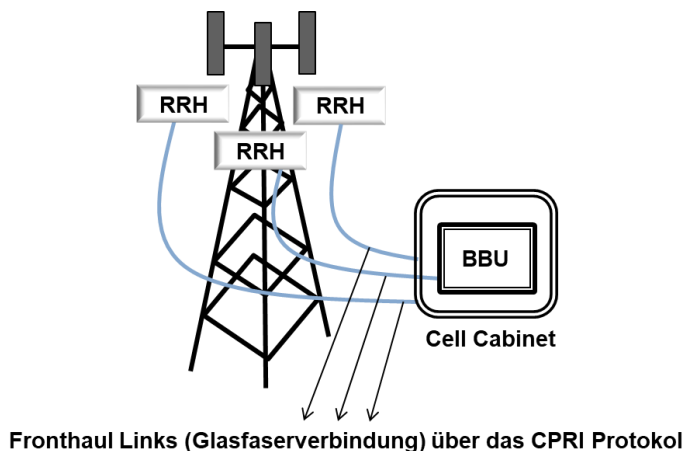
- Remote Radio Head (RRH): Dieses bietet eine drahtlose Signalabdeckung, indem Hochfrequenzsignale (RF) an User Equipments (UEs) im Downlink übertragen und die Basebandsignale von UEs an die Baseband Unit (BBU) weitergeleitet werden. Durch die Durchführung der meisten Signalverarbeitungsfunktionen in der BBU können RRHs unkompliziert in ihrer Errichtung sein und in einem Großszenario kostengünstig verteilt werden.
- Basisband-Unit (BBU): Sie führt digitale Verarbeitungsfunktionen der ersten drei TCP/IP-Schichten aus, während höhere Schichten Steuerungs- und Netzwerkfunktionen beinhalten.

In der dezentralen RAN-Architektur (D-RAN) sind BBUs und RRHs im gleichen Rack am Antennenstandort installiert. Das RRH ist über eine Glasfaserverbindung mit der BBU (Fronthaul) über das Common-Public-Radio-Interface- (CPRI) Protokoll¹⁵ verbunden, wie in Abbildung 3-2 dargestellt.

¹⁴ Vgl. z. B. Deutsche Telekom (2016): It's time for a new RAN architecture., <https://www.telekom.com/en/company/details/it-s-time-for-a-new-ran-architecture-441670> , zuletzt abgerufen am 10.09.2021.

¹⁵ Die CPRI-Schnittstelle wurde 2003 definiert, um die Transport-, Verbindungs- und Steuerungsparameter zwischen BBU und RRH zu standardisieren. Sie basierte auf der in der BBU gemeinsamen Architektur der Bitübertragungsschicht (physische Schicht, PHY), Sicherungsschicht und Vermittlungsschicht (Netzwerkschicht), wobei das Fronthaul die Verbindung zwischen RRH und der PHY-Layer der BBU sicherstellte. Die strikten Laufzeitvorgaben von CPRI beschränkten jedoch die räumliche Trennung zwischen den Standorten von BBU und RRH.

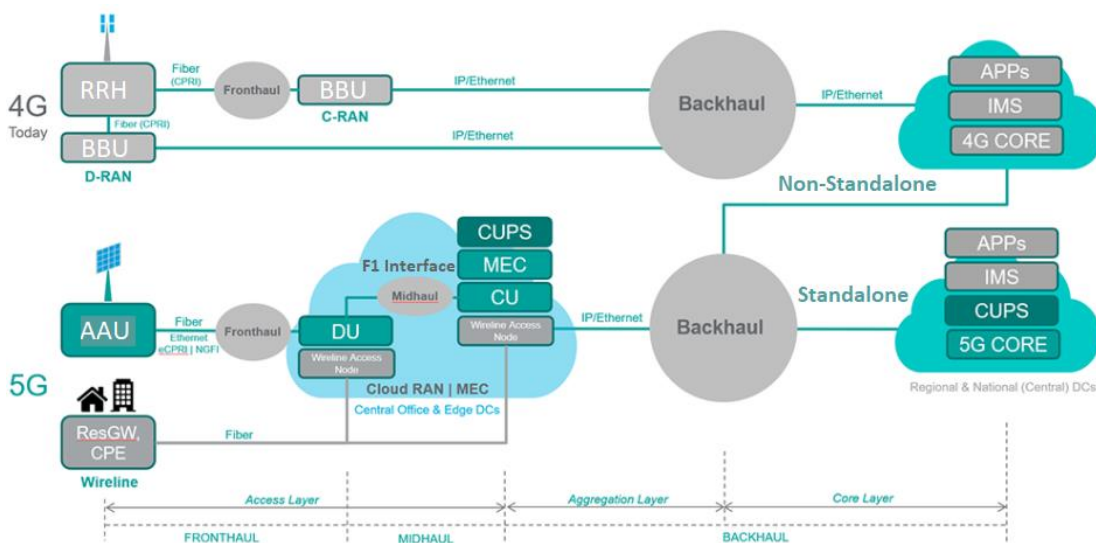
Abbildung 3-2: 4G-Standort



Quelle: WIK.

Diese Fronthaul-Lösungen wurden erstmals für LTE-Netze installiert, als die Netzbetreiber mit ihren Funkmodulen näher an die Antennen herangerückt sind. Das Ziel bestand darin, die Backhaul-Verbindung zwischen BBU und Kernnetz zu ergänzen. Die BBU kann alternativ auch zentralisiert und nicht zusammen mit der RRH an einem physischen Standort (C-RAN) untergebracht werden, wie im linken oberen Teil der Abbildung 3-3 dargestellt.

Abbildung 3-3: 4G- vs 5G-Netzarchitektur



Quelle: Cassan, R. (2019), abrufbar unter: <https://www.spirent.com/blogs/is-your-backhaul-network-ready-for-5g>, zuletzt abgerufen am 22.11.2021.

3.3.2 5G-Netzarchitektur

5G-RAN ist eine Weiterentwicklung der traditionellen Architektur von BBU und Remote-Radio-Heads (RRHs) aus 4G-Netzen. Dies führt zu einer Architektur, die aus verteilten Einheiten (DUs), zentralen Einheiten (CUs) und aktiven Antenneneinheiten (AAUs) besteht. Dies ist im unteren Teil von Abbildung 3-3 dargestellt.

Aufgrund der Disaggregation der BBU sind einige ihrer traditionellen Funktionen (PHY-, MAC- und RLC-Sublayer) in der DU verfügbar, während die verbleibenden Sublayer (z. B. PDCP, SDAP und RRC) die Aufgaben der CU bilden. 5G-Funksysteme werden weitestgehend eine AAU-Architektur verwenden, bei der die RRHs und die Antennensysteme in einem Gerät integriert sind. Je nach Implementierungsstrategie des Netzbetreibers könnten (und werden voraussichtlich) die DUs und CUs virtualisiert und auf RAN-Computersystemen (COTS) an verschiedenen Punkten im Netz in Clouds gehostet.

Zeitgleich mit der Disaggregation des 5G-Funksystems wird eine neue, paketbasierte Midhaul-Schnittstelle eingeführt, die die DUs und CUs über eine neue 3GPP-F1-Schnittstelle verbindet¹⁶.

3.4 O-RAN-Referenzarchitektur

In diesem Abschnitt wird die von der O-RAN ALLIANCE¹⁷ vorgestellte vorläufige Open-RAN-Referenzarchitektur erörtert, die auf eine RAN-Infrastruktur der nächsten Generation mit einem virtualisierten RAN auf offener Hardware und künstlicher Intelligenz (KI) für die Funksteuerungsfunktionen (RCF) ausgerichtet ist.

Die in Abbildung 3-4 dargestellte High-Level-Ansicht der O-RAN-Architektur besteht aus

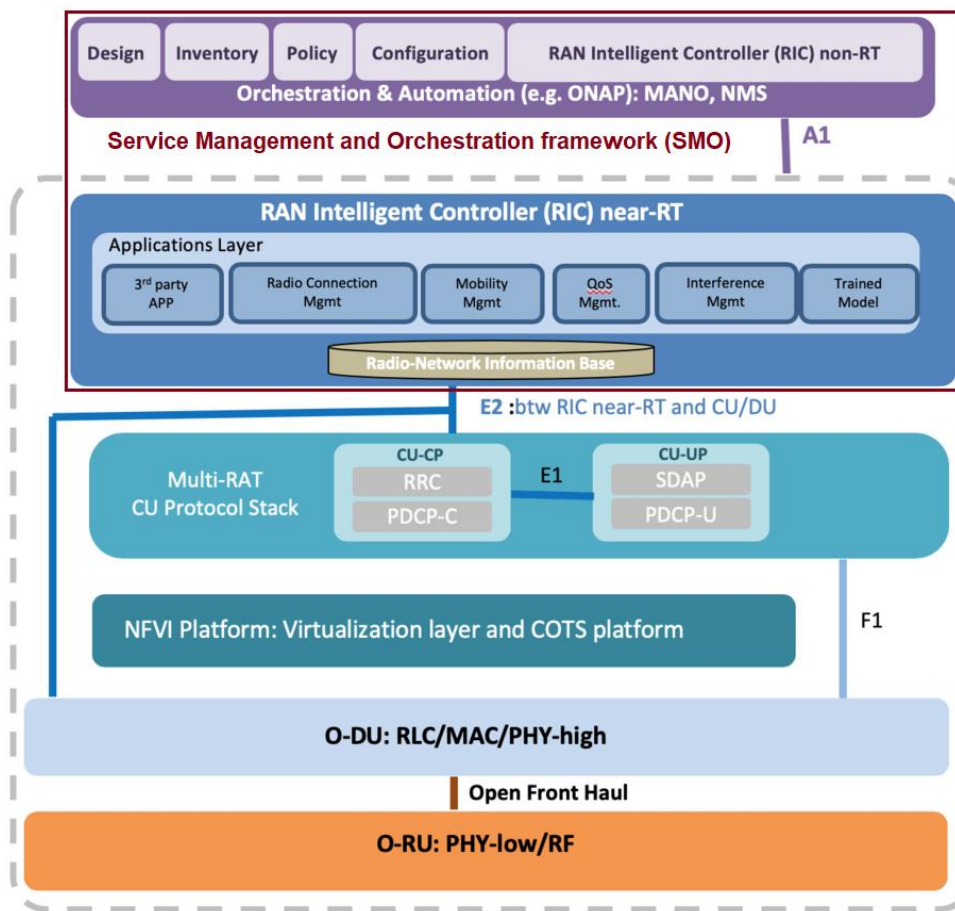
- (i) einer Open-RAN Cloud (O-Cloud), dargestellt in einer Open-Distributed Unit (O-DU), die die cloudifizierte O-RAN-Netzfunktionen beherbergt. Diese Funktionen können auch virtualisiert werden (z. B. virtuelle Maschinen (VMs)) durch eine Network Functions Virtualization Infrastructure (NFVI), die sich über der O-Cloud befindet, wie in Abbildung 3-4 dargestellt. Die Open-Radio Unit (O-RU) ist über eine offene FrontHaul-Schnittstelle mit der O-Cloud verbunden,
- (ii) ein Service-Management- und Orchestrierungs-Framework (SMO) zur Verwaltung der O-RAN-Netzfunktionen, das aus zwei Service-Management-Ebenen besteht: Nicht-Echtzeit-Anwendungen (violett dargestellt) und echtzeitnahe Anwendungen (blau dargestellt).

¹⁶ ETSI (2019), TS 138 470 V15.6.0, S. 8.

¹⁷ Im Zusammenhang mit der O-RAN ALLIANCE wird die Schreibweise mit Bindestrich (O-RAN) benutzt. Damit wird zum Ausdruck gebracht, dass es sich bei den beschriebenen Zusammenhängen nur um eine mögliche Ausprägung im weiter gefassten Umfeld von Open RAN handelt.

Die Management-Seite umfasst die SMO, die eine Non-Real-Time-RAN-Intelligent-Controller (Non-RT-RIC)-Funktion, also zeitunkritische Funktionen, sowie eine Near-Real-Time-RAN-Intelligent-Controller (Near-RT-RIC)-Funktion, also zeitkritische Funktionen, enthält. Die O-RAN-Cloud (O-Cloud) hingegen ist eine Cloud-Computing-Plattform, die die O-RAN-Anforderungen und -Spezifikationen¹⁸ erfüllen, um die relevanten O-RAN-Funktionen, die unterstützenden Softwarekomponenten und die entsprechenden Management- und Orchestrierungsfunktionen zu hosten.

Abbildung 3-4: O-RAN-Architektur



Quelle: WIK auf Basis von O-RAN ALLIANCE (2020).

Zu den funktionalen Modulen der O-RAN-Architektur gehören das Non-RT-RIC für das Policy-Management, das Anwendungsdesign, die Funktionsanalyse und die Konfiguration sowie die Near-RT-Schicht für zeitkritische Funktionen wie Load-Balancing, Handover und Interferenzerkennung. Durch die Integration beider Schichten (Near-RT

¹⁸ O-RAN ALLIANCE: O-RAN Architecture Description v5.0, Vgl. <https://www.o-ran.org/blog/2021/6/23/o-ran-alliance-introduces-33-new-specifications-released-since-march-2021-fdxtb>, zuletzt abgerufen am 23.11.2021.

und Non-RT) lernen beide RICs voneinander durch ihre intelligenten Module für maschinelles Lernen (ML).

Der Protokollstack der Centralised Unit (CU) (hellblau dargestellt) für mehrere Radio Access Technologies (RAT) (z. B. 4G und 5G) ist auf einer Virtualisierungsplattform implementiert und verarbeitet die Protokolle von 4G oder 5G. Gleichzeitig sorgt die CU für die Allokation der virtuellen Ressourcen. Die CU kann weiter in eine Centralized Unit-User Plane (CU-UP) und eine Centralized Unit-Control Plane (CU-CP) aufgeteilt werden. In diesem Fall würde die Verbindung zwischen CU-UP und CU-CP über eine E1-Schnittstelle¹⁹ hergestellt werden.

Die Open Radio Unit (O-RU) und die Open Distributed Unit (O-DU) sind über eine O-RAN-Fronthaul-Schnittstelle mit einem definierten „functional split“²⁰ integriert, die die Transportprotokolle CPRI (siehe Abbildung 3-2) und Radio over Ethernet (RoE) unterstützt. Die weitere Definition und Standardisierung dieser Schnittstellen wird aus Sicht der O-RAN-Alliance Interoperabilität, Wettbewerb und Innovation in der O-RAN-Lieferkette fördern²¹.

3.5 Weitergehende Überlegungen zur O-RAN-Architektur

Die Entwicklung der Architektur drahtloser Netze wurde durch Dienste vorangetrieben, von anfänglich leitungsgebundenen Sprach- bzw. Datendiensten hin über paketvermittelte Daten zu einem einzigen Paketdatenbereich zur Unterstützung von Sprache über Paketdaten wie Voice over LTE (VoLTE) oder Voice over New Radio (VoNR). Aus Sicht der Protokollarchitektur sind die Sprach- und Datenverbindungen mit der Implementierung der unteren Schicht verbunden. Mit der Entwicklung des Netzes zu einer einzigen Paketdatendomäne werden Dienste wie Sprache auf die Anwendungsschicht verlagert. Neben der Sprache gibt es noch weitere Dienste, insbesondere in vertikalen Anwendungen wie z. B. IoT. Die bestehende 4G-/5G-Netzwerkarchitektur ist möglicherweise nicht flexibel genug, um eine Netzwerkarchitektur bereitzustellen, die den Anforderungen aller potenziellen Anwendungen gerecht wird.

Aus diesem Grund muss die RAN-Architektur flexibel sein, so dass sie im laufenden Betrieb dynamisch konfiguriert oder freigegeben werden kann, wenn sie nicht benötigt wird. Dies setzt voraus, dass das Funkrufnetz vollständig offen und programmierbar ist und seine Funktionen bis auf die granulare Ebene zerlegt werden können, damit sie flexibel und dynamisch zugewiesen werden können. Dieses Maß an Flexibilität kann durch Offenheit, Virtualisierung und einen hybriden Einsatz dezentraler und zentraler

¹⁹ ETSI (2019), TS 138 470 V15.6.0, S. 8.

²⁰ Open-RAN-Netze bieten die Möglichkeit, Netzfunktionen an verschiedenen Stellen des 'signal processing path' zu platzieren. Diese Option wird als „functional split“ bezeichnet. Einen detaillierten Überblick über die möglichen Optionen der „functional splits“ findet sich unter <https://www.5gtechnologyworld.com/open-ran-functional-splits-explained/>.

²¹ O-RAN ALLIANCE (2020): O-RAN Use Cases and Deployment Scenarios, S. 6.

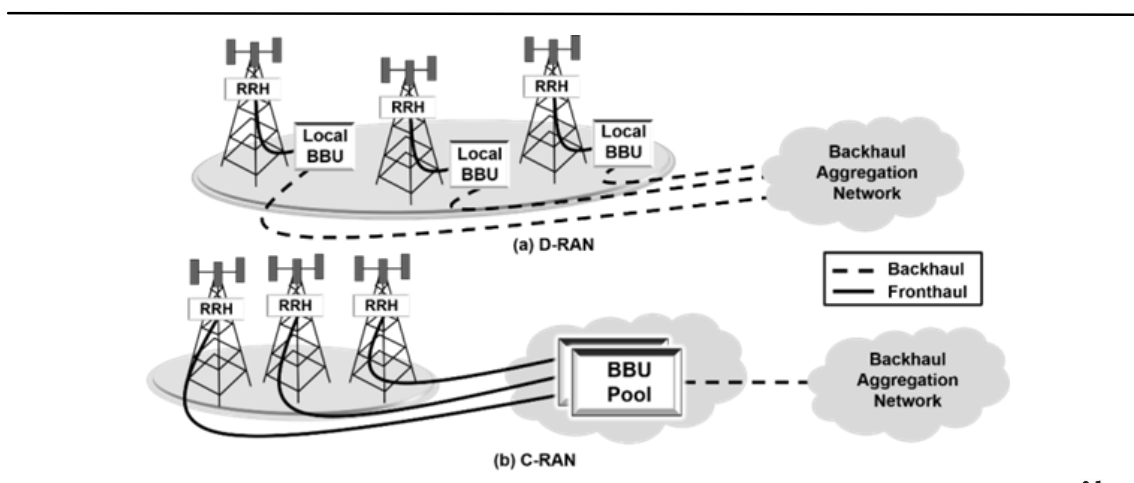
RAN-Architekturen erreicht werden, die die Anforderungen der verschiedenen Netzabschnitte (z. B. C-RAN, vRAN und RAN-Funktionssplits) erfüllen.

3.5.1 Centralized-RAN (C-RAN) vs. Open RAN

Mobilfunknetzbetreiber beabsichtigen, RAN-Steuerungsfunktionen zu zentralisieren, um ihre Gesamtleistung zu verbessern, die Effizienz zu steigern, den Energieverbrauch und die damit verbundenen CO₂-Emissionen zu senken und die Kosten zu reduzieren²². Die Zentralisierung ermöglicht die Aufteilung der Kosten für Wartung und Stromverbrauch auf mehrere, insgesamt aber geringere Zahl digitaler Verarbeitungseinheiten (Server). Darüber hinaus können die Basisbandressourcen im Pool durch einen Virtualisierungsprozess (virtuelle BBUs) auf die Basisstationen nach deren Rechenbedarf verteilt werden.

In der C-RAN-Architektur sind die BBUs nicht nur von den RRHs getrennt, sondern befinden sich in einer zentralen Einheit, dem BBU-Pool, der mehrere virtuelle BBUs aufnehmen kann, wie in Abbildung 3-5 dargestellt. Auf diese Weise können die Kosten der Unterbringung der Systeme und deren Energieverbrauch erheblich reduziert werden. Darüber hinaus stellt eine zentralisierte Einheit einen gemeinsamen Kommunikationskanal zwischen den BBUs zur Verfügung. Dies kann genutzt werden, um eine koordinierte Verarbeitung durchzuführen. Ein weiterer Schritt ist die Implementierung eines virtualisierten BBU-Pools, bestehend aus Universalprozessoren für die Basisbandverarbeitung. Universalprozessoren können dynamisch verschiedenen RRHs zugeordnet werden. Dies ermöglicht einen Lastausgleich und eine effiziente Ressourcenauslastung.

Abbildung 3-5: Decentralized vs Centralized RAN



Quelle: Shehata, Elbanna, Musumeci und Tornatore (2018).

²² Habibi, Nasimi, Han und Schotten (2019).

Ebenfalls vorgesehen ist eine weitere Untergliederung in regionale und überregionale Standorte. Diese zentralisierten BBU-Einsätze basieren in der Regel auf proprietärer Hardware von RAN-Anbietern. C-RAN war nicht notwendigerweise offen, aber es war der Beginn einer Bewegung hin zur Disaggregation des RAN. Allerdings waren die Anwendungsfälle aufgrund der Bündelung der gesamten digitalen Verarbeitung an einem zentralen Ort auf städtische Gebiete mit hoher Dichte beschränkt. Das Problem der Herstellerabhängigkeit war damit noch nicht gelöst. Dank Open RAN können die Betreiber nun gleichzeitig von Zentralisierung und Offenheit profitieren und gleichzeitig das Problem der Herstellerabhängigkeit vermeiden. Tabelle 3-1 zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen C-RAN und Open RAN.

Tabelle 3-1: C-RAN vs. Open RAN

	C-RAN (Zentralisierung)	Open RAN (Disaggregation)
BBU HW	Proprietär	COTS-basiert
BBU SW	Proprietär	virtualisierte Funktionen offene Schnittstellensoftware
RRH/RRU	Proprietär	COTS-basiert
Fronthaul	Proprietär	Offene Schnittstellen
Interoperabilität	BBU HW/SW sowie RRH/RRU müssen von demselben Hersteller geliefert werden.	BBU HW/SW sowie RRH/RRU können von verschiedenen Herstellern geliefert werden.

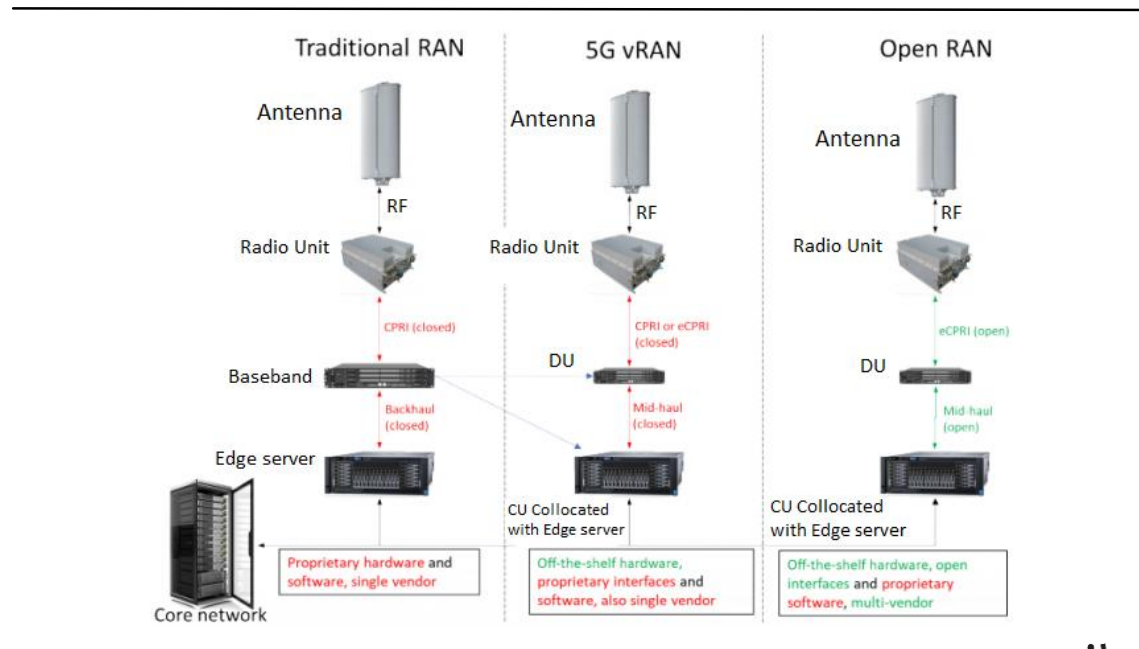
Quelle: WIK.

3.5.2 vRAN vs. Open RAN

Da sich die 5G-Designprinzipien auf einen softwaregesteuerten Ansatz konzentrieren, besteht das Ziel darin, die zentralisierten und disaggregierten Funktionen zu virtualisieren und sie auf COTS-Serverplattformen mit Standardbetriebssystemen auszuführen. Die Virtualisierung beinhaltet die Migration von speziell angefertigten Netzwerkknoten zu Netzwerkfunktionen, die in einer Software implementiert sind und auf einer generischen Hardware-Rechenplattform laufen. Die Virtualisierung für Anbieter von Kommunikationsdiensten begann mit dem Kernnetz und später mit Cloud-Technologien und hat sich in immer weiter entwickelt. Im RAN-Bereich hat COTS-Hardware von Anbietern das Potenzial, Innovationen in einer Reihe von Software-Ökosystemen zu ermöglichen. Obwohl die RAN-Funktionen auf einem COTS-Server virtualisiert sind, ist die Schnittstelle zwischen BBU und RRH keine offene Schnittstelle, so dass die Software eines beliebigen Anbieters nicht mit der RRH arbeiten kann (siehe Abbildung 3-6). Virtualisiertes RAN (vRAN) besteht aus einem RAN-Equipment/HW von Anbieter A und Software von Anbieter A, die auf einer COTS-BBU läuft. Ein Betreiber kann die Software von Anbieter B nicht auf derselben COTS-BBU einsetzen, es sei denn die Schnittstelle zum RAN-Equipment/HW von Anbieter A ist offen (vRAN bedeutet nicht Open RAN). Daher

löst vRAN immer noch nicht das Problem der Anbieterbindung, Open RAN hingegen schon.

Abbildung 3-6: vRAN vs. Open RAN



Quelle: Moniem-Tech (2020).²³

3.6 Sicherheitsaspekte von Open RAN

Open RAN bringt auch neue Herausforderungen für die Sicherheit von Telekommunikationsnetzen mit sich. Open RAN könnte durch die Desintegration von Komponenten Sicherheitsrisiken im RAN erhöhen, da es mehr Schnittstellen gibt, die Angriffsflächen für Cyber-Attacken liefern. Ungesicherte oder weniger sichere Verwaltungsschnittstellen könnten über die Dienstverwaltungs- und Orchestrierungsschicht zu einer Sicherheitslücke werden. Die Notwendigkeit einer konsistenten Umsetzung bewährter Sicherheitspraktiken in einer offenen Multivendor-Umgebung stellt eine praktische Herausforderung für eine sichere Open-RAN-Umsetzung dar.

Aufgrund der Verwendung von Open-Source-Software, White-Box-Hardware und der Mehrparteienbeziehung zwischen dem Betreiber, dem Cloud-Anbieter und dem Systemintegrator weist O-RAN auch gemeinsame Sicherheitsrisiken mit virtuellen und cloudbasierten Implementierungen auf.^{24 25} Um einige der oben genannten Herausfor-

²³ What is the difference between vRAN and Open RAN?, <https://moniem-tech.com/2020/10/25/what-is-the-difference-between-vran-and-open-ran/>, zuletzt abgerufen am 01.11.2021.

²⁴ 5G Americas (2020): Transition toward open and interoperable networks, S. 28.

²⁵ O-RAN ALLIANCE (2021): O-RAN Minimum Viable Plan and Acceleration towards Commercialization, S. 23.

derungen zu bewältigen, hat die O-RAN ALLIANCE eine Gruppe von Sicherheitsexperten in ihrer Security Focus Group (SFG) versammelt, um eine O-RAN-Sicherheitsarchitektur zu entwickeln, die es 5G-Diensteanbietern ermöglicht, O-RAN mit dem gleichen Maß an Vertrauen einzusetzen und zu betreiben wie ein 3GPP-definiertes RAN. Die SFG leitet die anderen Arbeitsgruppen der O-RAN ALLIANCE und arbeitet mit ihnen zusammen, um sicherzustellen, dass O-RAN von vornherein sicher („secure by design“) ist²⁶.

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich mit einer Open-RAN-Implementierung neue sicherheitsrelevante Aspekte von Funknetzen ergeben bzw. stellen, von deren Lösung auch die Akzeptanz der neuen Netze und Anwendungen bei den Kunden der Mobilfunknetzbetreiber abhängen. Wenn Open RAN als Bestandteil von 5G und 6G, die als Schlüsseltechnologien bei der weiteren Digitalisierung angesehen werden, erfolgreich sein soll, müssen die Zugangsnetze ein Höchstmaß an Sicherheit bieten.

3.7 Open-RAN-Organisationen

Es gibt eine Vielzahl von Open-RAN-Gruppen und -Organisationen, die sich auf Bereitstellung und Entwicklung von Open RAN konzentrieren. Es gibt verschiedene Organisationen, welche die Open RAN-Technologie vorantreiben. Zu nennen sind dabei TIP, O-RAN ALLIANCE und 3GPP. Darüber hinaus existieren einige zusätzliche Open-RAN-Gruppen, die an weiteren Open-RAN-Themen arbeiten, wie SCF (Small Cell Forum), Software Community und Open RAN Policy Coalition. Sie werden im Folgenden kurz vorgestellt.

3.7.1 Telecom Infra Project (TIP)

Die Telecom Infra Group (TIP) wurde 2016 von Facebook für den Aufbau und Bereitstellung globaler Telekommunikationsnetzinfrastrukturen gegründet. Hauptziel ist die Bereitstellung vollständig programmierbarer RAN-Lösungen auf der Grundlage von COTS und disaggregierter Software.

TIP hat mehr als 500 Mitglieder, worunter sich Betreiber, Anbieter, Entwickler, Integratoren, Start-ups und andere Unternehmen befinden, die in verschiedenen TIP-Projektgruppen mitarbeiten. TIP setzt auf transparente Prozesse und Zusammenarbeit bei der Entwicklung neuer Technologien. Alle Projekte werden von den Mitgliedern vorangetrieben und stützen sich auf aktuelle Feldstudien, um Telekommunikationsgeräte und -software in flexibleren und interoperableren Formen weiterzuentwickeln²⁷.

²⁶ Die Security Focus Group (SFG) wurde gebildet, um die sichere Einführung von O-RAN-Netzen durch die Koordination aller Arbeitsgruppen bei der Definition einer Sicherheitsarchitektur zu gewährleisten.

²⁷ Parallel Wireless (2020), S. 8.

3.7.2 O-RAN ALLIANCE

„Die O-RAN Alliance wurde im Februar 2018 mit der Absicht gegründet, ein offenes und intelligentes RAN zu fördern. Sie entstand durch den Zusammenschluss von zwei Organisationen, der C-RAN Alliance²⁸ und dem X-RAN²⁹ Forum.“³⁰ Die O-RAN ALLIANCE spielt eine wichtige Rolle bei der Zusammenführung der Branche, um ein softwarebasiertes, virtualisiertes, flexibles, intelligentes und energieeffizientes Netz zu schaffen. Diese Ziele können erreicht werden, indem das RAN in Richtung auf ein höheres Maß an Offenheit und Intelligenz weiterentwickelt wird³¹.

Die O-RAN ALLIANCE wird im Wesentlichen aus US-amerikanischen und chinesischen Unternehmen getragen.³² Ob insoweit Open RAN den Markteintritt europäischer Hersteller unterstützt oder anreizt, mag vor diesem Hintergrund fraglich sein.

Die O-RAN ALLIANCE gliedert ihre Vision in zwei übergeordnete Ziele³³:

1. Offenheit, die dazu beitragen wird, das kleinere Anbieter sowie Betreiber eigene Dienste einführen bzw. das Netz an ihre eigenen Bedürfnisse anpassen können. Offene Schnittstellen ermöglichen den Einsatz mehrerer Anbieter, was zu einem wettbewerbsfähigeren und dynamischeren Ökosystem von Anbietern führt. Letztendlich ermöglichen quelloffene Software- und Hardware-Referenzdesigns aus Sicht der O-RAN ALLIANCE schnellere und genehmigungsfreie Innovationen.
2. Die Automatisierung komplexer Netze führt zu einer Senkung der Betriebskosten (OPEX³⁴). Dies wird durch die Einbettung von Intelligenz unter Verwendung neuer Deep-Learning-Techniken in jeder Schicht, sowohl auf der Komponenten- als auch auf der Netzebene der RAN-Architektur, möglich sein³⁵.

3.7.3 Third Generation Partnership Project (3GPP)

3GPP oder Third Generation Partnership Project ist verantwortlich für die Entwicklung von Protokollen zur Realisierung eines funktionalen Mobilfunknetzes (3G, 4G und 5G). 3GPP arbeitet in verschiedenen Bereichen. Darunter befinden sich RAN, Dienste und Systemaspekte sowie Kernnetze und Endgeräte (Mobiltelefone usw.). 3GPP Rel-15 führte das Konzept einer geteilten Funkbasisstation zwischen einer Distribution Unit

²⁸ Die C-RAN Alliance bestand aus China Mobile und einer Vielzahl anderer chinesischer Hersteller.

²⁹ X-RAN Forum bestand aus US-amerikanischen, europäischen, japanischen und südkoreanischen Herstellern und Betreibern. AT&T, China Mobile, Deutsche Telekom, NTT Docomo und Orange waren die Gründungsmitglieder aus den Reihen der Betreiber.

³⁰ Parallel Wireless (2020), S. 8, eigene Übersetzung.

³¹ Parallel Wireless (2020), S. 9.

³² Techblog (2020): 44 Chinese companies have joined the O-RAN Alliance, <https://techblog.comsoc.org/2020/12/17/44-chinese-companies-have-joined-the-o-ran-alliance/>, zuletzt abgerufen am 23.11.2021.

³³ O-RAN ALLIANCE (2018): O-RAN: Towards an Open and Smart RAN, S. 7.

³⁴ Operational Expenditure: Üblicherweise zählen zu den Betriebsausgaben die Kosten für Roh- und Betriebsstoffe, Personalkosten, Energiekosten und Kosten für Vertrieb und Verwaltung.

³⁵ Parallel Wireless (2020): S. 9-10.

(DU) und einer zentralen Einheit (CU) ein. Auf diese Thematik wurde in Abschnitt 3.3 näher eingegangen (siehe Erläuterung zu Abbildung 3-3). 3GPP legt nicht fest, wie die Netzfunktionen implementiert werden. Dies gewährleistet den Betreibern eine Flexibilität, traditionelle oder virtualisierte RAN-Architekturen einzusetzen.

„Die aktuellen 3GPP-Standards ermöglichen den herstellerübergreifenden Einsatz an verschiedenen Standorten. Sie erlauben zusätzlich Multivendor-Einsätze im RAN für DU und CU, die von verschiedenen Anbietern am selben Standort bereitgestellt werden. Ferner bieten Sie Interoperabilität zwischen verschiedenen Komponenten der Betreibernetze an. Daher ermöglicht 3GPP bereits den Einsatz an einem einzigen Standort, sowie den geografischen Einsatz mehrerer Anbieter, die interoperabel und abwärtskompatibel für Kernnetz- und RAN-Funktionen sind.“ ³⁶

„Die O-RAN-Normen und -Spezifikationen sollen 3GPP-Normen ergänzen, indem sie neue Anforderungen und Anwendungsfälle definieren. Diese sollen jedoch nicht im Widerspruch zu den Arbeiten des 3GPP stehen bzw. sich mit diesen überschneiden. Dies soll helfen, eine Fragmentierung des Marktes zu vermeiden. Sowohl 3GPP als auch O-RAN haben eine Reihe von Architekturoptionen definiert, die ein unterschiedliches Maß an Disaggregation des Netzes bieten. Wenn eine O-RAN-Spezifikation fertiggestellt und erprobt ist, wird der O-RAN-Standard den 3GPP-Standard ergänzen. O-RAN hat nie das Ziel verfolgt einen vollständigen Satz von Standards zu schaffen, welcher für die Implementierung eines voll funktionsfähigen Mobilfunknetzes erforderlich sind.“³⁷

3GPP und O-RAN haben mehrere wichtige gemeinsame technologische Merkmale (wie z. B. Virtualisierung, dezentralisiertes RAN, offene Schnittstellen im RAN, Interoperabilität und Kompatibilität von Geräten, sowie softwaregesteuerte Funktionalität in RAN-Geräten), die eine freie Wahl für herstellereinspezifische Implementierungen ermöglichen. O-RAN geht durch die Disaggregation von RAN jedoch einen Schritt weiter.

3.7.4 O-RAN Software Community

„Die O-RAN Software Community ist eine Zusammenarbeit zwischen der O-RAN Alliance und der Linux Foundation³⁸. Das Ziel ist die Entwicklung von Open-Source-Software für das RAN zu unterstützen“³⁹. Dies soll erreicht werden, indem die Öffnung des RAN vorangetrieben wird. Der Schwerpunkt liegt auf den offenen Schnittstellen,

³⁶ Ericsson (2020), [O-RAN: What policy makers need to know - Ericsson](#), eigene Übersetzung, zuletzt abgerufen am 01.11.2021.

³⁷ Ericsson (2020), [O-RAN: What policy makers need to know - Ericsson](#), eigene Übersetzung, zuletzt abgerufen am 01.11.2021.

³⁸ Die Linux Foundation ist ein Zusammenschluss der Open Source Development Labs (OSDL) und der Free Standards Group (FSG). Ziel des gemeinnützigen Konsortiums ist es, das Wachstum von Linux zu unterstützen und zu fördern. Die Linux Foundation fördert die Zusammenarbeit unter Entwicklern aus der Industrie, Wissenschaft und freiberuflichen Entwicklern zur Schaffung von unter anderem standardisierten Open Source Software- und Hardwarelösungen, welche durch jedermann uneingeschränkt nutzbar sind.

³⁹ Parallel Wireless (2020), S. 10, eigene Übersetzung.

gefolgt von Implementierungen, die die neuen, durch die O-RAN-Spezifikationen ermöglichten Fähigkeiten, nutzen. Im Dezember 2019 hat die O-RAN Software Community ihren ersten Softwarecode namens „Amber“ veröffentlicht⁴⁰.

3.7.5 Small Cell Forum (SCF)

„SCF ist eine globale Mitgliederorganisation, die Mobilfunkbetreiber vertritt und sich für die Unterstützung einer flexiblen, kostengünstigen Mobilfunkinfrastruktur durch Kleinzellen (small cells) einsetzt. Ihr Ziel ist es, mobile Mobilfunkverbindungen für Organisationen jeder Größe zugänglich zu machen und die digitale Transformation von Industrie, Unternehmen und Gemeinden zu unterstützen.“⁴¹ Das Small Cell Forum hat sein eigenes Ökosystem von Open RAN mit Blick auf kleine Zellen geschaffen. In letzter Zeit hat es sich insbesondere auf die Entwicklung offener Schnittstellen konzentriert. Im Jahr 2020 wurden die im Vorjahr veröffentlichten Spezifikationen erweitert, um den stückweisen Aufbau von Kleinzellen mit Komponenten verschiedener Anbieter zu ermöglichen. Ziel ist es, die vielfältigen 5G-Anwendungsfälle problemlos bewältigen zu können.

3.7.6 Open RAN Policy Coalition

Die Open RAN Policy Coalition ist eine vergleichsweise neue Open-RAN-Gruppe, die im Jahr 2020 gegründet wurde.⁴² „Sie repräsentiert eine Gruppe von Unternehmen, die sich für eine Politik einsetzen, die die Einführung offener und interoperabler Lösungen im Funkzugangnetz (RAN) als Mittel zur Schaffung von Innovation, Wettbewerb und Erweiterung der Lieferkette für fortschrittliche Mobilfunktechnologien, einschließlich 5G, fördert.“⁴³ Die Hauptziele⁴⁴ sind:

- Unterstützung der globalen Entwicklung offener und interoperabler Drahtlos-technologien,
- Bemühen um staatliche Unterstützung für offene und interoperable Lösungen um das Multi-Vendor-Ökosystem zu unterstützen,
- Finanzierung von Forschung und Entwicklung,
- Beseitigung von Hindernissen für die 5G-Einführung.

⁴⁰ O-RAN Software Community (2019).

⁴¹ Vgl. <https://www.smallcellforum.org/about-us/>, zuletzt abgerufen am 18.11.2021, eigene Übersetzung.

⁴² Vgl. <https://moniem-tech.com/2021/08/27/o-ran-alliance-tip-onf-and-open-ran-policy-coalition/>, zuletzt abgerufen am

⁴³ Open RAN Policy, <https://www.openranpolicy.org/about-us/>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021, eigene Übersetzung.

⁴⁴ Parallel Wireless (2020), S. 11.

3.8 Zwischenfazit zum technischen Teil

Der Open RAN-Ansatz trennt die Software von der Hardware, so dass die RAN-Software auf standardisierten Hardware-Plattformen ausgeführt werden kann. Offene, standardisierte Schnittstellen sollten im Idealfall die Integration der besten Komponenten von verschiedenen Herstellern (in Bezug auf Energieverbrauch, Größe und Preis) ermöglichen. Darüber hinaus soll Open RAN die Effizienz und Leistungsfähigkeit der Mobilfunknetze durch RAN-Automatisierung verbessern. Open-RAN-Architekturüberlegungen bieten Flexibilität für dynamische Konfigurationen, Unterstützung für mehrere RAN-Funktionssplits zwischen CU, DU und RU und sie bieten offene Schnittstellen für die Interoperabilität zwischen mehreren Herstellern⁴⁵.

Das Open-RAN-Ökosystem wird durch mehrere Organisationen aufgebaut, darunter 3GPP, O-RAN ALLIANCE, Small Cell Forum, Telecom Infra Project (TIP), O-RAN Software Community und die kürzlich gegründete Open RAN Policy Coalition. Jede dieser Gruppen hat mit ihren eigenen Perspektiven die Open-RAN-Bewegung bereichert und das Interesse und Bewusstsein in der gesamten Branche gesteigert. Gemeinsam haben diese Gruppen eine Vielzahl von Spezifikationen und Ansätzen definiert, um die 3GPP-Basis mit neuen offenen Schnittstellen und Architekturen, die KI/ML-Fähigkeiten nutzen, zu ergänzen, was bei Betreibern und Herstellern weltweit auf großes Interesse stieß und zu zahlreichen Versuchen und Implementierungen führte.

Neben den (potentiellen) Vorteilen von Open RAN besteht die Notwendigkeit einer durchgängigen Verwaltung, Fehlerbehebung und Integration der verschiedenen Netzwerkkomponenten. Daraus resultieren Aufwendungen bei den Mobilfunknetzbetreibern oder (neuen) Systemintegratoren. Auf die Desintegration folgt die nachfolgende Integration verschiedener Netzkomponenten.

Die Sicherheit im offenen RAN ist eine große Herausforderung, da offenes RAN die Sicherheitsrisiken im RAN aufgrund von mehr disaggregierten Funktionen und zusätzlichen Schnittstellen erhöhen könnte. Offener Quellcode kann für böswilliges Hacken offen sein und die Anfälligkeit für öffentliche Angriffe erhöhen.

Schließlich ist noch zu erwähnen, dass Open RAN maßgeblich von Unternehmen aus den USA und Asien vorangetrieben wird.

4 Stand der Entwicklung

Dass Open RAN für Neueinsteiger in den Mobilfunkmarkt als auch für etablierte Mobilfunknetzbetreiber relevant ist, zeigt eine Reihe von Projekten, die u. a. in Abbildung 4-1 dargestellt sind.

⁴⁵ 5G Americas (2020): Transition toward open and interoperable networks, S. 45.

Abbildung 4-1: Globale Open-Ran-Einsätze und Versuche



Quelle: TIP (2021).⁴⁶

Zu den gegenwärtig am weitesten fortgeschrittenen Open-RAN-Implementierungen zählen Projekte von Rakuten, Vodafone und Telefónica. Diese werden im Folgenden näher beschrieben.

4.1 Open RAN-Aktivitäten im internationalen Bereich

4.1.1 Rakuten

Das japanische Unternehmen Rakuten hat im April 2020 das weltweit größte vRAN-Netz mit mehr als 4.000 Mobilfunkstandorten in Betrieb genommen. Es ist geplant, dieses in den nächsten Jahren landesweit auszubauen⁴⁷. Rakuten ist ein cloudnative-basiertes Online-Dienstleistungsunternehmen und sieht sich selbst nicht als traditionellen Mobilfunkbetreiber an. Es ist ein gutes Beispiel dafür, wie Open RAN landesweit tätige Mobilfunkbetreiber unterstützen kann. Im Jahr 2019 war der japanische Betreiber das erste Unternehmen, welches ein herstellerübergreifendes RAN implementiert hat und dabei Produkte verschiedener Anbieter wie z. B. Altiosstar, Airspan, Mavenir, Nokia etc. eingesetzt hat.

⁴⁶ <https://telecominfraproject.com/openran-project-group-accelerates-development-validation-deployment-openran-solutions/>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁴⁷ TIP (2020): Toward Disaggregated Mobile Networking, S. 4.

Nokia öffnete seine Funkschnittstellen für die BBU von Altiostar, welche auf einer Virtualisierungsplattform von Cisco liefern. Andere Funktionen innerhalb des Netzes wurden ebenfalls von mehreren Anbietern betrieben, wie z. B. der Evolved Packet Core (EPC) von Cisco sowie das IP Multimedia Subsystem (IMS) und die Rich Communication Services (RCS)-Anwendungen von Mavenir. Das Netz von Rakuten hat als LTE-Netz, das sowohl aus Makro- als auch aus Kleinzellen bestand, begonnen. Im Jahr 2020 hat das Unternehmen sein Netz auf 5G NR weiterentwickelt⁴⁸.

Rakuten gibt an, dass die Open-RAN-Plattform die Investitionskosten für Mobilfunkbetreiber um 40 % und die Betriebskosten um 30 % reduziert⁴⁹. Presseberichten⁵⁰ zufolge hat Rakuten Zellstandorte mit lediglich einer Antenne und ein RRH verschlankt, was die Standortakquisition vereinfacht und Kosten für den Aufbau reduziert. Für die Basisbandverarbeitung wird ein entferntes virtuelles RAN (vRAN) genutzt.

4.1.2 Vodafone

Als Mitglied von TIP und der O-RAN ALLIANCE ist Vodafone einer der aktivsten Akteure in der Erprobung von Open-RAN-Lösungen. Öffentlich bekannte Aktivitäten werden in der Türkei, dem Vereinigten Königreich, Irland, Mosambik, Südafrika und der Demokratischen Republik Kongo (DRC) durchgeführt⁵¹. Ferner hat Vodafone eine öffentliche Ausschreibung für seinen großen europäischen RAN-Bestand (mehr als 100.000 Mobilfunkstandorte) angekündigt⁵². Vodafone hofft, dass dieser für Open-RAN-Anbieter attraktiv sein wird. Vodafone hat Informationen zur Netzleistung seiner Open-RAN-Einrichtung in der Türkei mitgeteilt. So wird angegeben, dass das Netz 96 KPIs im 2G- als auch im 4G-Netz erreicht hat und dass die QoS (Quality of Service)-Levels bereits akzeptable Werte erreicht haben (Stand: Oktober 2019)⁵³. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass die Optimierung des Netzes im Oktober 2019 noch nicht vollständig abgeschlossen war und erwartet wird, künftig alle Ziel-KPIs zu erreichen. Im April 2020 gab Vodafone bekannt, dass Open RAN an mehreren Zellstandorten eingeführt wurde und seit Dezember 2019 kommerziellen Datenverkehr überträgt⁵⁴.

Nachdem Huawei in Großbritannien vom Netzausbau ausgeschlossen wurde,⁵⁵ setzt Vodafone dort nun auf Open-RAN-Equipment, welches vorrangig von US-

⁴⁸ IGR (2021): Open RAN Integration: Run With It, S.4.

⁴⁹ SDX Central, (2020), <https://www.sdxcentral.com/articles/news/rakuten-acquires-altiostar-to-boost-open-ran-efforts/2021/08/>, zuletzt abgerufen am 04.08.2021.

⁵⁰ Altiostar (2019): Rakuten Launches First Real-World End-to-End Tests in a Fully Virtualized Cloud-Native Mobile Network, <https://www.altiostar.com/rakuten-launches-first-real-world-end-to-end-tests-in-a-fully-virtualized-cloud-native-mobile-network/>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁵¹ Fierce wireless (2019): Vodafone initiates first open RAN trials in the U.K., challenging traditional vendors, <https://www.fiercewireless.com/tech/vodafone-initiates-first-open-ran-trials-uk-challenging-traditional-vendors>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁵² TIP (2020): Toward Disaggregated Mobile Networking S. 4.

⁵³ IGR (2021): Open RAN Integration: Run With It, S. 20.

⁵⁴ IGR (2021): Open RAN Integration: Run With It, S. 3.

⁵⁵ The UK's National Security Council, under pressure from the U.S., had decided that network operators would not be allowed to buy equipment from Huawei after Dec. 31, 2020. In addition, equipment must

amerikanischen Herstellern stammt. Vodafone bleibt der einzige der vier britischen Mobilfunknetzbetreiber, der weiterhin feste Pläne hat, Open RAN zu nutzen. Vodafone UK hat (im Juni 2021) angekündigt, Samsung als Lieferanten für den Aufbau von 5G-Infrastruktur auszuwählen⁵⁶. Vodafone UK spricht in diesem Zusammenhang von der ersten kommerziellen Einführung von Open RAN in Europa. Es handelt sich dabei um den Aufbau von Mobilfunkantennen in 2.500 ländlichen Gebieten. Diese befinden sich vorrangig im Südwesten Englands sowie in Wales⁵⁷. Zu den weiteren Herstellern für das Open-RAN-Projekt gehören NEC aus Japan, die US-Unternehmen Dell Technologies, Wind River, Keysight Technologies und Capgemini Engineering aus Frankreich⁵⁸.

4.1.3 Telefónica

Das Unternehmen betreibt eines der bedeutendsten Open-RAN-Projekte und engagiert sich dabei intensiv für das TIP Open RAN. Das Unternehmen hat in Peru mehrere hundert Standorte in Betrieb genommen⁵⁹. Ferner betreibt Telefónica in Madrid ein Interoperabilitäts-Testlabor des TIP, das sich auf die Implementierung eines kontinuierlichen Integrations- und Lieferrahmens für Open RAN in seinen Forschungs- und Entwicklungslabors konzentriert⁶⁰.

4.2 Kommerzielle Einführungen und Pilotprojekte in Deutschland

4.2.1 Deutsche Telekom (DT)

Die Deutsche Telekom (DT) erweitert ihr TIP-Community-Labor und plant, ein europäisches Open Test and Integration Center einzurichten, das an der Validierung von O-RAN-konformen RU-DU-Lösungen arbeiten möchte. Diese sollen beim kommenden

be removed from 5G networks by the end of 2027. The U.K. government is paying the country's mobile operators £250 million (€280 million) to implement the Huawei ban. EE, Vodafone, and Three use Huawei equipment in their 5G networks.

⁵⁶ BBC (2021): Vodafone picks Samsung for 5G network, <https://www.bbc.com/news/technology-57467769>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁵⁷ Vodafone lab (2021): Vodafone lab to show open RAN does exactly what it says on the tin, <https://www.lightreading.com/open-ran/vodafone-lab-to-show-open-ran-does-exactly-what-it-says-on-tin/d/d-id/768906>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁵⁸ Windriver (2021): Vodafone Selects Key Partners to Build Europe's First Commercial Open RAN Network, <https://www.windriver.com/news/press/news-20210614>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁵⁹ Light Reading (2019), <https://www.lightreading.com/facebook-telefonica-take-openran-live-in-peru-boast-450k-subs/d/d-id/755596>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁶⁰ TIP (2020): Toward Disaggregated Mobile Networking, S. 4.

Plug Fest⁶¹ eingesetzt werden. Das Unternehmen ist unter anderem Mitglied des neuen Evenstar-Programms⁶² zur Entwicklung eines White Box Radio⁶³.

Die DT plant ein sogn. „O-RAN Town“ in Neubrandenburg in den Jahren 2021 und 2022 schrittweise auszubauen und dabei mit verschiedenen Anbietern zusammenzuarbeiten. O-RAN Town wird an bis zu 25 Standorten⁶⁴ 4G- und 5G-Dienste auf Basis von Open RAN bereitstellen. Die ersten Standorte haben bereits den Betrieb aufgenommen und sind in das Live-Netz der Telekom Deutschland integriert. Dazu gehört die europaweit erste Integration von Massive Multiple Input Multiple Output (mMIMO) Funkeinheiten, die über die sogenannte O-RAN-Open-Fronthaul-Schnittstelle mit der virtualisierten RAN-Software verbunden sind⁶⁵.

Die ersten O-RAN-Town-Standorte basieren auf einer offenen Multi-Vendor-RAN-Architektur mit Geräten und Software der Hersteller Dell, Fujitsu, Intel, Mavenir, NEC und Supermicro. Die Remote Radio Units (O-RU) werden von Fujitsu und NEC bereitgestellt. Darunter sind die LTE- und 5G NR O-RUs von Fujitsu und die 32T32R 5G mMIMO⁶⁶ RUs von NEC. Beide erfüllen die Fronthaul-Spezifikationen der O-RAN ALLIANCE und verfügen über fortschrittliche Beamforming-Technologien. Die cloudnative Basisbandsoftware für die 4G- und 5G-Distributed Units (O-DU) und Central Units (O-CU), einschließlich der mMIMO-Funkeinheiten wird von Mavenir geliefert. Die virtualisierte Basisbandsoftware läuft auf der Standard-Serverhardware von Dell und Supermicro. Die gesamte O-RAN-Cloud-Architektur basiert auf der Intel FlexRAN-Software-Architektur.

4.2.2 Telefónica Deutschland

Telefónica Deutschland ist der erste deutsche Mobilfunknetzbetreiber, der lokal Open RAN in seinem Bestandsnetz einsetzt. Telefónica hat bereits im Dezember 2020 den Start eines Open RAN im LTE-Live-Betrieb im Raum Landsberg (im Südwesten Bayerns) mit Software von AltioStar angekündigt. Diese Technologie soll auch für 5G nutzbar sein, allerdings ist die Software dafür noch nicht fertiggestellt. Zum Einsatz kommt

⁶¹ „Plugfest“ ist eine Veranstaltung, die von der O-RAN Alliance und TIP organisiert wird, um Hersteller zum ersten Mal zusammenzubringen und ihnen eine Möglichkeit zur Interaktion in den frühen Phasen der Technologieentwicklung zu geben.

⁶² TIP (2020): TIP OpenRAN Project Group is Streamlined to Accelerate Development and Deployments, <https://telecominfraproject.com/tip-openran-project-group-is-streamlined-to-accelerate-development-and-deployments/>, zuletzt abgerufen am 23.11.2021.

⁶³ Deutsche Telekom (2021): Consortium of industry leaders creates new open lab "i14y" to accelerate network disaggregation and Open RAN, <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/consortium-establishes-open-lab-i14y-640186>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁶⁴ Mobile world live (2021): Deutsche Telekom lights open RAN test site, <https://www.mobileworldlive.com/featured-content/top-three/dt-openran-testbed>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁶⁵ Deutsche Telekom (2021): Consortium of industry leaders creates new open lab "i14y" to accelerate network disaggregation and Open RAN, <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/consortium-establishes-open-lab-i14y-640186>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁶⁶ NEC (2021): O-RAN Compliant 5G Radio Unit, <https://www.nec.com/en/global/solutions/5g/O-RAN-Compliant-5G-Radio-Unit.html>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

unter anderem Hardware von Dell, Intel, Supermicro und Xilinx, zusätzlich ist der japanische NEC-Konzern als Systemintegrator dabei. In einer Pilotphase werden drei Mobilfunkstandorte von Telefónica umgerüstet. Ab Herbst 2021 plant Telefónica, Open RAN in größerem Umfang (ca. 1.000 Antennenstandorte) einzuführen.⁶⁷

4.2.3 1&1-Drillisch

Der deutsche Mobilfunkanbieter 1&1 Drillisch, der im Jahr 2019 Frequenznutzungsrechte im Bereich 2 GHz und 3,6 GHz ersteigert hat, wird mit Hilfe des japanischen Unternehmens Rakuten Mobile ein Open-RAN-Netz aufbauen. Damit ist 1&1 der erste Betreiber in Europa sein, der einen vollständigen Aufbau eines Open RAN und eines virtualisierten Zugangsnetzes anstrebt. Rakuten Mobile, das sich stark auf seine Rakuten Communication Platform (RCP) mit cloudbasierten mobilen Netzwerkelementen stützt, wird das 1&1-Netz aufbauen und betreiben. Mit dem Aufbau soll noch in diesem Jahr (2021) begonnen werden.⁶⁸

Laut Aussage von 1&1 wird das Netz mit COTS-Servern und -Software sowie Antennen verschiedener Anbieter aufgebaut. Alle Netzfunktionen liegen dabei in der Cloud und werden mittels Software gesteuert. Aufwendige Umbauten oder Wartungsarbeiten an den Antennen-Basisstationen sind somit obsolet und können durch Software-Updates effizient und kostengünstig durchgeführt werden.⁶⁹

Die ersten Realisierungen befinden sich an 1&1 Unternehmensstandorten in Karlsruhe und Montabaur. Die ersten Sendestationen im Band 7 (2.600 MHz) sind bereits errichtet worden. Die dafür benötigte Frequenz hat 1&1 von Telefónica so lange gepachtet, bis die eigenen, ersteigerten Frequenzen genutzt werden können.⁷⁰

4.2.4 Zwischenfazit zum Stand der Entwicklung

Open RAN wird bereits bei einigen Mobilfunknetzbetreibern eingesetzt. Parallel wird die weitere Standardisierung von Open RAN vorangetrieben.

⁶⁷ Telefónica (2020): Erster deutscher Netzbetreiber mit Open RAN im Livebetrieb, <https://www.telefonica.de/news/corporate/2020/12/telefonica-o2-setzt-erfolgreich-open-ran-im-o2-netz-ein.html>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁶⁸ Handelsblatt (2021): Japanischer Netzbetreiber Rakuten soll 1&1 mit 5G in Deutschland helfen, <https://www.handelsblatt.com/technik/it-internet/mobilfunk-japanischer-netzbetreiber-rakuten-soll-1und1-mit-5g-in-deutschland-helfen/27000892.html?ticket=ST-4172150-h7pswwSldPp9VSWjhb9p-cas01.example.org>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁶⁹ TelecomTV (2021): German operator 1&1 to build greenfield Open RAN network with Rakuten, , <https://www.telecomtv.com/content/open-ran/german-operator-1-1-to-build-brownfield-open-ran-network-with-rakuten-42125/>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

⁷⁰ Teltarif (2021): 5G Open-RAN: 1&1-Drillisch setzt auf Technik von Rakuten, <https://www.teltarif.de/1und1-5g-netz-drillisch-rakuten/news/83838.html>, zuletzt abgerufen am 19.11.2021.

Betreiber, die Open RAN implementieren, werden je nach ihrem Geschäftsmodell zwischen Greenfield-, Brownfield- oder gemischten Bereitstellungen wählen. Bei Greenfield-Implementierungen hängt die Implementierungsdauer von der Reife der offenen RAN-Standardisierung und der Entwicklung des offenen RAN-Ökosystems ab, während Brownfield- und gemischte Umgebungen zusätzlich durch Integrationsprobleme herausgefordert werden, da die Gerätespezifikationen nicht offen sind, was zusätzliche Kosten verursacht.

Der Austausch traditioneller RAN-Komponenten durch neue Open-RAN-Komponenten mehrerer Hersteller ist für Mobilfunknetzbetreiber zunächst mit einer erhöhten Komplexität verbunden und insoweit eine Herausforderung. Die Herausforderungen betreffen folgende Aspekte:

- Hoher Aufwand für die Produkt- und Systemintegration,
- Probleme bei der Validierung, Prüfung und Fehlerbehebung,
- Komplexe Ende-zu-Ende-Leistungsbewertung,
- Zunahme der Systemwartungsaktivitäten,
- Komplizierte Software-Upgrades

Zusammenfassend steht Open RAN, obwohl es bereits vereinzelt im Einsatz ist, noch am Anfang der Entwicklung oder des Produktzyklus.

5 Ökonomische Aspekte

In diesem Abschnitt werden die ökonomischen Implikationen von Open RAN betrachtet. Dabei geht es vor allen Dingen um die Fragen, ob Open RAN den Wettbewerb intensiviert, ob Open RAN zu Kostensenkungen führt und ob Open RAN tatsächlich Anreize für mehr Innovationen im Bereich des Funkzugangsnetzes gibt.

5.1 Lock-in-Effekte

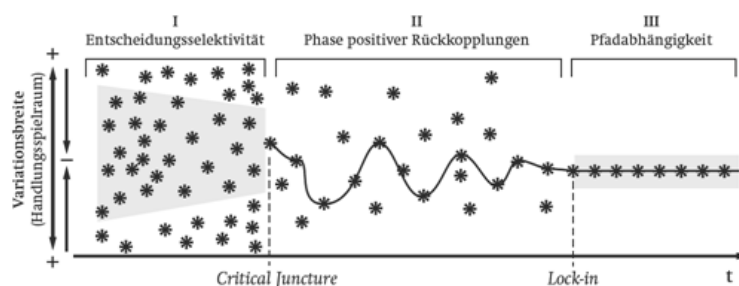
Ein wesentliches Argument für Open RAN ist die Vermeidung von Lock-in-Effekten und der Abhängigkeit der Mobilfunknetzbetreiber von einzelnen Anbietern aus dem Herstellermarkt.⁷¹ Durch offene Standards kann ein Ökosystem mit (neuen) Herstellern entstehen, das es den MNOs ermöglicht, Entscheidungsalternativen wahrzunehmen. Der Hintergrund von Lock-in-Effekten ist in der nachstehenden Box beschrieben.

⁷¹ Vgl. <https://www.mobileeurope.co.uk/features-me/15009-keys-to-the-kingdom-openran-seeks-to-break-open-vendor-lock-inQuelle>, zuletzt abgerufen am 20.09.21.

Lock-in-Effekte

Lock-in-Effekte beschreiben einen Zustand, in dem Personen oder Unternehmen aufgrund von früheren Entscheidungen kaum noch Handlungsalternativen besitzen, bzw. diese nur zu hohen Kosten realisieren können. Daraus resultiert letztlich eine Pfadabhängigkeit (vgl. Abbildung 5-1).

Abbildung 5-1: Lock-in und Pfadabhängigkeit

wik 

Quelle: Schreyögg (2008), S. 11.

Während zu Beginn eines Prozesses also ausreichend Handlungsalternativen vorhanden sind, wird durch positive Rückkopplungen der Weg zu einer bestimmten Lösung verstärkt. Ist diese erreicht, tritt der Lock-in-Effekt ein. Das Problem dabei ist, dass sich die so gefundene Lösung im Nachhinein oft als nicht optimal herausstellt.

Selbstverstärkende Prozesse können nach Arthur (1994, S. 112) vier allgemeine Ursachen besitzen:

- Hohe Gründungs- bzw. Fixkosten, die nachfolgend Größenvorteile bedingen.
- Lerneffekte, die die Produkte verbessern oder deren Kosten reduzieren.
- Koordinationseffekte, die Vorteile bedingen, da der Anschluss an andere Wirtschaftssubjekte, die ähnlich handeln, vorteilhaft ist.
- Selbstverstärkende Erwartungen, bei denen die zunehmende Verbreitung eines Produktes den Glauben an eine noch weitere Verbreitung erhöht.

Auf der anderen Seite kann es auch zu einem Pfadabbruch kommen, wenn die Beendigung eines Pfades bewusst herbeigeführt wird.⁷² „Aktuelle Strukturen müssen also so modifiziert werden, dass sie als Grundlage für einen neuen Pfad dienen können. Neben einer bewussten Abweichung gibt es weitere Herausforderungen. Zum einen muss der neue Pfad in Teile des alten eingebettet werden, zum anderen benötigt es eine Mobilisierung der Ressourcen [...]“⁷³

⁷² Clement, Schreiber (2013), S. 104.

⁷³ <https://leo-mattes.com/eigenschaften-von-pfadabhaengigkeiten/>, zuletzt abgerufen am 21.09.2021.

Im Falle von Open RAN stellt sich also die Frage, inwiefern Lock-in-Effekte bestehen und ob aus diesen ausgebrochen werden kann. Größenvorteile in der Herstellung und Umsetzung beim Aufbau von RAN scheinen durch die Entwicklung der letzten Jahre bestätigt zu werden, da nur wenige Anbieter auf dem Markt verblieben sind. Auch Lerneffekte können hier eine Rolle gespielt haben, da das Zusammenspiel der Komponenten desselben Ausrüsters grundsätzlich einfacher nachzuvollziehen ist als ein Pool an Möglichkeiten aus verschiedenen Hardware- und Softwarelösungen.⁷⁴ Zudem verfolgen die Mobilfunknetzbetreiber das Ziel, den Stromverbrauch in den Zugangsnetzen zu reduzieren, worauf die traditionellen Netzwerkhersteller ihre Produkte ausgerichtet haben.

Ein gewisser Lock-in ist also zu bestätigen. Da allerdings das Ausbrechen aus diesem Pfad von allen Mobilfunknetzbetreibern angestrebt wird,⁷⁵ erscheinen die damit verbundenen Vorteile größer zu sein als die Wechselkosten. Insbesondere die erhofften Preissenkungen durch mehr Wettbewerb können somit die Skalenvorteile der bisherigen Lösung kompensieren. Die entsprechende Mobilisierung von Ressourcen kann somit genauso realisiert werden wie durch das „Einbiegen“ auf einen neuen Pfad auf der Grundlage des alten. Eine Voraussetzung ist allerdings, dass für die einzelnen Komponenten von Open RAN genügend Angebote bzw. Anbieter bestehen (vgl. dazu auch Abschnitt 5.2). Ansonsten wird eine neue Abhängigkeit von einzelnen, spezialisierten Herstellern begründet.

Auch kann es zu „Ökosystemen im Ökosystem“ kommen, d. h. einige Hersteller treten, z. B. unter dem Dach eines großen Anbieters als Alternative auf, während ihre Produkte aber nicht mit denen anderer Hersteller kompatibel sind.⁷⁶ Dann würde an die Stelle des alten Lock-in ein neuer treten. Die Wertschöpfungsketten hätten sich zwar verändert, aber die Kontrolle wichtiger Bestandteile des RAN würde lediglich in andere Hände gegeben. Die „Gate-Keeper“-Funktion wäre dann nicht aufgelöst, sondern nur verlagert. Hier ist beispielsweise zu beachten, dass auch Rakuten als Online-Dienstleistungsunternehmen nicht eine Vielzahl von Herstellern in seinen Systemlösungen vereint. Zudem wurden einzelne Unternehmen, die Komponenten für das Open RAN entwickelt haben, von Rakuten übernommen.

5.2 Marktkonstellation und Wettbewerbsentwicklung

Zunächst soll ein Überblick über die Akteurslandschaft erfolgen. Nach Meinung einiger MNOs hat sich der Markt für die Errichtung von RAN in den letzten Jahren verdichtet und so nur wenig Auswahlspielraum gelassen.⁷⁷ Weltweit teilen sich derzeit eine Hand-

⁷⁴ Diese Aussagen ergeben sich auch aus den Expertengesprächen mit den Vetrreten der MNOs.

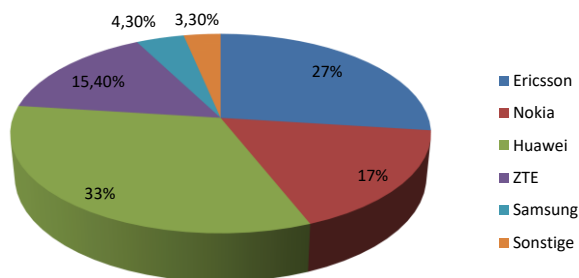
⁷⁵ So das Ergebnis unserer Experteninterviews.

⁷⁶ <https://www.lightreading.com/open-ran/say-hello-to-open-ran-ecosystem-or-vendor-lock-in-20/d/d-id/767225>, zuletzt abgerufen am 21.09.2021

⁷⁷ Vgl. z. B. <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/empfehlungen-fuer-open-ran-640860>, zuletzt abgerufen am 20.12.2021.

voll Unternehmen den Markt für den Aufbau von RAN, wie in Abbildung 5-2 zu sehen ist.

Abbildung 5-2: Weltweite Marktanteile am Aufbau von RAN (3. Quartal 2020)

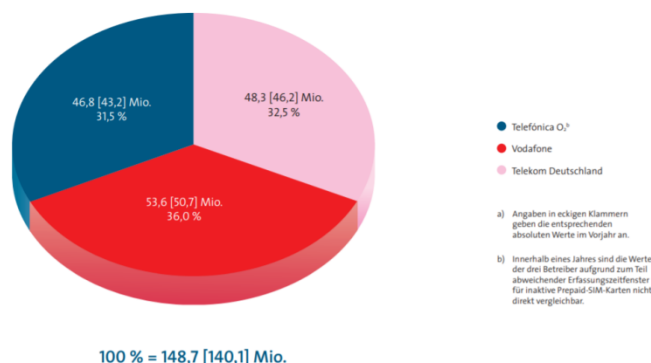


wik

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von: <https://www.telecomlead.com/telecom-equipment/huawei-strengthens-leadership-in-ran-market-98012>, zuletzt abgerufen am 12.05.2021.

Da in vielen Ländern nur wenige MNOs auf dem Markt sind⁷⁸, stellt sich der Markt für den Aufbau von RANs als beidseitiges Oligopol dar (wenige Anbieter, wenige Nachfrager), das zu bestimmten Abhängigkeiten führen kann. Eine Übersicht über die Marktanteile der Mobilfunknetzbetreiber in Deutschland zeigt Abbildung 5-3.

Abbildung 5-3: Zahl der aktiven SIM-Karten nach Mobilfunknetzbetreibern inkl. M2M-SIM-Karten (Schätzung für 2020)



wik

Quelle: Dialog Consult, VATM (2020): 22. TK-Marktanalyse Deutschland 2020, S. 22.

⁷⁸ Vgl. „List of mobile network operators of Europe“, https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_mobile_network_operators_of_Europe, zuletzt abgerufen am: 02.08.2021

Das Marktergebnis in Oligopolen ist grundsätzlich schwer zu prognostizieren, da die Unternehmen verschiedene Strategien verfolgen können, um auf das Verhalten der Konkurrenten zu reagieren. Die Theorie kennt neben dem Cournot-Modell mit den jeweiligen Reaktionsfunktionen, dem Bertrand-Modell mit Preiswettbewerb und der Stackelberg-Lösung mit einem Preisführer noch viele weitere, z. B. spieltheoretische Ansätze.

Einen Hinweis auf die Konzentration des Marktes kann der Herfindahl-Hirschmann-Index (HHI) geben. Brincat (2015, S. 41) schlägt vor, diesen in zweiseitigen Oligopolen sowohl für die Anbieter- als auch die Nachfrageseite zu bilden und aus dem Quotienten der beiden Indizes eine Aussage über die jeweiligen Machtverhältnisse zu treffen. Der Koeffizient (K) berechnet sich somit wie folgt:⁷⁹

$$K = \frac{HHI_S}{HHI_D}$$

HHI_S bildet den Herfindahl-Hirschmann-Index der Angebots- und HHI_D den der Nachfrageseite ab. K kann theoretisch Werte von 0 (keine Marktmacht der Angebotsseite) bis unendlich (keine Marktmacht der Nachfrageseite) annehmen. Ein Wert von 1 deutet auf eine gleiche Verteilung der Machtverhältnisse innerhalb der Marktseiten hin.

Marktanteile der Hersteller (Angebotsseite) für den deutschen Markt sind nach Kenntnis der Autoren nicht verfügbar. Für den weltweiten Markt lässt sich allerdings ein HHI berechnen⁸⁰, der dem der Nachfrageseite für den deutschen Markt (Mobilfunknetzbetreiber) gegenübergestellt werden kann. Daraus ergeben sich für die Jahre 2019 und 2020 folgende Werte für den HHI und den Quotienten K (vgl. Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: HHI für die Angebots- und Nachfrageseite im Mobilfunkmarkt

	2019		2020	
	Hersteller	MNO	Hersteller	MNO
HHI	2.309	3.348	2.113	3.344
K	0,69		0,63	

Quelle: WIK auf Basis von Dialog Consult / VATM (2020): 22. TK-Marktanalyse Deutschland 2020, S. 22 und: <https://telecoms.com/505872/nokia-ericsson-and-huawei-dominance-beginning-to-fade-analyst/>, zuletzt abgerufen am 03.08.2021. Für die Angebotsseite wurden drei sonstige Anbieter mit jeweils gleich großen Marktanteilen angenommen.

Der HHI wird üblicherweise vorwiegend zur Bewertung von Fusionen herangezogen. Neben dem absoluten Wert des Index spielt dann auch dessen Veränderung eine Rolle. In der EU gilt ein Wert unter 1.000 als unbedenklich.⁸¹ Zwischen 1.000 und 2.000 Punk-

⁷⁹ Brincat (2015), S. 41.

⁸⁰ Die Berechnung erfolgt für die Anbieter des Aufbaus von 5G-Basisstationen.

⁸¹ EU-Kommission (2004), S. 31/7.

ten besteht, je nach der Höhe der Veränderung, eine gewisse Konzentrationsgefahr. Diese wird ab einem Wert von 2.000 nochmals kritischer gesehen.⁸²

Nach dieser Berechnung zeigen sich also ein hoch konzentrierter Markt auf Seiten der Netzbetreiber und ein etwas weniger stark konzentrierter Markt auf der Herstellerseite. Eine Öffnung in Richtung Open RAN würde den HHI der Hersteller weiter verringern, wenn davon ausgegangen werden kann, dass diese sämtliche Bestandteile des RAN liefern könnten. Treten durch Open RAN also viele weitere Akteure hinzu, so tendiert die Marktform für die Ländermärkte zum *Oligopson* mit wenigen Nachfragern und vielen Anbietern. Für die Nachfrageseite weisen Haucap et al. (2010) außerdem darauf hin, dass der HHI im Bereich des Mobilfunks möglicherweise etwas an Aussagekraft verliert, da die Marktanteile von der Vergabe knappen Frequenzspektrums abhängen und so natürlicherweise beschränkt sind.⁸³ Auf der anderen Seite wird derzeit über einen Ausschluss von Huawei bzw. aller chinesischen Firmen beim Aufbau der 5G-Netze diskutiert (vgl. Abschnitt 5.6).

Demgegenüber steht das Bestreben, durch Open RAN ein Ökosystem möglichst vieler Anbieter zu etablieren. Falls sich einzelne Anbieter allerdings auf wenige oder einzelne Komponenten spezialisieren, so kann eine Entwicklung stattfinden, die den Markt für die Errichtung eines Open RAN weiter aufsplittert. Dies wiederum kann dazu führen, dass für die Lieferung bestimmter Komponenten des Netzes erneut nur einzelne Anbieter in Frage kommen und sich neuerdings Lock-in-Effekte bilden (vgl. Abschnitt 5.1).

Eine weitere Frage ist die nach der Mindestgröße des Mobilfunknetzes (d. h. die Anzahl von Mobilfunksendeanlagen) und die Attraktivität einer Open-RAN-Lösung. Wie das Beispiel Swisscom⁸⁴ zeigt, setzen einige Anbieter auf die feste Partnerschaft mit einem einzelnen Hersteller. Bei einer vergleichsweise geringen Anzahl von Sendeanlagen wird der potentielle Vorteil, Netzwerkkomponenten von verschiedenen Herstellern einsetzen zu können, angesichts der nachfolgenden Integrationsaufwendungen gering sein. Die Integrationskosten könnten bei einer geringen Anzahl von Netzwerkkomponenten höher ausfallen als die Einsparungseffekte durch Investitionen in marktübliche Hardware.

Hinsichtlich des Integrationsaufwands haben einzelne Mobilfunknetzbetreiber angekündigt, die Integration von „losen“ Open-RAN-Komponenten selbst zu übernehmen. Aus Sicht des MNO erfolgt hier eine Kostenabwägung (vgl. Kapitel 5.3). Die Alternativen sind dabei die Beauftragung von Gesamtlösungen eines Anbieters, die Beauftragung eines Aggregators für den Aufbau und Betrieb eines (Open) RAN oder die eigene Durchführung.

⁸² In den USA wird ein Markt bei Werten zwischen 1.500 und 2.500 Punkten als moderat konzentriert angesehen, ab 2.500 als hochkonzentriert (vgl. <https://www.justice.gov/atr/herfindahl-hirschman-index>, zuletzt abgerufen am 06.08.2021).

⁸³ Haucap et al. (2010), S. 12.

⁸⁴ Vgl. z. B. https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20210503_OTS0070/ericsson-und-swisscom-erweitern-strategische-partnerschaft-um-5g-standalone-foto, zuletzt abgerufen am 06.08.2021.

Schließlich kann durch die stärkere Trennung von Software und Hardware der Effekt entstehen, dass die softwarebasierte Netzsteuerung immer mehr in die Cloud verlagert wird. Ein Software- bzw. Cloudanbieter ist dann in der Lage unterschiedliche (virtuelle) Netze zu steuern und somit ein RAN-Sharing zu unterstützen. Die technische Zentralisierung ginge dann mit einer ökonomischen Zentralisierung in diesem Bereich einher. Die Monopolisierungstendenzen der sog. Hyperscaler sind auch auf dem europäischen Markt zu beobachten⁸⁵ und sollten bei der Entwicklung in Richtung Open RAN entsprechend bedacht werden.

5.3 Kostensituation

Betrachtet man die diversen Netzebenen (Core-Netz, Backhaul-Netz, Aggregationsnetz und RAN), so ist das RAN für etwa 50 % der Gesamtkosten eines Mobilfunknetzes verantwortlich. Aus Sicht einzelner Marktteilnehmer können sogar 60 bis 80 % der Kosten auf das RAN fallen. Daraus ergibt sich, dass die Einsparpotenziale beim Aufbau eines Open RAN entsprechend hoch ausfallen könnten. Grundsätzlich wird durch mehr Wettbewerb bei Open-RAN-Komponenten (vgl. Abschnitt 5.2) ein Absinken der Kosten für einzelne Komponenten erwartet. Auf der anderen Seite wird es zu einer Zunahme an Schnittstellen kommen, so dass die Transaktionskosten für das (Wieder-)Verzahn der Komponenten und Prozesse zunehmen. Tabelle 5-2 zeigt, wie die Zahl der Kombinationsmöglichkeiten bzw. Lösungen mit der Zahl der austauschbaren Netzelemente sowie der Zahl der Anbieter zunimmt.

Tabelle 5-2: Anzahl der Lösungsmöglichkeiten in einer Open-RAN-Umgebung

Elemente	Anbieter (pro Element)				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	1	4	9	16	25
3	1	8	27	64	125
4	1	16	81	256	625
5	1	32	243	1.024	3.125

Eine wesentliche Rolle wird daher die Standardisierung spielen. Hier gilt es, ein vernünftiges Maß zu finden, wie weit die Standardisierung gehen sollte, denn diese ist mit Kosten verbunden.⁸⁶ Bis zu einem gewissen Punkt können durch Standardisierung Kosten gespart werden, da die Kosten der Konvertierung⁸⁷ (als Alternative zur Standardisierung) entsprechend abnehmen. Nach Erreichen dieses Punktes nehmen die

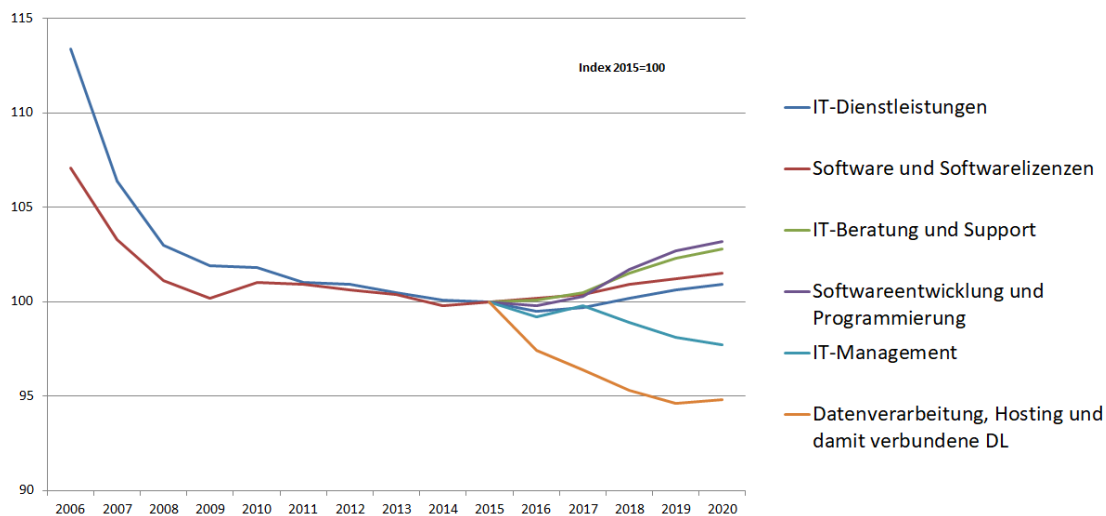
⁸⁵ <https://www.funkschau.de/markt-trends/europaeischer-cloud-markt-nur-was-fuer-hyperscaler.186750.html>, zuletzt abgerufen am 28.09.2021.

⁸⁶ Vgl. <http://www.ribke-consulting.de/expertise-eam-enterprise-architecture-management/standardisierung-komplexitaetsreduktion/>, abgerufen am 22.09.21

⁸⁷ Unter Konvertierung versteht man die Umwandlung von einem Format in ein anderes.

Kosten aufgrund zunehmender Komplexität wieder zu.⁸⁸ Langfristig wird von den meisten Marktteilnehmern erwartet, dass sich Open RAN durchsetzen wird. Letztendlich wird sich die Frage daran entscheiden, welche Marktseite dominant sein wird und ob bzw. wie schnell sich der Trend zum softwarebasierten Netzaufbau entwickelt. Denn im Bereich der Software ist, falls sich der Trend der letzten Jahre fortsetzt, mit Preisrückgängen bzw. nur geringen Preissteigerungen zu rechnen. Für Deutschland ergibt sich für verschiedene Services im IT-Sektor folgendes Bild (vgl. Abbildung 5-4).

Abbildung 5-4: Preisentwicklung verschiedener IT-Services



Quelle: Eigene Abbildung auf Grundlage von Destatis, Genesis-Datenbank (2021): Erzeugerpreisindizes für Dienstleistungen, abgerufen am 13.08.2021.

Auch durch den gemeinsamen Bau und Betrieb der 5G-Infrastruktur können Kosten eingespart werden.⁸⁹ Da sich mit SDN die für die Netzsteuerung benötigte Intelligenz eher zentralisiert, erscheint auch ein Network-Sharing einfacher, da in der Hardware keine Kontrollfunktion mehr verbleibt. Durch Open RAN wird dieser Prozess weiter vorangetrieben, da eine stärker softwarebasierter Netzbetrieb eine wesentliche Grundlage des Konzepts von Open RAN darstellt.⁹⁰

⁸⁸ Vgl. <http://www.ribke-consulting.de/expertise-eam-enterprise-architecture-management/standardisierung-komplexitaetsreduktion/>, abgerufen am 22.09.21

⁸⁹ Vgl. Schäfer et al. (2020).

⁹⁰ Singh et al. (2020), S.1.

5.4 Innovationen

Im Markt wird vielfach die Erwartung geäußert, dass durch die Einführung von Open RAN die Innovationstätigkeiten intensiviert werden.⁹¹ Dies wird in erster Linie durch eine Zunahme an Marktakteuren (und somit höherer Wettbewerbsintensität) begründet.⁹² Zumindest aus theoretischer Sicht ist diese Schlussfolgerung nicht gesichert. Denn welches Wettbewerbsumfeld für Innovationen am vorteilhaftesten ist, ist in der Literatur nicht gänzlich eindeutig. Ausgehend von von Hayeks Sicht des Wettbewerbs als einem dynamischen Prozess wird heute vielfach an die These Schumpeters der „schöpferischer Zerstörung“ angeknüpft,⁹³ bei dem die Innovatoren bzw. die die Innovationen umsetzenden Unternehmer einen Anreiz zur Innovation besitzen, da sie zumindest kurzfristig Monopolgewinne erzielen können.⁹⁴ Der Effekt ist dann umso größer, je geringer der Wettbewerb ist, d. h. bei intensivem Wettbewerb besteht ein geringerer Anreiz zur Innovation.

Für Aghion et al. (2004) ist der Schumpeter-Effekt allerdings nur für ein hohes Wettbewerbsniveau dominant, während für ein anfänglich schwaches Wettbewerbsniveau der sog. „Escape Competition“-Effekt als Erklärungsmuster für Innovationen dient.⁹⁵ Dabei spielt es eine Rolle, ob die Unternehmen auf Augenhöhe agieren („neck-and-neck“) oder der Markt sich eher asymmetrisch („uneveled“) darstellt. Für den ersten Fall kann der Escape-Competition-Effekt dominierend sein, d. h. bei Unternehmen gleichen Charakters (z. B. Unternehmen mit ähnlichen Produktionskosten, oftmals in Oligopolen) kann sich ein Unternehmen durch Innovation dem Wettbewerb teilweise entziehen. Bei asymmetrischen Märkten kann die Intensivierung des Wettbewerbs zu weniger Innovationen führen, da der bzw. die Nachzügler einen geringen Anreiz für Innovationen besitzt/besitzen, da sich der Gewinn vor und nach der Innovation nicht entscheidend ändert.

Allerdings wird auch dieser Ansatz kritisiert, etwa durch Correa (2011). Danach lässt sich der durch Aghion et al. (2004) definierte Zusammenhang nicht empirisch belegen. Vielmehr scheint auch die Ausgestaltung des Patentschutzes eine wichtige Rolle zu spielen.⁹⁶ Der Zusammenhang zwischen Wettbewerbsgrad und Innovation bleibt somit weiterhin umstritten. Auch muss im hier diskutierten Zusammenhang darauf hingewiesen werden, dass die üblichen Analysen sich mit Produkt- bzw. Endkundenmärkten beschäftigen. Beim Themenkomplex Open RAN sind die Abnehmer dagegen die Mobilfunkanbieter, die sich im Hinblick auf Anzahl und Größe von Endkunden unterscheiden. Daraus ergeben sich ggf. unterschiedliche Verhaltensweisen und Marktergebnisse.

⁹¹ Vgl. z. B.: Open RAN Policy Coalition (2021): Open RAN: A Year in Review, veröffentlicht am 3. Mai 2021, abrufbar unter: <https://www.openranpolicy.org/category/blog/>, zuletzt abgerufen am 06.05.2021; Gavrilovska et al. (2020), S.7.

⁹² Vgl. z. B. Parallel Wireless (2020), S. 49.; Perrin (2017), S. 9.

⁹³ Burr (2017), S. 48 ff.

⁹⁴ Borbély (2008), S. 404.

⁹⁵ Aghion et al. (2004), S.1. Durch Innovation und Produktdifferenzierung können sich Unternehmen dem Wettbewerb ein Stück weit entziehen.

⁹⁶ Correa (2011), S. 161.

Aufgrund dessen bietet sich ein eher pragmatischer Ansatz an, um die Frage der Innovationstätigkeit der Unternehmen im Bereich Open RAN zu analysieren, indem Kriterien für erfolgreiche Innovationen herangezogen werden. In der konkreten Fragestellung gibt es verschiedene Aspekte für Unternehmen, ob eine Innovation erfolgreich sein kann, wie in der linken Spalte von Abbildung 5-2 aufgeführt.⁹⁷ Obgleich auch dieser Ansatz auf Endkunden gerichtet ist, lassen sich die Fragen auch auf die Marktconstellation im Bereich (Open) RAN übertragen. Die Antworten sollen aber weniger aus Sicht der Anbieter, als aus einer übergeordneten Perspektive erfolgen.

Tabelle 5-3: Fragen und Antworten für erfolgreiche Innovationen im Bereich Open RAN

Fragen für eine erfolgreiche Innovation	Antworten Open RAN
Relevanter Kundennutzen: Ist die Innovation für den Kunden relevant?	Die Frage nach der Relevanz wird durch die Marktteilnehmer unterschiedlich bewertet. Während einzelne Hersteller den Ansatz insgesamt völlig ablehnen, sehen die MNO die Relevanz in erster Linie in den vermuteten Kostenvorteilen von neuen Produkten. Die Frage inwieweit einzelne Innovationen relevant sind, wird sich ebenfalls an den Kostenvorteilen ermesen lassen.
Relevante Differenzierung vom Wettbewerb: Ist die Lösung in einem relevanten Aspekt überlegen?	Auch die Frage der Überlegenheit wird kontrovers diskutiert. Hier können verschiedene Aspekte entscheidend sein: <ul style="list-style-type: none"> • (verbesserte) Energieeffizienz • Günstigere Bereitstellung • Qualitative Vorteile des Produkts
Akzeptanz und Erklärbarkeit der Produktinnovation: Kann der Produktnutzen und seine Einzigartigkeit Kunden einfach erklärt werden?	Die Akzeptanz ist in diesem Fall vor allen Dingen auf Seiten der Nutzer schon sehr groß, da sie den Ansatz insgesamt begrüßen und verstehen. Potenzielle Innovationen werden also grundsätzlich gut angenommen werden.
Einfach zu testen: Ist es für den Kunden einfach, das Produkt auszuprobieren und den Nutzen zu erleben?	Da die vollständige Umsetzung von Open RAN nach Meinung der Marktteilnehmer noch einige Zeit in Anspruch nehmen wird, ist ein einfaches „Ausprobieren“ nicht möglich, zumal die Umsetzung in den meisten Fällen nicht als „Greenfield“-Ansatz erfolgen kann, sondern in einer in Betrieb befindlichen Infrastruktur. Allerdings können Pilotprojekte natürlich wichtige Erkenntnisse liefern (siehe Abschnitt 4).
Einfach zu wechseln: Ist es für den Kunden einfach, zu Ihrem Produkt zu wechseln, ohne Risiko und großen Aufwand?	Die Frage nach dem „Produkt-“ bzw. in diesem Fall eher Systemwechsel lässt sich nicht ohne weiteres beantworten. Ein Wechsel kann nur schrittweise stattfinden. Inwieweit er gelingt, hängt auch vom Fortschritt der Standardisierung ab.
Rechtliche Rahmenbedingungen: Geraten Sie mit der Produktinnovation eventuell in rechtliche (Gesetze, Normen, Patente) oder ethnische Konflikte	An dieser Stelle stellt sich die Frage nach den Verantwortlichkeiten. Bei Open RAN müssen viele kleine Zahnräder ineinandergreifen. Wenn das

⁹⁷ Vgl. <https://www.lead-innovation.com/blog/kriterien-produktinnovation-erfolgreich>, zuletzt abgerufen am 07.05.2021.

Fragen für eine erfolgreiche Innovation	Antworten Open RAN
(Werte)?	System ausfällt oder nicht die versprochene Servicequalität bietet, ist es u. U. schwer, die verantwortliche Stelle auszumachen.
Ertragsaussichten der Produktinnovation: Hat die Produktinnovation das erforderliche Potenzial für Umsatz und Gewinn?	Für die neuen Marktteilnehmer sicherlich. Für die etablierten Anbieter bedeutet es, sich am Markt noch stärker aufzustellen.
Integration in bestehendes Produktportfolio: Kann das Produkt eingeführt werden ohne direkt mit dem bestehenden Produktportfolio des innovativen Unternehmens zu konkurrieren?	Das betrifft wiederum die etablierten Anbieter, die zu einem Stück weit auch disruptive Angebote machen müssen.
Umsetzbarkeit: Stehen Ihnen die erforderlichen Ressourcen zur Verfügung, um die Produktinnovation technisch umzusetzen und zu vermarkten?	Diese Frage stellt sich für die Newcomer. Die Anlaufkosten sind in einem softwarebasierten System für die entsprechenden Hersteller sicherlich geringer.

Ob es also durch Open RAN tatsächlich zu mehr Innovationen kommen wird, hängt von einer Reihe verschiedener Faktoren ab. Wesentlich sind Fortschritte in der Standardisierung, die wiederum Einfluss auf die Kosten haben.

5.5 Auswirkungen auf Produktdifferenzierung

Eine Produktdifferenzierung der Netzbetreiber findet in erster Linie über unterschiedliche Versorgungsqualitäten statt.⁹⁸ Wie in Kapitel 3 beschrieben, werden durch Open RAN verschiedene Komponenten für den Wettbewerb geöffnet. Dadurch ist es für die MNOs möglich, Produkte verschiedener Anbieter auszuwählen und somit auch die Versorgungsqualität und somit das Produkt „Versorgungsqualität“ zu beeinflussen. Eine räumliche Differenzierung der Versorgungsqualität ist denkbar. Dies setzt allerdings voraus, dass die MNOs die Komponenten der (neuen) Anbieter bzw. insbesondere deren Zusammenspiel kennen.

Ob dies gelingt, hängt vor allen Dingen von der Komplexität der angestrebten Lösung und dem vorgesehenen Zeitrahmen ab. Durch die verschiedenen Kombinationsmöglichkeiten steigt die Zahl der möglichen Lösungen bzw. Verfahren zur Produkterstellung einer bestimmten Mobilfunkqualität mit jedem zusätzlichen Hersteller rapide an. Das beschleunigt die Produktdifferenzierung, MNOs können aber auch in eine Komplexitätsfalle geraten und die Prozesse u. U. nicht mehr im gewünschten Sinne kontrollieren. Auf jeden Fall wird es eine gewisse Zeit dauern, bis durch entsprechende Erfahrungen zumindest annähernd optimale Lösungen gefunden werden können. Dann jedoch kann Open RAN ein Treiber für stärkere Produktdifferenzierung sein.

⁹⁸ Nett, Sörries (2019), S. 10.

5.6 Digitale Souveränität und Sicherheit

„Im Kern ist die Digitale Souveränität die Möglichkeit zur unabhängigen digitalen Selbstbestimmung. Im internationalen Zusammenhang bedeutet das vor allem, eigene Gestaltungs- und Innovationsspielräume zu erhalten und einseitige Abhängigkeiten zu vermeiden.“⁹⁹ Digitale Souveränität kann also auch die Souveränität ganzer Staaten bedeuten.¹⁰⁰ Ausgehend von dieser Definition digitaler Souveränität erfährt das Thema Open RAN ein gesteigertes öffentliches Interesse. Es wird befürchtet, dass durch einzelne Komponenten bestimmter Hersteller Einfallstore für andere Staaten geschaffen werden, die dann (negativen) Einfluss auf den Betrieb der (Mobilfunk-)Netze nehmen könnten.¹⁰¹ International haben einige Staaten bereits den Ausschluss chinesischer Hersteller bekanntgegeben. Einen Überblick dazu bietet Abbildung 5-5.

⁹⁹ Bitkom (2019). S. 4.

¹⁰⁰ Bitkom (2019). S. 11. Baischew et al. (2020) legen dar, dass es in der EU „drei gemeinsame Dimensionen digitaler Souveränität gibt: (1) Privatsphäre, (2) Cybersicherheit und (3) Strategie. Während es bei der ersten Dimension vor allem um die Fähigkeit des Einzelnen geht, sein digitales Leben und seine Daten zu kontrollieren, beziehen sich die zweite und dritte Dimension vor allem auf die kollektive Ebene der Staaten sowie der EU, die versuchen, im digitalen Zeitalter (wieder) Kontrolle und Führung zu erlangen.“

¹⁰¹ Lee-Makiyama (2020), S.2.

Abbildung 5-5: Ausschluss von Huawei beim Aufbau von 5G weltweit



Quelle: Handelsblatt (2020)¹⁰².

In Deutschland wurde im Jahr 2021 das IT-Sicherheitsgesetz 2.0 verabschiedet. Dort heißt es in § 9b, Satz 1: „Der Betreiber einer Kritischen Infrastruktur hat den geplanten erstmaligen Einsatz einer kritischen Komponente gemäß § 2 Absatz 13 dem Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat vor ihrem Einsatz anzuzeigen. In der Anzeige sind die kritische Komponente und die geplante Art ihres Einsatzes anzugeben.“ Über diesen Paragraphen könnte indirekt ein Ausschluss von Anbietern erfolgen.¹⁰³ Fall dies erfolgen sollte, würde sich auch auf der Nachfrageseite zunächst ein höher konzentrierter Markt ergeben. Die Anzahl der Hersteller, aus denen MNOs den Aufbau ihres Netzes wählen können, verringert sich. Auf der anderen Seite wird vor allen Dingen 5G zukünftig aber, wie geschildert, auch in kritischen Infrastrukturen eingesetzt.

¹⁰² <https://www.handelsblatt.com/politik/international/5g-mobilfunknetz-hohe-huerden-fuer-huawei-das-verfahren-kommt-einem-ausschluss-gleich/26229670.html?ticket=ST-2077623-gubpJoeiUxz3I7qeAQbB-ap1>, zuletzt abgerufen am 06.08.2021.

¹⁰³ Vgl. zur Diskussion z. B. <https://www.noerr.com/de/newsroom/news/it-sicherheitsgesetz-20--neue-anforderungen-und-erweiterter-adressatenkreis>, zuletzt abgerufen am 06.08.2021.

„Kritische Infrastrukturen (KRITIS) sind Organisationen oder Einrichtungen mit wichtiger Bedeutung für das staatliche Gemeinwesen, bei deren Ausfall oder Beeinträchtigung nachhaltig wirkende Versorgungsengpässe, erhebliche Störungen der öffentlichen Sicherheit oder andere dramatische Folgen eintreten würden.“¹⁰⁴ Die Prüfung durch eine staatliche Institution kann also durchaus gerechtfertigt sein. Die Ziele Sicherheit und Wettbewerb befinden sich an dieser Stelle also in einem Spannungsverhältnis, insbesondere auch vor dem Hintergrund der Entwicklung, dass durch softwarebasierte Systeme außereuropäische Hyperscaler eine (neue) Vormachtstellung erhalten könnten (vgl. Abschnitt 5.2).

6 Situation in 5G-Campusnetzen

Für abgegrenzte Grundstücke und Betriebsgelände vergibt die Bundesnetzagentur auf Antrag seit November 2019 Frequenzen im Bereich 3.700 bis 3.800 MHz.¹⁰⁵ Damit können sog. lokale Campusnetze aufgebaut werden. Vor allen im Bereich der Industrie kann so eine eigenständige 5G-Infrastruktur implementiert werden. Diese kann z. B. im Vergleich zu kabelgebundenen Technologien eine höhere Flexibilität im Produktionsprozess gewährleisten, da sie einfacher an die individuellen, flexiblen Bedürfnisse in der jeweiligen Produktion oder Logistik angepasst werden kann.

Der zusätzliche Vorteil von Open RAN in Campusnetzen besteht darin, dass die Campusnetzbetreiber noch passendere, d. h. speziell auf ihre Bedürfnisse zugeschnittene Lösungen implementieren können, indem sie (zumindest in der Theorie) aus einer Vielzahl von Anbietern diejenigen auswählen, die für ihre Prozesse am besten geeignet sind. Branchenspezifische Lösungen treten somit mittelfristig in den Vordergrund. Der Unterschied zu den öffentlichen Mobilfunknetzen ist auch darin zu sehen, dass, je nach Anwendung, keine flächendeckende Abdeckung gewährleistet werden muss. Dies kann eine Marktlücke für neue Angebote und Lösungen darstellen. Auch muss hier aufgrund der räumlichen Nähe nicht unbedingt eine Trennung in CU/DU erfolgen, d. h. es müssen nicht sämtliche Schnittstellen in den Netzwerkkomponenten geöffnet werden. Auch der Aspekt des Energieverbrauchs spielt in Campusnetzen eine eher untergeordnete Rolle, so dass dies die Frage nach Open RAN unter diesem Gesichtspunkt nicht beeinflusst wird.

Aktuell bestehen noch keine Projekte, in denen Campusnetzbetreiber auf Open RAN setzen.¹⁰⁶ Vielmehr scheint hier die Entwicklung im Massenmarkt abgewartet zu wer-

¹⁰⁴ https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/KRITIS-und-regulierte-Unternehmen/kritis-und-regulierte-unternehmen_node.html, zuletzt abgerufen am 27.09.2021.

¹⁰⁵ Vgl. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/LokaleNetze/functions/faq_3,7%20GHz.html, zuletzt abgerufen am 24.09.2021.

¹⁰⁶ Einzig der Service-Anbieter „umlaut“ hat angekündigt, ein Campus-Netz auf Basis von Open RAN für Testzwecke aufzubauen, vgl. <https://www.umlaut.com/de/stories/umlaut-baut-5g-open-ran-campusnetz-in-aachen>, zuletzt abgerufen am 23.09.2021

den, um auf entsprechende Erfahrungen aufbauen zu können. Allerdings treten schon einzelne Dienstleister mit entsprechenden Angeboten auf den Markt.¹⁰⁷ Es ist aber noch nicht absehbar, welche Technologien und Betriebskonzepte sich bei Campusnetzen durchsetzen werden. Mit Open RAN besteht jedoch eine Option mehr für die Realisierung von Campusnetzen, die ihre praktische Relevanz aber erst noch darlegen muss.

7 Ergebnisse und Handlungsempfehlungen

Die Diskussion in den vorangegangenen Kapiteln hat gezeigt, dass das Thema Open RAN sowohl auf der technischen als auch auf der ökonomischen Sicht äußerst vielschichtig ist. Eine eindeutige Aussage „pro oder contra Open RAN“ ist daher aus wissenschaftlicher Sicht nicht ableitbar. Vielmehr können anhand einer SWOT-Analyse die Vor- und Nachteile von Open RAN herausgearbeitet werden. Im Folgenden wird daher zusammenfassend ein Überblick über Stärken und Schwächen, aber auch über Chancen und Risiken von Open RAN gegeben.

Tabelle 7-1: SWOT-Analyse: Open RAN aus volkswirtschaftlicher Sicht

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Niedrigere Markteintrittsschwelle durch Standardisierung • Aufbau eines Ökosystems führt zu differenzier-ten (Produkt-) Angeboten • Individuelle Lösungen für öffentliche und private Mobilfunknetze • (Zentrale Architektur erleichtert Netzbetrieb) 	<ul style="list-style-type: none"> • Eingespielte und funktionierende Prozesse werden aufgebrochen • Skaleneffekte gehen zunächst verloren • Komplexitätssteigerung bringt höhere Transaktionskosten mit sich
Chancen	Risiken
<ul style="list-style-type: none"> • Mehr Wettbewerb auf Anbieterseite kann zu Kosten- und Preissenkungen führen • Dynamisches Umfeld kann Ideenwettbewerb und Innovationen begünstigen • Abnehmende Skalengröße durch Standardisierung öffnet neue Anwendungsfelder • Lock-in-Effekte der althergebrachten Anbieter können entfallen 	<ul style="list-style-type: none"> • Potenziell neue Lock-in-Effekte • Mögliches Oligopson führt zu einseitiger Mark-macht auf MNO-Seite • Fehlende Verantwortlichkeiten bei Fehlfunktion • Auswirkungen auf Energieeffizienz noch unklar • Ausschluss einzelner Anbieter verschiebt Marktgewichte • Markmacht der Hyperscaler • Größere Angriffsflächen für Cyber-Attacks

Die Komplexität des Themas löst entsprechenden weiteren Forschungsbedarf aus. Es ist wenig überraschend, dass Open RAN Gegenstand von 6G-Forschungsprojekten ist. Aus technischer und betrieblicher Sicht wird sich zeigen müssen, ob und wie Open RAN in der Realität tatsächlich umgesetzt werden kann und ob sich die erwarteten Vor-teile tatsächlich einstellen. Aus ökonomischer Perspektive ist insbesondere die Markt-

¹⁰⁷ Vgl. z. B. <https://www.cocus.com/5g-open-ran-campus/>, zuletzt abgerufen am 11.11.2021.

entwicklung vor dem Hintergrund der digitalen Souveränität von Interesse für weitere Forschungsarbeiten.

Es empfiehlt sich, die kurz- bis mittelfristige, durchaus dynamische Entwicklung aufmerksam zu beobachten. Dies gilt einerseits für die Treiber eines neuen Ökosystems, andererseits aber hinsichtlich der Sicherheitskonzepte, die Open RAN resilient machen. Aus einer Mikroperspektive ist die Entwicklung im Zusammenhang mit Campusnetzen interessant, bei der Deutschland international eine Führungsrolle eingenommen hat. Open RAN kann, wenn die Versprechungen tatsächlich in der Praxis Realität werden, deutlich individualisierte Lösungsansätze mit geringeren Kosten für die Besitzer von Frequenznutzungsrechten bedeuten.

Schlussendlich ist noch die Forschungsfrage interessant, wo die Steuerung des Netzes letztendlich stattfindet (z. B. in der Cloud) und welche Bedeutung der verstärkte Rückgriff auf Cloud-Anbieter für die bisherigen Marktakteure haben wird. Zudem stellt sich dann die Frage nach neue Abhängigkeiten von bestimmten Unternehmen und die Auswirkungen solcher Abhängigkeiten auf die digitale Souveränität in Deutschland.

Literatur

1&1 (2021): 1&1 und Rakuten vereinbaren weitreichende Partnerschaft.

5G Americas (2020): Transition toward open and interoperable networks, S. 28.

Aghion, P., Bloom, N., Blundell, R., Griffith, R., Howitt, P. (2004): Competition and Innovation: An Inverted U Relationship, IFS Working Papers, No. 02/04.

Altiostar (2019): Rakuten Launches First Real-World End-to-End Tests in a Fully Virtualized Cloud-Native Mobile Network.

Arthur, W. B. (1994): Increasing Returns and Path Dependence in the Economy, Ann Arbor: University of Michigan Press.

Baischew, D., Kroon, P., Lucidi, S., Märkel, C. und Sörries, B. (2020). Digital Sovereignty in Europe - a first benchmark. WIK-Consult Bericht. Online abrufbar unter https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2021/Digital_Sovereignty_Report.pdf, zuletzt abgerufen am 06.12.2021. BBC (2021): Vodafone picks Samsung for 5G network.

Bitkom (2019): Digitale Souveränität: Anforderungen an Technologie- und Kompetenzfelder mit Schlüsselfunktion, Stellungnahme.

Borbély, E. (2008): J. A. Schumpeter und die Innovationsforschung, in: 6th International Conference on Management, Enterprise and Benchmarking MEB 2008-Proceedings, S.401-410.

Burr, W. (2017): Innovationen in Organisationen, 2., erweiterte und aktualisierte Auflage, Verlag W. Kohlhammer.

Clement, R., Schreiber (2013): Internet-Ökonomie, Grundlagen und Fallbeispiele der vernetzten Wirtschaft, 2. Auflage, Springer-Verlag.

Correa, J. A (2011): Innovation and competition: An unstable relation, Journal of applied econometrics 27, S. 160-166.

Deutsche Telekom (2016): It's time for a new RAN architecture.

Deutsche Telekom (2021): Consortium of industry leaders creates new open lab "i14y" to accelerate network disaggregation and Open RAN.

Deutsche Telekom (2021): Telekom schaltet O-RAN Town in Neubrandenburg ein.

Deutscher Bundestag (2021): Deutscher Bundestag, Drucksache 19/27677, 19. Wahlperiode 18.03.2021, Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Oliver Luksic, Frank Sitta, Bernd Reuther, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP.

Elbanna, A., Eltges, F. (2019): 5G Status Studie: Herausforderungen, Standardisierung, Netzarchitektur und geplante Netzentwicklung, WIK Diskussionsbeitrag, Nr. 449.

Ericsson (2020): Mobile radio access networks: What policy makers need to know.

ETSI (2019): 5G; NG-RAN; F1 general aspects and principles, 3GPP TS 38.470 version 15.6.0 Release 15.

- EU-Kommission (2004): Leitlinien zur Bewertung horizontaler Zusammenschlüsse gemäß der Ratsverordnung über die Kontrolle von Unternehmenszusammenschlüssen (2004/C 31/03).
- EU-Kommission (2020): Sichere 5G-Netze: Fragen und Antworten zum EU-Instrumentarium.
- European Journal of Communication (2021): The geopolitical hijacking of open networking: the case of Open RAN.
- Fierce wireless (2019): Vodafone initiates first open RAN trials in the U.K., challenging traditional vendors.
- Financial Times (2020): Telecoms Networks Look to Fix Huawei Problem with Open Source Software, A Heavy Reading White Paper Produced for the Telecom Infra Project.
- Gavrilovska, I, Rakovic, V., Denkovski, D. (2020): From Cloud RAN to Open RAN, *Wireless Pers Commun* 113, S. 1523–1539.
- Handelsblatt (2021): Japanischer Netzbetreiber Rakuten soll 1&1 mit 5G in Deutschland helfen.
- Haucap, J. Heimeshoff, U., Stühmeier, T. (2010): Wettbewerb im deutschen Mobilfunkmarkt, *Ordnungspolitische Perspektiven*, Nr. 04, September 2010.
- IGR (2021): Open RAN Integration: Run With It.
- ISO/IEC (2018): Information technology — Security techniques — Information security risk management.
- Lee-Makiyama, H. (2020): Open RAN: The Technology, its Politics and Europe's Response, *ECIPE Policy Brief* No. 8/2020.
- M. A. Habibi, M. Nasimi, B. Han and H. D. Schotten, "A Comprehensive Survey of RAN Architectures Toward 5G Mobile Communication System," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 70371-70421, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919657.
- Mobile world live (2021): Deutsche Telekom lights open RAN test site.
- Moniem-Tech (2020): What is the difference between vRAN and Open RAN?.
- NEC (2021): O-RAN Compliant 5G Radio Unit.
- Nett, L., Sörries, B. (2019): Infrastruktur-Sharing und 5G: Anforderungen an Regulierung, neue wettbewerbliche Konstellationen, *WIK Diskussionsbeitrag* Nr. 443.
- O-RAN Alliance (2018): O-RAN: Towards an Open and Smart RAN
- O-RAN Alliance (2020): O-RAN Use Cases and Deployment Scenarios
- O-RAN Alliance (2021): O-RAN Minimum Viable Plan and Acceleration towards Commercialization.
- O-RAN Alliance (2021): Threat modeling and remediation analysis, v1.0.
- O-RAN Software Community (2019): Amber Release (Nov 2019).

- Plantin, J.,C. (2021): The geopolitical hijacking of open networking: the case of Open RAN, in: European Journal of Communication, Vol. 36(4), S. 404–417.
- Parallel Wireless (2020): Everything you need to know about Open RAN.
- Perrin, S. (2017): Evolving to an Open C-RAN Architecture for 5G, A Heavy Reading White Paper produced for Fujitsu.
- Schäfer, S., Elbanna, A., Neu, W., Plückebaum, T. (2020): Mögliche Einsparungspotentiale beim Ausbau von 5G durch Infrastructure Sharing, WIK Diskussionsbeitrag, Nr. 472.
- Schreyögg, G. (2008): Wie Unternehmen pfadabhängig werden, Technologische und strategische Pfade 1, Innovationsforum der Gottlieb Daimler- und Karl Benz-Stiftung, 26. Mai 2008, Berlin.
- SDX Central (2020): Rakuten Acquires AltioStar to Boost Open RAN Efforts.
- Shehata, M., Elbanna, A., Musumeci, F. und M. Tornatore (2018): "Multiplexing gain and processing savings of 5G radio-access-network functional splits." IEEE Transactions on Green Communications and Networking 2, no. 4 (2018) 982-991.
- Singh, s.K., Singh, R., Kumbhani, B. (2020): The Evolution of Radio Access Network Towards Open-RAN: Challenges And Opportunities, 2020 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2020, S. 1-6.
- Spirent (2019): Is Your Backhaul Network Ready for 5G?.
- Techblog (2020): 44 Chinese companies have joined the O-RAN Alliance.
- TelecomTV (2021): German operator 1&1 to build greenfield Open RAN network with Rakuten.
- Telefónica (2020): Erster deutscher Netzbetreiber mit Open RAN im Livebetrieb.
- Teltarif (2021): 5G Open-RAN: 1&1-Drillisch setzt auf Technik von Rakuten.
- TIP (2020): Toward Disaggregated Mobile Networking.
- TIP (2021): TIP's OpenRAN Project Group Accelerates the Development, Validation, and Deployment of OpenRAN Solutions.
- U.S. NIST (2020): Information Technology Laboratory, COMPUTER SECURITY RESOURCE CENTERSP 800-207, Zero Trust Architecture.
- Vodafone lab (2021): Vodafone lab to show open RAN does exactly what it says on the tin.
- Windriver (2021): Vodafone Selects Key Partners to Build Europe's First Commercial Open RAN Network.

Als "Diskussionsbeiträge" des Wissenschaftlichen Instituts für Infrastruktur und Kommunikationsdienste sind zuletzt erschienen:

- Nr. 404: Karl-Heinz Neumann, Stephan Schmitt, Rolf Schwab unter Mitarbeit von Marcus Stronzik:
Die Bedeutung von TAL-Preisen für den Aufbau von NGA, März 2016
- Nr. 405: Caroline Held, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückerbaum:
Entgelte für den Netzzugang zu staatlich geförderter Breitband-Infrastruktur, März 2016
- Nr. 406: Stephan Schmitt, Matthias Wissner:
Kapazitätsmechanismen – Internationale Erfahrungen, April 2016
- Nr. 407: Annette Hillebrand, Petra Junk:
Paketshops im Wettbewerb, April 2016
- Nr. 408: Tseveen Gantumur, Iris Henseler-Unger, Karl-Heinz Neumann:
Wohlfahrtsökonomische Effekte einer Pure LRIC - Regulierung von Terminierungsentgelten, Mai 2016
- Nr. 409: René Arnold, Christian Hildebrandt, Martin Waldburger:
Der Markt für Over-The-Top Dienste in Deutschland, Juni 2016
- Nr. 410: Christian Hildebrandt, Lorenz Nett:
Die Marktanalyse im Kontext von mehrseitigen Online-Plattformen, Juni 2016
- Nr. 411: Tseveen Gantumur, Ulrich Stumpf:
NGA-Infrastrukturen, Märkte und Regulierungsregime in ausgewählten Ländern, Juni 2016
- Nr. 412: Alex Dieke, Antonia Niederprüm, Sonja Thiele:
UPU-Endvergütungen und internationaler E-Commerce, September 2016 (in deutscher und englischer Sprache verfügbar)
- Nr. 413: Sebastian Tenbrock, René Arnold:
Die Bedeutung von Telekommunikation in intelligent vernetzten PKW, Oktober 2016
- Nr. 414: Christian Hildebrandt, René Arnold:
Big Data und OTT-Geschäftsmodelle sowie daraus resultierende Wettbewerbsprobleme und Herausforderungen bei Datenschutz und Verbraucherschutz, November 2016
- Nr. 415: J. Scott Marcus, Christian Wernick:
Ansätze zur Messung der Performance im Best-Effort-Internet, November 2016
- Nr. 416: Lorenz Nett, Christian Hildebrandt:
Marktabgrenzung und Marktmacht bei OTT-0 und OTT-1-Diensten, Eine Projektskizze am Beispiel von Instant-Messenger-Diensten, Januar 2017
- Nr. 417: Peter Kroon:
Maßnahmen zur Verhinderung von Preis-Kosten-Scheren für NGA-basierte Dienste, Juni 2017
- Nr. 419: Stefano Lucidi:
Analyse marktstruktureller Kriterien und Diskussion regulatorischer Handlungsoptionen bei engen Oligopolen, April 2017
- Nr. 420: J. Scott Marcus, Christian Wernick, Tseveen Gantumur, Christin Gries:
Ökonomische Chancen und Risiken einer weitreichenden Harmonisierung und Zentralisierung der TK-Regulierung in Europa, Juni 2017
- Nr. 421: Lorenz Nett:
Incentive Auctions als ein neues Instrument des Frequenzmanagements, Juli 2017
- Nr. 422: Christin Gries, Christian Wernick:
Bedeutung der embedded SIM (eSIM) für Wettbewerb und Verbraucher im Mobilfunkmarkt, August 2017
- Nr. 423: Fabian Queder, Nicole Angenendt, Christian Wernick:
Bedeutung und Entwicklungsperspektiven von öffentlichen WLAN-Netzen in Deutschland, Dezember 2017

- Nr. 424: Stefano Lucidi, Bernd Sörries, Sonja Thiele:
Wirksamkeit sektorspezifischer Verbraucherschutzregelungen in Deutschland, Januar 2018
- Nr. 425: Bernd Sörries, Lorenz Nett:
Frequenzpolitische Herausforderungen durch das Internet der Dinge - künftiger Frequenzbedarf durch M2M-Kommunikation und frequenzpolitische Handlungsempfehlungen, März 2018
- Nr. 426: Saskja Schäfer, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückebaum unter Mitarbeit von Stephan Schmitt:
Zugang zu gebäudeinterner Infrastruktur und adäquate Bepreisung, April 2018
- Nr. 427: Christian Hildebrandt, René Arnold:
Marktbeobachtung in der digitalen Wirtschaft – Ein Modell zur Analyse von Online-Plattformen, Mai 2018
- Nr. 428: Christin Gries, Christian Wernick:
Treiber und Hemmnisse für kommerziell verhandelten Zugang zu alternativen FTTB/H-Netzinfrastrukturen, Juli 2018
- Nr. 429: Serpil Taş, René Arnold:
Breitbandinfrastrukturen und die künftige Nutzung von audiovisuellen Inhalten in Deutschland: Herausforderungen für Kapazitätsmanagement und Netzneutralität, August 2018
- Nr. 430: Sebastian Tenbrock, Sonia Strube Martins, Christian Wernick, Fabian Queder, Iris Henseler-Unger:
Co-Invest Modelle zum Aufbau von neuen FTTB/H-Netzinfrastrukturen, August 2018
- Nr. 431: Johanna Bott, Christian Hildebrandt, René Arnold:
Die Nutzung von Daten durch OTT-Dienste zur Abschöpfung von Aufmerksamkeit und Zahlungsbereitschaft: Implikationen für Daten- und Verbraucherschutz, Oktober 2018
- Nr. 432: Petra Junk, Antonia Niederprüm:
Warenversand im Briefnetz, Oktober 2018
- Nr. 433: Christian M. Bender, Annette Hillebrand:
Auswirkungen der Digitalisierung auf die Zustellogistik, Oktober 2018
- Nr. 434: Antonia Niederprüm:
Hybridpost in Deutschland, Oktober 2018
- Nr. 436: Petra Junk:
Digitalisierung und Briefsubstitution: Erfahrungen in Europa und Schlussfolgerungen für Deutschland, Oktober 2018
- Nr. 437: Peter Kroon, René Arnold:
Die Bedeutung von Interoperabilität in der digitalen Welt – Neue Herausforderungen in der interpersonellen Kommunikation, Dezember 2018
- Nr. 438: Stefano Lucidi, Bernd Sörries:
Auswirkung von Bündelprodukten auf den Wettbewerb, März 2019
- Nr. 439: Christian M. Bender, Sonja Thiele:
Der deutsche Postmarkt als Infrastruktur für europäischen E-Commerce, April 2019
- Nr. 440: Serpil Taş, René Arnold:
Auswirkungen von OTT-1-Diensten auf das Kommunikationsverhalten – Eine nachfrageseitige Betrachtung, Juni 2019
- Nr. 441: Serpil Taş, Christian Hildebrandt, René Arnold:
Sprachassistenten in Deutschland, Juni 2019
- Nr. 442: Fabian Queder, Marcus Stronzik, Christian Wernick:
Auswirkungen des Infrastrukturwettbewerbs durch HFC-Netze auf Investitionen in FTTP-Infrastrukturen in Europa, Juni 2019
- Nr. 443: Lorenz Nett, Bernd Sörries:
Infrastruktur-Sharing und 5G: Anforderungen an Regulierung, neue wettbewerbliche Konstellationen, Juli 2019
- Nr. 444: Pirmin Puhl, Martin Lundborg:
Breitbandzugang über Satellit in Deutschland – Stand der Marktentwicklung und Entwicklungsperspektiven, Juli 2019

- Nr. 445: Bernd Sörries, Marcus Stronzik, Sebastian Tenbrock, Christian Wernick, Matthias Wissner:
Die ökonomische Relevanz und Entwicklungsperspektiven von Blockchain: Analysen für den Telekommunikations- und Energiemarkt, August 2019
- Nr. 446: Petra Junk, Julia Wielgosch:
City-Logistik für den Paketmarkt, August 2019
- Nr. 447: Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Entwicklung des Effizienzvergleichs in Richtung Smart Grids, September 2019
- Nr. 448: Christian M. Bender, Antonia Niederprüm:
Berichts- und Anzeigepflichten der Unternehmen und mögliche Weiterentwicklungen der zugrundeliegenden Rechtsnormen im Postbereich, September 2019
- Nr. 449: Ahmed Elbanna unter Mitwirkung von Fabian Eltges:
5G Status Studie: Herausforderungen, Standardisierung, Netzarchitektur und geplante Netzentwicklung, Oktober 2019
- Nr. 450: Stefano Lucidi, Bernd Sörries:
Internationale Vergleichsstudie bezüglich der Anwendung und Umsetzung des Nachbildbarkeitsansatzes, Dezember 2019
- Nr. 451: Matthias Franken, Matthias Wissner, Bernd Sörries:
Entwicklung der funkbasierten Digitalisierung in der Industrie, Energiewirtschaft und Landwirtschaft und spezifische Frequenzbedarfe, Dezember 2019
- Nr. 452: Bernd Sörries, Lorenz Nett:
Frequenzmanagement: Lokale/regionale Anwendungsfälle bei 5G für bundesweite Mobilfunknetzbetreiber sowie für regionale und lokale Betreiber unter besonderer Betrachtung der europäischen Länder sowie von China, Südkorea und den Vereinigten Staaten von Amerika, Dezember 2019
- Nr. 453: Martin Lundborg, Christian Märkel, Lisa Schrade-Grytsenko, Peter Stamm:
Künstliche Intelligenz im Telekommunikationssektor – Bedeutung, Entwicklungsperspektiven und regulatorische Implikationen, Dezember 2019
- Nr. 454: Fabian Eltges, Petra Junk:
Entwicklungstrends im Markt für Zeitungen und Zeitschriften, Dezember 2019
- Nr. 455: Christin Gries, Julian Knips, Christian Wernick:
Mobilfunkgestützte M2M-Kommunikation in Deutschland – zukünftige Marktentwicklung und Nummerierungsbedarf, Dezember 2019
- Nr. 456: Menessa Ricarda Braun, Christian Wernick, Thomas Plückebaum, Martin Ockenfels:
Parallele Glasfaserausbauten auf Basis von Mitverlegung und Mitnutzung gemäß DigiNetzG als Möglichkeiten zur Schaffung von Infrastrukturwettbewerb, Dezember 2019
- Nr. 457: Thomas Plückebaum, Martin Ockenfels:
Kosten und andere Hemmnisse der Migration von Kupfer- auf Glasfasernetze, Februar 2020
- Nr. 458: Andrea Liebe, Jonathan Lennartz, René Arnold:
Strategische Ausrichtung bedeutender Anbieter von Internetplattformen, Februar 2020
- Nr. 459: Sebastian Tenbrock, Julian Knips, Christian Wernick:
Status quo der Abschaltung der Kupfernetzinfrastruktur in der EU, März 2020
- Nr. 460: Stefano Lucidi, Martin Ockenfels, Bernd Sörries:
Anhaltspunkte für die Replizierbarkeit von NGA-Anschlüssen im Rahmen des Art. 61 Abs. 3 EKEK, März 2020
- Nr. 461: Fabian Eltges, Gabriele Kulenkampff, Thomas Plückebaum, Desislava Sabeva:
SDN/NFV und ihre Auswirkungen auf die Kosten von Mobilfunk und Festnetz im regulatorischen Kontext, März 2020
- Nr. 462: Lukas Wiewiorra, Andrea Liebe, Serpil Taş:
Die wettbewerbliche Bedeutung von Single-Sign-On- bzw. Login-Diensten

- und ihre Relevanz für datenbasierte Geschäftsmodelle sowie den Datenschutz, Juni 2020
- Nr. 463: Bernd Sörries, Lorenz Nett, Matthias Wissner
Die Negativauktion als ein Instrument zur Versorgung weißer Flecken mit Mobilfunkdiensten, Dezember 2020
- Nr. 464: Sebastian Tenbrock, Christian Wernick:
Incumbents als Nachfrager von Vorleistungen auf FTTB/H-Netzen, Dezember 2020
- Nr. 465: Marcus Stronzik, Gonzalo Zuloaga:
Empirische Untersuchung der FTTB/H-Ausbauaktivität im europäischen Vergleich, Dezember 2020
- Nr. 466: Antonia Niederprüm mit Unterstützung von Gonzalo Zuloaga und Willem van Lienden:
Verbundproduktion im Zustellmarkt: Briefnetze mit Paketen oder Paketnetze mit Briefen?, Dezember 2020
- Nr. 467: Serpil Taş, Lukas Wiewiorra (in Zusammenarbeit mit dem Weizenbaum-Institut):
Multihoming bei Plattformdiensten – Eine nachfrageseitige Betrachtung, Dezember 2020
- Nr. 468: Menessa Ricarda Braun, Julian Knips, Christian Wernick:
Die Angebotsentwicklung auf dem deutschen Mobilfunkmarkt 2017-2020, Dezember 2020
- Nr. 469: Isabel Gull, Lisa Schrade-Grytsenko, Martin Lundborg:
Cloud-Lösungen und KI-as-a-Service – Aktuelle und potenzielle Anwendungsszenarien und Marktentwicklungen, Dezember 2020
- Nr. 470: Bernd Sörries, Matthias Franken, Dajan Baischew, Stefano Lucidi:
Einfluss von Versorgungsaufgaben auf die Mobilfunkabdeckung in der EU, Dezember 2020
- Nr. 471: Julian Knips, Christin Gries, Christian Wernick:
Consumer-IoT in Deutschland – Anwendungsbereiche und möglicher Regelungsbedarf, Dezember 2020
- Nr. 472: Saskja Schäfer, Ahmed Elbanna, Werner Neu, Thomas Plückebaum:
Mögliche Einsparungspotentiale beim Ausbau von 5G durch Infrastructure Sharing, Dezember 2020
- Nr. 473: Gabriele Kulenkampff, Martin Ockenfels, Konrad Zoz, Gonzalo Zuloaga:
Kosten von Breitband-Zugangsnetzen, Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus – bottom-up Modellierung und statistische Analyse –, Dezember 2020
- Nr. 474: Lorenz Nett, Bernd Sörries:
Ausgestaltung und Umsetzung eines Universaldienstregimes (insbesondere mit Blick auf die Realisierung einer Versorgung mit schnellem Internet) in anderen Ländern, November 2021
- Nr. 475: Christin-Isabel Gries, Martin Lundborg, Peter Stamm:
Digitale Arbeitswelten im Mittelstand - Auswertung von Studien zu Arbeit 4.0, November 2021
- Nr. 476: Menessa Ricarda Braun, Julian Knips, Christian Wernick:
Analyse der Angebotsentwicklung für leitungsgebundene Breitbanddienste für Privatkunden im deutschen Festnetzmarkt von 2017-2020, Dezember 2021
- Nr. 477: Christian Märkel, Marcus Stronzik, Martin Simons, Matthias Wissner, Martin Lundborg:
Einsatz von Blockchain in KMU: Chancen & Hemmnisse, Dezember 2021
- Nr. 478: Matthias Wissner, Ahmed Elbanna, Bernd Sörries, Thomas Plückebaum:
Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, Dezember 2021

ISSN 1865-8997