

SDN/NFV und ihre Auswirkungen auf die Kosten von Mobilfunk und Festnetz im regulatorischen Kontext

Autoren:

Fabian Eltges
Gabriele Kulenkampff
Thomas Plückebaum
Desislava Sabeva

Bad Honnef, März 2020

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 Abteilungsleiter Post und Logistik	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

Stand: März 2020

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	III
Zusammenfassung	V
Summary	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
1 Hintergrund und Gegenstand	1
2 SDN/NFV – Definitionen	4
2.1 SDN – Software Defined Networking	4
2.1.1 Definition	4
2.1.2 Technische Beschreibung	5
2.2 NFV - Network Functions Virtualisation	9
2.2.1 Definition	9
2.2.2 Technische Beschreibung	9
2.3 Implementierungsgründe für SDN/NFV	11
2.3.1 Synergien aus SDN und NFV	11
2.3.2 Network Slicing	12
3 Wesentliche Anwendungsfälle der SDN/NFV Architektur	14
3.1 5G Mobilfunk	15
3.2 IMS-Plattform	17
3.3 Leased Lines (Festverbindungen):	19
3.3.1 Technische Realisierung von Festverbindungen	19
3.3.2 Bedeutung von SDN/NFV für die Bereitstellung von Festverbindungen	24
3.4 Bitstromzugang	25
3.4.1 Definition	25
3.4.2 Bedeutung von SDN/NFV für Bitstromzugang	27
4 Stand der aktuellen Implementierung	29
4.1 Open Networking Foundation	29
4.2 Offene oder geschützte APIs	30
4.3 NFV Standardisierung	31
4.4 Umsetzung bei den Herstellern	32
4.5 SDN/NFV Umsetzung in Unternehmen	33

5 Die Auswirkungen von SDN/NFV auf die Kosten der Netze und Vorleistungsprodukte	36
5.1 Kosten für Festnetzterminierung	37
5.2 Kosten für Mobilfunknetzterminierung	40
5.3 Kosten für CFV	40
5.4 Kosten für Bitstromzugang/VULA	42
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	43
7 Literaturverzeichnis	45

Abbildungen

Abbildung 1-1:	Vergangenheit: Dedizierte Netze für verschiedene Dienste	2
Abbildung 1-2:	Gegenwart: ein gemeinsames (All-IP) Netz für viele (alte und neue) Dienste	2
Abbildung 1-3:	Zukunft: Ein All-IP Netz mit zentralisierter Kontrollschicht und virtualisierten Kanälen (rechts)	3
Abbildung 2-1:	SDN Netzarchitektur	6
Abbildung 2-2:	Virtualisierte Netze für abstrahierte Geschäftslogik	8
Abbildung 2-3:	Ebenen der Network Function Virtualisation	10
Abbildung 2-4:	NFV Ansatz von ETSI	11
Abbildung 3-1:	Beispiel SDN und NFV für das Mobilfunknetz	16
Abbildung 3-2:	Beispiel für IMS-Plattform im Mobilfunknetz (LTE)	19
Abbildung 3-3:	Netzhierarchie aus mehreren Ebenen mit unterschiedlichen Verbindungen (A – B, A – C, A – D)	20
Abbildung 3-4:	Beispiel für eine Vorkonzentration von Mietleitungen (TDM) in einem großen HVt Standort (Layer 1 Channelbank, kaskadierend für unterschiedliche Bandbreiten)	21
Abbildung 3-5:	Übergang der Dienste auf den Ring zur nächsthöheren Netzebene	21
Abbildung 3-6:	Verbindung über verschiedene Netzebenen hinweg	22
Abbildung 3-7:	Verbindungsausleitung in intermediären Knoten höherer Hierarchie	22
Abbildung 3-8:	Typischer Protokollstack: Ineinandergreifen der verschiedenen miteinander verschalteten Übertragungssysteme und Infrastrukturkomponenten	23
Abbildung 3-9:	Protokollstruktur einer typischen Datenübertragung mit Ethernet, MPLS und IP Header	24
Abbildung 3-10:	Allgemeine Netzstruktur für Bitstrom (VULA, Ethernet Best Effort und IP Best Effort)	26
Abbildung 3-11:	Zweig einer Bitstrom Netzstruktur über mehrere Netzebenen hinweg	26
Abbildung 4-1:	Meilensteine des ONF Standardisierungsprozesses	30
Abbildung 4-2:	ETSI NFV Referenzarchitektur	32
Abbildung 4-3:	Google G-Scale WAN	33
Abbildung 4-4:	Stand der Virtualisierung der Transportnetze	35
Abbildung 5-1:	Einrichtungen der Kontrollschicht	38

Zusammenfassung

Software Defined Networking (SDN) und Network Function Virtualisation (NFV) sind die nächsten Entwicklungsschritte in der Architektur der NGN basierten Telekommunikationsnetze. Dies gilt gleichermaßen für das Fest- wie für das Mobilfunknetz. Wesentliche Funktionen des Netzmanagements und der Bereitstellung der Dienste werden weiter automatisiert und virtualisiert und sind nicht mehr in den Netzelementen angesiedelt. Vielmehr sollen diese Funktionen über eine verteilte Cloud den Netzelementen bereitgestellt und damit Verkehrsströme zentral gesteuert werden. Durch die Separierung von Hardware und Steuerungszintelligenz kann die Flexibilität des Netzes gesteigert und darüber eine effizientere Ressourcenausnutzung erreicht werden. Ein prominentes Beispiel einer softwarebasierten Netzarchitektur ist die Einrichtung von Network Slices, welche sich wie eigenständige Netze (jedoch nur virtuell) individuell und flexibel konfigurieren lassen. Im Anwendungsbereich 5G finden sich bereits entsprechende Standards.

In diesem Diskussionsbeitrag beschreibt das WIK die neue Architektur in ihren wesentlichen Elementen und nimmt dabei Bezug auf den aktuellen sowie geplanten Entwicklungsstand. Die Studie gibt einen Überblick über wesentliche Anwendungsfälle der SDN/NFV Architektur und analysiert deren möglichen Auswirkungen auf die Kostenstrukturen von Fest- und Mobilfunknetzen. Ein Fokus liegt dabei auf den zu erwartenden Implikationen für die Kosten regulierter Vorleistungsprodukte. Es steht durch eine zentralere Netzsteuerung und Virtualisierung von Netzfunktionen zu erwarten, dass die CAPEX von TK-Netzen sinken werden. Gleichzeitig erlaubt die zunehmend softwaregesteuerte Netzorchestrierung den Netzbetreibern die Möglichkeit, Teile der Netzverwaltung zu Automatisieren bzw. sogar an Cloud-Provider auszulagern. Mit derartigen unternehmerischen Entscheidungen würde der Netzbetrieb weniger kapitalintensiv werden.

Summary

Software Defined Networking (SDN) and Network Function Virtualisation (NFV) are the next steps in the development of NGN-based telecommunication networks and its architecture. This applies equally to the fixed and mobile networks. Key functions of network management and service provisioning will be subject to further automation and virtualisation and will not any longer be allocated to network elements which are performing transport functionalities. Now, these management and control functions will be provided by a specialised cloud-oriented platform which is managing and controlling traffic flows by centralised means. By decoupling transport network elements into distinct network hardware and software-based network management functions an increasing network flexibility can be achieved, which then allows for a more efficient use of network resources. A prominent example of SDN/NFV implementation are so called network slices which can be configured individually and flexibly. Several types already have been standardised in the context of 5G mobile networks.

In this discussion paper, WIK captures the new architecture in its essential elements in the current and planned future development stage. The study gives an overview of essential use cases of the SDN/NFV architecture and analyses their possible effects on the cost structures of fixed and mobile networks. A special emphasis is given to the impacts on costs for regulated wholesale products. It is expected that telco network costs become less CAPEX-intense due to more centralised network control and virtualisation of network functions. This may become even more obvious if network operators begin to source out parts of the network management to cloud providers. This would even more lower the weight of CAPEX on the overall costs.

Abkürzungsverzeichnis

ADC	Application Delivery Controller
ADM	Add Drop Multiplexer
API	Application Program Interface
BBU	Base-Band Units
BHCA	Busy Hour Call Attempts
BNetzA	Bundesnetzagentur
BNG	Broadband Network Gateway
BRAS	Broadband remote access server
BSS	Business Support System
CAPEX	Capital Expenditures
CDN	Content Delivery Network
CFV	Carrier-Festverbindungen
CPE	Customer Premise Equipment
C-RAN	Centralised Radio Access Network
CSCF	Call State Control Server
CSP	Communication Service Provider
DNS	Domain Name System
DPI	Deep Packet Inspection
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	DSL Access Multiplexer
DTAG	Deutsche Telekom Aktiengesellschaft
DWDM	Dense Wavelength Division Multiplexing
DXC	Digital Cross Connect
EM	Element Manager
eMBB	enhanced Mobile Broadband
ETSI	Electrotechnical Standards Institute
HVt	Hauptverteiler
I-CSCF	Interrogating-Call State Control Server
IMS	IP-Multimedia Subsystem
INF	Interactive Network Facility

IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
ISO	International Organization for Standardisation
IT	Informationstechnik
ITU	International Telecommunication Union
KVz	Kabelverzweiger
LER	Label Edge Router
LRIC	Long Run Incremental Cost
LTE	Long Term Evolution
MGW	Media Gateway
MGWC	Media Gateway Controller
mMTC	massive Machine Type Communications
MPLS	Multiprotocol Label Switching
MPoP	Metropolitan Point of Presence
MSAN	Multiservice Access Node
MSAU	Multiservice Access Unit
NFV	Network Function Virtualisation
NGN	Next Generation Network
NIA	New IP Agency
NMS	Network Management System
OADM	Optical Add Drop Multiplexer
ONF	Open Network Foundation
OPEX	Operational Expenditures
O-RAN	Open Radio Access Network
OSI	Open Systems Interconnection
OSS	Operational Support System
P-CSCF	Proxy-Call State Control Server
PSTN	Public Switched Telephone Network
QoS	Quality of Service
RADIUS	Remote Authentication Dial in User Service
RAN	Radio Access Network

SBC	Session Border Controller
SBI	South Bound Interface
S-CSCF	Serving Call State Control Server
SDN	Software Defined Networking
SIP	Service Interface Protocol
STDM	Statistical Time Division Multiplex
TAS	Telephone Application Server
TDM	Time Division Multiplex
TK	Telekommuniktion
URLLC	Ultra-Reliable Latency Communication
VASP	Value Added Service Provider
VIM	Virtual Infrastructure Manager
VNF	Virtualised Network Functions
VoIP	Voice over Internet Protocol
VoLTE	Voice over LTE
VPN	Virtual Private Network
VULA	Virtual Unbundled Local Access
WAN	Wide Area Network
WW	Weltweit, World Wide

1 Hintergrund und Gegenstand

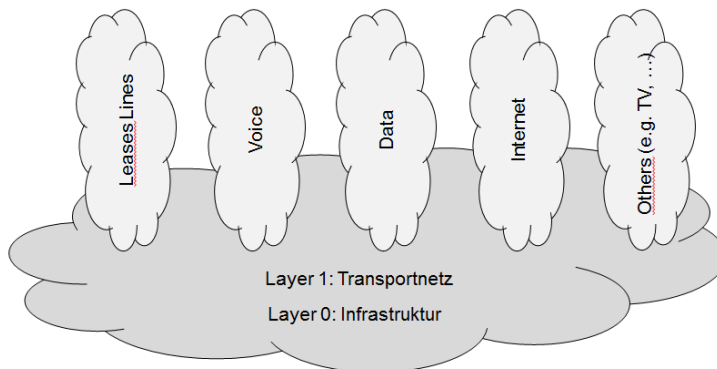
In den heute vorherrschenden Next Generation Netzen (NGN) werden Informationen von Netzknoten zu Netzknoten transportiert. Die Netzelemente an diesen Netzknoten verfügen über die notwendige, jedoch limitierte Intelligenz, Verkehre zu steuern. In der Vergangenheit wurden gar verschiedene Dienste wie Telefonie oder Internet in dedizierten Netzen realisiert, was in den heutigen NGNs durch All-IP gemeinsam administriert werden kann. Software-defined Networking (SDN) und Network Functions Virtualisations (NFV) werden die nächste Evolutionsstufe der TK-Netze charakterisieren. Solche Netze zeichnen sich durch zentrale Netzsteuerung und Virtualisierung von dezentralen Netzfunktionen aus und verringern so Komplexität und Überwachungsaufwand.

Im Rahmen dieses Diskussionsbeitrags werden speziell die Neuerungen, die durch die Technologien von Software-defined Networking (SDN) und Network Functions Virtualisation (NFV) ermöglicht werden, analysiert. In unseren gegenwärtigen Telekommunikationsnetzen sind die Funktionalitäten der Netzelemente untrennbar mit der Hardware verbaut. Die Steuerungseinheiten sind somit als Bestandteile des physischen Netzes in der Fläche verteilt. Dies limitiert die Flexibilität des Netzes und seine Anpassungsfähigkeit in Bezug auf die Einführung neuer Dienste. Die Implementierung von SDN/NFV kann als eine Fortführung der Entwicklung gesehen werden, die sich in den letzten Jahren mit der All-IP-Umstellung der Netze manifestiert hat.

Die aus einer softwaregestützten Netzarchitektur und Virtualisierung von Netzfunktionen erzielbaren Vorteile prägen bereits heute die Entwicklung, Planung und Implementierung von Netzen (sowohl Festnetz als auch 5G-Netze). Umstellung der Netze erfordern, dass herkömmliche Netzelemente ersetzt werden, da automatisierte und softwareseitige Umgestaltungen ohne entsprechende Hardwareanpassungen kaum möglich sind.

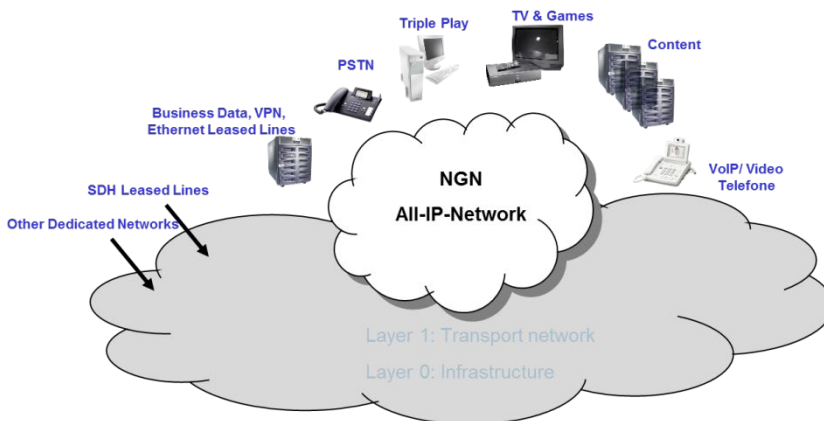
In der Vergangenheit waren dedizierte Netze für einzelne Dienste vorgesehen (Abbildung 1-1). In dieser Netzarchitektur ist diese Hardwareabhängigkeit offenkundig. Die Abhängigkeit der Netzfunktionen von diesen Hardwareeinrichtungen mündet in einer ineffizienten Ressourcenallokation.

Abbildung 1-1: Vergangenheit: Dedizierte Netze für verschiedene Dienste



Entkoppelt wurde diese Abhängigkeit und limitierte Flexibilität durch die Umstellung auf All-IP, welches zwischenzeitlich vorherrscht (Abbildung 1-2). Eine Verbesserungen in den Übertragungs- und Switching-Technologien ermöglicht es, alle Dienste in einem gemeinsamen Netz zu realisieren. Ein solches Netz wird auch als Next Generation Network (NGN) beschrieben.

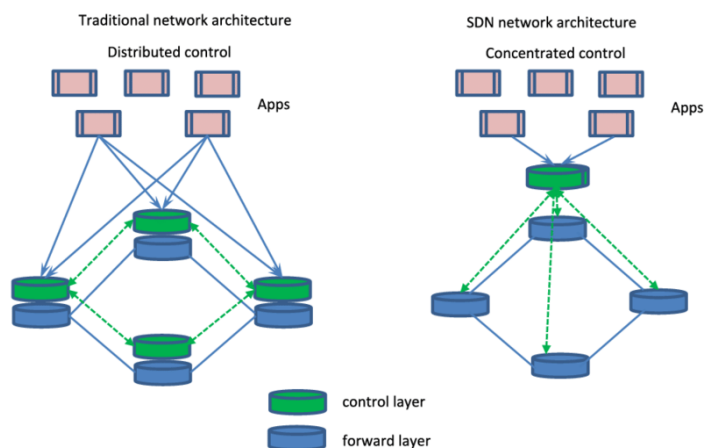
Abbildung 1-2: Gegenwart: ein gemeinsames (All-IP) Netz für viele (alte und neue) Dienste



In Zukunft sollen eine zentralisierte Netzsteuerung, welche durch SDN/NFV ermöglicht werden soll, diese Starre nahezu gänzlich auflösen. Wie Abbildung 1-3 darstellt, löst sich in einem SDN/NFV-basierten Netz die strikte Kohärenz von steuernden Netzknoten und Verkehrssteuerungselementen. Der Verkehr wird in einer zentralisierten Kontrollschicht gesteuert werden können in dem die Netzintelligenz konzentriert. Gleichzeitig ermöglicht eine solche Netzarchitektur die Virtualisierung von Kanälen und Diensten innerhalb des All-IP-Netzes.

Gegenstand dieser Studie ist es daher, die zukünftige Netzarchitektur, welche durch SDN und NFV-Ansätze ermöglicht wird, zu erfassen und zu analysieren. Hierzu gehört die Analyse aller Netzebenen mit ihren Funktionalitäten und der Vergleich mit der heutigen Netzarchitektur in Fest- und Mobilfunk.

Abbildung 1-3: Zukunft: Ein All-IP Netz mit zentralisierter Kontrollschicht und virtualisierten Kanälen (rechts)



Quelle: Liang und Li, 2018

Diese technologische Neuerungen werden eine zentralisierte Netzsteuerung mit mehr Intelligenz im Netz, größere Freiheiten der Produktinnovation, tendenziell sinkende Kosten und kürzere Innovationszyklen ermöglichen. Dies kann zum einen eine veränderte Dienstleistung entlang der Wertschöpfungskette nach sich ziehen und geht zum anderen mit einer Veränderung der Kostenstruktur von Netzen einher. Die kostenbasierte Entgeltregulierung von Vorleistungen wird dieser Entwicklung Rechnung tragen müssen.¹

In diesem Diskussionsbeitrag werden in Kapitel 2 zunächst die Begriffe von SDN und NFV eingeführt und mit ihren technischen Eigenschaften und Möglichkeiten beschrieben. Daraufhin beschreibt Kapitel 3 beispielhafte Anwendungsfälle der Technologien in Fest- und Mobilfunk. In Kapitel 0 geht dieser Beitrag auf den Stand der Implementierung von SDN/NFV in der Wirtschaft ein, bevor die potenziellen Auswirkungen auf die Kosten und damit verbundene Vorleistungsentgelte beschrieben werden (Kapitel 5) Dabei werden Anwendungsfälle (Use-Cases) dargestellt und mit ihrer Hilfe Implikationen für die Kostenberechnung abgeleitet.

¹ BEREC, BoR (16)97, Input Paper on Potential Regulatory Implications of Software Defined Networking and Network Functions Virtualisation, May 2016, vgl. S. 9 Abschnitt 4.4

2 SDN/NFV – Definitionen

2.1 SDN – Software Defined Networking

2.1.1 Definition

In den vergangenen Jahren setzte sich die Wahrnehmung durch, ausgehend von den IT-Netzen, dass historisch bedingt die Administration der Netze häufig auf unteren Ebenen, den Netzkomponenten wie Router, Switches etc. stattfindet. Eine komfortable, Dynamik fördernde Administration oder gar programmierbare Steuerung/Regelung auf hoher Ebene war bislang nicht vorgesehen. Inzwischen ist die Erkenntnis gereift, dass es signifikante Vorteile bietet, wenn es eine abstrahierende und logisch zentralisierende Steuerungsschicht gibt.

Erreicht werden soll dies durch das seit ca. 2012 intensiv vorangetriebene Konzept der über Software gesteuerten Netze (programmierbare Netze), dem Software Defined Networking (SDN). Dem Konzept zugrundeliegend ist der Ansatz, dass eine Trennung von Transportschicht (Netzelemente/Netzknoten) und Steuerungsschicht erfolgt, die bislang in einzelnen Hardwarekomponenten mit deren integrierter und damit proprietärer Steuerungssoftware realisiert war. Dies bedeutete für die Administration eines Netzes, dass Einstellungen zur Konfiguration der Netzfunktionen in jedem einzelnen Netzknoten erfolgen mussten. Zukünftig wird diese Funktion der Netzsteuerung auf einer höheren Netzebene zentralisiert. Dies hat den Vorteil, dass die Steuerungsebene nicht nur Kenntnis der Konfiguration eines einzelnen Netzknotens hat, sondern einen Überblick über das gesamte Netz bzw. relevante Teilnetze hat. Auf diese Weise wird die bisher dezentral verankerte Steuerung der Netzknoten zentral steuerbar..

OSI-Schichtenmodell

Das OSI-Schichtenmodell ist ein Produkt der International Telecommunication Union (ITU) und der International Organization for Standardisation (ISO) und beinhaltet insgesamt 7 Schichten (Layer 1 bis Layer 7). Layer 0 ist in der ursprünglichen Definition nicht enthalten. Für tiefergehende Informationen zu den Schichtenklassifizierungen sei auf ITU und ISO verwiesen.

OSI-Schicht	Netzelemente
Layer 3	Einrichtungen des logischen Netzes auf Schicht 3 (hier IP Label Edge und Label Switch Router sowie Mediagateway)
Layer 2	Einrichtungen des logischen Netzes auf Schicht 2 (hier Ethernet-Switches und Konzentratoren)
Layer 1	Einrichtungen des (physikalischen) Transportnetzes (hier Multiplexer (Add-Drop-, SDH-, DWDM), Regeneratoren)
Layer 0	Gräben, Kabel und Kabelkanalanlagen

2.1.2 Technische Beschreibung

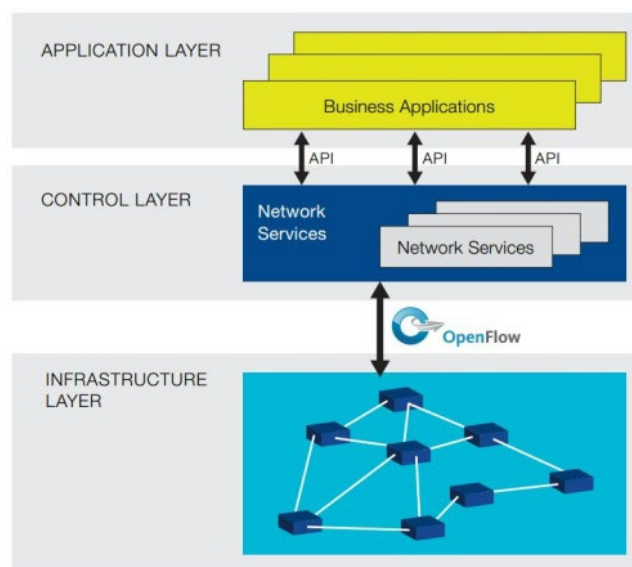
Das Konzept von SDN basiert auf drei zu betrachtenden Ebenen (siehe Abbildung 2-1). Die unterste Ebene wird „Infrastructure Layer“ genannt und beschreibt die Infrastrukturbene mit den einzelnen Netzelementen, die deren Funktionen bereitstellen. Bei diesen Netzelementen handelt es sich in der Regel um Geräte zur Übertragung des Datenverkehrs. Die wesentliche Funktion der Netzelemente zur Datenübertragung besteht in der Weiterleitung der ankommenden Datenpakete an erreichbare, benachbarte Netzelemente (z.B. Router- oder Switch-Funktion auf der Basis einer Routing- oder Flow-Tabelle) oder der Verkehrsverarbeitung (z.B. Firewall- oder Paketfilter-Funktion). Dabei werden in dieser Ebene die von den höheren Ebenen gesendeten Steuerungsanweisungen umgesetzt. Eine autonome Funktion der Netzelemente ist nicht gegeben.

Die Ebene darüber, „Control Layer“ genannt, beschreibt die Kontrollschicht, welche über das sogenannte „Southbound-Interface“ (SBI) die Steuerung der Netzelemente der darunter liegenden Ebene übernimmt. Hierbei handelt es sich um die SDN-Controller. Das Southbound-Interface stellt die Kommunikation zwischen SDN-Controller und den Netzelementen sicher, d.h., bildet die Schnittstelle zwischen dem in Abbildung 2-1 dargestellten Control Layer und Infrastructure Layer. Diese Kommunikation erfolgt dynamisch in Echtzeit, um die Netzelemente gemäß den jeweils aktuellen Anforderungen bedarfsgerecht zu steuern. Auch erfolgt nicht zwingend eine Steuerung jedes einzelnen Datenpakets, sondern gleichartige Datenpakete (z.B. solche mit gleichem Start- und

Ziel) werden nach dem gleichem Muster weitergeleitet. Es wird also nicht mehr nur ein Paket gelenkt, sondern der Fluss eines Verkehrsstromes. Für jede Kommunikationsbeziehung wird ein Pfad durch das Netz ermittelt und die entsprechenden Steuerungsinformationen an die beteiligten Netzelemente entlang dieses Pfades verteilt. Bislang existiert noch kein standardisiertes, allgemeingültiges Protokoll für das Southbound-Interface, seitens der „Open Networking Foundation“ wird derzeit versucht den „Open-Flow-Standard“ als solches zu etablieren. Dies hängt jedoch von der Bereitschaft der Hardwarehersteller ab, diesen Standard zu implementieren.

In der obersten Ebene befindet sich der „Application Layer“. Er bietet die Möglichkeit, Produktinnovation auf Basis der zugrundeliegenden Kontrollschicht in Form von Anwendungen zu implementieren. Diese Anwendungen können Endkundenanwendungen sein oder auch die Netzsicherheit, Monitoring, Troubleshooting und Netzkonfiguration ansprechen. Die Kommunikation zwischen der Applikation und den SDN-Controllern erfolgt über APIs. Diese Kommunikation ermöglicht es den Applikationen zum Beispiel, virtualisierte Netze zu konfigurieren und auf Endkundenbedürfnisse zuzuschneiden und in kurzer Zeit anzupassen oder neue Produkte zu entwickeln.^{2, 3}

Abbildung 2-1: SDN Netzarchitektur



Quelle: ONF (2014)

Bei der Einführung von SDN muss unterschieden werden, ob ein bestehendes Netz migriert werden soll oder ob ein vollständig neues Netz errichtet wird. Während der Aufbau eines neuen Netzes direkt in der neuen Technologie erfolgen wird, erfolgt die

- ² HowtoForge, <https://www.howtoforge.com/tutorial/software-defined-networking-sdn-architecture-and-role-of-openflow/>, abgerufen am 30.03.2020
- ³ Maennel, Application Layer of Software Defined Networking: pros and cons in terms of security, 2016,

Migration bestehender Netze hin zu SDN unter Zuhilfenahme von Übergangstechnologien. Strategisch wird bei der Migration zwischen Overlay- und Underlay-Netzen unterschieden.

- Bei einem SDN-Overlay-Netz handelt es sich um ein bestehendes physisches Netz, dem ein logisches SDN-Netz überlagert wird. Realisiert wird dies, indem bestimmte, strategisch wichtige Netzknoten als SDN-Bausteine ausgeführt und die Verbindungspfade auf der Basis der bestehenden Architektur als Tunnel verwendet werden. Hierbei wird die Fähigkeit der bestehenden Netzkomponenten, also schnelles und effizientes Weiterleiten von Datenpaketen, weitergenutzt und gleichzeitig durch die punktuell eingesetzten SDN-Komponenten eine deutlich verbesserte Agilität und Flexibilität erzielt, da Abschnitte des Netzes bereits über Software gesteuert und administriert werden können.
- Bei einem SDN-Underlay-Netz werden die einzelnen Netzkomponenten bereits mit SDN-Funktionalitäten in der integrierten Hardware bereitgestellt, die dann unter Verwendung dynamischer Routingprotokolle untereinander kommunizieren. In dieser Konstellation werden noch keine abgesetzten oder zentralisierten SDN-Controller eingesetzt.

Für den Einsatz von SDN kommen grundsätzlich alle Netzkomponenten, insbesondere Switches und Router in Frage. Zukünftig werden alle mit der Datenverarbeitung und Datenweiterleitung befassten Netzwerkelemente SDN-Fähigkeiten aufweisen, so auch Basisstationen für den Mobilfunk, aber auch Speichermedien für Cloud-Dienste.

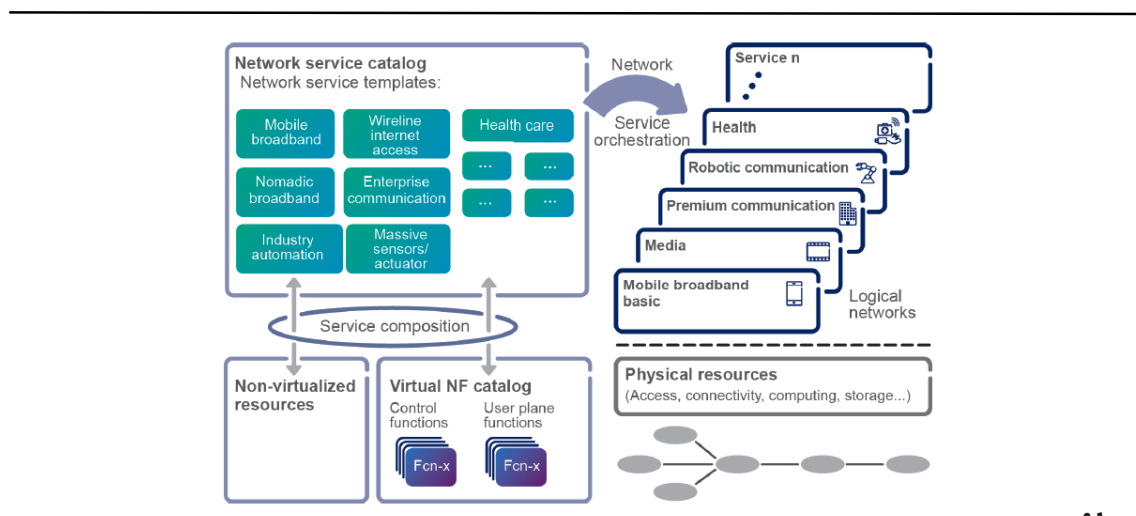
Aktuell gibt es bezüglich der Schnittstellen zwei praktisch gegenläufige Ansätze, die von den verschiedenen Herstellern von Netzhardware verfolgt werden. Auf der einen Seite gibt es Hersteller, die offene Schnittstellen implementieren. Diese folgen in der Regel den Empfehlungen der Open Network Foundation (ONF). Auf der anderen Seite entwickeln andere Hersteller proprietäre Schnittstellen, die keine Interoperabilität mit anderen Systemen zulassen. Es bleibt abzuwarten, welche Tendenz sich hier in der Zukunft durchsetzen wird. Beide Seiten bieten Vorteile und Nachteile, wobei die Vorteile des einen Ansatzes die Nachteile des anderen Ansatzes darstellen. Als Wesentlich sind hierbei zu nennen: Offene Systeme bieten den Vorteil der Interoperabilität zwischen Hard- und Software unterschiedlicher Hersteller. Nachteilig ist zu bewerten, dass bei offenen Standards ebendiese Möglichkeiten zum Missbrauch eröffnen und potenziell ein Sicherheitsrisiko darstellen könnten.

Die Konfiguration eines SDN Netzwerkes erfolgt entweder über die Programmierumgebung einer der gängigen Programmiersprachen (z.B. Python), oder durch ein Visualisierungs- und Orchestrierungstool. Angesprochen wird hierbei jeweils die offen gelegte API (Application Programming Interface) der einzelnen Netzelemente durch den SDN-Controller, welcher seinerseits dann durch die Programmierung bzw. das Orchestrierungstool mit der dort hinterlegten Business-Logik gesteuert wird. Hierdurch wird dann nicht nur die Steuerung des Netzes erreicht, sondern auch die Automatisierung. Unter

Automatisierung ist in diesem Zusammenhang zu verstehen, dass mit Hilfe einer Software und einer geeigneten Benutzerschnittstelle (API) eine Erfassung des in Rede stehenden TK-Dienstes erfolgt, die es erlaubt, die Konfigurationsanforderungen des Netzes zu übersetzen und direkt zu implementieren. Eine API lässt sich daher mit einem Konfigurator vergleichen, der Anforderungen von Seiten des Nachfragers aufnimmt und in produktionstechnische Anforderungen übersetzt. – Dies setzt – selbstredend – entsprechende Voreinstellungen und Festlegungen des Möglichkeitsraums voraus. Idealerweise wird diese Entwicklung in der Zukunft dazu führen, dass SDN zwar durch Netzadministratoren eingerichtet werden muss, aber die agile Definition und Einrichtung von Dienstleistungen auch außerhalb der Technik erfolgen kann, bis hin zur Bedienung durch den Kunden.

Auf der Basis der Parametrisierung des SDN-Netzes werden die Datenflüsse überwacht und automatisch die geeigneten Pfade durch das Netz ausgewählt, da Pfade nicht mehr statisch definiert und konfiguriert sind, sondern die Entscheidungen durch das Netz auf der Basis der implementierten Geschäftslogik selbstständig getroffen werden. Zu den hierbei verwendeten Parametern gehören neben der Geschäftslogik auch Regeln zur Netzsicherheit oder Spezifikationen zum Quality of Service (QoS). In diesem Zusammenhang kann also von einem selbstlernenden System gesprochen werden. Die Komplexität des darunter liegenden physischen Netzes wird durch die Kontrollschicht abstrahiert bzw. verborgen. Abbildung 2-2 zeigt, wie auf Basis der physischen Infrastruktur der „non-virtualised resources“ virtuelle Netze implementiert werden können, die in ihrer Dienstverfügbarkeit individuell auf den individuellen Geschäftskunden zugeschnitten sind. Unter entsprechender Netzorchestrierung werden zudem die QoS auf die jeweiligen Endgeräte des Geschäftskunden eingestellt.

Abbildung 2-2: Virtualisierte Netze für abstrahierte Geschäftslogik



2.2 NFV - Network Functions Virtualisation

2.2.1 Definition

Die Grundidee hinter dem Konzept der Virtualisierung von Funktionen ist ebenso wie bei SDN die Trennung von Hard- und Software. Der Fokus liegt dabei auf der Virtualisierung von Netzfunktionen (NF), die über eine allgemeine Infrastruktur für die Gesamtheit der Netzfunktionen realisiert wird (NFVI, Network Function Virtualisation Infrastructure). Bei dem Versuch einer Abgrenzung gegenüber dem SDN-Ansatz kann der Fokus von NFV daher eher auf Einrichtungen der Kontrollschicht gelegt werden, eine klare Trennung der Konzepte ist jedoch auch in der Literatur kaum zu finden. Auch das Konzept der Virtualisierung von Funktionen gibt es bereits seit mehreren Jahren. Aber erst die heutigen Rechnerleistungen ermöglichen die Nutzung für Netze bzw. deren Netzelemente im großen Umfang.

Erreicht wird dies dadurch, dass die Funktionen der bislang in der proprietären Hardware implementierten und untrennbar verbundenen Software nun auf Standardhardware (Computer/Server) realisiert werden. Die verbleibende, spezielle Netz-Hardware wird dadurch auf die rudimentär notwendigen Funktionen der Vermittlung und priorisierten Übertragung, ohne integrierte Managementfunktionen, reduziert.

Durch den Einsatz von Steuerungssoftware erhält die Standardhardware ihre virtualisierte Funktionalität: Es können mehrere miteinander verknüpfte Steuerungssoftwaremodule zum Einsatz kommen, die die Standardhardware funktional betreiben. Grundsätzlich ergibt sich hierdurch auch die Möglichkeit, dass Hard- und Software von unterschiedlichen Herstellern zusammen arbeiten. Daran wird die Erwartung geknüpft, dass durch dieses Optimierungspotenzial die Investitionsaufwände (CAPEX) reduziert werden können. ⁴

Die oben beschriebenen Aspekte und die Möglichkeit der Auslagerung von Netzfunktionen an entfernte Standorte oder in eine Cloud-Umgebung bilden die Basis für bedarfsabhängig schnelles Hinzufügen oder Entfernen von Netzfunktionalitäten.

2.2.2 Technische Beschreibung

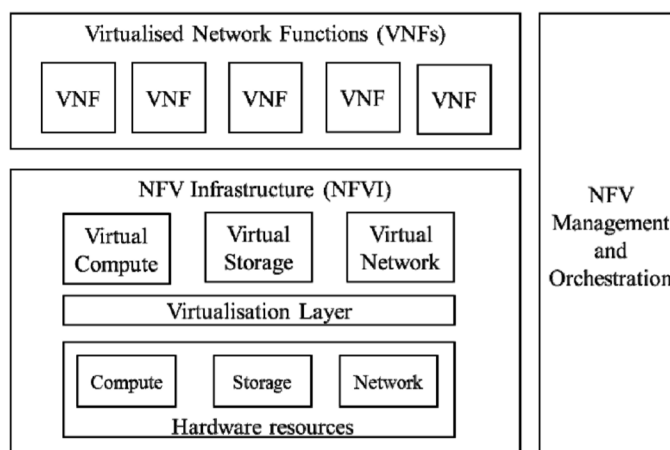
Die Idee der Implementierung der NFV-Technologie ist die Entkoppelung der strikten Kohärenz von Netzelementstandort und seiner jeweiligen Funktionalität. Dabei werden abstrakt 3 Ebenen voneinander unterschieden, die in der nachfolgenden Abbildung 2-3 illustriert sind:⁵

⁴ Metzler & Metzler, SDN und NFV unterstützen die Transformation von Telekommunikationsunternehmen, 2015, S. 5

⁵ ETSI, Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework, 2014, S. 14-15 sowie BEREC, BoR (16)97, 2016, S. 16-17

- **Virtualised Network Functions (VNF):**
Hierbei handelt es sich um die eigentliche, zu virtualisierende Funktionalität. Beispiele dafür sind Firewalls, Gateways, BRAS (Broadband Remote Access Server) oder ADC (Application Delivery Controller).
- **NFV Infrastructure (NFVI):**
Hierunter wird die Gesamtheit der Hard- und Software-Komponenten verstanden, die für die Realisierung von virtualisierten Netzfunktionen erforderlich ist. Die Einrichtungen (und damit auch die zugehörige Software) können dezentral aufgebaut werden. Diese Einrichtungen und ihre Verbindungen untereinander konstituieren die NFV Infrastruktur.
- **NFV Management and Orchestration:**
Diese dritte Ebene bildet den Rahmen für die implementierte Virtualisierung der Netzfunktionen. Sie beschreibt das erforderliche Management, welches aus der Separierung von Netzfunktionen und Hardware entsteht, inkl. der operativen Aufgaben wie Kapazitätserweiterungen oder Anpassungen- bzw. Änderungen von Netzfunktionen. Die Steuerung der Virtualisierung der Netzfunktionen wird zentral durch einen sog. „Hypervisor“ oder „Virtual Machine Monitor“⁶ gesteuert.

Abbildung 2-3: Ebenen der Network Function Virtualisation



Quelle: ETSI (2014), S. 10

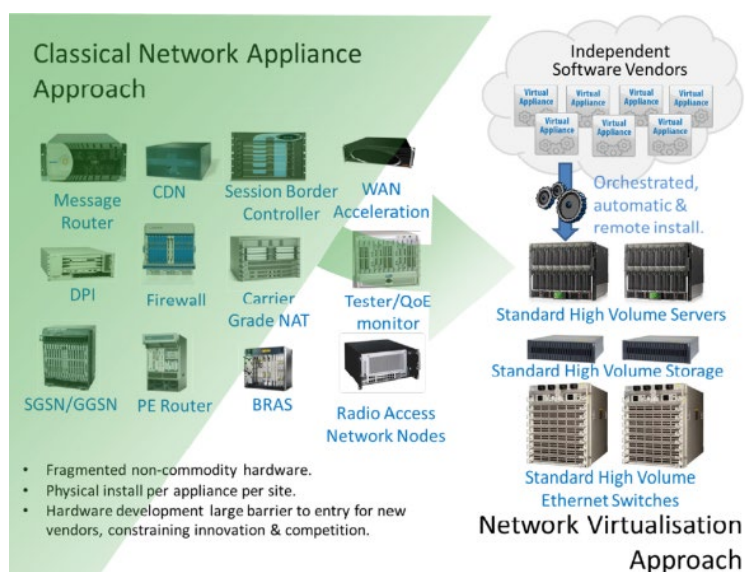
Es bleiben jedoch Funktionalitäten des Netzes erhalten, welche nicht durch Virtual Machines erbracht werden können und die demnach weiter dedizierte Netzelemente benötigen. Diese Funktionalitäten betreffen beispielsweise Antennen, Sensoren oder Kabel.

Die Virtualisierung der Netze erlaubt eine effizientere Ressourcenverwendung, da Kapazitäten auf die dynamisch und endkundenabhängigen Bedürfnisse und Konfigurationen

⁶ Applied Science and Technology Research Institute, Network Functions Virtualisation (NFV) for Next Generation Networks (NGN), 2017, S. 2-3

nen abgestimmt werden können. In einem NFV-basierten Netz verlagert sich letztlich die Intelligenz der einzelnen Netzelemente an zentralisierte Standorte. Die Abbildung 2-4 stellt „alte“ und „neue Welt“ der Realisierung von Netzfunktionen gegenüber: Die bis dato intelligenten Einrichtungen, die auf einer jeden Ebene Verkehre aggregiert, ausgelesen und mittels selbst ausgestatteter Intelligenz an die nächst höhere Netzebene weitergeleitet haben, werden passiviert. In einer solchen Architektur sind die Netzelemente der unteren Layer nur ausführende Organe, sog. „White Boxes“. Beispielsweise eignen sich hierfür Standard-Server, wie sie auch in Daten- und Rechenzentren zu finden sind.

Abbildung 2-4: NFV Ansatz von ETSI



Quelle: ETSI (2012)

2.3 Implementierungsgründe für SDN/NFV

2.3.1 Synergien aus SDN und NFV

SDN und NFV sind grundsätzlich komplementäre technologische Ansätze, welche einander nicht bedingen, aber erst im Zusammenspiel erlauben, das gesamte Potenzial an Effizienz und Flexibilität zu realisieren. Durch die Implementierung derartiger virtualisierter Netze wird es ermöglicht, die Administration von Netzen zu vereinfachen und die Flexibilität hinsichtlich der Bereitstellung von innovativen und skalierbaren Diensten zu erhöhen.

Bei der Virtualisierung von Netzen erhält das physische Netz, bestehend aus Transportinfrastruktur und Netzknotenhardware, eine virtuelle Steuerungsschicht. Hierbei bietet

SDN die Grundlagen zur Programmierung von Netzfunktionen bzw. -diensten und NFV bietet die virtuelle Abstraktion programmierbarer Netzkomponenten. In einer finalen Ausbaustufe wird hierbei die Implementierung der Steuerungsfunktionen einer Cloud-orientierten Massenslandschaft gleichen, die vielmehr einer Landschaft aus dem Rechenzentrumsbetrieb gleicht und weniger an herkömmliche TK-Netze erinnert.⁷

Diese technischen Möglichkeiten gepaart mit der verbesserten Administrierbarkeit bieten die Option, die Markteinführung neuer Dienstleistungen zu verkürzen und kundenindividuell einzurichten⁸. Dazu zählt auch, dass die Erweiterung von Netzen durch den Einsatz von SDN/NFV deutlich vereinfacht wird, da die Bereitstellung von Kapazitäten flexibler gestaltet werden kann. Das beste Beispiel der flexiblen Netzgestaltung ist das Network Slicing, welches durch SDN/NFV deutlich vereinfacht wird.

In „Vollendung“ der Virtualisierung ist es aus technischer Sicht sogar angestrebt, den stark abstrahierten Orchestrierungs-Layer nicht nur den Mitarbeitern des Netzbetriebs zugänglich zu machen, sondern sogar dem Kunden über ein Portal den Zugriff auf diese Plattform bereitzustellen. Auf diese Weise würde es dem Endkunden (oder einem Intermediär) erlaubt, die von ihm gewünschten TK-Dienste direkt einrichten zu (sog. Self-Service oder Self-Management). Das bisher vom Netzbetreiber vollzogene Konfektionieren von Diensten kann dann über eine Software mit entsprechender Benutzerschnittstelle vom Kunden direkt vollzogen werden.⁹ Dies trifft grundsätzlich für alle denkbaren Dienstangebote zu, wie beispielsweise virtuelle Unternehmensnetze, Sicherheitslösungen, Storage- oder Cloud-Lösungen, skalierbare Bandbreitenanforderungen oder Verfügbarkeitsanforderungen.

2.3.2 Network Slicing

Ein Feature, welches häufig mit 5G in Verbindung gebracht wird, ist das Network-Slicing. Die Technologie ist nicht neu und wird beispielsweise für die Realisierung von VPN (Virtual Private Network) bereits seit geraumer Zeit in Festnetzen eingesetzt. Network Slicing beschreibt die Virtualisierung von Netzen auf Basis physischer Infrastruktur. Diese Network Slices können wie eigenständige Netze betrieben werden, d. h., es können einzelne Dienste oder gar anwenderspezifisch zugeschnittene Eigenschaften individuell für Nutzergruppen konfiguriert werden. Die Individualisierung der Leistungsmerkmale bezieht sich dabei auf Datenübertragungsraten, Quality of Service (QoS), Kapazität o.ä. Voraussetzung für eine solche Virtualisierung von Netzen ist, dass die zugrundeliegende physische Netzinfrastruktur hinreichend flexibel konstruiert ist, um diese Konfigurationsanforderungen erfüllen zu können.

⁷ Mit anderen Worten: Bzgl. der eingesetzten Geräte lassen sich IT und TK auf der logischen Ebene kaum noch unterscheiden: auch in TK-Netzen kommen somit zunehmend Standard IT-Elemente und -Systeme zum Einsatz..

⁸ Markova & Schnitter, SDN und NFV unterstützen die Transformation von Telekommunikationsunternehmen, 2018, S. 12

⁹ In der ersten Stufe der Implementierung von SDN/NFV wird der Netzbetreiber für seine eigenen Mitarbeiter im Bereich Netzbetrieb und Diensteeinrichtung die Arbeit erleichtern.

Ermöglicht wird das Network Slicing für den Mobilfunk auf 5G-Standard durch SDN und NFV, also die zentralisierte Steuerung der Netzintelligenz und den Ersatz dedizierter Hardware durch White Boxes. In der 5G-Implementierung besitzt die Netzvirtualisierung insofern Relevanz, als dass die erwarteten Dienste der Zukunft besondere Anforderungen an die Latenz stellen und von denen erwartet wird, dass 5G am besten in der Lage sein wird diese zu erfüllen (Latenzzeiten von weniger als 1ms). Je nach Diensteanforderung können sich die virtualisierten Netze in Latenz, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit unterscheiden, um verschiedene Anwendungsfälle zu bedienen.¹⁰ Beispiele hierfür sind die drei bereits standardisierten 5G-Network Slices von Enhanced Mobile Broadband (eMBB), Ultra-Reliable Latency Communications (URLLC) und Massive Machine Type Communications (mMTC). Dabei fokussiert jede Netz-Scheibe auf die Anforderungen eines Dienstes.¹¹

1. [eMBB] Slice, geeignet für die Verarbeitung von mit 5G verbessertem mobilem Breitband

Diese Netzscheibe stellt auf die breitbandige 5G Mobilfunkversorgung (auch in der Fläche) ab. Die steigende Nachfrage nach mobiler Bandbreite wird die Qualitätsverbesserung des mobilen Netzes weiter fördern. Das verbesserte Szenario der mobilen Breitbandnutzung wird mit neuen Anwendungsbereichen und Anforderungen zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit und der Benutzerfreundlichkeit einhergehen.

Das dieser Netzscheibe zu Grunde liegende Nutzungsszenario umfasst eine Reihe von Fällen, vor allem Flächendeckung und Hotspots, die unterschiedliche Anforderungen haben. Für den Hotspot-Fall, d.h. für ein Gebiet mit hoher Nutzerdichte, ist eine sehr hohe Verkehrskapazität erforderlich, während der Mobilitätsbedarf gering ist und die Nutzerdatenrate höher ist als bei einer großflächigen Abdeckung. Für den Fall der Weitbereichsabdeckung sind eine nahtlose Abdeckung und eine mittlere bis hohe Mobilität erwünscht, wobei die Benutzerdatenrate im Vergleich zu den bestehenden Datenraten deutlich verbessert wird.

2. [URLLC] Slice, geeignet für die Verarbeitung von hochzuverlässiger Kommunikation mit niedriger Latenzzeit

Dieser Anwendungsfall stellt hohe Anforderungen an Fähigkeiten wie Durchsatz, Latenz und Verfügbarkeit. Einige Beispiele sind die drahtlose Steuerung von industriellen Fertigungs- oder Produktionsprozessen, medizinische Fernchirurgie, Distributionsautomatisierung in einem Smart Grid, Transportsicherheit usw. Hierbei handelt es sich um geschäftskundenspezifische Dienste.

¹⁰ 5G PPP, Vision on Software Networks and 5G, 2017, S. 19-21

¹¹ Zu den drei nachfolgenden Beispielen siehe Elbanna, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 449; 5G Status Studie, 2019, S. 22-23

3. [mMTC] Slice, geeignet für die Handhabung von IoT und mMTC.

Dieser Anwendungsfall zeichnet sich durch eine sehr große Anzahl von angeschlossenen Geräten aus, die typischerweise vertrauliche Daten mit einem relativ geringen Datenvolumen übertragen. Die Geräte müssen kostengünstig sein und eine sehr lange Akkulaufzeit haben.¹²

Wie beschrieben, ist der Einsatz von Network Slicing nicht nur für 5G im Mobilfunk relevant. Im Festnetz gibt es eine Vielzahl von Beispielen für virtualisierte Netze: Mietleitungen, VoIP-Netze im NGN oder VPN. Diese virtuellen Kanäle mit ihren individuellen Anforderungen und Anwendungsfällen jedoch zu managen und unter Umständen auch flexibel anpassen zu können, erfordert heute einen großen Aufwand. Im Betrieb herkömmlicher Netze müssen für Netzelemente je nach ihrer Zugehörigkeit der Netzebene aus Core, Aggregation, Access, Rechtekontrolle und Steuerung verschiedentlich konfiguriert und überwacht werden. Es ist die allgemeine Erwartung, dass SDN und NFV aufgrund der Virtualisierung eine flexible und individuelle Konfiguration deutlich erleichtern können.

3 Wesentliche Anwendungsfälle der SDN/NFV Architektur

Die beschriebenen technologischen Eigenschaften eines Netzes auf Basis einer SDN/NFV Architektur bieten für einmal getätigte Investitionen nachhaltige Vorteile.

Zunächst verkürzen sich Einführungszeiten neuer Dienste („time to market“) durch zentrale Steuerungseinheiten und die Virtualisierung von Diensten. Statt einer etwaigen Anpassung bzw. einem Austausch herstellerepezifischer Netzelemente (Hardware) würde sich die Einführung auf eines softwareseitigen Updates der zentralen Steuerungseinheit des Hypervisors beschränken. Gleichzeitig öffnet sich durch diese Architektur die Spannweite für mögliche Innovationen, da bei gegenwärtiger Architektur Innovationen aufgrund von zu hohen Investitionskosten verworfen werden müssten.

Bei einer einmal getätigten Investition in die Steuerungshardware und Software der SDN/NFV führt dies fortan zu Verringerungen der CAPEX, da weitere Innovationen weitestgehend softwareseitig abgehandelt werden können. Ein kostenintensiver Austausch zahlreicher dedizierter Netzelemente wäre nicht mehr vonnöten.

Gleichzeitig sind die White Boxes standardisierte Einrichtungen, die als solche geringere Investitionskosten aufweisen dürften, als herstellerepezifische und funktionalitätsspezifische Hardware. Leistungssteigerungen der reinen Übertragungsfunktionen (z.B. Datendurchsatz) bedingen ggf. jedoch den Austausch der White Boxes durch Geräte einer neueren Generation.

¹² Die Geräte müssen kostengünstig sein und eine sehr lange Akkulaufzeit haben. (Elbanna, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 449; 5G Status Studie, 2019, S. 30-31).

Gleichermaßen verringerten sich OPEX unter anderem dadurch, dass die Instandhaltung durch die standardisierte Hardware weniger aufwendig würde. Physische Schaltprozesse entfielen sogar nahezu vollständig. Auch entstehen Potentiale für eine Verringerung des Stromverbrauchs.

Die SDN/NFV-Architektur ist in der Lage, aufgrund ihrer Zentralisierung der Netzkontrolle und automatisierten Kapazitätssteuerung auftretende Echtzeit-Kommunikationsbedarfe eines jeden Endkunden in allen beteiligten Netzebenen bedarfsgerecht zu befriedigen: Eventuelle auftretende Engpässe können durch eine flexible Re-allokation aktuell unterausgelasteter Netzelemente überwunden werden. Ebenso können Netzelemente aus Gründen der Energieeinsparung temporär deaktiviert werden, um sie in Engpasszeiten, etwa zur Busy Hour, wieder freizugeben. Dieses Leistungsmerkmal erlaubt das zeitweise Abschalten von Netzelementen.

Als genereller Vorteil von SDN/NFV wird die allgemeine Verringerung der Komplexität bei steigender Leistungsfähigkeit des Netzes gesehen: Durch die zentralisierte Steuerung und Vereinheitlichung der übrigen Netzelemente verringert sich die Komplexität des Netzes, ein weiteres Vorteil einer modernisierten Netzarchitektur. Gleichzeitig verringert sich mit verminderter Komplexität der Überwachungsaufwand, was wiederum Zuverlässigkeit und Sicherheit des Netzes erhöht. Durch die flexible Allokation von Ressourcen erhöht sich zudem die Verfügbarkeit für den einzelnen Anwender, vor allem außerhalb der Busy Hour. Insgesamt erhöht sich also die Leistung des Netzes.¹³

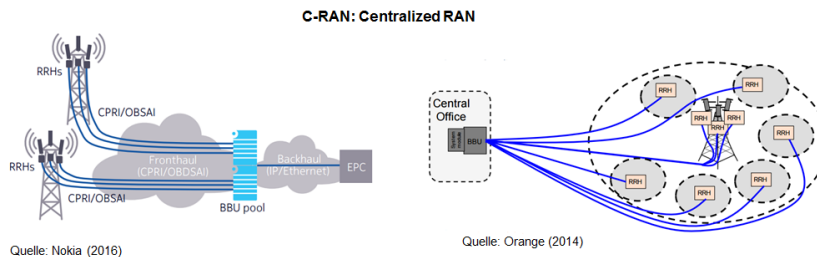
3.1 5G Mobilfunk

Centralised Radio Access Network (C-RAN) ist eine vielversprechende Mobilfunkarchitektur, die die Anforderungen zukünftiger 5G-Mobilfunknetze unterstützt. In C-RAN ermöglicht die Zentralisierung von Base-band Units (BBU) erhebliche Einsparungen von Rechenressourcen und erhebliche Energieeinsparungen. Andererseits erfordert der Einsatz von C-RAN eine hohe Kapazität und stellt hohe Latenzanforderungen an das Fronthaul-Transportnetz¹⁴. Fronthaul ist ein Begriff, der in der theoretischen Überlegung über die räumliche Trennung von Sendestation (Radio Head) und Prozesseinheit entstanden ist. In einer Architektur des Centralised RAN werden die Prozesseinheiten (Baseband Units – BBU) gepoolt, d.h. an übergeordneten Stellen des Netzes (regional) zusammengefasst, was den Ausbau einer Glasfaser-Verbindung zwischen dem Remote Radio Head und der BBU erfordert, der Fronthaul genannt wird.

¹³ Dr. Lemstra, SMART 2018/0082 - Task 1 - Identify the relevant trends at EU level, 2018, S. 49.

¹⁴ Shehata, Elbanna, Musumeci, & Tomatore, Multiplexing Gain and Processing Savings of 5G Radio-Access-Network Functional Splits, 2018, S. 1.

Abbildung 3-1: Beispiel SDN und NFV für das Mobilfunknetz



Das C in C-RAN steht sowohl für "zentralisiertes" Mobilfunkzugangnetz (RAN) als auch für "Cloud-basiertes" RAN. Es handelt sich um verwandte Konzepte, die beide eine neue Architektur für das Netzequipment an den Mobilfunkstandorten beinhalten.

In einem traditionell verteilten Mobilfunknetz ist das RAN der Teil des Netzes, den wir als Mobilfunkstandort betrachten, mit Equipment an der Ober- und Unterseite eines Mastes ist die Base-band Unit (BBU), eine Funkeinrichtung, die Milliarden von Bits pro Stunde verarbeitet und die den Endkunden mit dem Kernnetz verbindet.¹⁵

Bis vor kurzem war die BBU fast immer vor Ort in der Nähe des Turms untergebracht. Die Netzbetreiber mussten den Raum mieten, jede BBU mit Strom versorgen und die Geräte kühlen. Ein erheblicher Teil der Gesamtkosten eines Mobilfunknetzes entfallen auf Betriebskosten wie Strom und Kühlung. Mit kleineren Zellen und einer stärkeren Sektorisierung/ Kapazitätserhöhung der Basisstationen steigt auch der Bedarf an BBU. Dieser Mehrbedarf soll durch eine Zusammenfassung der BBU an regional zentralen Stellen begrenzt und deren Auslastung erhöht werden.

C-RAN bietet dabei eine elegantere und effizientere Alternative. Durch die Nutzung der enormen Übertragungsfähigkeit von Glasfaserkabeln für den Fronthaul können Betreiber mehrere BBUs an einem Ort zentralisieren: entweder an einem Funkzellenstandort oder an einem zentralen BBU-Poolstandort- oder gar in einer „Cloud“. Die Zentralisierung mehrerer BBUs reduziert die Anzahl der an jedem einzelnen Zellstandort benötigten Geräte und bietet eine Vielzahl weiterer wichtiger Vorteile, wie beispielsweise eine geringere Latenzzeit. Im Centralised RAN können Ressourcen effizient genutzt werden, indem einzelne BBUs deaktiviert werden, wenn die Verkehrsmengen der an diesen Pool per Fronthaul angeschlossenen Remote Radio Heads von bereits einer Teilmenge der BBUs im Pool verarbeitet werden können. Zu Zeiten von Spitzenlasten können diese inaktiven BBUs dann wieder aktiviert werden. Generell kann man davon ausgehen, dass bei diesem Konzept weniger BBU benötigt werden als bei einer dezentralen Ansiedlung an den Antennenstandorten. Dieser Vorteil des C-RAN lässt sich durch die

¹⁵ Ebenda.

zentrale Netzsteuerung und eine Virtualisierung der BBUs, wie sie SDN/NFV ermöglichen würde, noch besser ausschöpfen.

Neben der Einsparung von Hardwarekosten kann das C-RAN-Modell erhebliche Einsparungen bei den Strom-, Kühl- und Standortleasingkosten erzielen. In Asien, der ersten Region, die C-RAN erfolgreich kommerziell einsetzt, sind die Betriebskosten um 30 bis 50 Prozent gesunken¹⁶. C-RAN ermöglicht es den Betreibern auch, auf einige interessante Funktionen von LTE-Advanced (LTE-A) zuzugreifen, die die Kapazität ohne zusätzliche Investitionen erhöhen können.

Die Weiterentwicklung von C-RAN stellt das Cloud-basierte RAN dar, bei dem einige Netzfunktionen in der "Cloud" virtualisiert werden. Sobald die BBUs zentralisiert sind, können kommerzielle Standard-Server einen Großteil der Routineverarbeitung übernehmen. Dies bedeutet, dass die BBUs neu gestaltet und verkleinert werden können, um sich auf die komplexe oder proprietäre Verarbeitung zu konzentrieren. Die Zentralisierung der Verarbeitung von Basisstationen mit Cloud-basiertem RAN vereinfacht das Netzmanagement und ermöglicht die Bündelung und Koordination von Mobilfunkressourcen.¹⁷

Im Kontext der Radio-Zugangsnetze ist die Open-RAN (O-RAN) Initiative großer Mobilfunkanbieter zu erwähnen, mit der der Einsatz von SDN/NFV in Mobilfunknetzen vorangetrieben wird. 2018 gegründet, soll eine offene Radio-Zugangsnetz Architektur spezifiziert werden, die das Ganze oben angeführte Spektrum der RAN-Architektur umfasst, von Use-Cases und einer daraus abgeleiteten generellen Netzarchitektur über Controller für die dynamische Ressourcen-Allokation des Funknetzes, offene Interfaces für die Fronthaul-Kommunikation zwischen BBU und RRH, die Spezifikation von White-Boxes und bis zur Entkopplung der RAN-Software von der Hardware, Cloudification und Orchestration genannt.¹⁸

3.2 IMS-Plattform

Bei der IMS-Plattform (IP Multimedia Subsystem) handelt es sich um eine international standardisierte Architektur zur Realisierung verschiedener Kommunikationsdienste in einem IP-basierten Next Generation Network (NGN) und stellt einen bereits heute vielfach implementierten Anwendungsfall von SDN/NFV dar.

Eine IMS-Plattform ist modular aufgebaut und besteht im Kern aus verschiedenen Servern, in der Regel an mehreren Standorten im Bereich des Kernnetzes, die in ihrer Gesamtheit die Steuerungsfunktion des Sprachdienstes übernehmen. Jedes Modul übernimmt dabei bestimmte Funktionen, wie z.B. Registrierungen der Endgeräte, Routing-

¹⁶ Signalbooster, www.signalbooster.com/blogs/news/c-ran-centralized-vs-cloud-based-radio-access-network, abgerufen am 05.03.2020.

¹⁷ Elbanna, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 449; 5G Status Studie, 2019.

¹⁸ O-RAN, www.o-ran.org/, abgerufen am 05.03.2020.

Steuerung, Übergang zu anderen Netzen. So wird die Funktion der Kontrollschicht für den Sprachdienst im Wesentlichen durch die IMS-Plattform übernommen. Die räumliche Verteilung dient, wie bereits zuvor in den NGN Netzen, der Redundanz und Ausfallsicherheit.

Die einzelnen Komponenten des IMS werden entweder vom Signalisierungsverkehr oder vom eigentlichen Sprachverkehr/Nutzdatenstrom durchlaufen. Der Signalisierungsverkehr durchläuft dabei insgesamt deutlich mehr Netzelemente als der eigentliche Sprachstrom/Nutzkanal.

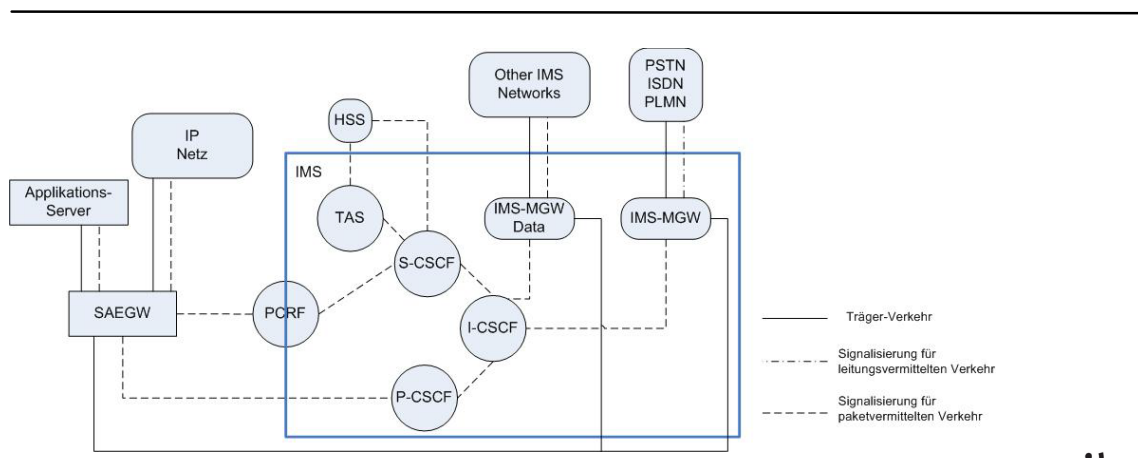
Der Anruf kann entweder von den eigenen Endkunden im NGN oder den eigenen Endkunden im PSTN oder von Endkunden im Netz eines Zusammenschaltungspartners initiiert und zu einem dieser drei Endkunden-Kategorien auch terminiert werden.

Auch im Mobilfunknetz findet die IMS-Plattform Anwendung, wo sie für die LTE-Dienste mit bestimmten Qualitätsanforderungen bereitgestellt wird. Die IMS-Plattform ist konzipiert worden, um eine umfangreiche Nachfrage nach erweiterten und intelligenten Diensten zu bewältigen, die erweiterte QoS-Parameter wie Bitrate, Paketverlust, Paketverzögerung etc. verlangen. Während diese Dienste ursprünglich hauptsächlich aus VoLTE¹⁹ bestanden, enthalten sie zunehmend auch Datendienste, die zusammen die sogenannten Rich Communication Services bilden. Die Plattform besteht im Wesentlichen aus drei (Gruppen von) Bestandteilen, den IMS-Media Gateways für die Verbindungen zu anderen Netzen (eins für VoLTE und eins für den Datenverkehr), dem Telephone Application Server (TAS) und dem Call State Control Function Server (CSCF). Die IMS-MGW nehmen die gleiche Aufgabe wahr wie das MGW im 2G/3G-Core, nur hier getrennt für VoLTE und Daten. Der CSCF wird gemäß der Aufgaben, die er im Netz übernimmt, in drei Funktionen unterteilt, und zwar in die Serving Call Session Control Function (S-CSCF), Interrogating Call Session Control Function (I-CSCF) oder Proxy Call Session Control Function (P-CSCF).²⁰ Der S-CSCF ist für das Einbuchen des Teilnehmers und die Steuerung des Gesprächs bzw. der Session zuständig, der I-CSCF übernimmt die Suche nach einem Teilnehmer in IMS-Netzen und der P-CSCF ist für die Authentifizierung, Festlegung von Profilen etc. vorgesehen. Abbildung 3-2 zeigt eine mögliche Realisierung von IMS-Plattform für Daten und Sprache in einem LTE Mobilfunknetz. Die IMS-Plattform verarbeitet den Signalisierungsverkehr aller IMS-Dienste.

¹⁹ Voice over LTE, paketvermittelte Sprachübertragung im Mobilfunk der 4. Generation (LTE: Long Term Evolution).

²⁰ WIK-Consult, Ergänzungen im Analytischen Kostenmodell für ein Mobilfunknetz (2018), 2019, S. 10.

Abbildung 3-2: Beispiel für IMS-Plattform im Mobilfunknetz (LTE)²¹



3.3 Leased Lines (Festverbindungen):

Festverbindungen verbinden zwei Endpunkte einer Telekommunikationsverbindung über ein Netz aus vielen Netzkomponenten über die unterschiedlichen Regionen und Netzabschnitte hinweg und ggf. ebenfalls über verschiedene Netzebenen hinweg mit einer definierten Qualität.

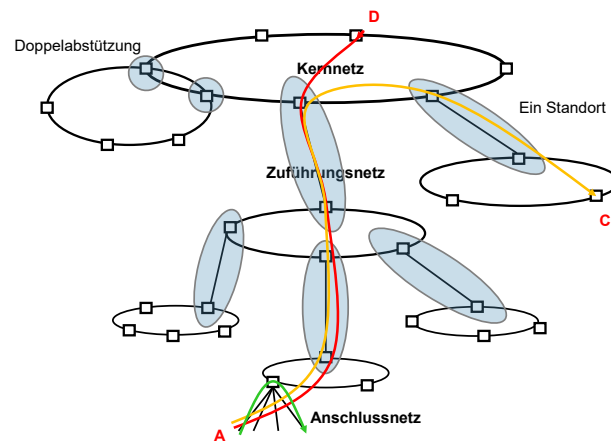
3.3.1 Technische Realisierung von Festverbindungen

Um die Bedeutung von SDN/NFV sowohl für die Realisierung als auch die Bereitstellung von Festverbindungen einordnen zu können, wird zunächst auf ihre bisherige technische Realisierung in TK-Netzen eingegangen.

Im einfachsten Fall sind Festverbindungen innerhalb desselben Anschlussbereiches im Sternpunkt der Anschlussleitungen (typischerweise dem HVt (Hauptverteiler) oder MPoP (Metropolitan Point of Presence)) zusammengeschaltet. Liegt der erste gemeinsame Netzknoten auf einer höheren Hierarchie-Ebene, so müssen entsprechend viele, unterschiedliche geartete Netzabschnitte durchquert und Netzelemente in Anspruch genommen werden. Dies bedarf einer entsprechenden Einrichtung der jeweiligen Festverbindungen.

²¹ WIK-Consult, Ergänzungen im Analytischen Kostenmodell für ein Mobilfunknetz (2015), 2016, S. 21.

Abbildung 3-3: Netzhierarchie aus mehreren Ebenen mit unterschiedlichen Verbindungen (A – B, A – C, A – D)



In der Abbildung 3-3 werden Netzabschnitte unterschieden, die alle ihre spezifischen Übertragungssysteme benötigen:

- das Anschlussnetz
- das (hier zweistufige) Zuführungsnetz (auch Aggregations- oder Konzentrationsnetz genannt)
- das Kernnetz

Im Anschlussnetz besteht eine Abhängigkeit vom Medium und Übertragungssystem der Anschlussleitung (Kupfer, Glasfaser, hybride Lösungen, Punkt-zu-Punkt oder Punkt-zu-Multipunkt geführt). Für die jeweilige Realisierung kommen spezifische Einrichtungen zum Einsatz; Anschlüsse müssen spezifisch konfiguriert werden. Auch spielt hier die Bandbreite der Festverbindung, die bereitgestellt werden soll, eine Rolle.

Für das Zuführungsnetz bedarf es Netzelemente, die den Übergang vom Anschluss- in das Zugangsnetz ermöglichen und darüber hinaus die Aggregation der Verbindungsnachfragen erlauben. Derzeit sind im Bereich der Festverbindungen noch SDH Realisierungen im Einsatz (siehe Abbildung 3-4 und Abbildung 3-5). Diese werden jedoch zunehmend abgelöst durch Ethernet-Konzentratoren und eine entsprechende Realisierung.

Abbildung 3-4: Beispiel für eine Vorkonzentration von Mietleitungen (TDM) in einem großen HVt Standort (Layer 1 Channelbank, kaskadierend für unterschiedliche Bandbreiten)

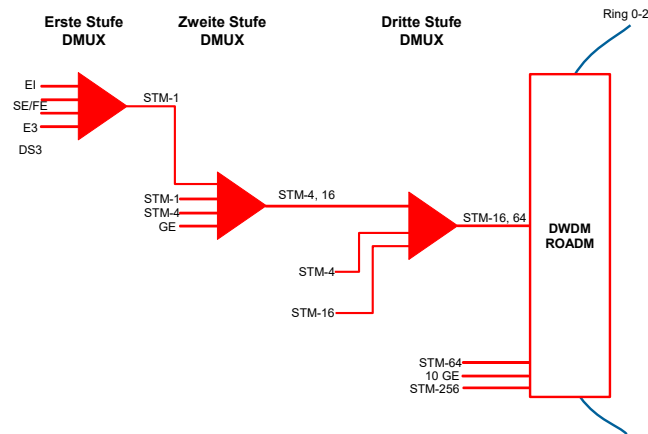
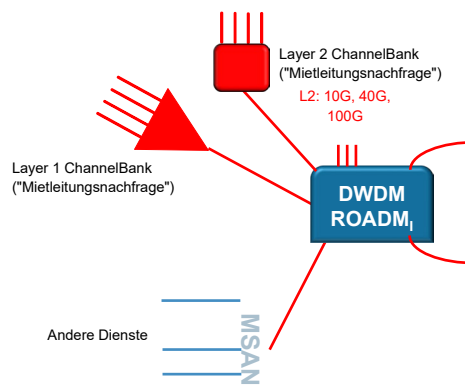
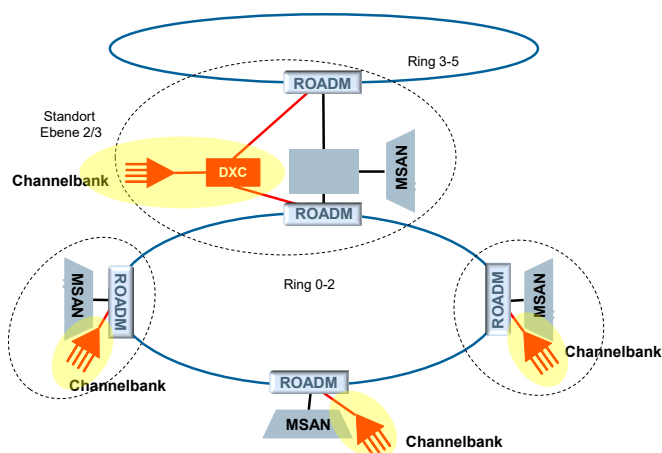


Abbildung 3-5: Übergang der Dienste auf den Ring zur nächsthöheren Netzebene



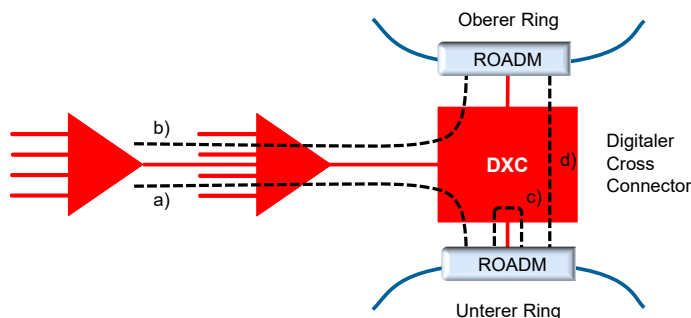
Zum anderen sind Übertragungssysteme erforderlich, die den Verkehr zwischen den Netzknoten derselben oder der verschiedenen Hierarchieebenen miteinander verbinden (siehe Abbildung 3-6 und Abbildung 3-7). Dies geschieht typischerweise über Glasfasern. Im Allgemeinen sind dabei die benachbarten Knoten der unteren Hierarchieebene ringförmig mit einem (oder zwei) Knoten der nächsthöheren Hierarchieebene verbunden. In den Knoten der höheren Hierarchieebenen sitzen spezielle Netzknoten, die den Verkehr der dort zusammenlaufenden Ringe der unteren und der oberen Hierarchieebenen miteinander so verschalten, dass die Festverbindungen in die richtige Richtung durchgeleitet werden.

Abbildung 3-6: Verbindung über verschiedene Netzebenen hinweg



wik

Abbildung 3-7: Verbindungsausleitung in intermediären Knoten höherer Hierarchie

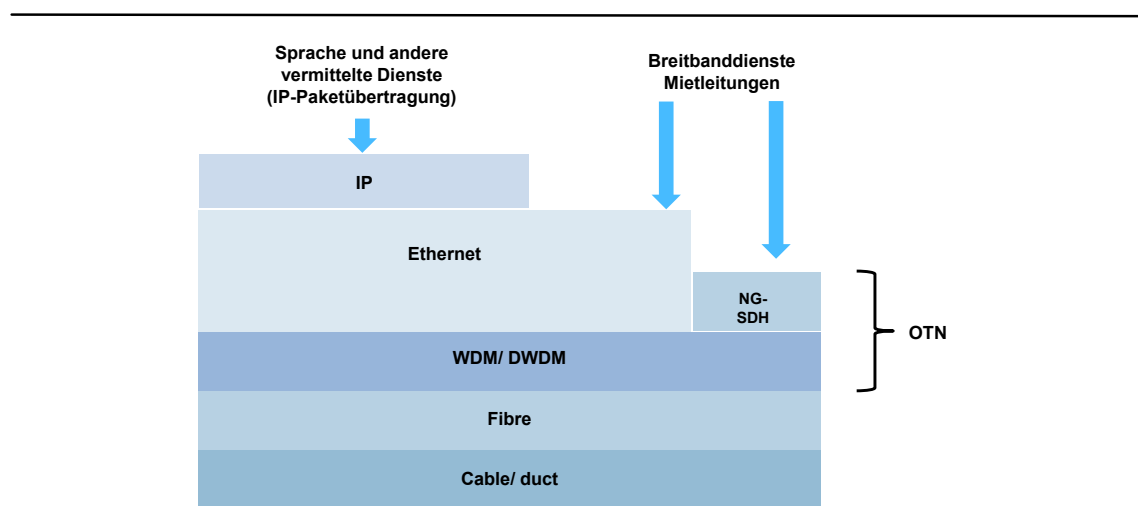


wik

Die Kapazitäten der einzelnen Glasfasern bzw. Glasfaserringe werden durch unterschiedliche Systeme verwaltet. Zunächst werden die Faserkapazitäten durch parallel in derselben Faser übertragene Lichtstrahlen unterschiedlicher Farbe (Wellenlängen) in bis zu ca. 160 optische Kanäle unterteilt, die im Ring geführt an jedem Zwischenknoten heraus und wieder hineingeführt werden können, um dort Verkehr hinaus- oder wieder hinein zu leiten (optische Add-Drop Multiplexer (OADM)). Jede dieser Wellenlängen kann mit elektrischen Multiplex-Systemen bewirtschaftet und in kleinere Kapazitäten unterteilt werden. Dies geschieht entweder durch Systeme, die feste Unterkapazitäten anbieten (TDM: Time Division Multiplex) oder solche, die variabel arbeiten und Datenpakete unterschiedlicher Länge und zufälliger Ankunftsrate zu übertragen erlauben (STDM: Statistical Time Division Multiplex). Die TDM-Systeme sind typischerweise NG-SDH Systeme, die STDM-Systeme sind typischerweise Ethernet Switches, die in der Vergangenheit auf TDM-Kanälen der NG-SDH Systeme die dort bereitgestellten festen Kapazitäten weiter unterteilen, heute jedoch typischerweise unmittelbar auf den Wel-

Wellenlängen der optischen Übertragungskanäle arbeiten und im Grenzfall eine Kapazität von 100 Gbit/s direkt bewirtschaften. Daneben gibt es insbesondere für die höheren Netzebenen Übertragungssysteme, die die TDM-Eigenschaften und die Eigenschaften der Wellenlängenübertragung miteinander kombinieren und die Wellenlängen optimal mit TDM-Kanälen zu beschalten erlauben. Über die Netzebenen und über die Knoten der Ringe hinweg können die optischen Kanäle wie auch die in ihnen eingebetteten TDM Kanäle an allen Standorten eingefügt und ausgeleitet werden. Die STDM Systeme nutzen diese Plattform, indem sie entweder die Wellenlängen unmittelbar mit hoher Kapazität beschalten und voll ausnutzen oder indem sie TDM Kanäle nutzen, die zur maximalen Kapazität einer Wellenlänge aggregiert werden können.

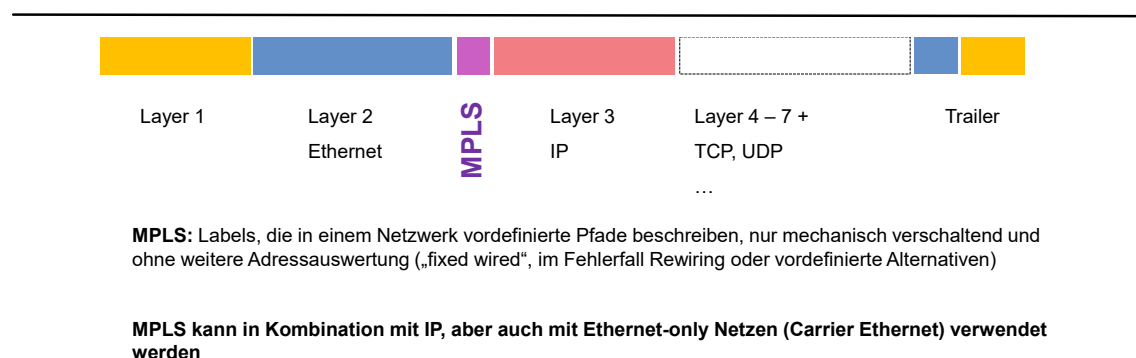
Abbildung 3-8: Typischer Protokollstack: Ineinandergreifen der verschiedenen miteinander verschalteten Übertragungssysteme und Infrastrukturkomponenten



Eine weitere wichtige Systemfamilie sind die IP-Router, die heute i.d.R. auf den höchsten Netzebenen eingesetzt werden und dort die Datenströme auf IP-Paketebene netzweit vermitteln und über die Netzgrenzen hinaus weiterleiten oder von dort empfangen.²² Sie kommen bei der Realisierung von Ethernet-basierten Festverbindungen im Kernnetz zum Einsatz. Damit die netzinterne Vermittlung nicht an jedem Netzknoten der oberen Netzebenen stattfinden muss, wurde mit MPLS (Multiprotocol Label Switching) ein Verfahren eingeführt, dass die einzelnen IP-Pakete derselben Enddestination im IP-Netz in Kanäle zusammenfasst, indem für die jeweiligen Verbindung den IP-Adressen Label für die einzelnen Verbindungen vorangestellt werden, die in den zu durchquerenden IP-Router nur weitergeleitet werden, ohne die Adressinformation des IP-Pakete je Router noch einmal zu interpretieren. Dies geschieht ausschließlich beim Eingang in diese Netz. Das Label wird am Netzausgang wieder entfernt.

²² Für derartige Aufgaben ist das Ethernet-Protokoll ungeeignet.

Abbildung 3-9: Protokollstruktur einer typischen Datenübertragung mit Ethernet, MPLS und IP Header



Die Qualität einer Festverbindung ist eine weitere Randbedingung, die die technische Implementierung bestimmt. So bestimmt die Anforderung an die Verfügbarkeit einer Verbindung²³, wie redundant die Systeme und damit die Verbindung ausgelegt werden müssen. Hier gibt es Lösungen, die nur eine Absicherung der Verbindung in den einzelnen Ringen benötigen, oder aber eine vollständig getrennt Wegeführung zwischen den beiden Endpunkten. Dies bedingt dann auch, dass die Ringe in der nächsthöheren Hierarchie doppelt abgestützt sein müssen. Weitere typische Qualitätsparameter betreffen die Qualität des Datenstromes, die zeitliche Verzögerung, mit denen die Daten am anderen Ende eintreffen (Delay), die zeitliche Schwankung in dieser Verzögerung (Jitter) und das Ausmaß der Verluste von Daten bei der Übertragung (Packet Loss oder Bitfehlerrate/ Rahmenverlustrate). Ein weiterer wichtiger qualitativer Parameter ist die Bandbreite der Verbindung und ggf. die mittlere Datenrate oder Kapazität, die benötigt wird. Während TDM-Kanäle eine feste Bandbreite unterstützen, mit nur sehr geringem Delay und keinen Jitter haben sowie eine geringe Bitfehlerrate, unterstützen STM-Systeme je nach Auslegung und Dimensionierung eine eher variable Bandbreite mit einem mehr oder weniger hohes Maß an Delay, Jitter und Packet Loss. STM-Systeme sind prädestiniert für Best Effort Verkehr (Internet).

3.3.2 Bedeutung von SDN/NFV für die Bereitstellung von Festverbindungen

Im Grundsatz will der Netzbetreiber eine Verbindung mit ihren Eigenschaften mit ihren beiden Endpunkten an der Konsole sitzend einrichten (oder bei der Kündigung wieder entfernen, bei einer Änderung mit den qualitativen Daten, typischerweise der Bandbreite verändern), ohne sich mit den Details der Netzabschnitte und der beteiligten Systeme zu befassen. Er will nicht die einzelnen Netzknoten konfigurieren, deren Ports beschalten, die Anschlussverbindungen durchschalten und die noch freien Kapazitäten unter der Randbedingung der geforderten Qualitäten managen, redundante Wege ein-

²³ Z.B. 97% oder 99,5%.

führen und das ggf. über mehrere Netzebenen (Wellenlängen, TDM, STDM (Ethernet und IP) und Knotentypen hinweg, ggf. sogar noch unterschiedlicher Hersteller und deren Bediensysteme.

All dies soll automatisch geschehen, und nach dem Ein- oder Ausrichten der Verbindungen oder einer Änderung auch den Vollzug des Tuns im BSS (Business Support System) dokumentieren und der Abrechnung zuführen. Auch sollen die Verbindungen vollständig und in ihrem Zusammenhang über die Systeme hinweg von Anfang bis Ende dokumentiert werden, um im Fehlerfall die betroffenen Kunden schnell identifizieren und informieren zu können und ggf. gezielt einzelnen wichtigen Verbindungen eine gesonderte Behandlung zuteilwerden lassen zu können²⁴.

Hier bieten SDN/NFV Systeme eine wirkungsvolle Unterstützung. Mit Network Slicing können Schichten unterschiedlicher Netzqualität definiert werden, innerhalb derer dann für die einzelnen Verbindungen virtuelle Pfade definiert und anschließend in die Physik des Netzes umgesetzt werden. In diesen Slices (Schichten) müssen dann die Verbindungen mit ihren weiteren qualitativen Eigenschaften (Resilienz, Kapazität) Ende – Ende über die Netzabschnitte und Netzebenen hinweg eingerichtet werden.

Eine solche Strukturierung erlaubt einerseits, neue Verbindungen schnell einzurichten (was früher mehrere Wochen dauerte geht nun in ein paar Minuten, freie Kapazität vorausgesetzt) und es erlaubt andererseits, Netzknoten für eine Reparatur auszutauschen oder kapazitativ aufzurüsten oder gar einen Herstellerwechsel vorzunehmen, ohne dass dies Auswirkungen bis in die Netzverwaltung hinein hat und lange Umbauzeiten mit Parallelbereitstellung in größerem Umfang und hoher Komplexität benötigt. Das schlägt dann natürlich auf die Kosten (OPEX) durch.

3.4 Bitstromzugang

3.4.1 Definition

Bei Bitstromzugang handelt es sich um ein Vorleistungsprodukt: voraggregierte Anschlussleitungen, die immer als STDM-Anschlussleitung als Ethernet oder IP-Verkehr, also auf den zwei unterschiedlichen Netz- und Protokollebenen, an den Sammelstellen kleinerer oder größerer Gebiete aggregiert an alternative Netzbetreiber übergeben werden. In Deutschland sind das derzeit ca. 900 Ethernet Zusammenschaltungspunkte („BNG-Standorte“, Broadband Network Gateway) bei ca. 8.000 HVt und 73 oder weniger (bis zu 2) IP-Zusammenschaltungspunkten, bei denen der Verkehr vom Wholesale-Anbieter Deutsche Telekom entweder ins eigene Netz (für die eigenen Kunden) oder an Wettbewerber im Wholesale übergeben werden. Die Übergabe an die Wholesale-Nachfrager erfolgt über getrennte Schnittstellen in deren eigenen IP- (oder Ethernet-)

²⁴ Gesetzliche Begründungen dazu finden sich z.B. in der TKSiv (Telekommunikations-Sicherstellungsverordnung).

Netze. Auch andere Anbieter können vergleichbare Strukturen haben.²⁵ Abbildung 3-10 zeigt die wesentlichen Netzelemente die für die Erbringung des Bitstromdienstes erforderlich sind.

Abbildung 3-10: Allgemeine Netzstruktur für Bitstrom (VULA, Ethernet Best Effort und IP Best Effort)

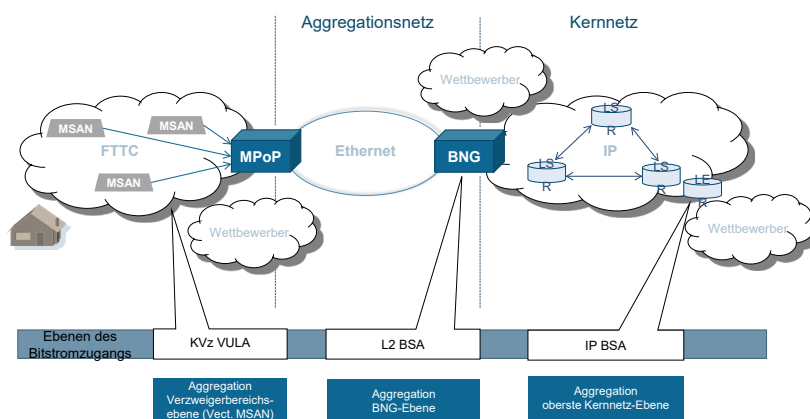
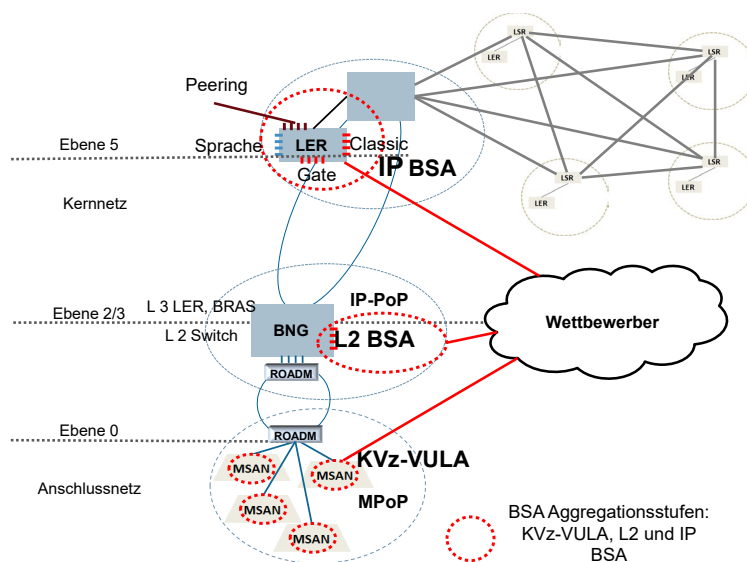


Abbildung 3-11: Zweig einer Bitstrom Netzstruktur über mehrere Netzebenen hinweg



²⁵ Für Kabel-TV Netze gibt es spezifische Anschluss- und Aggregationsnetze – aber dies ändert an den grundsätzlichen Aussagen nichts Wesentliches.

3.4.2 Bedeutung von SDN/NFV für Bitstromzugang

Für die Einrichtung der Anschlüsse im Netz des Betreibers gibt es für die Implementierung des Bitstromzugangs Herausforderungen, die mit denen der Festverbindungen vergleichbar sind – allerdings bewegen wir uns hier im Massenmarkt mit ganz anderen Mengengerüsten. Der Kundenanschluss führt vom Kundenstandort über die Anschlussleitung i.d.R. zum KVz (Knotenverzweiger) auf ein dort aufgebautes aggregierendes System (DSLAM, MSAN)²⁶. Während die Anschlussleitung aus Kupfer ist und eine längenabhängige Bandbreite aufweist, sind die weiterführenden Infrastrukturen aus Glasfaser. Am HVt wird der MSAN-Verkehr auf Wellenlängen aggregiert und zu den BNG geführt, dort auf die Rechte und Dienste hin gecheckt, die der Nutzer kontrahiert hat, und ihm entsprechender Zugang in das Netz des Netzbetreibers gewährt (BRAS Funktionalität).

Eine wesentliche Unterscheidung in der Qualität der Bitstromdienste besteht zum einen auf der Protokoll-Ebene: IP-Bitstrom ist in aller Regel ein Best Effort Verkehr mit einer ggf. vorgegebenen betrieblichen Mindestqualität bzgl. Durchsatz, Delay, Jitter und Paket Loss, aber in einer hohen Varianz der tatsächlich angebotenen Qualität. Ethernet Bitstrom erlaubt ein weites Maß unterschiedlicher Qualitäten und ist im Grundsatz ein geeignetes Medium für Network Slicing. Er kann aufgrund von Beschränkungen in der Adressierung jedoch nur regional angeboten werden. Zum anderen gibt es dedizierte wettbewerbsrechtliche Vorgaben für den Ethernet Bitstrom, virtuell entbündelten Bitstrom anstelle echter physischer Entbündelung der Anschlussleitungen anzubieten (VULA, Virtual Unbundled Local Access). Dies erfordert Mindestqualitäten, die sich je Anwendungsfall unterscheiden können. In Deutschland gibt es den Förder-VULA, den Nahbereichs-VULA und den normalen VULA mit einer Übergabe am KVz bzw. HVt und am BNG. Eine Herausforderung ist, dass der Förder-VULA die ja individuell verschiedene Kapazität der Anschlussleitung bis zum Übergabepunkt durchreichen muss. Dies muss bei der Dimensionierung der Systeme berücksichtigt werden.

Eine Herausforderung beim Bitstrom und der beschränkten Kapazität der Anschlussleitungen ist das Angebot von IP-TV im klassischen Broadcast bzw. Multicast. Weitere Dienstespezifische Differenzierungen in den Anschlussdiensten sind vorstellbar – so z.B. eine spezielle Qualität für Gamer, oder eine für Nutzer mit einer Affinität zu Virtual Reality.

Auch hier gilt: Im Grundsatz will der Netzbetreiber eine Verbindung mit ihren Eigenschaften mit ihren beiden Endpunkten an der Konsole sitzend oder besser noch nach einer Prüfung vollautomatisch (Massenmarkt) einrichten (oder bei der Kündigung wieder entfernen, bei einer Änderung mit den qualitativen Daten, typischerweise der Bandbreite verändern), ohne sich mit den Details der Netzabschnitte und der beteiligten Systeme befassen zu müssen. Er will nicht die einzelnen Netzknoten konfigurieren, deren

²⁶ Digital Subscriber Line Access Multiplexer, MultiService Access Node.

Ports beschalten, die Anschlussverbindungen durchschalten und die noch freien Kapazitäten unter der Randbedingung der geforderten Qualitäten managen, und das ggf. über mehrere Netzebenen (MSAN, Wellenlängen, STDM (Ethernet, Wholesale Ethernet Interfaces und regionale oder zentrale IP Interfaces) und Knotentypen hinweg, ggf. sogar noch unterschiedlicher Hersteller und deren Bediensysteme.

All dies soll automatisch geschehen, und nach dem Ein- oder Ausrichten der Verbindungen oder einer Änderung auch den Vollzug des Tuns im BSS (Business Support System) dokumentieren und der Abrechnung zuführen. Auch sollen die Anschlüsse vollständig und in ihrem Zusammenhang über die Systeme hinweg von Anfang bis Ende dokumentiert werden, um im Fehlerfall die betroffenen Kunden schnell identifizieren und informieren zu können und ggf. gezielt einzelnen wichtigen Verbindungen eine gesonderte Behandlung zuteilwerden lassen zu können.²⁷

Auch hier bieten SDN/NFV Systeme eine wirkungsvolle Unterstützung. Mit Network Slicing können Schichten unterschiedlicher Netzqualität definiert werden, innerhalb derer dann für die einzelnen Verbindungen virtuelle Pfade definiert und anschließend in die Physik des Netzes umgesetzt werden. Typische Anwendungen sind hier Schichten für IP- und Ethernet, und innerhalb Ethernet für den allgemeinen Best Effort Bitstrom und die VULA Klassen. Auch könnte hier ein Slice für den qualitativ hochwertigen Bitstrom des Marktes ⁴²⁸ eingefügt werden. In diesen Slices (Schichten) müssen dann die Verbindungen mit ihren weiteren qualitativen Eigenschaften (Resilienz, Kapazität, ggf. Delay, Jitter und Packet Loss) Ende – Ende über die Anschlussleitung und weiteren Netzabschnitte und Netzebenen hinweg bis zum Übergabepunkt eingerichtet werden.

Eine solche Strukturierung erlaubt einerseits, neue Verbindungen schnell einzurichten (was früher mehrere Tage dauerte geht nun in ein paar Minuten, freie Kapazität vorausgesetzt) und es erlaubt andererseits, Netzknoten für eine Reparatur auszutauschen oder kapazitatív aufzurüsten oder gar einen Herstellerwechsel vorzunehmen, ohne dass dies Auswirkungen bis in die Netzverwaltung hinein hat und lange Umbauzeiten mit Parallelbereitstellung in größerem Umfang und hoher Komplexität benötigt.

²⁷ Vgl. Fußnote 24.

²⁸ Siehe Europäische Kommission, Märkteempfehlung vom 09.10.2014, Anhang.

4 Stand der aktuellen Implementierung

4.1 Open Networking Foundation

Die Open Networking Foundation (ONF) ist ein gemeinnütziges, von Betreibern geführtes Konsortium, das die Transformation der Netzinfrastruktur und der Carrier-Geschäftsmodelle vorantreibt und Standardfunktionen / Schnittstellen als Open Source Lösungen definiert.

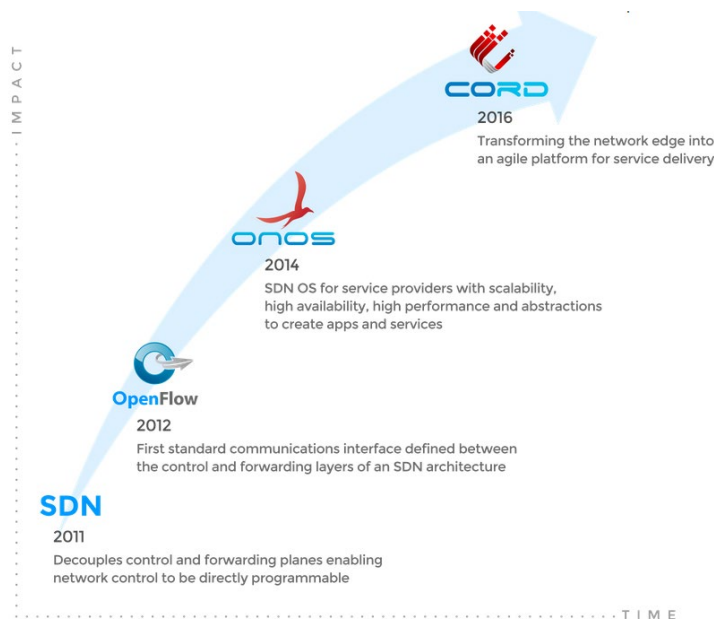
Das ONF entwickelt Open-Source-Lösungen für Betreiber und wurde 2011 erstmals als Standardträger für Software Defined Networking (SDN) eingeführt. Unter der Leitung seiner Betreiberpartner AT&T, China Unicom, Comcast, Deutsche Telekom, Google, NTT Group und Turk Telekom treibt das ONF einen enormen Wandel im gesamten Betreiberbereich voran²⁹.

Das 2012 definierte OpenFlow Protocol ist der führende Standard für die Southbound-Schnittstelle, welche die Netzelemente mit dem Netz-Controller verbindet. Switches von Cisco, Juniper, Extreme Networks und anderen Equipment Herstellern unterstützen mittlerweile den OpenFlow Standard.

Abbildung 4-1 zeigt die wesentlichen Schritte zur SDN Standardisierung durch ONF seit der Gründung der Organisation in 2011. 2014 wurde der erste Open Source SDN Controller eingeführt, seit 2016 arbeitet die Organisation an dem CORD Projekt (**C**entral **O**ffice **R**e-architected as a **D**ata Center).

²⁹ Kreutz D., Ramos, Estevez Verissimo, Esteve Rothenberg, Azodolmolky, & Uhlig, Software-Defined Networking: A comprehensive survey, 2015, S. 15.

Abbildung 4-1: Meilensteine des ONF Standardisierungsprozesses



Quelle: ONF (2019)

4.2 Offene oder geschützte APIs

APIs (Application Programming Interface) sind die Programmierschnittstellen, die den Zugriff zur Hardware bilden. Sie sind demnach die Schnittstelle für die Interaktion verschiedener Hardwareeinrichtungen, auf die die Netzadministration zugreift und die im Falle der Implementierung von SDN/NFV entsprechend elementar für die Synchronisation der Netzabläufe sind.

Diese APIs determinieren das Zusammenspiel zwischen Application Layer und Control Layer, also zwischen den Endgeräten und der Kontrollschicht des Netzes. APIs können geschützt, also herstellerepezifisch, oder herstellerübergreifend standardisiert sein.

Im Falle ungeschützter APIs wäre demnach eine Migration hin zu einer SDN/NFV-Architektur schneller möglich und auch bei einem migrierten Netz ließen sich bei standardisierten, nicht herstellerepezifisch geschützten APIs flexibler Änderungen in Hardware und Software umsetzen, um beispielsweise Produktinnovationen zu implementieren. Netzbetreiber und Hersteller wenden oft offene APIs an, um die Zusammenschaltung von Netzen zu vereinfachen und Endverbrauchern globale Konnektivität anbieten zu können.

Geschützte APIs hingegen bieten Herstellern und Netzbetreibern mehr Hoheit über die Anwendungen und Dienste die mit der eigenen Hardware kompatibel sind. So müssen

jedem Dienstanbieter die geschützten APIs bekannt sein um neue Dienste anbieten zu können. Darüber hinaus vermag ein Hersteller bei geschützten APIs den Abnehmer seiner Hardware in Pfadabhängigkeiten zu drängen, da nur die eigenen Produkte untereinander kompatibel sind.³⁰

Ob im Rahmen von SDN/NFV Hersteller und Netzbetreiber auf geschützte oder ungeschützte APIs setzen werden, wird sich zeigen. Das Ergebnis dieser Entwicklung wird sich auch auf den Wettbewerb auswirken. Offene APIs könnten es auch alternativen Netzbetreibern eröffnen Network Slice Produkte zu definieren, die sich von jenen des Altsassen unterscheiden und somit den Wettbewerb unter den Diensteanbietern und Netzbetreibern forcieren. Geschlossene APIs könnten in einer migrierten Welt den Wettbewerb zu den Herstellern verlagern. Im Rahmen der Markteinführung von 5G haben sich 15 Mobilfunkbetreiber zusammengeschlossen (auch die Deutsche Telekom), um unter dem Brand O-RAN („Open RAN“), um u.a. offene Multi-Vendor APIs zu spezifizieren.³¹

4.3 NFV Standardisierung

2012 wurde die NFV Industry Specification Group (**ISG**) innerhalb von ETSI durch sieben der weltweit führenden Telekommunikationsunternehmen gegründet. In den darauf folgenden zwei Jahren wurden neue Betreiberanforderungen festgelegt für ein offenes System von Anbietern. 2014 kam es zu einer strategischen Partnerschaft zwischen ETSI und ONF bzgl. der Anwendung des OpenFlow Protokolls für die Southbound-Schnittstelle im Kontext von NFV. Um NFV skalierbar zu machen und die Interoperabilität der darin verwendeten NFV-Lösungen sicherzustellen, wurden zwischen 2015 und 2016 eine Reihe von Schlüsselfunktionen neu ausgewählt und priorisiert. (**ISG Release 2**).

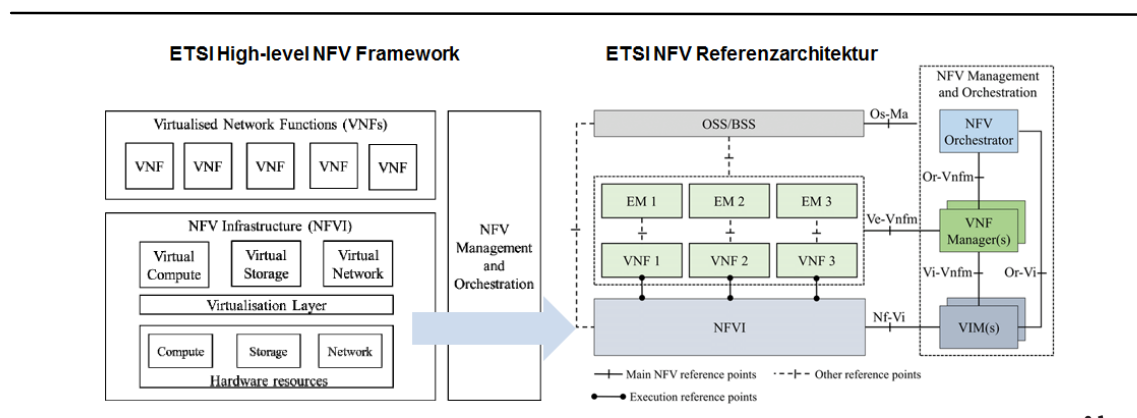
2017 bis 2019 wurde die NFV-Architektur erweitert und dadurch auf den globalen Einsatz und Betrieb vorbereitet (**ISG Release 3**). Schließlich wurde zwischen 2019 und 2020 die Integration von virtualisierten Netzfunktionen und Diensten optimiert, die NFV-Automatisierung und Orchestrierung verbessert und eine Verschärfung von Sicherheitsaspekten beschlossen (**ISG Release 4**).³²

³⁰ Dr. Lemstra, SMART 2018/0082 - Task 1 - Identify the relevant trends at EU level Subtask 1: Technological developments: the dawn of a new era, 2018, S. 52.

³¹ O-Ran, <https://www.o-ran.org/>, abgerufen am 30.03.2020.

³² Dr. Lemstra, SMART 2018/0082 - Task 1 - Identify the relevant trends at EU level Subtask 1: Technological developments: the dawn of a new era, 2018, S. 53.

Abbildung 4-2: ETSI NFV Referenzarchitektur



VIM: Virtual Infrastructure Manager

EM: Element Manager

OSS/BSS: Operations / Business Support System

Quelle: ETSI (2013), S. 10 & S. 14

4.4 Umsetzung bei den Herstellern

Eine der größten gegenwärtigen Herausforderungen bei der Implementierung von virtualisierten Lösungen für Netzbetreiber ist die (mangelnde) Interoperabilität der Lösungen, die von verschiedenen Herstellern angeboten werden. Im Rahmen der New IP Agency (NIA) arbeiten führende Hardwareanbieter in Testprogrammen zusammen, um die Interoperabilität ihrer Netzelemente auf NFV vorzubereiten. In einem Testprogramm 2016 erzielten 12 Hersteller 6 interoperable Lösungen der Netzwerkorchestrierung für virtualisierte Netze. Dieser Test konzentrierte sich auf das Zusammenspiel virtualisierter CPEs verschiedener Hersteller in Kombination mit verschiedenen NFV-Infrastrukturen, die von Adva, Nokia, Cisco, Dell und Juniper bereitgestellt wurden.³³ Ungeachtet der tatsächlichen Ergebnisse und Lösungen signalisiert diese Zusammenarbeit die Bereitschaft der Hersteller, interoperable Lösungen marktfähig zu machen, um die Einführung von SDN und NFV zu beschleunigen.

2018 kündigte NIA ein Zertifikatprogramm an, um die Interoperabilität von verschiedenen NFV-Netzen zu bescheinigen. Auf Basis der eingeführten Zertifikate soll für Netzbetreiber offenbar werden, ob und wie Hardware welcher Hersteller ohne größeren Aufwand miteinander agieren kann³⁴.

³³ New IP Agency, Interoperability Showcase 2016, 2016, S. 2 f.

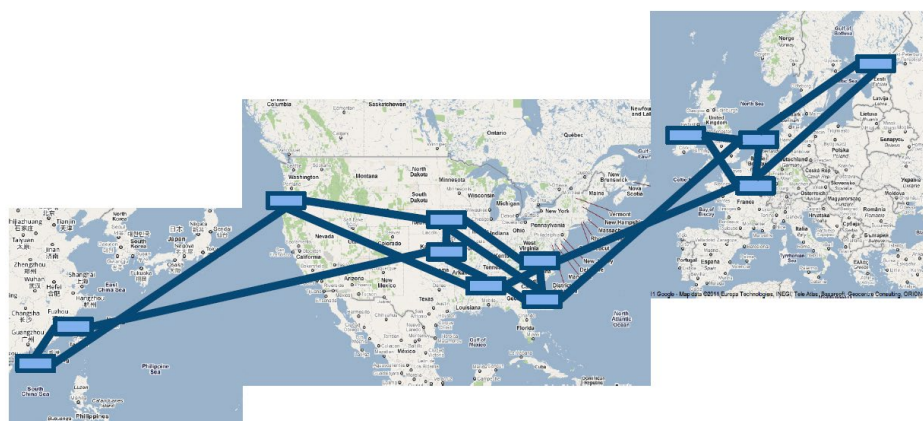
³⁴ Lightreading, <https://www.lightreading.com/nfv/nfv-tests-and-trials/the-new-ip-agency-announces-interoperability-certification-for-next-gen-virtualization/d/d-id/739943>, abgerufen am 03.03.2020.

4.5 SDN/NFV Umsetzung in Unternehmen

SDN/NFV findet bereits Anwendung in Unternehmens-, Cloud- und Rechenzentrums-umgebungen:

Das Google G-Scale WAN (Wide Area Networks)-Backbone verbindet die verschiedenen globalen Rechenzentren und ist ein Beispiel für ein 2011 eingeführtes OpenFlow Layer 3-Netz (SDN). Einer der Vorteile, die Google verspricht, ist eine Netznutzung/-auslastung von bis zu 95%.

Abbildung 4-3: Google G-Scale WAN³⁵



G-scale WAN - Serves traffic between datacenters

PCCW Global ist ein global agierender Tier 1-Betreiber, der bereits heute SDN in seine Dienstbereitstellung integriert hat, um ad-hoc Konnektivitäten in einem weltweiten Maßstab realisieren zu können. In Echtzeit können Nachfrager über die „Console Connect“ gemäß ihrer Konnektivitätsanforderungen Standorte untereinander oder mit externen Cloud Providern verbinden. Ein Prozess, der in einem herkömmlich gesteuerten Netz bis zu einer Woche in Anspruch nimmt und unter der zentralisierten Steuerung des SDN-Netzes durch virtualisierte Kanäle durch den Anbieter in geringer Zeit eingerichtet werden kann. Die softwaregesteuerten Verbindungen erlauben dem Endkunden die eigene Überwachung der in Anspruch genommenen Dienste und die Flexibilität Kapazitäten zu erhöhen oder verringern.³⁶ Letztlich wird auch darauf verwiesen, dass die SDN-Lösung nicht nur kostengünstiger, sondern auch sicherer als die Datenübermittlung über das Internet ist.

³⁵ SDN@Google, <https://www.internet2.edu/presentations/it2012summer/20120717-agarwal-sdn@google.pdf>, abgerufen am 30.03.2020.

³⁶ PCCW Global, www.pccwglobal.com, abgerufen am 30.03.2020.

Im Jahr 2014 gab HP die allgemeine Verfügbarkeit seines SDN App Store bekannt. Kunden, die den HP OpenFlow-Controller verwenden, haben Zugriff auf den Shop und können Anwendungen auswählen, die dynamisch heruntergeladen, in den Controller installiert, getestet und bereitgestellt werden.³⁷

Anfang 2019 ist Vodafone eine Partnerschaft mit IBM eingegangen, um Unternehmenslösungen wie KI (Künstliche Intelligenz), 5G, Edge und SDN anzubieten. Im Rahmen der Vereinbarung wird IBM Managed Services für die Cloud- und Hosting-Einheit von Vodafone Business in einem achtjährigen Engagement im Wert von rund 550 Millionen US-Dollar (480 Millionen Euro) bereitstellen. Geschäftskunden von Vodafone sollen dabei profitieren von den Optimierungs-, Automatisierungs- und kognitiven Fähigkeiten von IBM, die ihnen helfen, ihr Geschäft in einer Cloud-Umgebung effektiv zu betreiben.

Das neue Unternehmen will gemeinsam neue digitale Lösungen entwickeln, die die Stärken von Vodafone bei IoT-, 5G- und Edge-Computing mit der Multicloud-Technologie, dem Branchenwissen und den Professional Services-Funktionen von IBM kombinieren.³⁸

Eine Studie von ACG Research aus dem Jahr 2019 veröffentlicht auf der Grundlage von durchgeführten Interviews, dass 20-30% der Transportnetze virtualisiert sind und 40-50% unter SDN-Kontrolle stehen.³⁹

³⁷ HP Pressemitteilung: <https://www8.hp.com/us/en/hp-news/press-release.html?id=1798074>, abgerufen am 30.03.2020.

³⁸ IBM & Vodafone business join forces to drive innovation in rapidly changing worlds, <https://newsroom.ibm.com/2019-01-17-IBM-Vodafone-Business-Join-Forces-to-Drive-Innovation-in-Rapidly-Changing-World>, abgerufen am 27.03.2020.

³⁹ ACG Research, Challenges, trends and opportunities in optical and carrier Ethernet transport services: A study of communication service providers, resellers and large enterprises, 2019.

Abbildung 4-4: Stand der Virtualisierung der Transportnetze

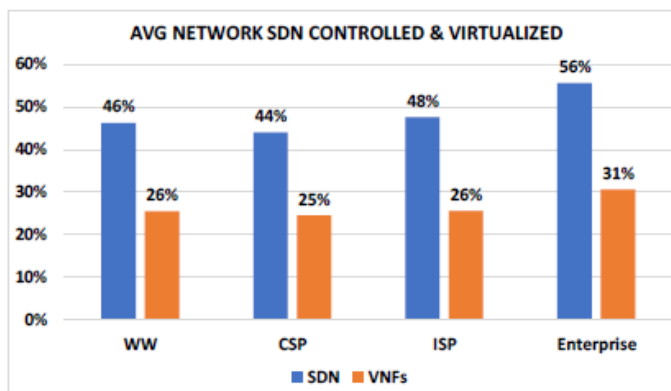


Figure 16. Average Network SDN Control and Virtualization

communication service providers (CSP): Netzbetreiber
 value-added service providers (VASP): Mehrwertdiensteanbieter
 WW: weltweit

Quelle: S. ACG Research (2019), Figure 16.

Der Anteil der SDN-Kontrolle und Virtualisierung nimmt stetig zu. Diese Ergebnisse müssen jedoch mit Vorsicht aufgenommen werden, da die Mitarbeiter in jedem Netz dazu neigen, ihre Zahlen im Vergleich zur Realität in ihren Netzen zu überschätzen. Darüber hinaus ist es schwierig, glaubwürdige öffentliche Informationen zu identifizieren, da einige Unternehmen den Anteil der Virtualisierung ihres Netzes auf Basis einer einzelnen virtuellen Instanz angeben. Basierend auf weiteren Recherchen von ACG Research und detaillierten Gesprächen mit Diensteanbietern wird der Anteil von SDN und NFV in dieser Umfrage um etwa Faktor zwei überbewertet. Der realistische Anteil der Netze unter SDN-Kontrolle wird daher auf ca. 25% geschätzt und ungefähr 13% der Netze sind virtualisiert. I.d.R. sind große Unternehmen in beiden Transformationskategorien den CSPs voraus.⁴⁰

⁴⁰ Dr. Lemstra, SMART 2018/0082 - Task 1 - Identify the relevant trends at EU level Subtask 1: Technological developments: the dawn of a new era, 2018, S. 56.

5 Die Auswirkungen von SDN/NFV auf die Kosten der Netze und Vorleistungsprodukte

Einer der wesentlichen Gründe für die Umstellung der Netze auf SDN/NFV ist die erwartete Senkung von Kapital- und Betriebskosten (CAPEX und OPEX).

Niedrigere CAPEX sind zu erwarten, weil Standardhardware-Einrichtungen i.d.R. billiger als dedizierte/proprietäre Hardware-Einrichtungen sind. Zudem sollen mit SDN/NFV Standard-Betriebssysteme und standardisierte Betriebsumgebungen verwendet werden, was die Inbetriebnahme deutlich vereinfachen wird.

Auch die OPEX sollen mit der Einführung von SDN/NFV signifikant sinken: Zentralisierte Software Controller (SDN) – Administratoren können Netzdienste einfacher hinzufügen, skalieren und ändern als heutzutage. Neue Dienste lassen sich schneller in Standard-Betriebsprozesse (inkl. Software-Sicherung) und Standard-Rechenzentrum-Umgebungen einbetten. Darüber hinaus gibt es eine Reihe monetär schwer quantifizierbarer Vorteile, darunter erweiterte Produktdiversifikation, kürzere Time-to-Market etc.

Von diesen beschriebenen Kosteneffekten werden auch regulierte Vorleistungsprodukte betroffen sein. Im Folgenden soll der Fokus auf den betreffenden Netzelementen und Tarifkomponenten liegen, die für die Berechnung der Kosten von Vorleistungsprodukten relevant sind. Dabei werden nicht nur die Einsparungen im Bereich CAPEX und OPEX von Bedeutung sein, sondern auch der Grad der Verbundproduktion, der mit zunehmender Virtualisierung der Netze voranschreitet und aus Dienste-Perspektive „inkrementelle Netzelemente“ (wie beispielweise Vermittlungsrechner oder Media-Gateway-Controller) überflüssig werden lässt. Diese Entwicklung hat bereits mit der Einführung des sog. All-IP-Netzes und der darin vollzogenen Dienstintegration begonnen. Durch SDN/NFV führt die Einrichtung zentralisierter Netzelemente zur Orchestrierung des Netzes dazu, dass einzelne Netzelemente nicht mehr - wie im herkömmlichen Netz – eindeutig bestimmten Diensten zugeordnet werden können. So wurde in der Vergangenheit etwa der DXC (Digital Cross Connect) eindeutig zur Erbringung der Leistung einer Layer 1 Mietleitung benötigt, während in einem SDN/NFV basierten Netz zentralisierte Einrichtungen zur Steuerung des gesamten Verkehrs eingesetzt werden. Letztlich können White Boxes durch ihre allgemeine Einsetzbarkeit den Diensten nicht inkrementell zugerechnet werden. Daraus ergeben sich Informationsanforderungen für die Kostenberechnung, die für eine verursachungsgerechte und diskriminierungsfreie Zurechnung gemeinsamer Kosten auf Dienste und Vorleistungsprodukte erforderlich ist.

5.1 Kosten für Festnetzterminierung

Die Kosten der Festnetz-Terminierung in Deutschland werden seit 2012 unter Rückgriff auf das analytische Breitbandkostenmodell des WIK bestimmt.

Bei dem analytischen Kostenmodell des WIK handelt es sich um ein bottom-up Modell für ein Next Generation Multi Service Network, welches nachfragegetrieben eine Dimensionierung der zur Dienstbereitstellung erforderlichen Netzelemente nach ingenieurmäßigen Kriterien vornimmt und diese bewertet.

Im NGN wird Sprache gemeinsam mit anderen Breitbanddiensten über das IP-basierte Transportnetz realisiert. ⁴¹

Im diensteintegrierenden Breitbandnetz werden Telefonie, Breitbandzugang oder auch Festverbindungen über ein gemeinsames Transportnetz realisiert, welches mit Blick auf die Inanspruchnahme durch die verschiedenen Dienste und Vorleistungsprodukte eine verursachungsgerechte Aufteilung der Kosten erfordert. Dabei gilt die Inanspruchnahme von Übertragungskapazität (in der Hauptverkehrsstunde) als der relevante Kostentreiber, der eine diskriminierungsfreie Zurechnung der Kosten auf die Dienste erlaubt.

Für die Realisierung des Sprachdienstes ist neben dem gemeinsamen Transport mit anderen Diensten sowohl die Steuerung des Sprachdienstes als auch die dienstespezifische Netzübergabe zu berücksichtigen.

In der nachfolgenden Abbildung 5-1 sind neben den allgemeinen auch die sprachspezifischen Funktionselemente dargestellt.⁴² Dabei ist für diese Einrichtungen ebenfalls eine gemeinsame Nutzung durch verschiedene Dienste bereits heute Realität. Ein Beispiel dafür ist die Funktionalität des Softswitches, der – in Zusammenarbeit mit anderen Einrichtungen wie beispielsweise dem DNS (domain name server) – für die Realisierung von Ende-zu-Ende-Verbindungen erforderlich ist.

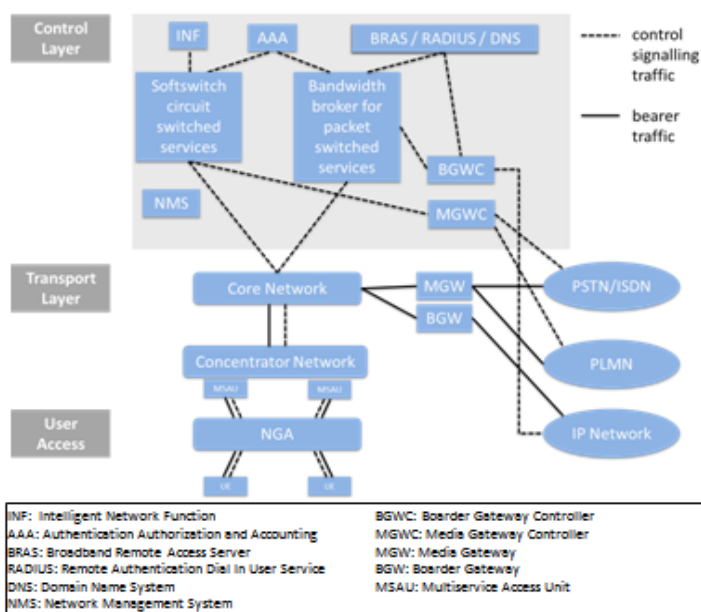
⁴¹ Siehe hierzu auch das Referenzdokument zum analytischen Kostenmodell für ein Breitbandnetz Version 2.3. Dort findet sich eine detaillierte Darstellung des diensteintegrierenden Breitbandnetzes, seiner Dienste und ihrer Verkehrseigenschaften. Die Bestimmung der Kosten der Sprachzusammenschaltung ist dort in Anlage 1 dargestellt.

https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Marktregulierung/massstaerke_methoden/kostenmodelle/breitbandnetz2x/breitbandnetz2x-node.html

Im Modell wird ausgehend von der Netzdimensionierung in einem zweiten Schritt eine netzelementbezogene Kostenberechnung vorgenommen. Der dritte Schritt ist eine Kostenzurechnung auf die betrachteten Dienste. Die Kosten der Sprachzusammenschaltung werden im WIK NGN Modell sowohl nach dem KeL-Maßstab (Kosten der effizienten Leistungserbringung bzw. LRIC), als auch nach dem Pure LRIC Kostenmaßstab bestimmt.

⁴² Referenzdokument, Analytisches Kostenmodell für das Breitbandnetz, Referenzdokument Version 2.3, erstellt im Auftrag der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, 15. August 2016, Abschnitt 6.4.

Abbildung 5-1: Einrichtungen der Kontrollschicht



In dem vom WIK erstellten Analytischen Kostenmodell für das Breitbandnetz wird diese „gemeinsame Nutzung des Softswitch“ vernachlässigt und statt dessen davon ausgegangen, dass die Dimensionierung der sprachspezifischen Einrichtungen der Kontrollschicht inkrementell für den betrachteten Dienst sind.⁴³ Dabei beruht die bisherige methodische Vorgehensweise auf der Hypothese, dass bei gegebenen Nachfragemengen und Kapazitäten der Einrichtungen, eine Linearisierung der Kosten vertretbar ist.

Für die IP-basierte Zusammenschaltung von Sprache sind im NGN-Modell des WIK folgende Netzelemente vorgesehen:

- Softswitch (mit integriertem SIP-Server)
- Label Edge Router (am Netzübergang)
- Session Border Controller (SBC)⁴⁴

Für die Zusammenschaltung von IP- und PSTN/ISDN-basiertem Sprachverkehr ist darüber hinaus ein Mediatgateway vorgesehen. Bei reiner IP-Telefonie erfüllt der am Standort vorgesehene Router die Aufgabe der Netzübergabe. Sofern die Anzahl der für

⁴³ Sprachverkehr wird im aktuellen NGN Kostenmodell (Version 2.3) in der Kontrollschicht durch einen Softswitch gesteuert, der die Sprachanforderung annimmt und kontrolliert, ob im IP basierten Transportnetz ausreichend Kapazitäten vorliegen. Er behandelt sowohl den internen Verkehr als auch den Verkehr von und zu den Zusammenschaltungspunkten mit den anderen Netzen. D.h. als gemeinsames Netzelement wird ein durch die Busy Hour Call Attempts (BHCA) gesteuerter Softswitch benötigt, der typischerweise einen SIP Server integriert.

⁴⁴ Die Funktion des SBC kann auch in der Einrichtung des Softswitches oder im LER integriert sein.

Interconnection benötigten Ports nicht hinreichend ist, müssen weitere Router installiert werden.

Die Migration einer Softswitch-Architektur in Richtung IMS- Plattform wird eine verstärkte Zentralisierung der oben beschriebenen Kontrollfunktionen für den Sprachdienst mit sich bringen. IMS unterstützt den Aufbau und die Überwachung von Multimediaverbindungen sowohl intern als auch mit anderen Netzen und ist damit auch von Bedeutung für die Zusammenschaltung von unterschiedlichen Netzen, z.B. für Sprachdienste von VoIP im IMS mit dem PSTN/ISDN-Netz. Daher beinhaltet die IMS-Plattform die oben genannten Funktionalitäten des Softswitch, MGW, MGWC und SBC. Zudem erlaubt die IMS-Plattform eine dynamische Zuteilung von Kapazitäten der Kontrolleinrichtungen.

Anders als im Modellierungsansatz des WIK-NGN-Modells vorgesehen, ist im realen Netzbetrieb davon auszugehen, dass die Komponenten der IMS-Plattform nicht ausschließlich den Sprachverkehr im Festnetz steuern. Dies macht auch der Begriff Multimedia in der Bezeichnung IMS deutlich. Zudem können die Elemente des IMS-Verkehrsströme sowohl im Fest- als auch Mobilfunknetz verwalten. Derartige Verbundproduktionen sind bei der Zurechnung der Kosten für die Plattform auf die Dienste zu berücksichtigen. D.h., den bisher in getrennten Netzen realisierten Nachfragen sind verursachungsgerecht die Kosten zuzurechnen (Konvergenz von Fest- und Mobilfunknetzen). So könnten z.B. über die gemeinsame IMS-Plattform nomadische Nutzer zu Hause (auf Festnetz) oder unterwegs (über Mobilfunk) über eine personalisierte Rufnummer erreicht werden.

Kosten der Kontrollschicht machen i.d.R. den größten Anteil der Terminierungskosten aus. In Bezug auf

- die LRAIC ist entsprechend zu erwarten, dass eine zunehmende - durch SDN/NFV getriebene – Ausweitung **zentralisierte** Netz- und Dienstesteuerung die Verbundkosten erhöht, was wiederum eine Verschiebung relativer Kosten der Dienste zur Folge haben könnte. - Generell ist jedoch davon auszugehen, dass die bisherige methodische Vorgehensweise, die auf der Hypothese beruht, dass die Dimensionierung der Netzsteuerungskapazitäten auf dienstespezifische, normierbare Kostentreiber zurückzuführen ist und eine Linearisierung der Kosten weiterhin möglich ist. Im Kontext einer bottom-up Kostenberechnung könnte dann die Separierung der Netzfunktionalitäten daher weiterhin ein gangbarer Weg sein. – In Bezug auf eine top-down Berechnung steht vor allem im Fokus, die Kosten diskriminierungsfrei zuzurechnen. aufgestellt wird, dass bei den betrachteten Größenordnungen (Mengen der jeweiligen Dienste im Netz) keine relevanten Größenvorteile bestehen und somit von tendenziell linearen Kosten ausgegangen werden kann oder e.
- die Pure LRIC ist zu erwarten, dass die flexiblere Zuteilung von Ressourcen in der Steuerungsplattform zu weniger sprungfixen Kosten führt. Sprungfixe Kosten entstehen immer dann, wenn auf Grund der zusätzlichen Bereitstellung von

Terminierung bestimmte Dimensionen des Netzes eine gegebene Schwelle überschreiten und deshalb in neue Netzelemente investiert werden muss. Mit der Einführung von SDN/NFV ist zu erwarten, dass solche Sprünge aufgrund der besseren Lastverteilung im Netz seltener auftreten werden. Damit verbunden sind dann auch im Erwartungswert geringere Pure LRIC

5.2 Kosten für Mobilfunknetzterminierung

Wie auch in der Festnetzterminierung reduzieren sich die CAPEX dadurch, dass statt intelligenter Netzelemente in einem SDN/NFV basierten Netz standardisierte White Boxes zum Einsatz kommen. Gleichzeitig verbessern sich die Skalenerträge durch die zentralisierte Intelligenz, die Ressourcen flexibel zuweisen kann (siehe Abschnitt 3.1). Somit steht zu erwarten, dass neben der Reduktion der CAPEX als absolute Werte auch die Kostenzurechnung zu verringerten inkrementellen CAPEX führen wird.

Abschnitt 3.1 führt dazu aus, wie durch SDN/NFV die Funktionalitäten einer 5G-Infrastruktur weiter verbessert werden können, um Ressourcen effizient zu allokalieren. Einer der größten Kosteneinsparpotenziale bietet das BBU-Pooling. In diesem Pool können einzelne BBUs bei unterausgelasteten Remote Radio Heads (Antenneneinheit) deaktiviert werden. Durch SDN/NFV lassen sich diese BBUs virtualisieren und softwareseitig zentral steuern, was diese Einsparpotenziale erhöhen und die Ressourcenallokation weiter verbessern kann. Dies reduziert die zu erwartenden OPEX.

5.3 Kosten für CFV

Die Kosten für Festverbindungen (CFV)⁴⁵ setzen sich i.d.R. aus folgenden Tarifpositionen zusammen:

- Bereitstellungskosten (Kosten für die Einrichtung von Verbindungen, einmalig)
- Kosten der Überlassung der Festverbindung (jährlich)

Die Kosten der Überlassung unterteilen sich in weiteren Positionen:

- Anschlusskosten (Anschluss- und Aggregationsequipment)
- Kosten für den Transport im Aggregations- und Kernnetz

SDN/NFV wird sich sowohl auf die Bereitstellungskomponente als auch auf die Kosten der Überlassung der CFV auswirken.

Bei den Bereitstellungskosten können sich eine bessere Überwachung bei der Einführung neuer Systeme, die erleichterte Konfiguration bei Software-Upgrades und nicht zuletzt die Kompatibilität mit Netzequipment verschiedener Hersteller (Standardisierung

⁴⁵ S. auch die Definition von Festverbindungen im Abschnitt 3.3.

durch die Open Networking Organisation) kostensenkend auswirken. Durch die Verlagerung der Intelligenz der Systeme in zentralisierten Controllern (und somit weniger intelligente Geräte in der Fläche) wird das Knotenequipment günstiger (CAPEX). Dies betrifft die Router und Switches im Transportnetz, aber auch das Anschluss- und Aggregationsequipment. Zudem erlaubt SDN/NFV eine feinere Abstufung von CFV Verbindungen: z.B. kann eine 1G Mietleitung zu 100M gedrosselt werden. Die restliche Kapazität wird dann im Transportnetz anderen Diensten zur Verfügung gestellt, das bedeutet eine flexiblere Zuteilung von Ressourcen und sinkende Transportkosten (Kosten pro Mbit/s). Eine solche flexible Ressourcennutzung würde sich in einer Reduktion der Bereitstellungskosten wiederfinden.

Zu den Effekten auf die Betriebskosten (OPEX), die sich vor allem in den Überlastungsentgelten niederschlagen, zählen die erwartete Stromkostensenkung (carbon footprint), ein verbessertes Kapazitätsmanagement und Funktionen der Fehleranalyse. Auch ist mit SDN/NFV ein vereinfachter Austausch von Netzknoten für eine Reparatur oder kapazitative Aufrüstung ohne lange Umbauzeiten mit Parallelbereitstellung in größerem Umfang und hoher Komplexität möglich. Auswirkungen in die Netzverwaltung hinein können vermieden werden. . All diese Aspekte deuten auf eine signifikante Reduktion der OPEX hin.

Mit einer Verankerung der Netzsteuerung in den Network Element Managern skalierten die Kosten mit den technischen Einrichtungen des Transportnetzes. So werden die Kosten für die Steuerung der CFV sind im WIK-NGN Modell in den Hardware-Kosten - den Kosten für Network Element Manager - abgebildet. Bereits heute erfordert diese methodische Vorgehensweise eine entsprechende Zurechnung von Kosten auf die Netzelemente.

Durch die Einführung von SDN/NFV ist jedoch eine verstärkte Zentralisierung der Kontrollfunktionen zu erwarten. Um einem bottom-up Modellierungsansatz zu verfolgen, könnte modelltechnisch ein separater Investitionsblock für ein Netzmanagementsystem definiert werden, welcher mit der Größe des jeweiligen Netzes skalierbar sein sollte.

Denkt man jedoch an die darauf folgende Entwicklungsstufe von SDN/NFV, so wäre es sogar denkbar, dass die Netzbetreiber ihre Netzmanagementdienste nicht selbst produzieren, sondern bei Anbietern von Cloud-Lösungen einkaufen. Die für solche Fälle können die in den Geschäftsmodellen angewendeten bezugsgrößen und Einkaufspreise für eine bottom-up Modellierung herangezogen werden. Alternativ können die Kosten über die OPEX erfasst werden. Soll dies in Form von mark-up Faktoren erfolgen, setzt dies ein entsprechendes Benchmarking voraus, was erfahrungsgemäß für neue Technologien beschränkt verfügbar ist. Insgesamt ist davon auszugehen, dass die Relevanz der OPEX im Vergleich zu CAPEX in der Zukunft steigen wird.

5.4 Kosten für Bitstromzugang/VULA

Wie in Abschnitt 2.3.2 dargestellt, handelt es sich bei CFV um eine Form virtualisierter Kanäle mit definierten QoS zur Erbringung garantierter Bandbreiten im B2B Markt. Mit SDN/NFV würde sich diese Form der Virtualisierung auch auf andere Vorleistungsprodukte wie den Bitstromzugang oder VULA erweitern lassen. Über Network Slices ließen sich auf Basis des physischen Netzes Kanäle definieren, die in ihren Konfigurationen auf die jeweiligen Anforderungen des Dienstes in Bezug auf Verfügbarkeit, Bandbreite, Bandbreitenvarianz, Latenz/Delay, Jitter und Paket Loss zugeschnitten sind.⁴⁶

Ähnlich wäre es vorstellbar, dass wie im Mobilfunk beim Nationalen Roaming, ganze Network Slices als Vorleistungsprodukte eingeführt werden, in denen ein Zugangssuchender Freiheiten in der Konfiguration erhält, um sich nicht nur über den Preiswettbewerb sondern auch in der Produktausgestaltung vom Wholesale-Anbieter unterscheiden zu können.

Für den Netzbetreiber ergäbe sich aus dem Network Slicing, dass die Kosten der zentralisierten Steuerungssysteme auf mehrere Dienste aufzuteilen wären. Auch sind die Kosten der Kontrollschicht für Network Slicing geringer als für die dezentrale Steuerung in den herkömmlichen Netzen ohne SDN/NFV. Eine Kostenzurechnung der Kontrollelemente entlang der Dienste nach deren Kostentreiber (Bandbreiten, Verbindungsversuche, Anzahl der Produkte/ Anschlüsse) wäre zu definieren, ähnlich wie dies bei der Zurechnung von Ressourcen (Transportkapazitäten) im Kernnetz in All-IP Netzen bereits der Fall ist. Es ist zu erwarten, dass diese Entwicklung zu einer Reduktion der LRIC der Bitstromprodukte führen würde. Zudem könnte die flexiblere Zuteilung von Ressourcen in der Plattform – ähnlich wie bei den Pure LRIC der Festnetz-Terminierung - zu weniger sprungfixen Kosten bei der Berechnung von Dienstes-Inkrementen führen.

Schließlich verringert die vereinfachte Provisionierung die Bereitstellungskosten und macht manche zusätzlichen Dienste erst möglich. So kann mit SDN/NFV die Einrichtung von Endkundenprofilen, die Inbetriebnahme und die Rechteverwaltung automatisierter und somit schneller als in der Vergangenheit erfolgen, was zu relevanten Senkungen der OPEX führen könnte.

⁴⁶ S. hierzu auch die Beschreibung der unterschiedlichen Bitstromprodukte im Abschnitt 3.4.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

SDN und NFV sind die nächste Evolutionsstufe für Telekommunikationsnetze nach der All-IP-Umstellung und der sog. Next Generation Networks. Ihre Einführung ist kein einmaliger Quantensprung, sondern die Evolution ist eher sanft und erfolgt Schritt für Schritt. Dennoch wird sie umfangreiche Auswirkungen auf die Fähigkeiten der Netze zur Individualisierung der Dienste und die Kosten hierfür haben.

Bereits heute werden SDN- und NFV-Ansätze in Unternehmen mit steigender Tendenz eingesetzt. Die Umstellung auf mehr software- statt hardwarebasierte Netze mit virtuellen Maschinen ist für Unternehmen mehr eine Frage der Zeit, als eine Frage des ob.

Ein SDN/NFV-orchestriertes Netz wird andere Kostenstrukturen vorweisen als die heutigen Netze der Mobil- und Festnetzbetreiber. Eine gesteigerte Effizienz der Netze, die durch die Virtualisierung von Funktionen und Zentralisierung der Netzsteuerung im Rahmen von SDN/NFV induziert wird, läßt eine Senkung des Gesamtkostenniveau erwarten.

Das Niveau der CAPEX wird sinken, da Steuerungselemente nur noch an zentralen Netzstandorten vorgehalten werden müssen und nicht an einem Vielfachen der Netzknoten. Dort werden zunehmend kostengünstigere White Boxes Verkehr zentral gesteuert vermitteln, wo zuvor spezialisiertes, aufwendiges Equipment Verkehr von Knoten zu Knoten leitet. Darüber hinaus wird durch eine zentrale und flexible Steuerung des Netzes eine bessere Ressourcenauslastung erzielt werden können. Somit wird mit der Vermeidung sprungfixer Kosten eine weitere Reduktion des CAPEX-Niveaus einhergehen.

Auch für die OPEX steht eine Reduktion zu erwarten, da sich der Aufwand der Netzsteuerung und –überwachung durch die Zentralisierung und vereinfachten Bedienbarkeit der Intelligenz vereinfachen wird. Gleichzeitig eröffnen sich dem Netzbetreiber durch SDN/NFV zunehmende Möglichkeiten, eine Auslagerung von Teilen des Netzbetriebs zu vollziehen und beispielsweise als Cloudlösung zu betreiben. Dies würde CAPEX operationalisieren und somit das gegenwärtig bestehende Verhältnis von CAPEX und OPEX hin zu OPEX verschieben.

Neben den Einflüssen auf die Kostenstruktur der Netze, erhöhen sich durch die Virtualisierung von Netzen und die zentralisierte Steuerung der physischen Netzelemente die Möglichkeiten der flexiblen Netzsteuerung und Ressourcenallokation und beispielsweise durch Network Slicing auch die Anpassungsfähigkeit an Kunden- und Diensteanprüche. Verminderte Netzkomplexität erleichtert das Monitoring der Telekommunikationswege, was sich positiv auf die Sicherheit auswirken wird. Es wird abzuwarten sein, wie viel Mitgestaltungsmöglichkeit die Hardwareentwickler den Endnutzern überlassen werden, indem sie ihre APIs entweder schützen oder öffnen. Offene APIs würden die Ausgestaltungs- und Differenzierungsmöglichkeiten bzgl. der ggf. individuellen Kunden-

bedürfnisse weiter erhöhen und die Migrationsgeschwindigkeit hin zu SDN/NFV-basierten Netzen vergrößern.

Wie beschrieben, wird die Umsetzung von SDN/NFV Auswirkungen auf die Kostenstrukturen der Mobil- und Festnetzbetreiber haben und somit auf die regulierten Vorleistungsprodukte. Ungeachtet dieser abzuwartenden Entwicklung wird die Notwendigkeit, Kosten gemeinsamer Produktion auf verschiedene Dienste und Vorleistungsprodukte zu verteilen, steigen. Offen bleibt, in welchem Rahmen die nationalen Netzbetreiber die sich bietenden Optionen einer Ausgliederung von Steuerungsfunktionen in Anspruch nehmen werden und bzw. oder Dritten die Möglichkeit bieten, die von ihnen nachgefragten Dienste einzurichten. Soweit passive Infrastruktur eine notwendige Voraussetzung für die Realisierung der Dienste darstellt, ist davon auszugehen, dass die nationalen Betreiber nach wie vor den Zugriff auf diese Ressourcen werden kontrollieren wollen. Sich eröffnende Konfigurationsmöglichkeiten für Vorleistungsnachfrager werden weiterhin Beschränkungen aufweisen. Diese in ihrer Wettbewerbskonformität zu beurteilen, wird vermutlich auch zukünftig im Aufgabenbereich von Regulierungsbehörden liegen.

7 Literaturverzeichnis

- 5G PPP. (2017). *Vision on Software Networks and 5G*.
- 5G PPP Architecture Working Group. (2016). *View on 5G Architecture*.
- ACG Research. (2019). *ACG Research | Transport Services | 2019*.
- Arnold , R., Bonneau , V., Bott , J., Djurica , M., Holtzer , A., Plückebaum , T., et al. (2015). *Implications of the emerging technologies Software-Defined Networking and Network Function Virtualisation on the future Telecommunications Landscape* .
- Agarwal , A. (2012). *SDN@Google*.
- Applied Science and Technology Research Institute. (2015). *Network Functions Virtualization (NFV) for Next Generation Networks (NGN)*.
- Arthur D Little. (2015). *Reshaping the future with NFV and SDN - The impact of new technologies on carriers and their networks*.
- BEREC. (2016). *Input Paper on Potential Regulatory Implications of Software Defined Networking and Network Functions Virtualisation*.
- Elbanna, A. (2019). *WIK Diskussionsbeitrag Nr. 449; 5G Status Studie*.
- ETSI. (2012). *Network Functions Virtualisation - An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action*.
- ETSI. (2013). *ETSI GS NFV 002 V1.1.1 (2013-10); Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework*.
- ETSI. (2014). *ETSI GS NFV 002 V1.2.1 (2014-12); Network Functions Virtualisation (NFV)*.
- Europäische Kommission. (2014). *Empfehlung der Kommission über relevante Produkt- und Dienstmärkte des elektronischen Kommunikationssektors*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32014H0710>.
- Gantumur, T., Stronzik, M., Wolter, L., Stumpf, U., Pennings, C., Chaillou, V., et al. (2016). *Regulatory, in particular access, regimes for network investment models in Europe (SMART 2015/0002)*.
- Kreutz, D., Ramos, F., Esteves Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2015). *Software-Defined Networking: A Comprehensive Survey*.
- Kreutz, D., Ramos, F., Estevez Verissimo, P., Esteve Rothenberg, C., Azodolmolky, S., & Uhlig, S. (2015). *Software-Defined Networking: A comprehensive survey*.
- Lemstra, W. (2018). *SMART 2018/0082 - Task 1 - Identify the relevant trends at EU level Subtask 1: Technological developments: the dawn of a new era*.
- Liang, G., & Li, W. (2018). *A novel industrial control architecture based on Software-Defined Network*.
- Maennel , O. (2016). *Application Layer of Software Defined Networking: pros and cons in terms of security*.

- Markova, V., & Schnitter, S. (2018). *SDN und NFV unterstützen die Transformation von Telekommunikationsunternehmen*.
- Metzler, J., & Metzler, A. (2015). *The 2015 Guide to SDN and NFV*.
- New IP Agency. (2016). *Interoperability Showcase 2016*.
- Open Network Foundation. (2016). *Threat Analysis for the SDN Architecture*.
- Open Networking Foundation. (2016). *Framework and Architecture for the Application of SDN to Carrier Networks*.
- Open Networking Foundation. (2016). *SDN Architecture*.
- Open Networking Foundation. (n.d.). *Use Cases for Carrier Grade SDN*.
- PCCW Global. (2020). *PCCW Global - Console Connect*. Retrieved 03 30, 2020, from [www.pccwglobal.com: https://www.pccwglobal.com/our-services/software-defined-network/console-connect/](https://www.pccwglobal.com/our-services/software-defined-network/console-connect/)
- Rao, S. (2014). *SDN and its use-cases- NV and NFV*.
- Shehata, M., Elbanna, A., Musumeci, F., & Tomatore, M. (2018). *Multiplexing Gain and Processing Savings of 5G Radio-Access-Network Functional Splits*.
- Shehata, M., Elbanna, A., Musumeci, F., & Tomatore, M. (2018). *Multiplexing Gain and Processing Savings of 5G Radio-Access-Network Functional Splits*.
- T-Systems. (2016). *White PaPer All-IP*.

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

- Nr. 383: Andrea Liebe, Christine Müller:
Energiegenossenschaften im Zeichen der Energiewende, Januar 2014
- Nr. 384: Christan M. Bender, Marcus Stronzik:
Verfahren zur Ermittlung des sektoralen Produktivitätsfortschritts - Internationale Erfahrungen und Implikationen für den deutschen Eisenbahninfrastruktursektor, März 2014
- Nr. 385: Franz Büllingen, Annette Hillebrand, Peter Stamm:
Die Marktentwicklung für Cloud-Dienste - mögliche Anforderungen an die Netzinfrastruktur, April 2014
- Nr. 386: Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Smart Metering Gas, März 2014
- Nr. 387: René Arnold, Sebastian Tenbrock:
Bestimmungsgründe der FTTP-Nachfrage, August 2014
- Nr. 388: Lorenz Nett, Stephan Jay:
Entwicklung dynamischer Marktszenarien und Wettbewerbskonstellationen zwischen Glasfasernetzen, Kupfernetzen und Kabelnetzen in Deutschland, September 2014
- Nr. 389: Stephan Schmitt:
Energieeffizienz und Netzregulierung, November 2014
- Nr. 390: Stephan Jay, Thomas Plückebaum:
Kostensenkungspotenziale für Glasfaseranschlussnetze durch Mitverlegung mit Stromnetzen, September 2014
- Nr. 391: Peter Stamm, Franz Büllingen:
Stellenwert und Marktperspektiven öffentlicher sowie privater Funknetze im Kontext steigender Nachfrage nach nomadischer und mobiler hochbitratiger Datenübertragung, Oktober 2014
- Nr. 392: Dieter Elixmann, J. Scott Marcus, Thomas Plückebaum:
IP-Netzzusammenschaltung bei NGN-basierten Sprachdiensten und die Migration zu All-IP: Ein internationaler Vergleich, November 2014
- Nr. 393: Stefano Lucidi, Ulrich Stumpf:
Implikationen der Internationalisierung von Telekommunikationsnetzen und Diensten für die Nummernverwaltung, Dezember 2014
- Nr. 394: Rolf Schwab:
Stand und Perspektiven von LTE in Deutschland, Dezember 2014
- Nr. 395: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke, Petra Junk, Antonia Niederprüm:
Produktive Effizienz von Postdienstleistern, November 2014
- Nr. 396: Petra Junk, Sonja Thiele:
Methoden für Verbraucherbefragungen zur Ermittlung des Bedarfs nach Post-Universaldienst, Dezember 2014
- Nr. 397: Stephan Schmitt, Matthias Wissner:
Analyse des Preissetzungsverhaltens der Netzbetreiber im Zähl- und Messwesen, März 2015
- Nr. 398: Annette Hillebrand, Martin Zauner:
Qualitätsindikatoren im Brief- und Paketmarkt, Mai 2015
- Nr. 399: Stephan Schmitt, Marcus Stronzik:
Die Rolle des generellen X-Faktors in verschiedenen Regulierungsregimen, Juli 2015
- Nr. 400: Franz Büllingen, Solveig Börnsen:
Marktorganisation und Marktrealität von Machine-to-Machine-Kommunikation mit Blick auf Industrie 4.0 und die Vergabe von IPv6-Nummern, August 2015
- Nr. 401: Lorenz Nett, Stefano Lucidi, Ulrich Stumpf:
Ein Benchmark neuer Ansätze für eine innovative Ausgestaltung von Frequenzgebühren und Implikationen für Deutschland, November 2015
- Nr. 402: Christian M. Bender, Alex Kalevi Dieke, Petra Junk:
Zur Marktabgrenzung bei Kurier-, Paket- und Expressdiensten, November 2015

- Nr. 403: J. Scott Marcus, Christin Gries, Christian Wernick, Imme Philbeck:
Entwicklungen im internationalen Mobile Roaming unter besonderer Berücksichtigung struktureller Lösungen, Januar 2016
- 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 Zustelllogistik, 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

ISSN 1865-8997