

# 5G Edge Cloud Architektur

Julian Beck

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Oliver Waldhorst

**Zusammenfassung** Die Edge Cloud wird in dem Zeitalter von 5G eine wichtige Rolle spielen. Als ein Bestandteil der 5G-Netzwerkarchitektur bietet sie nicht nur eine Vielzahl von Cloud-Ressourcen, sondern ermöglicht neue Plattformen für Drittanbieter und das Entwickeln von neuen Erfahrungen für Nutzer. Multi-Access Edge Computing (MEC) bietet Speicher- und Rechenressourcen in der Nähe des Endgerätes, eine besser Latenzzeit für mobile Endbenutzer und effizientere Nutzung des Mobile Backhaul- und Core Netzwerkes. Diese Seminararbeit erläutert, welche Technologien Multi-Access Edge Computing (MEC) ermöglicht und geht auf die Architekturen hinter MEC Computing ein.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	4
1.1	Aufbau der Seminararbeit .....	6
2	Benötigte Technologien .....	7
2.1	Edge Computing .....	7
2.2	5G Network .....	8
2.3	Network Function Virtualization .....	9
2.3.1	NFV Architektur und Orchestration Framework: .....	10
2.3.2	5G Edge Cloud und NFV .....	10
2.4	Software-defined Networking .....	11
2.5	Network-Slicing .....	12
2.6	Virtuelle Maschinen und Container .....	13
3	MEC Framework und Referenz Architektur .....	14
3.1	Multi-access Edge Referenz Architektur .....	14
3.1.1	Netzwerk Ebene .....	15
3.1.2	Distributed Host Level .....	15
3.1.3	MEC System Level .....	16
3.1.4	MEC-Services .....	18
3.2	Zusammenfassung .....	19
4	Integration von MEC und 5G .....	21
4.1	User Plane Function (UPF) .....	22
4.2	MEC- Kommunikation mit dem 5G Netzwerk .....	22
4.3	MEC Deployment in 5G .....	22
5	Mobilitätsmanagement in Mobile Edge Clouds .....	25
5.1	Verschieben der Anwendung und dessen Zustand .....	25
5.2	Aktualisierung des Routings für Mobilitätsupport .....	26
5.2.1	Problem .....	26
5.2.2	Aktualisieren des Routings .....	27
5.3	Ping-Pong Handover .....	30
5.3.1	Problem .....	30
5.3.2	Lösung .....	30
6	Multi-Access Edge Computing Scenarios .....	32
6.1	Cloud-Gaming, Remote Desktop .....	32
6.2	Smart Cities .....	33
6.3	Smart-Factory .....	34
7	Fazit und Ausblick .....	36
7.1	Ausblick .....	36
7.2	Angebote .....	36
	Literatur .....	37

# Akronyme

**3GPP** 3rd Generation Partnership Project. 9, 15, 25

**AF** Application Function. 22, 27, 28

**AMF** Core Access and Mobility Management Function. 8, 9

**AUSF** Authentication Server Function. 8, 9

**CFS** Customer Facing Service. 17

**CP** Control Pane. 9, 11, 22, 27

**CUPS** Control-/User Plane Separation. 8, 9, 11, 36

**DN** Data Network. 29

**ETSI** European Telecommunications Standards Institute. 4–6, 10, 14, 28, 30, 36

**IoT** Internet of Things. 7, 35

**MEC** Multi-Access Edge Computing. 1, 4, 6, 11–14, 21, 33

**MEO** MEC- Orchestartor. 29–32

**NEF** Network Exposure Function. 8, 21, 22, 28, 29

**NFV** Network Function Virtualization. 6, 8–12, 36

**NFVi** Network Function Virtualization Infrastructure. 10, 12, 15, 36

**NRF** Network Resource Funktion. 21

**NSSF** Network Slice Selection Function. 9

**OSS** Operation Support System. 17, 19

**PCF** Policy Control Function. 9, 22

**RAN** Radio Access Networks. 9, 10, 32

**RNIS** Radio Network Information Service. 26

**SBA** Service Based Architecture. 8, 12, 21, 27

**SDN** Software-Defined Networking. 6, 8, 11, 12, 36

**SMF** Session Management Function. 9, 22

**UDM** Unified Data Management. 9

**UE** User Equipment. 19, 25, 26, 28–30, 32, 33

**UP** User Pane. 9, 11, 12, 18, 22, 23, 26, 29

**UPF** User Plane Function. 2, 9, 22, 23, 26, 29, 30

**VM** Virtuelle Maschine. 12, 13, 32

**VNF** Virtualized Network Functions. 10–12

**WAN** Wide Area Network. 35

## 1 Einleitung

In den letzten zehn Jahren haben Fortschritte im Cloud-Computing einen zentralisierten Ansatz für die Systemadministration und den Systembetrieb verfolgt. Edge Computing gilt dabei als eine Evolution von Cloud Computing, in dem es das Hosten von Anwendung an den Netzwerkrand bringt, näher an den Benutzer und die Anwendungen die Daten generierten. Das Edge Computing ist eine der Schlüsseltechnologien der 5G-Mobilfunktechnik. Im Gegensatz zu den Mobilfunknetzwerken der dritten oder vierten Generation (3G oder 4G) ist die Unterstützung einer Edge Cloud von Beginn an in den 5G-Standards berücksichtigt und integriert wurden.

Die Abkürzungen MEC steht für Multi-Access Edge Computing. Dabei handelt es sich um eine Computer Architektur, die die Bereitstellung verteilter Services und Ressourcen an den Rand des Netzwerks verlegt. MEC wird vom European Telecommunications Standards Institute (ETSI) vorangetrieben und entwickelt.

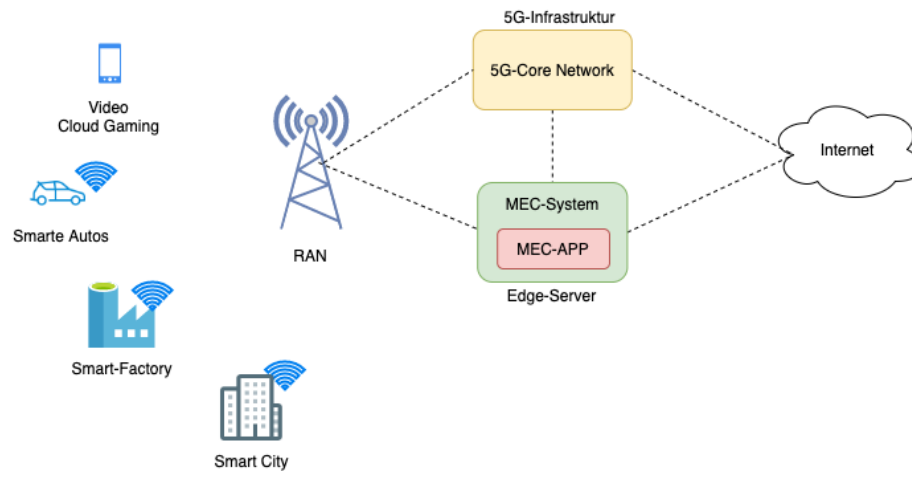
MEC ist nicht nur bei 5G zu finden, aber eine der wichtigsten Voraussetzung für diese. Die 5G-Architektur unterscheidet sich dadurch von den früheren Mobilfunkgenerationen, dass das MEC den latenzarmen Echtzeitzugang hoher Bandbreite zu den RAN-Daten umfasst. 5G-Netze, die auf den 5G-Spezifikationen des 3GPP-Projekts basieren, bieten sich für die Implementierung von MEC an. Diese 5G-Spezifikationen definieren die Voraussetzungen für das Edge-Computing und erlauben MEC und 5G, den Verkehr gemeinsam zu steuern. Neben der vorteilhaften Latenz und Bandbreite der MEC-Architektur ermöglicht die verteilte Rechenleistung eine höhere Anzahl von angeschlossenen Geräten, die untrennbarer Bestandteil der 5G-Bereitstellung und des sich entwickelnden Internet der Dinge (IoT) ist.

MEC bietet dabei Vorteile wie: [11][22]

- Reduzierter Datenverkehr im Kernnetzwerk
- Geringe Latenz und Datenverarbeitungszeit durch eine kurze Distanz zwischen Datenquelle und Server
- Hohe Verfügbarkeit
- Unterstützung für Echtzeitanwendungen

Mit der Hilfe des Multi-Access Edge Computing (MEC) verwandelt sich das 5G Mobilfunknetz in eine vielseitige Plattform zur Erbringung einer Vielzahl von Services. So ermöglicht MEC die Realisierung einer Vielzahl von Anwendungen: [25][9][13]

- Smart Cities
- Vehicle-to-Vehicle, Vehicle-to-Infrastructure
- Smart Factories
- Cloud Gaming
- Edge Video Caching



**Abbildung 1.1.** MEC und 5G

In dieser Arbeit wird in erster Linie auf die von ETSI veröffentlichte Architektur für ein MEC-System eingegangen.

## 1.1 Aufbau der Seminararbeit

Das zweite Kapitel dieser Seminararbeit **Benötigte Technologien 2** beschreibt grundlegenden Technologien die für ein MEC System benötigt werden. Dazu zählt Network Function Virtualization (NFV), Software-Defined Networking (SDN) aber auch die einzelnen Komponenten in einem 5G System.

Darauf aufbauend beschreibt das dritte Kapitel die von European Telecommunications Standards Institute definierte Architektur eines MEC-Systems und die einzelnen Komponenten.

Im vierten Kapitel wird erläutert wie das MEC-System in 5G integriert wird und wie die einzelnen Komponenten mit einander kommunizieren.

Einer der wichtigsten Aspekte in einem Mobilen Netzwerk ist das Mobilitätsmanagement. Das vierte Kapitel beschreibt wie ein MEC-System mit der Mobilität von Nutzern umgeht.

Das sechste Kapitel zeigt Szenarien in denen MEC eingesetzt werden kann. Es wird beispielsweise der Einsatz eines MEC-Systems in einer Smart Factory und die daraus entstehenden Vorteile erläutert.

Das letzte Kapitel zieht ein Fazit zum Multi-Access Edge Computing und gibt einen Ausblick über die Zukunft der Technologie. Des Weiteren wird auf die aktuellen Probleme für das Einsetzen von MEC eingegangen.

## 2 Benötigte Technologien

### 2.1 Edge Computing

Bei Cloud-Computing werden Rechenressourcen über das Netzwerk zur Verfügung gestellt. Beim Edge-Computing wird die Berechnung und Speicherung von Daten in die Nähe der Quelle gebracht, an den sogenannten Rand oder *Edge* des Netzwerks. Im Gegensatz zum Cloud-Computing werden die Daten nicht in zentralen Rechenzentren verarbeitet, sondern an dezentralen Cloud Systemen am Rand des Netzwerks. Edge-Computing bietet dabei folgende Vorteile: [26] [17]

- **Geschwindigkeit und Latenz:** Abhängig von der Anwendungen spielt die Zeit der Datenverarbeitung eine entscheidende Rolle. Beispielsweise bei autonomen Fahrzeugen ist es wichtig, dass innerhalb von Millisekunden die Daten verarbeitet werden. Auch bei Smart Factories (Abschnitt: ??) ist es ineffizient die Daten zu einer zentralen Cloud für die Verarbeitung zu senden. Wenn die Datenverarbeitung auf den Rand des Netzwerks verlegt wird, wird die Latenz des Netzwerks verringert und schneller auf Anfragen geantwortet.
- **Netzlast:** Da die Daten nicht zu einer zentralen Cloud gesendet werden, sondern am Rand des Netzwerks verarbeitet werden, verringert sich nicht nur die Latenz, sondern auch die Netzlast des gesamten Netzwerks. Die Daten müssen nicht über das WAN gesendet werden, stattdessen werden sie dezentral in der Nähe der Anwendungen verarbeitet.
- **Security:** Wenn Daten in einer zentralen Cloud verarbeitet werden, kann dies zu Nachteilen über die Sicherheit eines Systems führen. So kann beispielsweise ein DDoS-Angriff den gesamten Betrieb eines Unternehmens blockieren, wenn alle Systeme mit einer zentralen Cloud arbeiten. Da bei Edge-Computing kein einziges zentrales System existiert, verringert sich die Auswirkung eines solchen Angriffes für das ganze Unternehmen. Edge Computing hilft Unternehmen auch dabei, die Probleme der lokalen Compliance- und Datenschutzbestimmungen zu überwinden, da die Daten auf lokalen Systemen verarbeitet werden.
- **Kosteneinsparungen:** Durch Internet of Things (IoT) Geräte oder von Smart-Cities 6.2 werden eine Vielzahl an Daten generiert. Nicht alle Daten sind dabei kritisch für die Operation der Systeme. Edge Computing erlaubt das Kategorisieren der Daten. In dem ein Großteil der Verarbeitung am Rand des Netzwerks stattfindet wird Bandbreite eingespart. Dies optimiert den Datenfluss von lokalen Anwendungen und minimiert so die Betriebskosten einer zentralen Cloud.
- **Zuverlässigkeit:** Wenn ein Edge-Cloud Daten lokal speichern und verarbeiten können, verbessert dies die Zuverlässigkeit. Ein Unternehmen ist nicht auf die Verbindung zu einer zentralen Cloud angewiesen und eine vorübergehende Unterbrechungen der Verbindung hat keine Auswirkungen auf den Betrieb von Geräte, wenn diese die Verbindung zur Cloud verloren haben.

## 2.2 5G Network

Das 5G-Netzwerk wurde entwickelt um auch von der Industrie genutzt zu werden. Dies wird durch Techniken wie Network Function Virtualization und Software-Defined Networking ermöglicht. [7] Klassischerweise wurden mobile Netzwerke in erster Linie für Endgeräte wie Smartphones und Laptop konzipiert. Dies ändert sich bei dem 5G Netzwerk. Durch eine Vielzahl von Anwendungen und unterschiedliche Anforderungen, muss das Netzwerk so designt sein, dass es alle Forderungen der Industrie und des Endverbrauchers erfüllt.

Um den neuen 5G-Anforderungen 10 Gbit/s Datenrate, 1 ms End-to-End-Latenz, und 99:99% Serviceverfügbarkeit gerecht zu werden setzt 5G auf Technologien wie Control-/User Plane Separation (CUPS), Network Function Virtualization (NFV) und MEC.

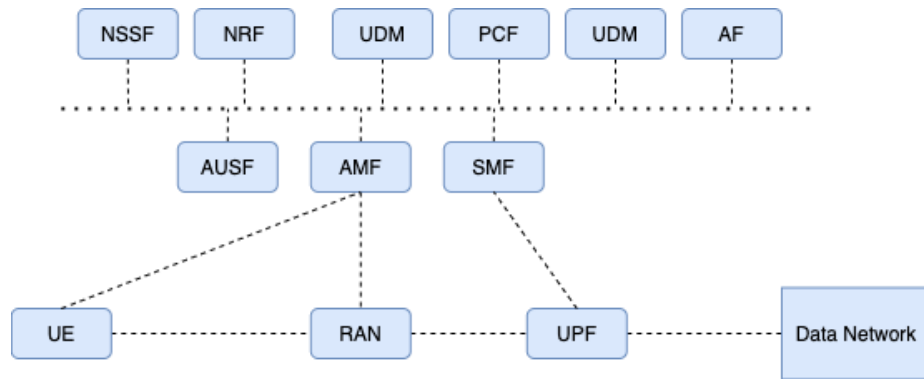


Abbildung 2.1. Service Basierte Architektur

Die Darstellung 2.1 zeigt die einzelnen Komponenten in Form einer Service Based Architecture (SBA). [1] Das 5G Netzwerk besteht aus sogenannten Netzwerkfunktionen (Abschnitt: 2.3), die softwarebasiert sind und so nach Bedarf angepasst/skaliert werden können. Die 5G CP ist das Kernnetz, dass aus einer Reihe von Netzwerkfunktionen besteht, die für die Separierung, Priorisierung und Zugriffssteuerung erforderlich sind:

- **Authentication Server Function (AUSF)** dient als Authentifizierungsserver
- **Core Access and Mobility Management Function (AMF)** ist für die Integrität, Registrierungsmanagement, Verbindungsmanagement, Zugriffs und Securitymanagement zuständig
- **Network Exposure Function (NEF)** verbreiten von Funktionen und Events, sichere Bereitstellung von Informationen aus externen Anwendungen für das 3GPP-Netzwerk. Diese Funktion ist vor allem für die Mobilität in der 5G Edge Cloud wichtig, was in Abschnitt 5 erläutert wird.



- **Session Management Function (SMF)** Sitzungsverwaltung, Zuweisung von IP Adressen an die Endgeräte.
- **Unified Data Management (UDM)** Generierung von Anmeldeinformationen für Authentifizierungen, Verwalten der Benutzeridentifikation und Zugriffsautorisierung.
- **User Plane Function (UPF)** Datenrouting und Weiterleitung. Dateninspektionen. Die UPFs spielt eine zentrale Rolle für das Mobilitätsmanagement, was in Kapitel 5 erleutert wird.
- **Policy Control Function (PCF)** Bereitstellung von Richtlinien für Funktionen, Zugriff auf Abonnementinformationen
- **Radio Access Networks (RAN)** Funkzugangsnetz
- **Network Slice Selection Function (NSSF)** kann vom AMF verwendet werden, um bei der Auswahl der Network Slice-Instanzen zu helfen, die Anfrage von einem Gerät benötigt werden. Bei der 5G Architektur sind die Netzwerkfunktionen der Control Plane (CP) von der User Plane (UP) getrennt, was als Control-/User Plane Separation (CUPS) bezeichnet wird. Aufgaben der CP ist das Verwalten der Benutzerverbindungen, Richtlinien sowie Authentifizierung während die UP für die Weiterleitung des Datenverkehrs zuständig ist. Die Motivation hinter CUPS ist die unabhängige Skalierung der User Plane, um den Netzbetrieb eine flexible Dimensionierung des Netzwerks zu ermöglichen. Wenn beispielsweise der Datenverkehr zunimmt, können User Plane Functions hinzugefügt werden, ohne die Control Plane zu beeinträchtigen. Teile der CP Netzwerkfunktionen wie AUSF, PCF, UDM, AMF und SMF. Zu der UP gehören die UPF. [1] [2]

### 2.3 Network Function Virtualization

Network Function Virtualization (NFV) erlaubt es Netzwerkfunktionen, von der Hardware zu entkoppeln. Dies ermöglicht das Verwenden von Gateways, Firewalls, DNS Services und Caching ohne proprietär Hardware.

Um ein neues Netzwerk zu erstellen, wird in der Regel eine Vielzahl von verschiedenen Hardware Komponenten benötigt. Diese benötigen Platz, Energie und müssen von qualifizierten Personal überwacht und gewartet werden. Network Function Virtualization will dieses Problem lösen, indem mithilfe von Virtualisierungstechniken, Netzwerkfunktionen auf Standard Server Hardware Komponenten betrieben werden. Folgende Vorteile werden durch NFV erzielt: [20] [14]

- **Skalierbarkeit und Flexibilität:** Die Virtualisierung erlaubt eine einfache Skalierung der Ressourcen. Bei einer großen Nachfrage eines Services kann dieser skaliert werden. Es können auch schnell weitere Instanzen einer Netzwerkfunktion gestartet werden.
- **Kosteneinsparungen:** Durch die Verwendung von Standard Komponenten werden die Kosten und der Energieverbrauch minimiert.

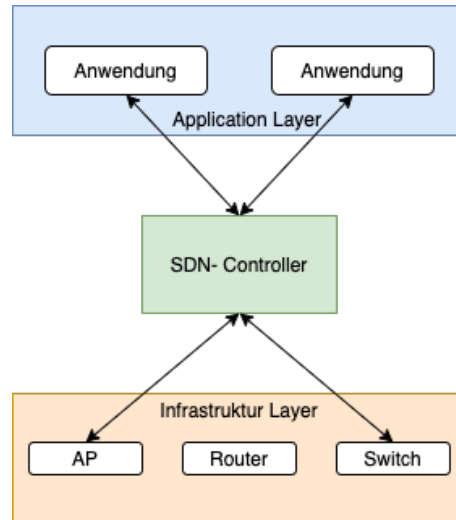
- **Anpassungsfähigkeit:** Die Virtualisierung erlaubt eine schnelle Anpassung an die Anforderungen eines Kunden. Die Server können durch der Virtualisierung von mehreren Nutzern gleichzeitig verwendet werden und die Anforderungen des jeweiligen Kunden erfüllen. Dies wird auch als Network Slicing bezeichnet.

**2.3.1 NFV Architektur und Orchestration Framework:** ETSI hat ein Standard für ein NFV Framework veröffentlicht. Dieser Standard definiert sogenannte Virtualized Network Functions (VNF), welche Netzwerkfunktionen in Software abbilden. Die VNF werden in der Network Function Virtualization Infrastructure (NFVi) gehostet. Die NFVi besteht aus gewöhnlichen den Hardware Komponenten wie CPU und Speicher, aber auch einem Virtualisierungslayer. Der *NFV MANO* (NFV Management und Orchestrierung) Layer verwaltet die Infrastruktur und passt diese an die Anforderungen an. [14]

**2.3.2 5G Edge Cloud und NFV** Die Network Function Virtualization spielt eine Schlüsselrolle für die Umsetzung einer 5G Edge Cloud. NFV erlaubt *Network Slicing*, ein Aspekt der virtuellen Netzwerkarchitektur, mit dem mehrere virtuelle Netzwerke auf einer gemeinsam genutzten Infrastruktur bereitgestellt werden können. [24]

NFV ermöglicht die 5G-Virtualisierung, sodass physische Netzwerk in mehrere virtuelle Netzwerke unterteilt werden können. Dies erlaubt es unterschiedliche Radio Access Networks (RAN) verschiedene Arten von Diensten gleichzeitig anzubieten. Der Anwender merkt dabei kein Unterschied, da die *Network Slices* voneinander isoliert arbeiten. NFV ist für die Skalierbarkeit, Flexibilität und Migration in einer 5G Edge Cloud wichtig. Wenn Anfragen an eine Anwendung steigen, kann nicht nur die Ressourcen für diese Anwendung skaliert werden, sondern es kann auch durch das Hinzufügen weiterer Software Instanzen in der Network Function Virtualization Infrastructure (NFVi), die Netzwerkinfrastruktur mit skaliert werden. [16] [14]

## 2.4 Software-defined Networking

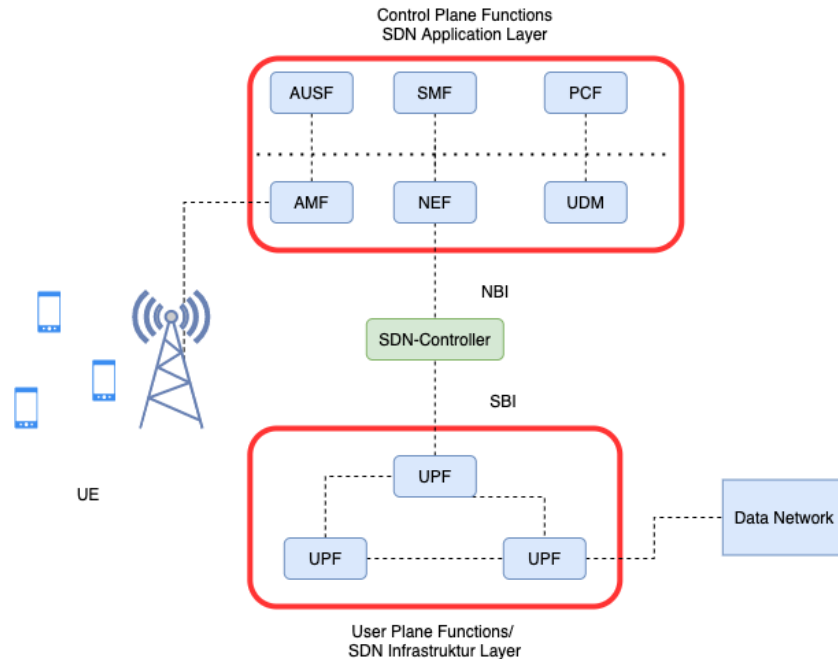


**Abbildung 2.2.** SDN Aufbau mit Northbound und Southbound API

Neben NFV, ist auch Software-Defined Networking für die Virtualisierung von Netzwerken wichtig. Bei einem SDN ist die Steuerung des Netzwerks von der Hardware getrennt. Es wird zwischen einem Controller, einer Southbound und einer Northbound API unterschieden. Die Northbound API, kommuniziert mit dem Application Layer, die Southbound API mit dem Infrastruktur Layer, was in 2.2 zu sehen ist. Die Southbound APIs führt die Anweisungen aus und gibt Informationen des Controllers an Netzwerkgeräte wie Switches, Access Points und Router weiter. Der Controller ist das zentrale Element eines SDN Netzwerkes, er ermöglicht ein zentrales Verwalten und Steuern des Netzwerkes. Die Northbound API gibt Informationen an den Controller weiter. Sie ist die Schnittstelle zwischen Anwendungen und dem SDN Controller.[23] [5]

Das Software-Defined Networking kann ein MEC unterstützen, indem es automatisch und flexibel Servicemanagement durchführt. Da bei einem SDN die User Plane (UP) und Control Plane (CP) durch die Southbound und Northbound API getrennt sind, führt SDN eine zentrale Steuerung ein, mit der VNF einfach gestartet und angeboten werden können. Die zugrunde liegende Netzwerkinfrastruktur wird so abstrahiert. Die Abstraktion von CP und UP ermöglicht im 5G eine bessere Implementation von Control-/User Plane Separation (CUPS). Die Grafik ?? zeigt die Controll-Netzwerkfunktionen von 5G in die über die Northbound API (NBI) mit dem SDN-Controller kommunizieren. Dieser steuert die UP des 5G Netzwerks über die Southbound API (SBI). Im Kontext von MEC

kann der SDN-Controller MEC bezogene VNF, VMs und Container als eine weitere Netzwerkkomponente behandeln, die dynamisch zugewiesen und neu lokalisiert werden können. So kann der SDN-Controller flexibel Services anpassen und dynamisch Dienste bereitstellen, indem er VNFs und MEC Dienste verbindet. Dies macht SDN zu einem zentralen Element für die Virtualisierung des MEC-Systems und für die Unterstützung der Mobilität. Kommt es beispielswei-



**Abbildung 2.3.** SDN in einer 5G SBA Architektur

se zu einer hohen Anfrage in einem 5G Netzwerk, wird das 5G-Netzwerk mittels NFV Technologien skaliert. SDN hat dabei die Aufgabe des Load-balancings zwischen MEC-Anwendungen und Netzwerkfunktionen. Dies erlaubt das schnelle Erstellen und veröffentlichen neuer MEC-Komponenten wie MEC-Plattform oder MEC-Anwendungen.

## 2.5 Network-Slicing

Die Kombination von SDN, NFV, NFVi erlauben zusammen das Erstellen von *Network Slices*. [7] *Network Slices* ist eine der wichtigsten Technologien im 5G Netzwerk und erweitert die Funktionsvirtualisierung (NFV) um eine neue Dimension, da sie es erlaubt, mehrere logische Netze gleichzeitig auf einer gemeinsamen physischen Infrastruktur zu betreiben. Network-Slicing bietet Anwendungen wie IoT, wo es eine extrem große Anzahl von Nutzern geben kann, aber die

insgesamt benötigte Bandbreite klein ist, deutliche Vorteile. Die Anpassungsfähigkeit des Netzwerks erlaubt, die Kosten, das Ressourcen-Management und die Flexibilität der Netzkonfigurationen zu optimieren. Da jeder Anwendungsfall eigene Anforderungen an das Netzwerk stellt, ist das Network-Slicing ein wichtiges Entwurfskriterium für die 5G-Netzarchitektur

## 2.6 Virtuelle Maschinen und Container

Eine Cloud Plattform besteht typischerweise aus einer Anzahl von Maschinen, die durch einen Hypervisor zu einer zentralen Maschine zusammen gefasst werden. Dieser kann isoliert virtuelle Maschinen erstellen und ausführen und dient als Abstraktionsebene, unabhängig von der Hardware auf denen die VMs laufen.

Eine leichtgewichtige Alternative zur Hypervisor-basierten Virtualisierung ist die Containergestützte Virtualisierung. Diese verwendet im Vergleich zu virtuellen Maschinen, eine andere Abstraktionsebene in Bezug auf Virtualisierung und Isolation. Container implementieren die Isolierung auf Betriebssystem Ebene und vermeiden so die Virtualisierung von Hardware und Treibern. Insbesondere teilen sich Container denselben Kernel mit dem zugrunde liegenden Hostcomputer. Dies macht Container sehr leichtgewichtig und flexibel im Gegensatz zu VMs. Typischerweise führt ein Container genau ein Service aus, was eine schnelle Migration ermöglicht.

Im Blick auf MEC ermöglichen Container eine leichtgewichtige Virtualisierungslösung. So eignen sich die Container als eine portable Laufzeit Umgebung für MEC-Dienste, die auch von MEC-Host zu einem weiteren migriert werden können. Einzelne Dienste können in Containern ausgeführt werden, sind so isoliert und können einfach verwaltet und gesteuert werden. Für die Umsetzung bietet sich die mittlerweile weitverbreitete Containerlösung Docker an. Hier stehen mit Kubernetes auch Orchestrierungs und Clustering Tools zur Verfügung [19]

### 3 MEC Framework und Referenz Architektur

Folgendes Kapitel zeigt die von European Telecommunications Standards Institute (ETSI) beschriebene Referenz Architektur zur Implementation eines MEC Systems.

ETSI beschreibt dabei in ihrer Spezifikation *Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture* [11] ein Framework und eine Referenz Architektur. Die Grafik 3.1 zeigt das MEC-Framework. Das MEC-Framework zeigt eine abstrahierte sicht der Komponenten eines MEC-Systems. Die Reference Architecture (Abbildung 3.2) bietet ein genauen Überblick der Komponenten und wie diese miteinander kommunizieren.

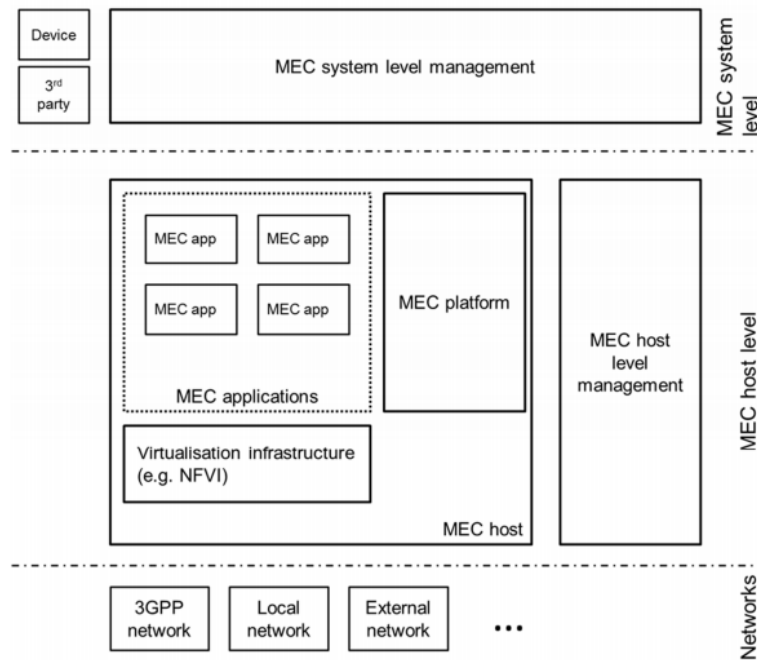
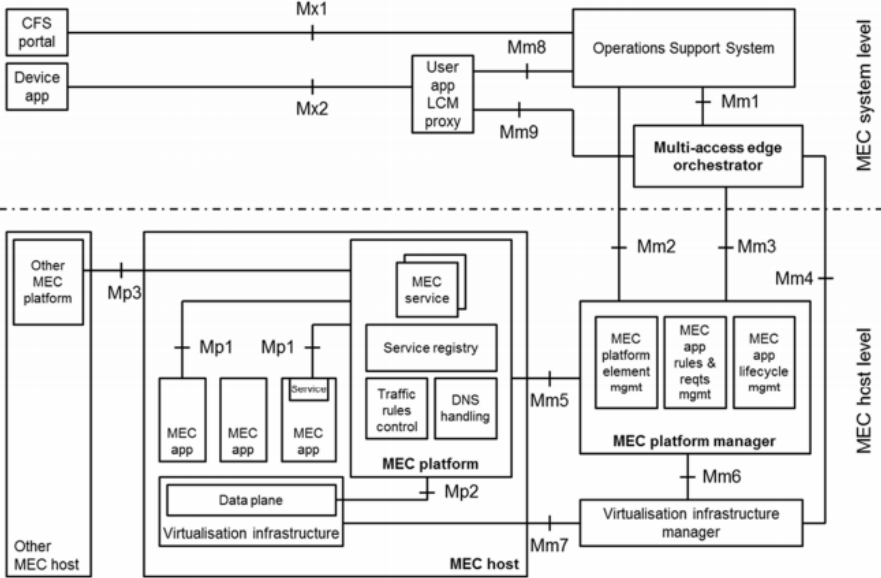


Abbildung 3.1. Multi-Access Edge Computing Framework [12]

#### 3.1 Multi-access Edge Referenz Architektur

Die Komponenten werden dabei auf Infrastruktur virtualisiert am Rande des Netzwerks ausgeführt. Dies ist möglich durch die in Kapitel 2 vorgestellten Technologien. Die Grafik 3.2 zeigt die Komponenten der Referenz Architektur. Die



**Abbildung 3.2.** Multi-Access Edge System Reference Architecture [12]

einzelnen Komponenten der MEC Framework und Referenz Architektur sind in folgende Ebenen unterteilt:

**3.1.1 Netzwerk Ebene** Die unterste Ebene des Frameworks ist die Netzwerk Ebene. Sie ermöglicht die Verbindung zu dem lokalen und externen Netzwerk. Die 3GPP Komponente steht für 3rd Generation Partnership Project, was ein Überbegriff für mobilen Telecommunications Standards wie LTE und 5G ist.

### 3.1.2 Distributed Host Level

Wie der Name schon sagt, gibt es mehrere MEC-Hosts, die im Netzwerk verteilt sind. Der MEC Host enthält die MEC Platform und die Infrastruktur auf denen die Anwendungen, in der Edge Cloud, betreiben werden. Die Infrastruktur stellt Rechen-, Speicher- und Netzwerkressourcen virtualisiert zu Verfügung. Als Virtualisierungslösung kann die in Kapitel 2.3 eingeführte Network Function Virtualization Infrastructure eingesetzt werden. Der MEC-Host beinhaltet folgende weitere Komponenten:

**MEC-Platform:** Die MEC-Plattform dient als eine Art Registry für Anwendungen, die auf der MEC-Infrastruktur laufen. Die Plattform bietet eine Umgebung, in der MEC-Anwendungen sich registrieren und anderen Anwendungen Anfragen stellen können. Die MEC-Plattform ist auch für DNS-Rekords zuständig. Sie nimmt Befehle des MEC-Platform-Managers entgegen und passt die DNS-Records und Proxies an. Des Weiteren verwaltet sie auch den Persistenten

## Speicher

**MEC-Anwendungen:** Multi-Access Edge Computing Anwendungen werden in einer Virtuellen Maschine oder als Container auf der Infrastruktur des MEC-Hosts ausgeführt. Die Anwendungen registrieren sich bei der MEC Platform Komponente, um darüber andere Anwendungen anzufragen und ihren Dienste zur Verfügung zu stellen. [10]

**MEC-Platform-Manager:** Der Platform-Manager verwaltet den Lifecycle der Anwendungen. Er startet, stoppt und startet diese neu. Gleichzeitig informiert er den MEC-Orchestrator über wichtige Events der Anwendungen. Eine weitere Aufgabe ist das Verwalten, Managen und Autorisierung von DNS Konfigurationen. Des Weiteren erhält der Platform-Manager Fehlerberichte und Informationen über die Infrastruktur von dem Virtualisierungs-Infrastruktur-Manager.

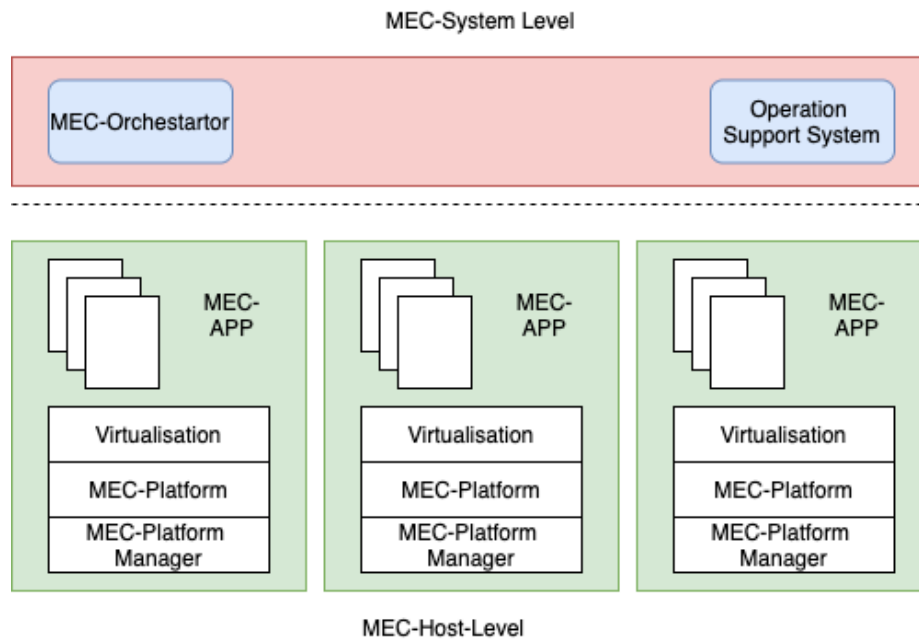
**Virtualization-Infrastruktur-Manager:** Eine weitere Komponente im Host Level, ist der Virtualization-Infrastruktur-Manager. Dieser ist für das Zuweisen, Verwalten und Freigeben von virtualisierten (Rechen-, Speicher- und Netzwerkressourcen) Ressourcen der Virtualisierungsinfrastruktur zuständig. Der Manager ist dabei auch für das Konfigurieren der Infrastruktur für ein neues Software Image verantwortlich. Dazu gehört das Herunterladen und Speichern der Images. Dabei kann der Manager auch Infrastructure-as-a-service Systeme wie Openstack unterstützen. Performance- und Fehlerdaten der Komponente werden von dem Manager gesammelt und weitergeleitet.

Kommt es zu einer Verschiebung einer Anwendung, wenn eine laufende Anwendung umgezogen wird, interagiert der Virtualization Infrastruktur Manager mit dem MEC-Host zusammen um den Handoff an die neue Cloud durchzuführen. Wie ein Handoff zwischen zwei MEC-Host abläuft wird in Kapitel 5 genauer erläutert.

**3.1.3 MEC System Level** Das MEC System Level ist übergreifend über mehrere MEC-Hosts (Abbildung 3.3)

**MEC- Orchestrator:** Der MEC-Orchestrator spielt eine zentrale Rolle, da er die Ressourcen und Funktionen des gesamten MEC-Systems im Blick hat. In vielerlei Hinsicht ähnelt dieser dem ETSI Network Functions Virtualization Orchestrator und hat ähnliche Aufgaben wie Orchestrierung und Kontrolle der Instanziierung, Lösung von Ressourcenkonflikten. Der MEC- Orchestrator ist verantwortlich für das Initialisieren, terminieren der Anwendungen, sowie das prüfen der Integrität und Authentizität. Der Orchestrator stellt sicher, dass ein MEC- Host der die Anforderungen an die Anwendung wie Latenz und Verfügbaren Ressourcen erfüllt, ausgewählt wird. Ist dies nicht der Fall ist es auch Aufgabe des Orchestrator, ein besseren Host zu finden und die Anwendungen zu migrieren.





**Abbildung 3.3.** MEC-System Level übergreifend über mehrere MEC-Hosts

**Operations Support System:** Das Operation Support System (OSS) ist die höchste Ebene, die eine Anwendung bei der Ausführung an einem Standort unterstützt. Das OSS empfängt Anforderungen zum Instanzieren und Beenden der mobilen Edge-Anwendungen von dem Customer Facing Service (CFS) und von den Endgeräten. Um diese zu erfüllen kommuniziert das Operation Support System mit dem MEC-Orchestartor.

**Customer Facing Service:** Der Customer Facing Service (CFS) dient als Schnittstelle für Drittanbieter und ähnelt Portalen wie bei Cloud-Plattformen. Dieser kommuniziert mit dem OSS.

**User App Lifecycle Management Proxy:** Der User App Lifecycle Management Proxy (User App LCM Proxy) ist eine Funktion, die Endgeräte anfordern können für Onboarding, Initialisierung und Terminierung der auf der Edge-Cloud laufenden Services. Stellt eine Endgerät eine Anfrage, autorisiert der Proxy die Anfrage und leitet diese an das OSS und den MEC- Orchestrator weiter. Die Endgeräte können so mit dem MEC- System über den Proxy kommunizieren und so auch beispielsweise das Umziehen einer Anwendung von einer externen Cloud in das MEC-System starten. Der User App LCM Proxy kann nur von dem Mobilien Netzwerk erreicht werden.

**3.1.4 MEC-Services** In einem MEC-System ist ein MEC-Service, ein Service, der von der MEC-Plattform oder von einer MEC-Anwendung konsumiert oder zur Verfügung gestellt werden kann. Wird der MEC-Service von einer Anwendung bereitgestellt, muss dieser sich in die Liste der Services auf der MEC-Plattform registrieren. MEC-Anwendungen können Services abonnieren, um Informationen zu erhalten. Beispielsweise gibt es Services die eine Anwendung benachrichtigen, wenn sich der Nutzer aus dem Funkbereich wegbewegt.

**Funknetz Informationsservice** An dem Funknetz Informationsservice können autorisierte Anwendungen Informationen über das Funknetz abfragen. Abonniert eine Anwendung diesen Service, erhält sie Informationen über den aktuellen Zustand des Funknetz und der UP. Die Anwendung erhält über den Service, die Informationen in regelmäßigen Abständen.

**Standort und Bandbreiten Service** Der Standort Service informiert Anwendungen über den Standort von Endgeräten, die derzeit von dem MEC-Host zugeordneten Funkknoten bedient werden. Es kann auch eine Liste aller Endgeräte an einem Standort abgefragt werden, sowie der Standort aller Funkknoten die dem MEC-Host zugeordnet sind. Diese Informationen sind wichtig für die Entscheidung, ob eine MEC-Anwendung zu einem dem Endgerät näheren MEC-Host wechseln soll.

Der Bandbreiten Service ermöglicht das Erhöhen der Bandbreite für bestimmten Datenverkehr von MEC-Anwendungen und damit die Priorisierung wichtiger Daten.

### 3.2 Zusammenfassung

Dieses Unterkapitel beschreibt, wie die zuvor erläuterten Komponenten des MEC-Systems zusammenarbeiten. Die Grafik 3.4 zeigt die Referenz Architektur. Wird eine neue MEC-Anwendung gestartet werden folgende Schritte durchgeführt:

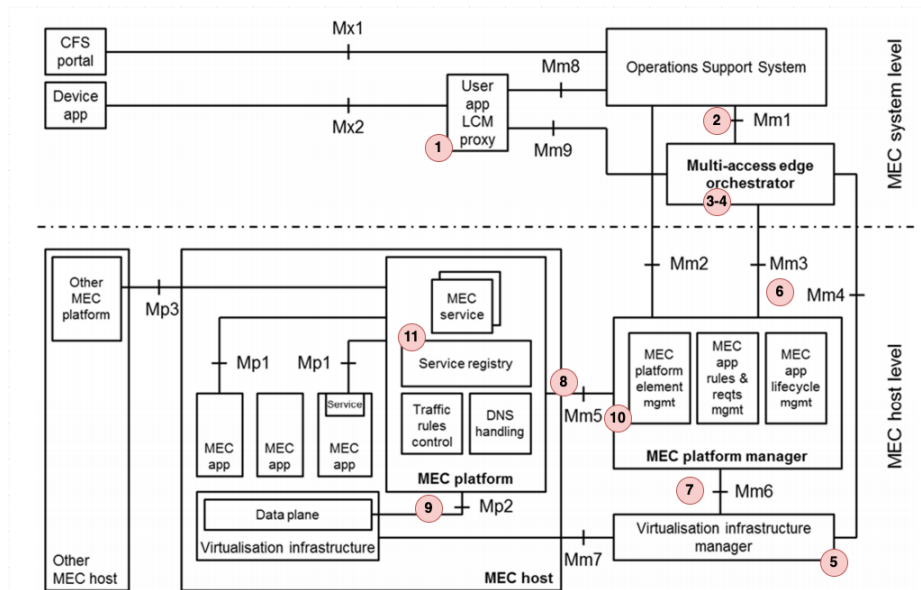


Abbildung 3.4. Schritte für das Starten einer MEC Anwendungen [12]

1. Die UE Anwendung stellt eine Anfrage für das Starten einer neuen Anwendung auf dem MEC-System. Die Anfrage läuft über den User App LCM Proxy. Dieser leitet diese an das Operation Support System weiter.
2. Das OSS gibt die Anfrage an den MEC- Orchestartor weiter.
3. Die Anfrage für das Starten einer neuen MEC- Anwendung enthält Informationen über die Anwendung und andere Informationen. Dies beinhaltet der Ort an dem die Anwendung ausgeführt werden soll, andere Anwendungsregeln und Anforderungen sowie den Speicherort des Anwendungsimage, falls dieses noch nicht im MEC-System vorhanden ist.
4. Anhand folgender Informationen wählt der MEC-Orchestartor ein geeigneten MEC-Host aus:
  - Latenzanforderungen an die Anwendung
  - Anforderung an den Ort (möglichst in der Nähe des UE)
  - Benötigte Speicher- und Rechenressourcen
  - MEC-Services die für die Anwendung benötigt werden
  - Mobilitätsanforderungen (muss die Anwendung umziehen, muss der Zustand der Anwendung umziehen)

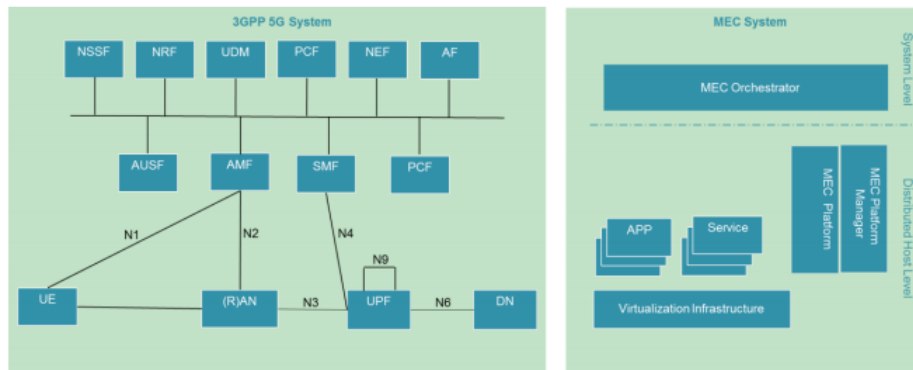
- Art des Hostens der Anwendung (Handelt es sich um eine Instanz pro Benutzer eine Instanz pro MEC-Host)
- Informationen über den Netzbetreiber des MEC-Hosts (Kosten, Funknetztopologie)

Der MEC-Orchestrator wählt anhand dieser Informationen ein oder mehrere MEC-Hosts aus und startet das Initialisieren der Anwendungen.

5. Für das Abfragen der verfügbaren Ressourcen kommuniziert der MEC-Orchestartor mit dem Virtualization-Infrastruktur-Manager.
6. Wurde ein passender MEC-Host gefunden, startet der MEC Platform Manager die Anwendung. der MEC-Platform Manager erhält von dem MEC-Orchestartor die Anforderungen der Anwendung.
7. Der MEC-Platform Manager kommuniziert mit dem Virtualization Infrastruktur Manager um die benötigten virtualisierten Ressourcen bereitzustellen. der Infrastruktur Manager lädt das benötigte Image für die Anwendung runter wenn dieses noch nicht Verfügbar ist.
8. Anschließend kommuniziert der MEC- Platform Manager mit der MEC-Platform um die Anwendung zu konfigurieren.
9. Die MEC- Platform konfiguriert das Routing des Datenverkehrs auf der Data-Plane der virtuellen Infrastruktur.
10. Der MEC- Platform Manager startet die Anwendung auf der virtuellen Infrastruktur.
11. Die Anwendung registriert sich bei der MEC-Platform in der Service Registry. Die MEC-Platform konfiguriert die DNS Regeln der Anwendung und verwaltet den Zugriff auf den Persistenten Speicher.

## 4 Integration von MEC und 5G

In der 5G-Systemspezifikation stehen zwei Optionen für die Architektur zur Verfügung. Eine mit dem traditionellen Interface Ansatz und eine weitere bei der die Netzwerkfunktionen des Kernnetzes mithilfe einer Service Based Architecture (SBA) verbunden sind. Hier wird die Service Based Architecture betrachtet. Bei SBA können die Netzwerkfunktionen Dienste bereitstellen oder konsumieren, eine Funktion kann auch mehrere Dienste anbieten. Für die effiziente Nutzung der Dienste, ist eine Registrierung, Service Discovery, Abmeldung sowie Authentifizierung und Autorisierung erforderlich. Die Abbildung 4.1 zeigt auf der linken Seite ein 5G-System in Form von SBA, die rechte Seite zeigt die MEC-Systemarchitektur aus Kapitel 3.



**Abbildung 4.1.** 5G Servicebasierte Architektur und MEC Systemarchitektur [5] [11], [12]

Dieser Abschnitt beschreibt, wie Multi-Access Edge Computing (MEC) in die 5G-Netzwerkumgebung integriert werden kann und welche Komponenten miteinander interagieren.

Die Netzwerkfunktionen und die Dienste, die diese zu Verfügungstellen, werden im 5G System in der Network Resource Funktion (NRF) registriert. Die NRF bietet damit eine Liste mit allen Diensten an. In einem MEC System werden die Dienste, die von den MEC-Anwendungen bereitgestellt werden, in der Service Registry in der MEC Platform registriert. Will eine Netzwerkfunktion im 5G Netzwerk ein Dienst nutzen, kann diese direkt mit der Funktion, die den Dienst zur Verfügungstellt interagieren, wenn diese authentifiziert ist. Die Network Exposure Function (NEF) im 5G System stellt auch Dienste an nicht-authentifizierte Komponenten zur Verfügung. Die NEF ist damit sehr wichtig für die Bereitstellung von Services, da sie Anfragen von nicht-authentifizierten Komponenten entgegennimmt.

#### 4.1 User Plane Function (UPF)

Für die Integration von MEC in ein 5G Netzwerk, spielt die User Plane Function (UPF) eine wichtige Rolle. Die UPF ist Teil der User Plane und ist eine Darstellung dieser in Netzwerkfunktion. Die UPF ist das Gateway zur Kontrollen und Weiterleitung von Nutzdaten. Sie dient als Verbindungspunkt für die mobile Infrastruktur und das Data Network (DN). Beispielsweise ist es für das packen und entpacken von getunnelten Daten verantwortlich. Darüber hinaus dient die UPF auch als Anker für die Mobilität, was besonders für das Mobilitätsmanagement wichtig ist. [18]

#### 4.2 MEC- Kommunikation mit dem 5G Netzwerk

Dieser Abschnitt beschreibt die Kommunikation des MEC Plattform mit 5G-Kerndiensten.

In einem 5G System, verhält sich das MEC-System wie eine Application Function (AF) für 5G. Ist die AF ein Teil des Netzbetreibers, ist diese registriert als ein Teil des Kernnetzwerkes. Die AF sendet Informationen wie MEC-Application Details und Routing-Informationen an die PCF. Diese benachrichtigt den SMF. Die Session Management Function verwendet die Informationen um neue Routing Regeln in der aktuellen UPF zu hinterlegen. Ist die UPF nicht an der aktuellen Lage verfügbar, erstellt die SMF eine neue UPF und hinterlegt die Routing-Regeln so, dass der Netzwerkverkehr des Endgeräts zu der MEC-Anwendung weitergeleitet wird.

Ist das MEC nicht Teil des Netzbetreibers, dann interagiert die AF mit der NEF um den Datenverkehr zu steuern. Nach der Autorisierung der AF, sendet der NEF Details über das Routing an den SMF. Ist die UPF verfügbar, fügt der SMF neue Routing-Regeln, ist dies nicht der Fall, wird eine neue UPF erstellt und die Routing-Regeln hinterlegt.

#### 4.3 MEC Deployment in 5G

In dem MEC- System auf der rechten Seite, agiert der MEC- Orchestrator auf der MEC-System Ebene. Dieser interagiert über die NEF oder direkt mit den einzelnen Netzwerkfunktionen des 5G Netzwerkes. Auf der MEC-Host Ebene, interagiert die MEC-Plattform mit den Netzwerkfunktionen des 5G Netzwerkes. Die MEC-Host Ebene ist meistens auf der UP des 5G Netzwerkes, während der NEF als Teil des CP als Systemlevel Funktion zentral eingesetzt wird. Wie Abbildung 4.3 zeigt, befindet sich das MEC-System auf der CP des 5G Netzwerkes.

Das 5G-Kernnetz kann aus einem oder mehreren UPFs, die zum Steuern des

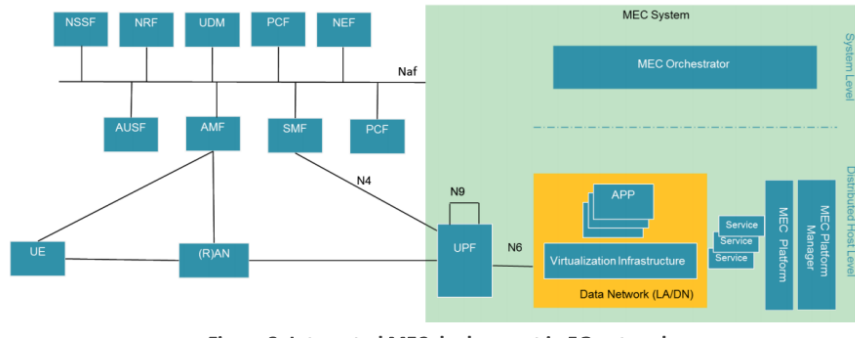


Abbildung 4.2. MEC in 5G [12]

Datenverkehrs zwischen MEC und dem 5G-Kernnetz konfiguriert sind. Alternativ kann die MEC-Plattform einen lokalem UPF bereitstellen. In einer einzelnen User Plane Function (UPF)-Konfiguration können 5G-Netz und MEC-Plattform nur mit einer User Plane Function (UPF) verbunden werden, der Regeln zum Weiterleiten von Datenverkehr an MEC oder Internet / Cloud enthält. In diesem Fall ist die einzelne UPFs Teil des MEC-Host. In einer Konfiguration mit meh-

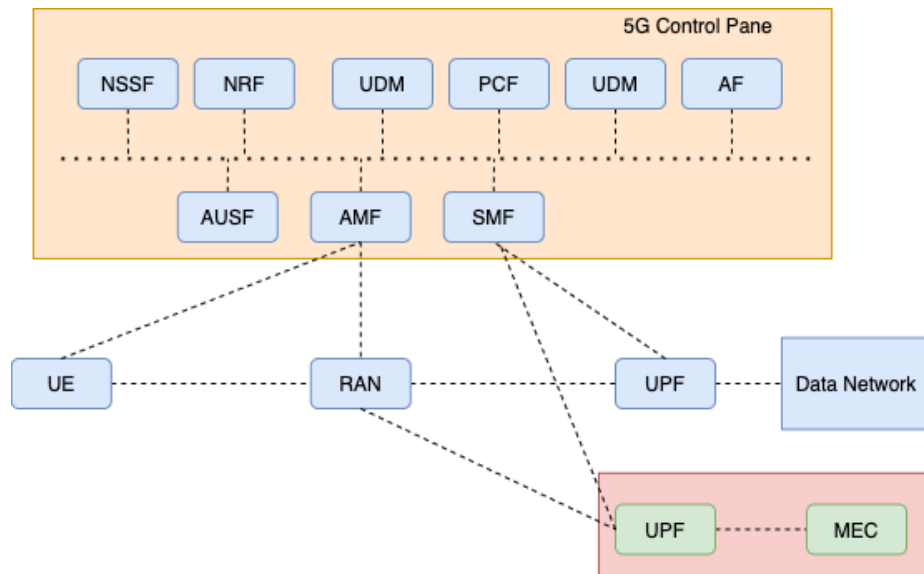


Abbildung 4.3. UPF in der UP und als Teil des MEC-Systems

renen User Plane Function (UPF)s leitet eine User Plane Function (UPF) den

Datenverkehr an die MEC-Anwendungen und eine anderer an Cloud- / Remote-Anwendungen weiter. Das MEC- System kann an verschiedenen Standorten in der Nähe der Base Station des 5G Netzwerkes eingesetzt werden.



## 5 Mobilitätsmanagement in Mobile Edge Clouds

Die Mobilität von Endgeräte im 3GPP Netzwerken, kann dazu führen, dass ein UE sich von einer Radio Station zu nächsten bewegt. Das Verwalten und Aufrechterhalten dieser Verbindungen in Funknetzen wird als Mobilitätsmanagement bezeichnet und ist eine Kernkomponenten von Funknetzen. Wird eine aktive Funkverbindung von einer Netzwerkzelle zu einer anderen weitergegeben, wird der Vorgang der Übergabe als Handoff oder Handover bezeichnet.

Die Mobilität des Endgerätes kann dazu führen, dass sich das UE zu einer anderen Zelle bewegt, die einem anderen MEC-Host zugeordnet ist. Es muss sichergestellt werden, dass der Datenverkehr richtig geroutet wird um das Ziel zu erreichen. Entfernt sich das Endgerät weiter vom Ort der MEC-Anwendung, kann dies dazu führen, dass die Latenz sich erhöht und die Deshalb ist es wichtig, dass je nach Anwendung, die laufende Anwendungsinstanz verschoben wird um die Latenz Anforderungen weiterhin zu erfüllen.

Die Häufigkeit eines wechsell der MEC Hosts, hängt stark von dem Einsatz ab. Bei der Verwendung von MEC für Autonomes Fahren treten häufiger Handover Event ein, wie bei beispielsweise in dem Szenario einer Smart Factory.

Die Mobilität eines UEs kann in weitreichenden MEC-Systemen vorhergesagt werden und die einzelnen MEC-Host demnach konfiguriert werden, dennoch muss der Zustand der Anwendung übertragen werden. Dieses Kapitel beschreibt wie verschiedene Handoff Events ablaufen. [12]

### 5.1 Verschieben der Anwendung und dessen Zustand

Bewegt sich das UE im Funknetz und ist möglicherweise ein anderer Ziel MEC-Host geeigneter als der aktuelle MEC-Host, muss die Anwendung umziehen. Die MEC-Anwendungen werden in zustandslose und zustandsbehaftete Anwendungen eingeteilt. Handelt es sich um eine zustandsbehaftete Anwendung, erfordert das Umziehen der Anwendung, ein synchronisieren des Zustands zwischen der aktuellen und der verschobenen Anwendungsinstanz, um Kontinuität zu gewährleisten zu können.

Das Synchronisieren des Zustands muss bei dem Entwickeln der Anwendungen berücksichtigt werden. Diese muss so konzipiert werden, dass die Anwendung in mehreren Instanzen auf unterschiedlichen MEC-Hosts betrieben werden kann. Für das Synchronisieren muss die Anwendungen das Einfrieren des Zustands und kopieren von einer Quell- Anwendung zu einer Zielanwendung unterstützen. Läuft die Anwendung noch nicht auf dem Ziel Host, muss diese initialisiert und gestartet werden. Nachdem die Anwendung gestartet ist, startet der Umzugsvorgang und der Zustand wird von dem aktuellen Host zu dem Ziel MEC-Host übertragen. Wenn der Zustand vollständig übertragen ist, stoppt die aktuelle Instanz und die Ziel Instanz übernimmt das kommunizieren mit dem Endgerät. [10]

Für das Erkennen von UE Mobilität zu einer neuen Zelle, abonniert die MEC Platform Radio Network Informationen die von dem Radio Network Information Service (RNIS) zu Verfügung gestellt werden. Mithilfe dieser Informationen

können UEs identifiziert werden, bei denen eine Zelländerung auftritt und bestimmen es kann bestimmt werden, ob diese sich aus dem Versorgungsbereich des aktuellen MEC-Hosts herausbewegen.

## 5.2 Aktualisierung des Routings für Mobilitätsupport

**5.2.1 Problem** Das MEC-System ist in der Lage flexibel User Plane Funktionen anzupassen je nach den Anforderungen oder Regeln des MEC-Systems und dem Zustand des Netzwerkes. Für das Mobilitätsmanagement ermöglicht dies, das flexible Lenken des Datenverkehrs auf der UP um die Verbindung zwischen dem Endgerät und der Anwendungsinstanz auf dem MEC-Host aufrecht zu halten. Soll die Anwendungsinstanz beispielsweise zu einem neuen MEC-Host migriert werden und dieser ist nicht in der Lage die Instanz zu hosten, kann der aktuelle MEC-Host noch einen zufriedenstellenden Service anbieten.

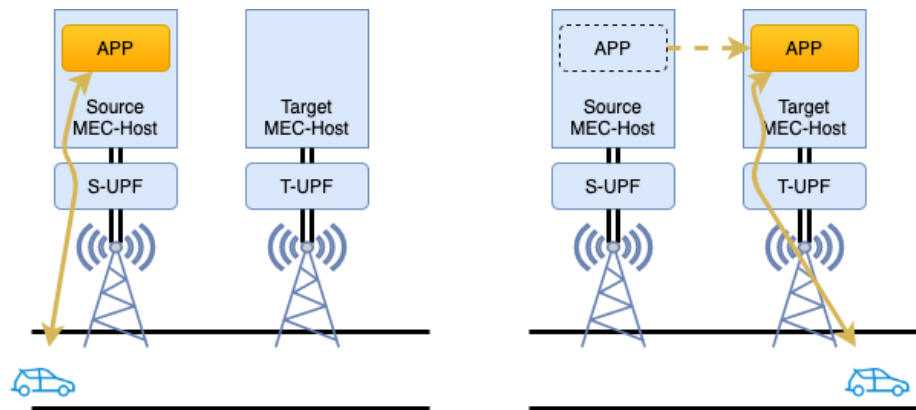
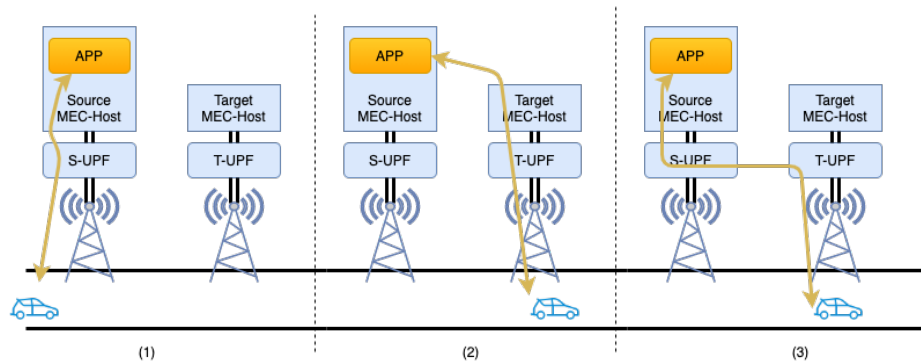


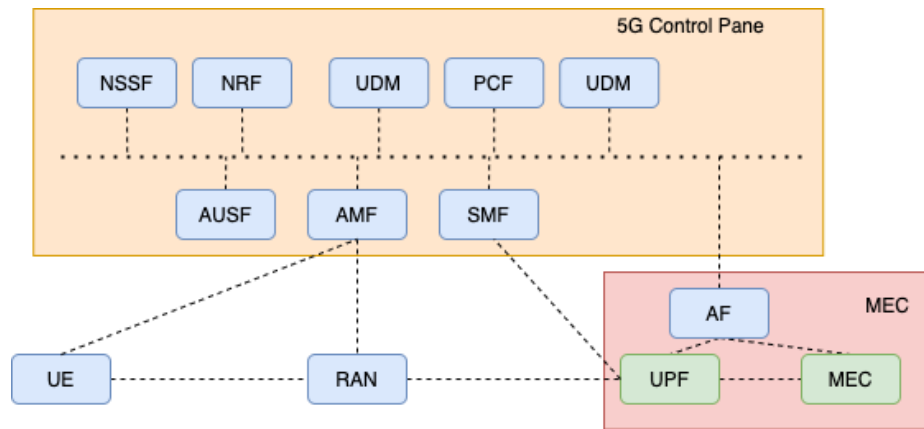
Abbildung 5.1. Handover vom MEC-Host zum Ziel-MEC-Host

Bewegt sich das Endgerät kann es zu einem gNB Handover kommen, was zu einer Änderung in der UPFs Ebene führt. Bei Bedarf wird der Zustand zu der Instanz in dem Ziel-MEC-Host übertragen und das Routing wird für das Endgerät angepasst, was in der Grafik 5.1 zu sehen ist. Kann der Ziel MEC-Host die Anwendung nicht hosten, weil dieser nicht über ausreichend Ressourcen verfügt oder nicht den gewünschten Service erfüllt, kann der Zustand einer laufenden Anwendungsinstanz nicht von dem S-MEC-Host zum Ziel-MEC-Host übertragen werden. Wenn dies der Fall, muss das Routing trotzdem aktualisiert werden. Die Anwendungsdaten werden entweder über den Ziel-MEC-Host (Bild 2 in Abbildung 5.2) oder über die UPFs des Ziel und ursprünglichen MEC-Hosts geleitet (Bild 3 in Abbildung 5.2). Unabhängig davon, ob die Anwendungsinstanz erfolgreich auf den Ziel-MEC-Host übertragen wurde oder nicht, der Verkehrspfad wird entsprechend aktualisiert. [12]



**Abbildung 5.2.** Routing wenn der Ziel-MEC Host die Anwendung nicht hosten kann

**5.2.2 Aktualisieren des Routings :** Für das Aktualisieren und Aufrechterhalten der Routen, ist die Application Function verantwortlich. Die Application Function (AF) interagiert mit CP, um das Routing zu beeinflussen.



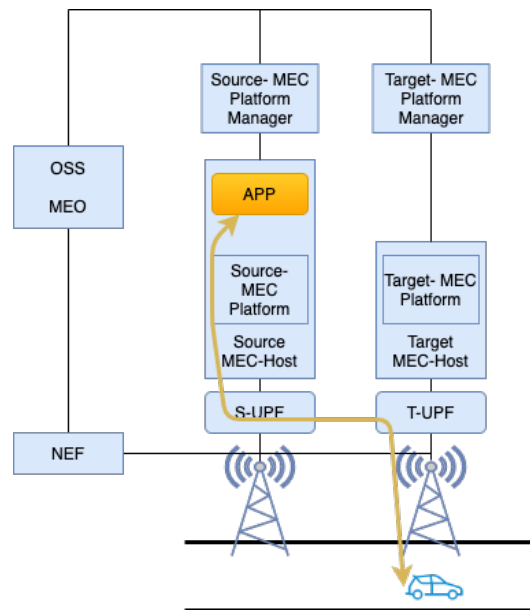
**Abbildung 5.3.** Application Function in 5G

Die Application Function (AF) erfasst Informationen über das 5G Netzwerk und unterstützt so die Mobilität von Anwendungsinstanzen. Dies ermöglicht in einem 5G-System eine flexiblere Bereitstellung der Data-Plane, um Edge-Computing nativ zu unterstützen. Die Abbildung 5.3 zeigt die AF in einer Service Based Architecture.

ETSI definiert für das Anpassen des Routings mithilfe der AF den sogenann-

ten *Application Function influence on traffic routing* Prozess. Startet ein MEC-System diesen Prozess benötigt es folgende Parameter:

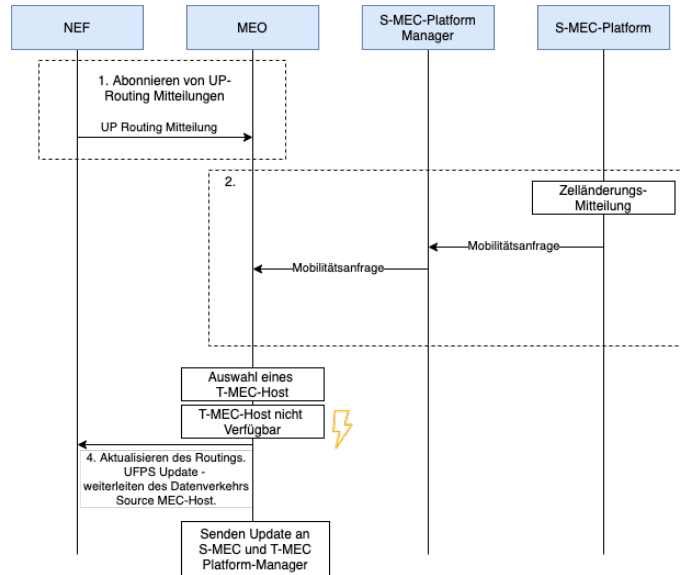
- UE Identifikator, eindeutig für das Endgerät
- Mögliche Orte für die Anwendung, Data Network Access Identifier (DNAI) wird benötigt um die Ziel UPFS zu erlangen.
- AF-Transaktionskennung, wird von der AF generiert
- Beschreibung des Datenverkehrs, dazu gehören IP-Adressen, Zieladressen und Data Network Name (DNN)



**Abbildung 5.4.** Komponenten für die Aktualisierung des Routings

Mithilfe dieser Parameter kann der Prozess des umleiten gestartet werden. Abbildung 5.4 zeigt wie die einzelnen Komponenten zusammenarbeiten um ein benötigte Aktualisierung des Datenverkehrs durchzuführen. Die Kommunikation mit dem MEC-System läuft dabei über die NEF. Diese kommuniziert mit dem MEC-Orchestartor welcher die Informationen auf MEC-Host Ebene an den Platform Manager weitergibt. [12] [6] Für das Aktualisieren des Routings werden folgende Schritte (Abbildung 5.5) durchgeführt:

1. Der MEC- Orchestartor (MEO) abonniert über NEF, UP Event Mittelungen. Der MEO erhält daher eine Mitteilung das sich die UE und DN des UEs aufgrund der Mobilität verändert haben.



**Abbildung 5.5.** Ablauf der Aktualisierung

- Die Quell-MEC-Plattform (S-MEC-Plattform) abonniert dem UE zugeordnete Zellenänderungsbenachrichtigung. Nachdem die S-MEC-Plattform eine Nachricht erhalten hat, bestimmt diese, ob das UE die Zelle verlassen hat. Ist dies der Fall sendet die S-MEC-Plattform eine Mobilitätsanfrage an den MEO.
- Der MEO wählt ein Ziel-MEC-Host für die Anwendung aus.
- In dem Fall, in dem der Ziel-MEC-Host aus nicht verfügbar ist, beispielsweise nicht ausreichend Ressourcen hat, wird die Anwendungsinstanz auf dem S-MEC-Host fortgesetzt und der vorhandene Pfad wird mittels der UPF zum S-MEC-Host umgeleitet.
- Der MEO sendet eine Aktualisierung an den S-MEC-Plattformmanager und dem T-MEC-Plattformmanager

Diese Schritte ermöglichen eine kontinuierliche Verbindung zwischen UE und MEC-Anwendung, unabhängig ob diese sich beim S-MEC-Host oder Z-MEC-Host befindet.

### 5.3 Ping-Pong Handover

**5.3.1 Problem** Ping-Pong-Übergaben treten auf, wenn ein Endgerät von einer Zelle zur nächsten wechselt, dann aber wieder in die ursprüngliche Zelle zurückgeht. Befindet sich ein Endgerät zwischen zwei Zellen, hat dies die Folgen, dass es zwischen den zwei Hosts hin und herspringt. Daher die Bezeichnung Ping-Pong Handover.

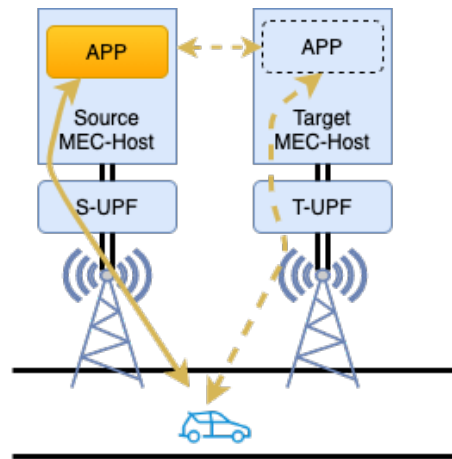


Abbildung 5.6. Ping Pong Handover

**5.3.2 Lösung** Für das Lösen des Ping-Pong Problems im MEC- System, schlägt ETSI eine Verringerung der Migrationsevent die vom MEO durchgeführt werden vor.

1. Der MEO wird Benachrichtigt, wenn es zu einem Ping-Pong Handover kommt, das zahlreiche Migrationen von MEC-Anwendung verursacht. Das Ping-Pong event wird dabei durch eine Vielzahl von Events der UPFS Erkannt.
2. Nach dem Erkennen eines Ping-Pong Events, startet der MEO den *Ping-Pong Handover Migration* Prozess. Dieser verändert die UPF so, dass diese sich immer zur S-MEC-Anwendung verbindet, unabhängig von der Verbindungsqualität des UEs. Dies reduziert die Anzahl der Migrationen zwischen Source-MEC-Host und Target-MEC-Host, auch wenn das UE sich oft zwischen Netzbereichen der Hosts wechselt. Das UE kommuniziert weiterhin mit der Anwendung im S-MEC über die Source-UPF. Abbildung 5.7 zeigt dies.
3. Der MEO wartet auf das sogenannte *Ping-Pong Recovery Event*. Dieses signalisiert, dass das UE sich nicht mehr zwischen zwei Aufgabenbereichen der MEC-Hots befindet.

4. Nach dem *Ping-Pong Recovery Event* setzt der MEO das Routing im UPFs wieder auf den ursprünglichen Zustand zurück.

So kann mithilfe des *Ping-Pong Handover Migration* und *Ping-Pong Recovery Event* mit dem Ping-Pong Problem in einem MEC-System umgegangen werden.

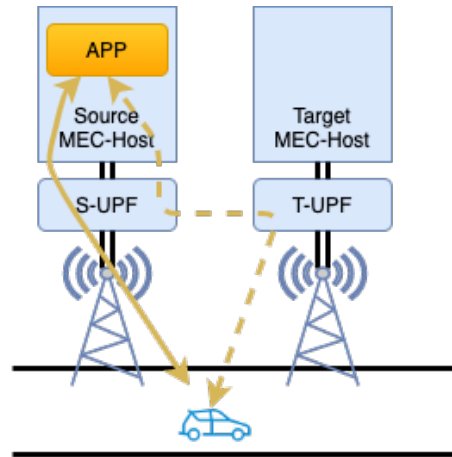


Abbildung 5.7. Angepasstes Routing

## 6 Multi-Access Edge Computing Scenarios

Folgendes Kapitel beschreibt unterschiedliche Use-Cases und Szenarios für die Verwendung von MEC.[21]

### 6.1 Cloud-Gaming, Remote Desktop

Computer Spiele werden immer populärer, aber die meisten Online Multiplayer Spiele benötigen eine geringe Latenz über das Netzwerk. Dies ist meistens nicht für mobile Endgeräte möglich, da sich die Server nicht im RAN befindet und so nicht in der Nähe des Endgerätes.

Bringt man die Spielserver in die Nähe des Funknetzes, ermöglicht dies das spielen von Spielen die eine geringe Latenz benötigen für mobile Nutzer. Die Verwendung ist dabei nicht auf Spiele beschränkt und kann auch für andere Anwendungen von Vorteil sein, die eine geringe Latenz erfordern. Beispielsweise können durch die geringe Latenz mobile Endgeräte mit *Remote Desktop* auf Virtuelle Maschinen zugreifen und benötigen so keine lokale Rechenressourcen. Dies erlaubt Tablets mit wenig Rechenleistung als *Thin Client* sich mit geringer Latenz mit einer VM zu verbinden. Es kann sich ein oder mehrere Nutzer mit der VM auf dem Server verbinden. Der Nutzer startet für das Verbinden die Anwendung lokal auf dem Endgerät und diese Verbindet sich mit der Cloud. Nutzen mehrere Benutzer eine Anwendungs Instanz auf dem gleichen MEC-HOST, ist die Latenz auch unter den Nutzern geringer. Bei einem Onlinespiel ist die Verzögerung zwischen zwei Spielern auf dem gleichen Server sehr gering. Wird eine Remote-Desktop anwendung von mehreren Nutzern in dem gleichen MEC-Host verwendet, ist die Latenz gering und die Bandbreite groß. So können zu für kolaborative Arbeiten beispielsweise große Dateien mit hoher Bandbreite geteilt werden, oder kolaborative Programme wie ein geteiltes Whiteboard mit geringer Latenz genutzt werden, auch wenn die Nutzer mobil sind. [13]

Benötigen die Anwendungen eine geringe Latenz, kann auch das Rendern der Videospiele oder Virtuellen Maschine auf dem MEC-Host durchgeführt werden. Die Endgeräte decodieren dann nur den Videostream der MEC-Anwendungen und senden die Steuerungseingaben in die Cloud. Gerade bei Spielen reichen dann *Thin Clients* aus und es werden keine leistungsstarke lokale Ressourcen benötigt. Dies ermöglicht das spielen von grafikintensiven Online-Spielen auf Smartphones. [8]

Wenn sich ein UE mit einem Funkknoten verbindet, der nicht demselben MEC-Host zugeordnet ist, auf dem die Anwendung ausgeführt wird (z. B. nachdem sich das Endgerät von dem wegbewegt hat), muss sichergestellt sein, dass die Konnektivität zwischen dem UE und der Anwendung aufrechterhalten wird. Um die Latenzanforderungen und damit eine gute Benutzererfahrung aufrechtzuerhalten, muss der MEO die Anwendung auf einen anderen MEC-Host, der in der



Nähe des UEs ist, verschieben. Dabei ist es wichtig, dass die Verbindung aufrechterhalten wird. Gerade bei dem mobilen spielen von Online-Spielen ist dieser Schritt sehr wichtig, da es zu frustrierenden Benutzung kommt. [11]

Aktuell werden Cloud-Gaming-Services wie Googles *Stadia* immer verbreiteter. Das Streamen von Videospielen ist allerdings nur im Heimnetzwerk möglich. 5G und MEC könnten es ermöglichen auch von Mobilien Endgeräten Cloud-Gaming-Services zu Nutzen, und die Latenz zu verbessern. [13]

## 6.2 Smart Cities

In einer Smart City werden Technologien aus den Bereichen Energie, Mobilität, Stadtplanung, Verwaltung und Kommunikation so miteinander vernetzt, dass sich die Lebensqualität für die Bewohner verbessert. Gleichzeitig profitiert die Nachhaltigkeit der Stadt. Dies wird immer wichtiger, da die Bevölkerungszahlen in Städten immer weiter zunehmen. Darüber hinaus wird der Bevölkerungsanstieg die städtische Infrastruktur aufgrund einer exponentiellen Zunahme der Daten, die von verschiedenen Geräten wie Smartphones, Sensoren und Kameras generiert werden, vor weitere Herausforderungen stellen.

Die Vielzahl von Daten die von einer Smart-City generiert werden müssen verarbeitet und ausgewertet werden. Dies kann durch lokalen Rechenressourcen direkt an der Datenquelle durchgeführt werden, was aber sehr teuer ist und praktikabel ist. Um die Notwendigkeit von dedizierter teurer Computerhardware zu beseitigen, wurde Cloud-Computing eingeführt. Cloud-Computing führt allerdings zu einer hohen Latenz was gerade im Kontext von Smart-Cities die Vielzahl von Echtzeitdaten generieren nicht optimal ist. Des Weiteren belastet Cloud-Computing das gesamte Netzwerk der Stadt. Wenn die Rechenleistung näher an der Datenquelle liegt, können die Daten mithilfe von Edge-Computing und 5G schneller analysiert und auf Anfragen geantwortet werden, ohne das gesamte-Netz zu belasten.

Die Verwendung von Kameras in einer Smart-City ist vorallem durch die Verfügbar Bandbreite eingeschränkt. Hochauflösende Lifestreams von Kameras erfordern viele Ressourcen für die Analyse und viel Speicherplatz. Dies macht das Einsetzen von HD-Kameras unter den gegenwärtigen Bedingungen schwierig. Das Einsetzen von Multi-Access Edge Computing kann dies ändern. Ein MEC-Systems ermöglicht das schnelle analysieren und auswerten von Videoinformationen und Speichern im MEC-HOST, in der Nähe der Kamera. Gleichzeitig ermöglicht 5G eine geringe Latenz und eine hohe Datenrate. Durch die gewonnene Mobilität, ist es beispielsweise möglich das Kameras von Polizisten und Polizistinnen über das 5G Netz übertragen und in Echtzeit ausgewertet werden. Die Firma *Dragon Law Enforcement* arbeitet aktuell an einer Spracherkennung. Diese passt sich den Akzenten an und reduziert den Lärm, um den Beamten dabei zu helfen, Protokolle sehr genau und effizient zu erstellen. [3]

Ein weiterer Use-Case im Bereich Smart-City ist die *Vehicle-to-Infrastructure* Kommunikation. Bei der Vehicle-to-Infrastructure werden Daten vom Fahrzeug und Sensoren an eine Infrastruktur gesendet, um die Sicherheit zu erhöhen und Risikosituationen frühzeitig zu erkennen. Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und der Infrastruktur erfordert eine geringe Latenz, die je nach Anwendungsfall unter 10 ms liegen muss. Gefahrenmeldungen wie Unfälle, stehengebliebene Fahrzeuge oder ein Stau können in Echtzeit über 5G übertragen werden. MEC kann hier eingesetzt werden, um die Fahrzeuge mit einer verteilten Cloud zu verbinden. So können MEC Anwendungen auf den MEC-Host gehostet werden, die Daten aus Fahrzeugen und Sensoren analysiert. Wird eine Gefahr erkannt, kann der MEC-Host dies mit einer geringen Latenz an andere Fahrzeuge Broadcasten. Dies ermöglicht einem smarten Auto innerhalb von Millisekunden Daten zu empfangen, sodass der Fahrer auf eine Gefahr reagieren und ausweichen kann.

Besonders für die *Vehicle-to-Infrastructure* Kommunikation eignet sich ein MEC-System. Da Fahrzeuge mobil sind, wechseln sie oft den Netzknoten. Das MEC-System ist für so eine Mobilitätsaufgabe ausgelegt. Gerade bei diesem Use-Case betreibt jeder MEC-Host die gleiche Anwendung. Beispielsweise eine Anwendung zur Analyse der Fahrzeugdaten. Das macht das wechseln von MEC-Hosts sehr effizient, da kein Image geladen werden muss und die Anwendung auf dem Ziel-MEC schon läuft. Bei einer Gefahrensituation ist es wichtig, dass die umliegenden Fahrzeuge schnell Benachrichtigt werden. Da aufgrund der geographischen Lage die Fahrzeuge mit dem gleichen MEC-Host kommunizieren, wie das Fahrzeug das eine Gefahr erkannt hat, ist das Benachrichtigen mit einer geringer Latenz möglich.

Auch für die *Vehicle-to-Vehicle* Kommunikation eignet sich MEC. Die Daten eines Fahrzeuges können mit geringer Latenz an einen MEC-Host gesendet werden, analysiert und an andere Fahrzeuge im gleichen MEC-host weitergeleitet werden.

### 6.3 Smart-Factory

Die Smart-Factory steht im Mittelpunkt der Industrie 4.0 und bezeichnet eine Produktionsumgebung, die sich selbst organisiert. Zur Produktionsumgebung gehören die Fertigungsanlagen und die Logistiksysteme. Die Produktionsumgebung ist automatisiert und erfordert nicht das Eingreifen eines Menschen. Im Mittelpunkt einer Smartfactory steht die intelligente Vernetzung von Maschinen und das hergestellte Produkt. Das Produkt teilt die für die Fertigung benötigten Informationen der Smart Factory mit. Anhand dieser Informationen stellen sich die Maschinen automatisch ein, um das gewünschte Produkt zu fertigen. In vielen Fällen findet dafür eine drahtlose Kommunikation zwischen Produkten und Anlagen statt. [15]

Für die Smart-Factory bietet sich ein MEC-System an. 5G besitzt die Möglichkeit

eines Privaten Netzes. So kann ein Netzwerk *On-permise* bei einem Unternehmen zu Verfügung gestellt werden. Maschinen und Produkte können Daten via 5G an MEC-Hosts senden. Ein Smart Factory besteht aus einer Vielzahl von Internet of Things (IoT) Geräten. Die Menge an Daten die dadurch generiert wird, kann nicht über das WAN zu einer zentralen Cloud gesendet werden. Ein MEC-System ist reduziert die Latenz und die Auswirkungen auf das Netzwerk. Des Weiteren wird die Sicherheit erhöht, da die Daten lokal bleiben und nicht über das WAN versendet werden. Auf dem MEC-Host können die Daten der IoT Geräte in Echtzeit analysiert werden. Beispielsweise können Maschine Learning Modelle für die Optimierung der Produktion eingesetzt werden. Der MEC-Host, kann die ankommenden Daten auch filtern und Entscheidungen über die Relevanz der ankommenden Daten treffen. Nur die relevanten Daten können dann zu einer zentralen Cloud weitergeleitet werden. Die Vorauswahl der Daten entlastet das Netz und verursacht weniger Kosten.

Eine mögliche Anwendung für MEC in einer Smart-Factory ist das Einsetzen von Kameras zur Qualitätssicherung. Für das Erkennen von Fehlern in Produktionsteilen, müssen hochauflösende Kameras verwendet werden. Der hohe Datenstrom kann über 5G an den MEC-Host gesendet werden. Dieser analysiert das Bildmaterial auf Fehler. Wird ein Fehler erkannt, kann der MEC-Host andere Maschine benachrichtigen, die das beschädigte Teil entfernt. Je nach der Geschwindigkeit der Produktion, ist es wichtig, dass dies mit einer geringen Latenz passiert. [13]

Huawei arbeitet zusammen mit China Mobile an einer *5G Connected Factory*. Hier soll die Anlage mithilfe einer Edge Cloud die Produktion verbessern und über Kameras Fehler erkennen. [27]

## 7 Fazit und Ausblick

Diese Seminararbeit gibt ein Überblick über die MEC-Technologien. Es wurden erläutert wie die zugrunde liegenden Technologien wie SDN, NFV, NFVi, Network-Slicing und CUPS dem 5G Netzwerk helfen, die Latenz von MEC-Anwendungen zu verringern, was gleichzeitig die Nutzung der Netzwerkressourcen optimiert und so die Benutzererfahrung verbessert. In dieser Arbeit wurde auch gezeigt, wie das MEC-Framework und die MEC-Referenz Architektur mit Herausforderungen wie die Mobilität des Benutzers umgehen. Dabei wurde ausführlich auf die Integration von MEC in das 5G Netzwerk eingegangen.

Früher als Mobile Edge Computing bekannt, ist Multi-Access Edge Computing eine der wichtigsten Säulen für 5G und definitiv eine der vielversprechendsten Technologien, um Cloud-basierte Anwendungen und Dienste in das Geschäft von Netzbetreibern zu integrieren. MEC ist eine der wichtigsten Technologien für 5G-Systeme, da es zu einer geringen Latenz und zur Kapazitätsverbesserung und Kernnetzwerk führt.

European Telecommunications Standards Institute hat eine Vielzahl von MEC-Standards veröffentlicht, die eine Cloud-Umgebung am Rand des Netzwerkes ermöglicht. Der Erfolg von 5G hängt im wesentlichen von der Ausrichtung der Technologien ab. ETSI definiert ausführlich die Managemen- und Orchestrierungssysteme für den Lifecyclemanagement der Anwendungen sowie deren Mobilität. Darüber hinaus sind die API Schnittstelle der Services und die Integration von MEC in 5G ausführlich definiert.

### 7.1 Ausblick

Neben dem Ausbau des 5G Netzes, ist bei der Einführung von *MEC* Systemen, die Standardisierung sehr wichtig. [4]

### 7.2 Angebote

## Literatur

- [1] *5G Core Network - a Short Overview*. 5. Juni 2017. URL: <https://www.grandmetric.com/2017/06/05/5g-core-network-a-short-overview/> (besucht am 31.10.2020).
- [2] *5G Core Network – Architecture, Network Functions, and Interworking*. URL: <https://www.rfglobalnet.com/doc/g-core-network-architecture-network-functions-and-interworking-0001> (besucht am 15.11.2020).
- [3] *5G Is Giving Law Enforcement Permission to Expect More*. URL: <https://www.police1.com/police-products/communications/articles/5g-is-giving-law-enforcement-permission-to-expect-more-KNbP1f00PFcIGT5S/> (besucht am 10.11.2020).
- [4] Zahraa N. Abdullah, Imtiaz Ahmad und Iftekhar Hussain. “Segment Routing in Software Defined Networks: A Survey”. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 1 (21–2019), S. 464–486. ISSN: 1553-877X, 2373-745X. DOI: 10.1109/COMST.2018.2869754. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8462720/> (besucht am 10.10.2020).
- [5] P. Arnold u. a. “5G Radio Access Network Architecture Based on Flexible Functional Control / User Plane Splits”. In: *2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. 2017 European Conference on Networks and Communications (EuCNC). Juni 2017, S. 1–5. DOI: 10.1109/EuCNC.2017.7980777.
- [6] Venkatraman Balasubramanian u. a. “A Mobility Management Architecture for Seamless Delivery of 5G-IoT Services”. In: *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC). Shanghai, China: IEEE, Mai 2019, S. 1–7. ISBN: 978-1-5386-8088-9. DOI: 10.1109/ICC.2019.8761658. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8761658/> (besucht am 10.10.2020).
- [7] Alcardo Alex Barakabitze u. a. “5G Network Slicing Using SDN and NFV: A Survey of Taxonomy, Architectures and Future Challenges”. In: *Computer Networks* (2020), S. 106984. ISSN: 1389-1286. DOI: 10.1016/j.comnet.2019.106984. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619304773>.
- [8] ZTE China Mobile. *Powered by SA: 5G MECBased Cloud Game Innovation*. URL: <https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2020/03/Powered-by-SA-5G-MEC-Based-Cloud-Game-Innovation-Practice-.pdf>.
- [9] Francesco De Pellegrini u. a. “Competitive Caching of Contents in 5G Edge Cloud Networks”. In: *2017 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*. 2017 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt). Paris, France: IEEE, Mai 2017, S. 1–8. ISBN: 978-3-901882-90-6. DOI: 10.23919/WIOPT.2017.7959875. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7959875/> (besucht am 10.10.2020).

- [10] *Developing Software for Multi-Access Edge Computing*. URL: [etsi\\_wp20ed2\\_MEC\\_SoftwareDevelopment](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/003/02_01_01_60/gs_MEC003v020101p.pdf).
- [11] ETSI. *ETSI GS MEC 003 V2.1.1 (2019-01): Multi-Access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture*. URL: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_gs/MEC/001\\_099/003/02\\_01\\_01\\_60/gs\\_MEC003v020101p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/MEC/001_099/003/02_01_01_60/gs_MEC003v020101p.pdf) (besucht am 23.10.2020).
- [12] ETSI. *Multi-Access Edge Computing (MEC) MEC 5G Integration*. URL: [https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi\\_wp28\\_mec\\_in\\_5G\\_FINAL.pdf](https://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/etsi_wp28_mec_in_5G_FINAL.pdf) (besucht am 23.10.2020).
- [13] ETSI. *Multi-Access Edge Computing (MEC); Phase 2: Use Cases and Requirements*. URL: [file:///Users/julianbeck/Zotero/storage/4VNC7SJ3/gs\\_MEC003v020101p.pdf](file:///Users/julianbeck/Zotero/storage/4VNC7SJ3/gs_MEC003v020101p.pdf) (besucht am 23.10.2020).
- [14] ETSI. *Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration*. URL: <https://www.etsi.org> (besucht am 23.10.2020).
- [15] M. Gundall u. a. “5G as Enabler for Industrie 4.0 Use Cases: Challenges and Concepts”. In: *2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. 2018 IEEE 23rd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Sep. 2018, S. 1401–1408. DOI: 10.1109/ETFA.2018.8502649.
- [16] *How 5G NFV Will Enable the 5G Future*. URL: <https://www.sdxcentral.com/5g/definitions/5g-nfv/> (besucht am 21.10.2020).
- [17] Greg LaBrie. *Top 5 Benefits of Edge Computing*. URL: <https://blog.wei.com/top-5-benefits-of-edge-computing> (besucht am 13.10.2020).
- [18] “Leitfaden 5G-Campusnetze”. In: (2020), S. 52.
- [19] Roberto Morabito u. a. “Consolidate IoT Edge Computing with Lightweight Virtualization”. In: *IEEE Network* 1 (Jan. 2018), S. 102–111. ISSN: 0890-8044, 1558-156X. DOI: 10.1109/MNET.2018.1700175. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8270640/> (besucht am 21.10.2020).
- [20] NFV White Paper. “Network Functions Virtualisation: An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action. Issue 1”. Okt. 2012.
- [21] Milan Patel u. a. “Contributor, Huawei, Vice Chair ETSI MEC ISG, Chair MEC IEG Working Group”. In: (), S. 16.
- [22] Sami Kekki, Walter Featherstone, Yonggang Fang, Pekka Kuure, Alice Li, Anurag Ranjan u. a. *ETSI - Multi-Access Edge Computing - Standards for MEC*. URL: <https://www.etsi.org/technologies/multi-access-edge-computing> (besucht am 23.10.2020).
- [23] *Software-Defined Networking (SDN) Definition*. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/software-defined-networking/overview.html> (besucht am 21.10.2020).
- [24] Cao Suzhi u. a. “Space Edge Cloud Enabling Network Slicing for 5G Satellite Network”. In: *2019 15th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC)*. 2019 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC). Tangier, Morocco: IEEE, Juni 2019, S. 787–792. ISBN: 978-1-5386-7747-6. DOI:

- 10.1109/IWCMC.2019.8766619. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8766619/> (besucht am 10.10.2020).
- [25] Tarik Taleb u. a. “On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network Edge Cloud Architecture and Orchestration”. In: *IEEE Communications Surveys & Tutorials* 3 (23–2017), S. 1657–1681. ISSN: 1553-877X. DOI: 10.1109/COMST.2017.2705720. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7931566/> (besucht am 10.10.2020).
- [26] Blesson Varghese u. a. “Challenges and Opportunities in Edge Computing”. In: Nov. 2016. DOI: 10.1109/SmartCloud.2016.18.
- [27] *What a Next-Gen Factory Looks like with Smart 5G*. URL: <https://www.huawei.com/en/publications/winwin-magazine/37/building-worlds-first-smart-5g-connected-factory> (besucht am 10.11.2020).