6G-ANNA
6G Access, Network of Networks, Automation & Simplification

Nokia Solutions & Networks GmbH & Co. KG

Kontakt:
Dr. Marco Hoffmann
marco.hoffmann@nokia.com

Zuwendungsempfänger:	Förderkennzeichen:
Nokia Solutions and Networks GmbH & Co. KG (NOKIA)	16KIS077K
Vorhabenbezeichnung: 6G Access, Network of Networks, Automation & Simplification – 6G-ANNA – Teilvorhaben: Netz Optimierung & KI-basierte Automatisierung – 6G-ANNA-NOKIA	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2022 - 31.12.2025	

Gefördert durch:

Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel von 6G-ANNA-NOKIA war es, die Forschung an der sechsten Mobilfunkgeneration voranzutreiben und für die Standardisierung vorzubereiten. Im Fokus stand dabei die Entwicklung einer nachhaltigen Ende-zu-Ende Sicherheitsarchitektur. Die Herausforderungen bei der Entwicklung einer solchen 6G Systemarchitektur unterteilten sich entsprechend des Verbundprojektes in die Themenblöcke 6G Access, Network of Networks und Automation & Simplification.

Konkret wurden in 6G-ANNA-NOKIA die Themen Cloud-basierte RAN Architektur, Sub-Netze, 6G Angriffs- und Sicherheitsanalysen, Cloud-native Software-Architekturen, AI-basiertes Management & Orchestrierung, Digitale Zwillinge und Erweiterte Realität sowie Nachhaltigkeit und Vertrauenswürdigkeit detailliert und ganzheitlich entwickelt, untersucht und teilweise in Form von Proof of Concepts (PoCs) / Testbeds umgesetzt. Die in den Themenblöcken erarbeiteten Konzepte flossen anschließend zusammen mit den Anforderungen neuartiger Anwendungsfälle und Dienste in die Definition der nachhaltigen und sicheren Ende-zu-Ende Architektur ein. Zusätzlich wurden die in den technischen Arbeitspaketen erzielten Ergebnisse auf ihre Standardisierungsrelevanz geprüft und entsprechende Schritte für eine Standardisierung eingeleitet.

1.2 Ablauf des Vorhabens

Dank des breit aufgestellten Konsortiums sowie des zeitlich günstigen Projektbeginns vor dem Start der 6G-Standardisierung durch die 3GPP konnten nicht nur umfassende Konzepte und Schlüsseltechnologien für die sechste Mobilfunkgeneration entwickelt werden. Darüber hinaus wurde eine ganzheitliche Systemarchitektur erarbeitet, kontinuierlich optimiert und sowohl innerhalb des Konsortiums als auch mit externen Partnern erfolgreich abgestimmt und harmonisiert.

Zur Unterstützung dieser Ziele wurden jährlich Konsortialtreffen durchgeführt. Die Mitarbeiter an den einzelnen Arbeitspaketen standen in einem engen, regelmäßigen Austausch über Videokonferenzen (mindestens zweiwöchentlich) und vertieften ihre Zusammenarbeit in dedizierten Arbeitspaket-Meetings. Ergänzend dazu erfolgte ein aktiver Austausch mit anderen Konsortien und externen Partnern im Rahmen von 6G-Plattformkonferenzen sowie mehrerer deutsch-japanischer Workshops.

Die Arbeiten innerhalb von 6G-ANNA waren in die folgenden sechs Arbeitspakete (AP) gegliedert:

- AP0: Projektmanagement & Scientific Exchange
- AP1: Sustainable and Secure Architecture & System Design
- AP2: 6G Access
- AP3: Network of Networks
- AP4: Automation & Simplification
- AP5: Testbeds & Proof of Concepts

Nokia war in allen Arbeitspaketen maßgeblich beteiligt und übernahm die Leitung der Arbeitspakete AP0 und AP1. AP0 umfasste insbesondere die Rolle des Konsortialführers einschließlich der entsprechenden Koordinations- und Steuerungsaufgaben. Neben den genannten Austauschformaten wurden jährlich Meilensteinberichte erstellt, bilaterale Abstimmungen mit Partnern durchgeführt sowie im Rahmen von AP5 gemeinsame Proof-of-Concept-Implementierungen realisiert.

1.3 Ergebnisse und Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die wesentlichen Projektergebnisse werden entlang der definierten Arbeitspaketstruktur dargestellt. Eine vertiefte und umfassende Beschreibung der einzelnen Arbeiten findet sich im zweiten Teil des Sachberichts.

Der Schwerpunkt von AP1 lag auf der Entwicklung einer gemeinsamen, ganzheitlichen Ende-zu-Ende-Architektur für 6G, welche die im Projektverlauf identifizierten Use Cases sowie deren Anforderungen vollständig adressiert und unterstützt. Ein besonderer Fokus wurde dabei auf ein sicheres und nachhaltiges Architekturdesign gelegt. Hierzu wurden relevante Teilergebnisse aus den übrigen Arbeitspaketen konsolidiert, gezielt ergänzt und mit Architekturansätzen anderer Forschungsinitiativen abgeglichen.

AP2 verfolgte das Ziel, ein umfassendes Framework für das 6G Radio Access Network (RAN) zu definieren. Die vorgeschlagene Architektur repräsentiert einen Paradigmenwechsel von einem knoten-zentrierten Ansatz in 5G hin zu einem flexiblen, funktionszentrierten Design. Dabei wurde insbesondere die Trennung zwischen funktionaler Definition und physischer Implementierung adressiert, was skalierbare Cloud-RAN-Deployments, eine effiziente Unterstützung von Sub-Netzen sowie die Einführung fortschrittlicher, programmierbarer Schnittstellen ermöglicht.

Im Rahmen von AP3 untersuchte Nokia insbesondere, wie zukünftige 6G-Systeme eine Vielzahl heterogener Sub-Netze in ein einheitliches „Network of Networks“ (NoN) integrieren können. Die Arbeiten definieren grundlegende Organisationsmodelle für die Ressourcenteilung, spezifizieren Mechanismen zur Verbindung, Verwaltung und Orchestrierung von 6G-Sub-Netzen und etablieren die Architektur des Sub-Netz-Controllers als zentrale Gateway- und Managementinstanz. Ergänzend wurden innovative Netzarchitekturen zur Anbindung von 6G-Funkzugangspunkten an Edge-Cloud- und Core-Netze sowie zur Interkonnektivität nicht-lokaler 6G-Sub-Netze analysiert. Im Bereich Sicherheit lag der Fokus insbesondere auf dem sicheren Betrieb von Netzkomponenten in Cloud-Umgebungen sowie auf der Absicherung von Sub-Netzen.

Im AP4 wurden AI-native Managementlösungen, Optimierungsverfahren sowie Konzepte im Bereich Generative AI entwickelt, um die Effizienz und Automatisierung von 6G-Netzen signifikant zu steigern. Darüber hinaus wurden Architekturen für Digitale Zwillinge sowie auf Graph Neural Networks (GNN) basierende Modelle konzipiert und durch praxisnahe Demonstratoren, unter anderem im Kontext von XR-Anwendungen und Latenzoptimierungen, validiert. Ergänzend wurden Mechanismen für Datensparsamkeit, Datenkontinuität und föderiertes Lernen erarbeitet, um eine vertrauenswürdige und skalierbare KI-Nutzung in 6G-Netzen zu ermöglichen.

Der Fokus von AP5 lag auf der praktischen Umsetzung der in den Arbeitspaketen AP2 bis AP4 entwickelten Konzepte und Technologien mittels Proof-of-Concept-Implementierungen sowie deren Evaluierung in verschiedenen Testbed-Umgebungen an den Standorten München und Stuttgart. Die Demonstratoren wurden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern entwickelt, kontinuierlich optimiert und sowohl innerhalb des Konsortiums als auch gegenüber Kunden präsentiert. Darüber hinaus erfolgte eine breite Dissemination der Ergebnisse im Rahmen verschiedener Veranstaltungen und öffentlicher Demonstrationen.

Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es erfolgte eine kontinuierliche Abstimmung mit der 6G-Plattform durch die Teilnahme an Koordinatoren-Meetings und Working Groups, wobei 6G-ANNA aktiv Beiträge leistete und selbst eine Architektur Working Group aufbaute und leitete. Darüber hinaus nahm Nokia als Konsortialführer aktiv an den Veranstaltungen der 6G-Plattform in Berlin teil. Es wurden Keynote Vorträge von Nokia gehalten, dedizierte Sessions zur 6G Architektur geleitet und andere Sessions mit Beiträgen unterstützt. Außerdem wurde die 6G-Plattform auf verschiedenen Konferenzen mit Demonstratoren unterstützt, z.B. beim Digital Gipfel in Jena oder beim IEEE 6G Summit in Dresden.

Ebenfalls wurde intensiv mit den 6G-Hubs zusammengearbeitet, insbesondere mit dem 6G-Life und dem 6GEM Hub (gemeinsame Demostände). Zusätzlich wurde aktiv an General Assemblies der Hubs teilgenommen.

Darüber hinaus beteiligte sich das Projekt an internationalen Kooperationen, insbesondere an deutsch-japanischen 6G-Workshops, bei denen Ergebnisse präsentiert und gemeinsam weiterentwickelt wurden. Eine enge Kooperation fand hierbei mit dem japanischen Industriepartner NTT Docomo im Bereich des Mobility Metaverse statt, um gemeinsame technische Themen und Demonstratoren abzustimmen und weiterzuentwickeln.

Nokia koordinierte den Austausch mit europäischen 6G-Initiativen wie Smart Networks and Services (SNS) sowie den EU-Flagship-Projekten Hexa-X und Hexa-X II und brachte dort Projektergebnisse ein.

Im Rahmen der Verwertung wurden entwickelte Konzepte und Prototypen zusätzlich mit externen Partnern außerhalb des Konsortiums diskutiert, unter anderem im Kontext internationaler Kooperationen, um weitere Anwendungsmöglichkeiten zu identifizieren.

2 Ausführliche Darstellung

2.1 Erzielte Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete

2.1.1 AP0: Projektmanagement & Scientific Exchange

Im AP0 hat Nokia als Konsortialleiter die Organisation von projektübergreifenden Abstimmungsmeetings mit allen Partnern abgehalten, die Leitung und Organisation von Projektmanagementmeetings übernommen und mit den Arbeitspaketleitern in regelmäßigen Abständen abgehalten. Jährlich wurden in Abstimmung mit den Arbeitspaketleitern dedizierte f2f Arbeitspakettreffen (jeweils ~30–40 Teilnehmer) für AP2 – 4 organisiert und projektübergreifende Meetings mit allen 6G-ANNA Partnern (~130 Teilnehmer) durchgeführt (Kick-Off Meeting 2022 in Dresden, Projektmeeting 2023 und 2024 in Berlin, Projektabschlussmeeting 2025 in Berlin).

Des Weiteren wurde ein Konsortialvertrag unter der Federführung von Nokia und der Beteiligung aller Projektteilnehmer erstellt und von allen Projektpartnern unterzeichnet. Zum wissenschaftlichen Austausch wurde eine 6G-ANNA Projektwebseite von Nokia erstellt 6G-ANNA Projekt. Diese wird vom Projektpartner Fraunhofer HHI gehostet.

Hinsichtlich des Austausches mit der 6G Plattform und der Zusammenarbeit mit anderen 6G Industrieprojekten und Forschungshubs wurde an den von der 6G Plattform initiierten Koordinatoren-Meetings und allen Kick-Off Meetings der Working Groups (WGs) teilgenommen. 6G-ANNA hat aktiv zu ausgewählten WGs, wie der WG Roadmap, beigetragen und setzte in Abstimmung mit der 6G Plattform die WG Architektur auf und leitete diese.

6G-ANNA war an allen drei bisherigen Berlin 6G Konferenzen der 6G Plattform (2023, 2024 und 2025) mit einem Stand und zahlreichen Demonstratoren vertreten (z.B. 13 Demos in 2025), darunter insgesamt 7 Demonstratoren mit Beteiligung von Nokia (siehe Abschnitt 2.6). Die Planung und Organisation der Stände und Demonstratoren wurde von Nokia durchgeführt. Im Rahmen dieser Konferenzen wurden die Demonstratoren von hochrangigen Vertretern von Nokia und der Projektleitung dem BMBF / BMFTR präsentiert (Abteilungsleiter, Staatssekretär, Ministerin).

Auf den 6G Plattform Events wurden von 6G-ANNA Partnern Sessions organisiert und geleitet (z.B. Architektur Session von Nokia), an Panel-Diskussionen teilgenommen und Vorträge gehalten (siehe Abschnitt 2.6).

Zusätzlich wurde die 6G Plattform regelmäßig bei der EuCNC Konferenz bei ihren Sessions mit Vorträgen unterstützt. Eine enge Abstimmung mit den 6G-Hubs ist im Berichtszeitraum besonders mit dem 6G-Life Hub erfolgt und gemeinsame Aktivitäten wurden durchgeführt. Außerdem hat die Projektleitung zur Abstimmung mit den 6G-Hubs an General Assemblies des 6GEM und des 6G-Life Hubs in Bochum, Dresden und München teilgenommen.

Die Abstimmung und der fachliche Austausch mit europäischen 6G Initiativen (z.B. Smart Networks and Services (SNS) und den durch die EU geförderten Flagship Projekten (Hexa-X, Hexa-X II)) wurde durch Nokia ermöglicht und vorangetrieben (z.B. 6G-ANNA Architektur Präsentation, Hexa-X II Workshop). Nokia beteiligte sich ebenfalls aktiv an den deutsch-japanischen 6G Workshops in Deutschland und Japan und präsentierte dort Ergebnisse, die im Rahmen der 6G-ANNA Projekterweiterung (japanische Industriebeteiligung) entstanden sind.

Zur Steigerung der Sichtbarkeit des Projektes wurden Vorträge und Demonstratoren bei wissenschaftlichen Konferenzen und Workshops präsentiert und im Rahmen der Verwertung Erfindungsmeldungen und Beiträge zur Standardisierung eingereicht (siehe Abschnitt 2.6).

2.1.2 AP1: Sustainable and Secure Architecture & System Design

Als Leitung von AP1 hat Nokia die AP Treffen und die Beiträge zu 6G-ANNA Projektevents organisiert. Unter anderem wurden auch AP übergreifende Meetings zur Architektur, dem 6G System Engineering Gremium und Querschnittsthemen Themen wie Security organisiert und geleitet. Zusätzlich war Nokia für die Erstellung der Projektberichte verantwortlich und hat Architektur Workshops (z.B. bei der Berlin 6G Konferenz) organisiert.

Zusammenfassend wurde an folgenden Themen in AP1 gearbeitet:

6G Use Cases: Nokia hat öffentliche Informationen aus unterschiedlichen Forschungsprojekten und Gremien (wie Hexa-X, NGMN, etc.) zu 6G Use Cases und Requirements zusammengetragen, aufgearbeitet und den anderen AP1 Teilnehmern vorgestellt. In diesem Zusammenhang hat Nokia auch eine Diskussion initiiert und geleitet, welche dieser Use Cases Relevanz für 6G-ANNA haben und wo bzw. warum auch neue 6G-ANNA spezifische Use Cases benötigt werden: zum einen waren noch nicht alle Use Cases unserer Industriepartner in anderen Projekten beschrieben worden, zum anderen hatten andere Projekte versucht die Use Cases zu gruppieren (z.B. Use Case Familien in Hexa-X), was zu sehr breiten Anforderungen (z.B. Latenz zwischen 0.1s und 1min) dieser generischen Use Case Kategorien geführt hat. Daher hat Nokia angeregt, in 6G-ANNA eher einzelne Use Cases und deren konkrete und spezifische Anforderungen zu betrachten, was zu einem Mehrwert für 6G-ANNA und die Industrie geführt hat. In diesem Zusammenhang war Nokia auch in der Roadmap WG der 6G Plattform aktiv. Hier wurden u.a. von AP1 verschiedene 6G-ANNA Use Cases der WG beigesteuert, die im Whitepaper der WG veröffentlicht wurden.

6G Gesamtarchitektur: Das Hauptziel in AP1 war es, für 6G-ANNA eine 6G Gesamtarchitektur zu definieren und die verschiedenen Ansätze und Teilaspekte der anderen APs in ein Gesamtbild zu integrieren. Diese Gesamtsicht beinhaltet die „6G RAN Function“ aus AP2 und die Netz-der-Netze (6G Sub-Nete) Arbeit aus AP3. Für das Radio Access Network und das Core Network wurden dabei verschiedene Design-Prinzipen und -Empfehlungen an die 3GPP diskutiert und abgestimmt.

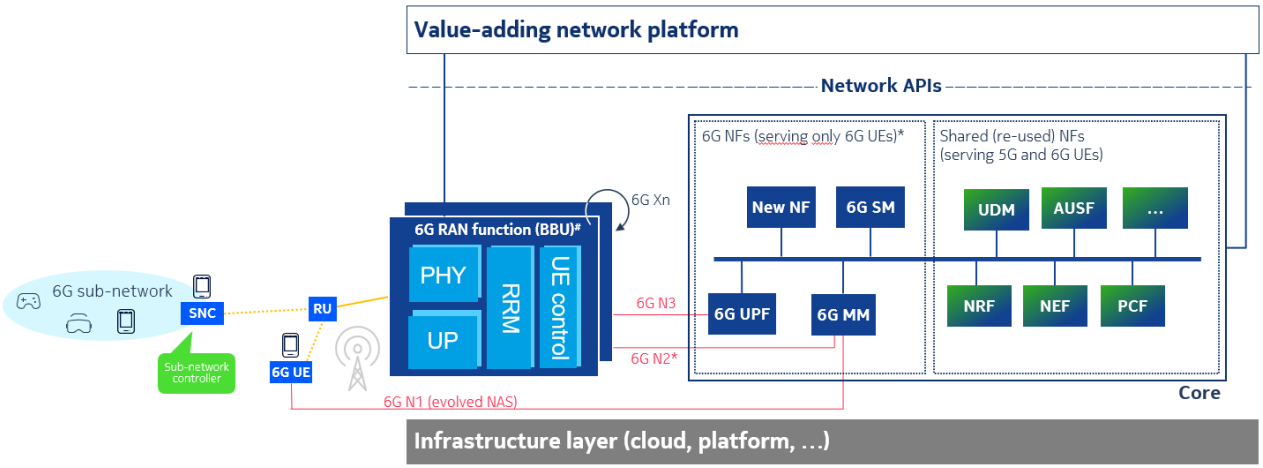


Abbildung 1: 6G-ANNA Architektur mit wesentlichen Beiträgen von Nokia zu Core, RAN und Sub-Nete

Nokia war hierbei federführend bei der Erstellung dieser Gesamtarchitektur und der Design-Prinzipien tätig. Auch die Core Netz Sicht wurde maßgeblich von Nokia in AP1 beigetragen. Darüber hinaus hat Nokia in AP1 weitere Aspekte zur empfohlenen „single 6G standalone“ Architektur und zur Unterstützung von „5G-6G interworking“ in die Diskussion eingebracht, welche mit kleineren Änderungen nach Diskussionen mit den anderen Projektpartnern in den AP1 Meetings übernommen wurden. Diese Ergebnisse wurden von Nokia in der Architektur Working Group der 6G Plattform und der SNS JU 6G Architecture Working Group vorgestellt, sowie beim 6G Series Workshop des Hexa-X-II Projekts einem breiteren Publikum präsentiert. Bezüglich der oben erwähnten Architektur WG der 6G Plattform war Nokia die Schnittstelle zu 6G-ANNA und hat dabei auch Informationen aus der WG in AP1 eingebracht.

System Engineering Gremium: im Januar 2023 hat Nokia das System Engineering Gremium (SEG) ins Leben gerufen und über die gesamte Laufzeit geleitet, welches die Harmonisierung und Vorbereitung der 6G-ANNA Ergebnisse hinsichtlich einer 6G Standardisierung als Ziel hatte. Als Schwerpunkte wurden dafür die folgenden Themen identifiziert: high-level 6G Anforderungen, Optionen zur effizienten Migration von 4G/5G zu 6G, Varianten für die 6G Einführung und deren Deployment, benötigtes und verfügbares Spektrum und eine bevorzugte Zeitleiste für die 6G Standardisierung und Einführung. Nokia hat dazu mehrere Beiträge zum Thema 6G Spektrum, 6G Timeline, und 6G Migration & Interworking mit 4G/5G geliefert. Gemeinsam mit anderen Partnern hat Nokia auch Ergebnisse einer FR3-Band Messung diskutiert und einen Überblick zu den Ergebnissen der WRC eingebracht.

Ebenfalls wurden von Nokia regelmäßige 6G-ANNA **„cross-AP“ Treffen zum Thema Sicherheit** organisiert, bei der eine Vielzahl von 6G Sicherheitsgefährdungen besprochen, mögliche Lösungsansätze vorgestellt und über AP-Grenzen hinweg diskutiert wurden. Ergebnisse dieser Arbeitsgruppe wurden unter

anderem von Nokia als Poster zusammengefasst und bei der Nationalen Konferenz IT-Sicherheitsforschung und als PowerPoint-Version bei den Treffen der 6G Plattform einem breiten Publikum präsentiert.

2.1.3 AP2: 6G Access

Cloud-basierte RAN-Architektur

6G-ANNA zielte darauf ab, ein umfassendes Framework für das 6G Radio Access Network (RAN) zu definieren. Die vorgeschlagene Architektur stellt einen Paradigmenwechsel von einem Knoten-zentrierten Ansatz in 5G hin zu einem flexiblen, funktions-zentrierten Design dar. Diese Entwicklung priorisiert die Trennung funktionaler Definitionen von der physischen Implementierung, was skalierbare Cloud-RAN-Bereitstellungen, eine effiziente Unterstützung für Sub-Netze und fortschrittliche programmierbare Schnittstellen ermöglicht.

6G RAN-Funktionsarchitektur

Die Kerninnovation des 6G-ANNA RAN-Architekturkonzepts besteht in der konsequenten Trennung von funktionaler Architektur, Implementierungsarchitektur und Bereitstellungsarchitektur. Die funktionale Architektur basiert auf logischen Netzfunktionen statt auf physischen Knoten und entkoppelt damit die Standardentwicklung von den Infrastrukturzyklen. Zentrale Einheit ist die „6G RAN-Funktion“, welche die Unterfunktionen RRC, RRM, User Plane und PHY in einer einzigen logischen Funktion zusammenführt und so die Komplexität der Architektur reduziert.

Zur weiteren Vereinfachung verzichtet das Konzept auf standardisierte interne Schnittstellen wie die aus 5G bekannte F1-Schnittstelle, da diese nachweislich die Komplexität erhöhen, ohne entsprechende Leistungsgewinne zu liefern. Ein standardisierter Lower-Layer-Split zwischen Radio Unit und RAN-Funktion bleibt jedoch zur Sicherstellung der Interoperabilität erhalten, ebenso wie die etablierte Schnittstelle zum Core Netz.

Die Architektur unterstützt unterschiedliche Bereitstellungsmodelle, von der integrierten Basisstation für kompakte oder klassische Einsatzszenarien bis hin zu Cloud-RAN-Ansätzen mit virtualisierter RAN-Funktion auf der Edge Cloud. Letzteres ermöglicht eine hohe Skalierbarkeit und ein koordiniertes Radio-Ressourcenmanagement, beispielsweise für Distributed-MIMO über größere geografische Bereiche.

Service-basiertes Design (SBD) für 6G RAN

Um eine Cloud-native Umgebung zu ermöglichen, wird für die RAN-Steuerungsebene ein service-basiertes Design (Service-Based Design, SBD) vorgeschlagen, das zwar vom Service-Based Architecture (SBA)-Ansatz des 5G Core inspiriert ist, sich jedoch bewusst in mehreren Aspekten davon unterscheidet. Die Architektur unterstützt eine flexible Aufteilung des Radio Access Networks (RAN) in Netzscheiben, wobei ein RAN-Slice nicht als starr definierter Slice-Unterstützungstyp (SST) wie im 5G-System verstanden wird, sondern als „Diensttyp“, der eine Gruppe ähnlicher QoS-Eigenschaften beschreibt. Durch diesen Ansatz entfällt die Notwendigkeit Slice-spezifischer Scheduling Request Bearer (SRBs), was die Komplexität des Uplink-Routings deutlich reduziert.

Zur Verwaltung der Dienstentdeckung und -bereitstellung führt das SBD spezifische Funktionen innerhalb des RAN ein. Eine zentrale Rolle übernimmt dabei die RAN Network Repository Function (RAN-NRF), die als zentrales Verzeichnis dient, in dem RAN-Netzfunktionen ihre Dienste registrieren und gegenseitig erkennen können, beispielsweise wenn ein RAN-Slice einen geeigneten Scheduler sucht. Ergänzend dazu übernimmt die RAN Network Exposure Function (RAN-NEF) das Routing zwischen dem Core Netz und RAN-Komponenten auf der Steuerungsebene. Persistente Informationen wie UE-Kontext, Sicherheitsparameter und RRC-Konfigurationen werden in der RAN Unified Data Management Function (RAN-UDM) verwaltet. Im Unterschied zum 5G Core verzichtet das RAN-SBD auf HTTP/2- und JSON-basierte Schnittstellen aufgrund strenger Latenzanforderungen und setzt stattdessen auf interne Dienstschnittstellen (SBDI) mit hochperformanten Kommunikationsmechanismen wie Shared Memory, die für Echtzeitverarbeitung optimiert sind.

Ein zentrales Merkmal des SBD ist die granulare Platzierung von Funktionen entsprechend ihrer Latenzanforderungen. Latenzkritische Funktionen wie die Cell Control Plane inklusive L2-Scheduler, PHY und Fronthaul-Multiplexer werden vor Ort (On-Premise) realisiert. Weniger zeitkritische Funktionen, etwa für

Betrieb, Administration und Wartung (OAM), die RAN-NEF oder nicht-echtzeitfähige Benutzerebenenfunktionen, können hingegen an weiter entfernten Edge-Standorten betrieben werden.

Mobilität und Spektrumaggregation
Im Bereich Mobilität und Spektrumaggregation zielt die Architektur darauf ab, unterschiedliche 5G-Mobilitätsmechanismen wie Layer-3-Handover, bedingter Handover sowie L1- und L2-getriggerte Mobilität in einem einheitlichen und robusten Verfahren zusammenzuführen. Dazu werden Netz und UE mit Kandidaten-Beams und -Zellen vorkonfiguriert, wobei entscheidend ist, dass das UE bereits vor der eigentlichen Handover-Ausführung Downlink- und Uplink-Synchronisation erreicht. Gleichzeitig wird Protokollkontinuität angestrebt, um Unterbrechungszeiten zu minimieren. Das Zurücksetzen von L2-Protokollen wie HARQ oder RLC bleibt optional, wodurch zusätzliche Paketverzögerungen durch Neuübertragungen vermieden werden können.

Für die Spektrumaggregation, etwa bei der Kombination von 2,6-, 3,5- und 7-GHz-Bändern, wurde ein Vergleich zwischen Carrier Aggregation (CA) und Dual Connectivity (DC) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass Carrier Aggregation insbesondere bei mittleren Dateigrößen einen Leistungsgewinn von etwa 12 bis 15 Prozent bietet und sich daher als bevorzugter Ansatz für 6G eignet. Dual Connectivity verursacht hingegen eine höhere Systemkomplexität, insbesondere durch Flusssteuerung und Leistungsaufteilung, und leidet zusätzlich unter Leistungseinbußen infolge nicht-idealer Backhaul-Verbindungen und strenger Leistungsreduktionsanforderungen.

Sub-Netze und spezialisierte Bereitstellungen
Darüber hinaus unterstützt die Architektur sogenannte Sub-Netze, also lokalisierte Netze beispielsweise in Fabrikumgebungen oder Fahrzeugen, die an ein übergeordnetes Parent-Netz angebunden sind. Der Sub-Netz-Controller fungiert dabei als Layer-3-Relais und integriert eine „6G-UE“-Funktion, um den Backhaul zum Parent-Netz sicherzustellen, während interne Geräte über eine eigene RAN-Funktion bedient werden. Teilen sich Sub-Netz und Parent-Netz dasselbe Spektrum, ist eine dynamische Koordination der Physical Resource Blocks erforderlich, um Interferenzen zu vermeiden. Ein besonderer Anwendungsfall sind nomadische, nicht-öffentliche Netze (Nomadic Non-Public Networks, NNPNs), etwa für Katastrophenhilfe oder landwirtschaftliche Anwendungen, die temporär auf satellitengestützten NTN-Backhaul angewiesen sein können.

Zur Priorisierung des kritischen Datenverkehrs, beispielsweise in Katastrophenszenarien, ermöglicht die Architektur ein slice-spezifisches RRC. UEs können ihre Slice-Anforderung bereits frühzeitig, entweder in Msg1 über die RACH-Präambel oder in Msg3 innerhalb der RRC-Setup-Anfrage, signalisieren. Dadurch kann das Netz das UE unmittelbar während des Verbindungsaufbaus den passenden Verarbeitungsressourcen zuordnen, etwa einer lokalen On-Premise-Verarbeitung oder einer Cloud-basierten Instanz.

Open RAN und Orchestrierung
Schließlich integriert die Architektur konsequent Open-RAN-Prinzipien, um Optimierungen durch Drittanbieter zu ermöglichen. Der nahezu echtzeitfähige RAN Intelligent Controller (RIC) ist über die E2-Schnittstelle eng mit dem RAN gekoppelt, wobei xApps beispielsweise zur Leistungs- und Interferenzsteuerung zwischen dynamischen Sub-Netzen eingesetzt werden können. Die übergreifende Steuerung erfolgt durch einen Ende-zu-Ende Orchestrator, der Bereitstellungen auf Basis von Service Level Agreements über RAN-, Transport- und Core-Domänen hinweg koordiniert. Jede Domäne verfügt dabei über einen eigenen Domänen-Controller; der RAN-Domänen-Controller nutzt Bereitstellungsdienste für Cloud-Native Funktionen, intelligente RRM-Funktionen sowie Infrastrukturmanagement, um die vereinbarten RAN-SLAs zuverlässig einzuhalten.

Betrieb von Sub-Netzen in unlizenzierten Frequenzbändern

Eine wichtige Spektrum Option für zukünftige Sub-Netze (SNs) wird durch unlizenzierte Frequenzbänder ermöglicht. Diese unlizenzierten Frequenzbänder bieten die folgenden Vorteile:

- Die Nutzung des Spektrums ist kostenlos, und der Kauf einer Lizenz für das Spektrum ist nicht immer die bevorzugte Option.
- Das zugewiesene Spektrum ist weltweit nahezu einheitlich, was internationales Roaming erleichtert.

- Neue Bänder (bis zu 1,2 GHz in einigen Ländern) werden im 6-GHz-Spektrum zunehmend verfügbar.

In den Veröffentlichungen [5] und [10] haben wir SNs im unlizenzierten 6-GHz-Spektrum bewertet und wir haben uns auf die Hauptherausforderung, die mit den geltenden Vorschriften bei der Nutzung des unlizenzierten Spektrums verbunden ist, nämlich die strengen Anforderungen an die Quality of Service (QoS) und gleichzeitig dem Mechanismus des Carrier sense multiple access with collision avoidance (CSMA/CA) zu entsprechen, konzentriert. CSMA/CA basiert auf dem "Listen before talk" (LBT)-Verfahren, das im Wi-Fi auch als Clear Channel Assessment (CCA) bekannt ist und folgende Schritte umfasst:

- Ein Gerät, das zu einem anderen Gerät senden möchte, führt eine Energiedetektion (ED) im aktuellen Kanal durch.
- Wenn die gemessene Leistung über einem bestimmten Schwellenwert liegt, bedeutet dies, dass der aktuelle Kanal belegt ist und das Gerät die geplante Übertragung verschieben muss.
- Wenn die gemessene Leistung unter diesem Schwellenwert liegt, beginnt das Gerät zu senden und belegt den aktuellen Kanal bis zu einer vordefinierten Zeitdauer.

Während LBT ein sehr effektives Verfahren ist, um die Koexistenz von Geräten mit verzögerungstolerantem Verkehr zu ermöglichen, ist sein grundlegendes Prinzip des "Wartens, bis der Kanal frei ist" nicht latenzfreundlich: Tatsächlich garantiert LBT Koexistenz und Fairness, indem es die Latenz als Anforderung opfert. Daher ist es nicht geeignet für Hyper Reliable Low Latency Communications (HRLLC)-Verkehr mit Latenzanforderungen in der Größenordnung von 100 µs, wie beispielsweise in 6G für bestimmte SN-Szenarien vorgesehen. In [10] haben wir daher eine neue verteilte Kanalzugriffsmethode, genannt Contention-free mechanism with power adaptation (ConPA), vorgeschlagen. Im Gegensatz zu den derzeit bestehenden Methoden, die auf LBT basieren, ermöglicht ConPA den Geräten, wenn erforderlich, den Zugang zum Kanal, und zielt darauf ab, eine erhöhte Leistung und höhere Zuverlässigkeit zu bieten. Dazu beseitigt ConPA Kollisionen auf dem Kanal und die damit verbundene Unzuverlässigkeit und passt die zu verwendende Sendeleistung basierend auf der während der ED gemessenen Interferenz an, sodass eine höhere Sendeleistung erlaubt ist, wenn eine geringere Interferenz gemessen wird. Abbildung 1 in [10] zeigt die Leistungszuordnungsfunktionen, die von ConPA und zwei Basismechanismen angewendet werden, nämlich dem IEEE 802.11 Distributed Coordination Function (DCF) und dem IEEE 802.11ax Overlapping Basic Service Set (OBSS) Packet Detect (PD)-basierten Spatial Reuse (SR) (als "802.11ax SR" bezeichnet), wobei die erlaubte Leistung für die Übertragung als Funktion der gemessenen Interferenz dargestellt ist. Die erlaubte Leistung kann in den Basisansätzen null werden, was zu einer Verschiebung der Übertragung führt. ConPA hingegen gewährleistet einen konsistenten Kanalzugang mit einer minimalen Sendeleistung. Mit ConPA können Geräte immer senden, vorausgesetzt, sie passen die Sendeleistung als Funktion der gemessenen Interferenz an. Während das signal to interference plus noise ratio (SINR) aufgrund potenziell erhöhter Interferenz begrenzt wird, zielt unser Ansatz auf eine erhöhte Airtime ab, die sowohl zur Erreichung strenger Latenzanforderungen, als auch zur Bereitstellung höherer Durchsatzraten beitragen kann. Die Ergebnisse in [10] zeigen, dass ConPA den höchsten Durchsatz unter allen Mechanismen bietet, mit bis zu 76% Verbesserung des Medians des Durchsatzes. Der durch ConPA erzielte Durchsatz-Gewinn kann durch die Airtime-Nutzung erklärt werden. Geräte, die ConPA implementieren, führen Übertragungen durch, indem sie die Kanalstreitigkeiten umgehen, was zu bis zu 98% mehr Airtime führt.

Einsatz von Subband-Full-Duplexing zur Verbesserung der Latenz und Kapazität auf dem Uplink

Das traditionelle Time-Division-Duplex ist wegen seiner Struktur in der Zeit und Frequenz bezüglich erzielbarer Latenzen, Kapazität und der Netzabdeckung auf dem Uplink beschränkt, da zu einen gegebenen Transmissionszeitpunkt (Symbol/Slot) physikalische Ressourcen in der Frequenzdomäne entweder nur in Downlink- oder Uplink-Richtung zur Verfügung stehen. Deshalb wurde im Rahmen von 6G-ANNA eingehend das Potential von Subband-Flexible-Duplex (SBFD) Verfahren in Sub-Netzen in Fabrik-Szenarien untersucht. Im Gegensatz zu den 3GPP Anwendungsfällen, die für die Performanz-Evaluation betrachtet werden, existieren, wegen der in einem Fabrik-Szenario sehr kleinen Zellen, bessere Chancen Leistungsgewinne zu erzielen, da aufgrund der sehr viel geringeren benötigten Sendeleistungen auf dem Downlink und Uplink die SBFD-Cross-Link-Interferenzphänomene deutlich schwächer ausgeprägt sind als beispielsweise in einem klassischen urbanen Szenario. Anhand von umfangreichen System-Simulationen unter Berücksichtigung aller Interferenzphänomene konnte geschlussfolgert werden, dass sich deutlich verbesserte Latenzen unter Verwendung von SBFD gegenüber TDD auf dem Uplink erzielen lassen.

Deep Reinforcement Lernen für Uplink Open-Loop Power Control in Sub-Netzen

In einem Sub-Netz kann es z.B. durch stark überlappende Zellen zu sehr herausfordernden Interferenzsituationen kommen, insbesondere, wenn die einer Zelle zugeordneten UEs keinen Handover in eine Nachbarzelle vollziehen können. Es ist bekannt, dass in der Regel die Uplink Senderichtung stärker von Interferenz aus einer gegnerischen Zelle betroffen ist als der Downlink. Deshalb ist es für die Gesamtsystemperformanz entscheidend, dass die Konfiguration der Uplink Open-Loop Power-Control (OLPC) sorgsam durchgeführt wird. In traditionellen Netzarchitekturen werden noch heute oftmals die Parameter statisch mit Hilfe von Erfahrungswerten gesetzt. Diese Methode kann jedoch in einem sehr stark heterogenen Sub-Netz nicht zielführend sein, da sich u.U. die Örtlichkeit der Zellen zeitlich verändern kann und die statisch gesetzten Parameter dann nicht mehr zur Erreichung der Systemperformanz-Kennzahlen geeignet sind. Mit der Einführung neuartiger Duplexverfahren wie SBFD gestaltet sich die Bestimmung optimaler UL OLPC Parameter, verursacht durch Uplink-zu-Downlink UE-UE intra-/inter-Zell Gleichkanalinterferenz, nochmals deutlich aufwändiger. Aus diesem Grund wurde ein maschinelles Online-Lernverfahren (Deep-Reinforcement Learning), das über einen multi-dimensionalen Aktionsraum wirkt, entwickelt, um mit diesem die für jede einzelne Zelle optimalen Werte für nominelle spektrale Sendeleistung P0 und den fraktionellen Pfadverlust-Kompensationsfaktor a zu bestimmen. Das Verfahren wurde gerade im Hinblick auf dem Einsatz in einem System mit SBFD dahingehend verfeinert, dass mehrere Deep-Learning Agenten verwendet werden, um die optimalen Parameter in Symbolen/Slots mit und ohne SBFD unabhängig voneinander zu bestimmen. Anhand von System-Simulationen konnte die Funktionsfähigkeit der erarbeiteten Lösung gezeigt werden.

2.1.4 AP3: Network of Networks

AP 3.1 Sub-Networks

Der Task 3.1 des AP3 untersucht, wie zukünftige 6G-Systeme eine große Vielfalt heterogener Sub-Netze in ein einheitliches Network of Networks (NoN) integrieren könnte. Diese Arbeit legt die grundlegenden Organisationsmodelle für die Ressourcenteilung fest, definiert, wie 6G-Sub-Netze verbunden, verwaltet und orchestriert werden, und spezifiziert die Architektur des Sub-Netz Controllers als zentrale Gateway- und Managementinstanz.

Tabelle 1: Verschiedene Sub-Netz Typen [22]

Archetype	SN Properties	
Fully Integrated Core	**RAN:** 3GPP RAN interface towards SN-UEs **Core:** SN includes a dedicated 3GPP CN	**3GPP-Compliance:** All relevant interfaces towards the PN are provided **Interaction:** Full integration of SN into PN[1]
Partially Integrated Core	**RAN:** 3GPP RAN interface towards SN UEs **Core:** SN includes partial 3GPP CN	**3GPP-Compliance:** A subset of 3GPP interfaces or proprietary tailored interfaces to the PN are provided **Interaction:** Selected interfaces for CN elements allowing interaction of SN and PN
Core-less	**RAN:** Independent from 3GPP[1] **Core:** SN does not include any 3GPP CN elements	**3GPP-Compliance:** No 3GPP interfaces other than a regular PN to UE interface w/o additional coordination **Interaction:** Backhaul 3GPP interface towards PN[1]

Im Rahmen dieser übergeordneten Vision definiert das 6G-ANNA-Projekt Sub-Netze als lokale, Use Case spezifische Netzdomänen, die ein anwendungsangepasstes Leistungsvermögen in Bezug auf Latenz, Datenrate, Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit bereitstellen sollen. Drei architektonische Archetypen – Fully Integrated Core, Partially Integrated Core und Core-less – unterstützen die große Heterogenität der Einsatzszenarien, die von Industrieumgebungen über mobile Robotik bis hin zu fahrzeuginternen Kommunikationssystemen reichen.

In Anerkennung der Tatsache, dass Sub-Netze unabhängig vom übergeordneten Netz betrieben werden können, führt 6G-ANNA ein strukturiertes Rahmenwerk für Autonomie ein, das von L0 (keine Autonomie) bis L3 (volle Autonomie) reicht. Dieses Modell ermöglicht es Sub-Netzen, kritische Funktionen wie lokale Kommunikation, Aufnahme von Geräten oder sogar vollständige Control- und User-Plane-Funktionen während temporärer Verbindungsunterbrechungen aufrechtzuerhalten. Zentrale Schlüsselelemente der Autonomie umfassen lokale Authentifizierung, lokale/Edge-Rechenkapazitäten, autonome Funkressourcenverwaltung, Sub-Netz-zu-Sub-Netz-Schnittstellen und vertrauensbasierte

Kontrollmechanismen. Die meisten untersuchten Anwendungsfälle benötigen L1-Autonomie, während missionskritische Szenarien wie öffentliche Sicherheit oder Kabinensensorik in Flugzeugen L2/L3 erfordern.

Im Zentrum jedes Sub-Netzes steht der Sub-Netz Controller, der die lokale Konnektivität steuert, je nach Bedarf lokale Netzfunktionen ausführt und die Backhaul-Verbindung zum übergeordneten Netz aufrechterhält. Je nach Einsatzszenario kann dieser Controller als leichtgewichtiges lokales gNB, als Relaisknoten oder als teilweise bzw. vollständig integrierte Kernnetzinstanz fungieren. Zu seinen konstant erforderlichen Fähigkeiten gehören das Management der Kommunikation innerhalb des Sub-Netzes, die Aufnahme von Geräten, die Wiederherstellung des Betriebs nach Unterbrechungen sowie die Koordination lokaler RAN- und Service-Interaktionen.

Um eine flexible Integration mit übergeordneten Netzen zu ermöglichen, stützt sich die Sub-Netzarchitektur auf ausgewählte Kernnetzfunktionen, die – abhängig von Autonomiestufe und Leistungsanforderungen – in entfernten, verteilten oder lokalen Modi betrieben werden. Funktionen wie AMF, SMF, UDM, AUSF, PCF und NWDAF können teilweise oder vollständig im Sub-Netz gehostet werden. Darüber hinaus führt 6G neue Fähigkeiten wie die Sensing Management Function (SeMF) für integrierte Sensorik und Kommunikation (ISAC) ein, die fortgeschrittene Anwendungsfälle wie die Erkennung der Sitzplatzbelegung in Flugzeugkabinen oder die Umweltüberwachung ermöglicht.

Insgesamt schaffen diese Ergebnisse ein kohärentes und zukunftsorientiertes architektonisches Fundament für 6G-Sub-Netze. Die konzeptionellen Modelle definieren die Interoperabilität heterogener Sub-Netze; das Autonomierahmenwerk gewährleistet Dienstkontinuität unter variierenden Netzbedingungen; und der Sub-Netz-Controller ermöglicht skalierbare lokale Intelligenz und nahtlose Integration.

Die flexible Platzierung von Kernfunktionen – lokal, remote oder verteilt – erlaubt es jedem Sub-Netz, sich an seine spezifischen Leistungs- und Zuverlässigkeitsanforderungen anzupassen. Insgesamt zeigt diese integrierte Architektur, dass 6G ein vielfältiges Ökosystem spezialisierter Sub-Netze unterstützen kann, das nahtlose Mobilität, effiziente Ressourcennutzung und vereinfachte Betriebsprozesse über verschiedene Domänen hinweg ermöglicht.

Optical

Im AP 3.1 wurden neuartige Netzarchitekturen zur Anbindung von 6G-Radiozugangspunkten an die Edge Cloud und das Radiokernnetz sowie zur Verbindung nicht-lokaler 6G-Mobilfunk Sub-Netze untereinander untersucht. Um Skalierbarkeit, Robustheit und Quality-of-Service zu gewährleisten, war dabei die größere Heterogenität und stärkere Dynamik im Vergleich zu Netzen vorheriger Generationen zu berücksichtigen, die sich aus der Vielfalt an Services und deren individuellen Anforderungen ergibt. Im Rahmen der Analyse in AP 3.1 haben sich Punkt-zu-Multipunkt-Netze als sinnvolle und kosteneffektive Lösung herausgestellt, da mehrere Radiozugangspunkte eine gemeinsame Faserinfrastruktur nutzen können. Dies trifft insbesondere auf Passive Optische Netze (PON) zu, die ohne aktive Komponenten im Fasernetz auskommen. PON unterstützt der Analyse zufolge verschiedene Split-Punkte wie Split 7.3 und 7.2x für den Transport der Mobilfunkdaten und ermöglicht eine flexible funktionale Aufteilung pro Funkeinheit (RU) und effiziente Zentralisierung energiehungriger Ressourcen, siehe Abbildung 2.

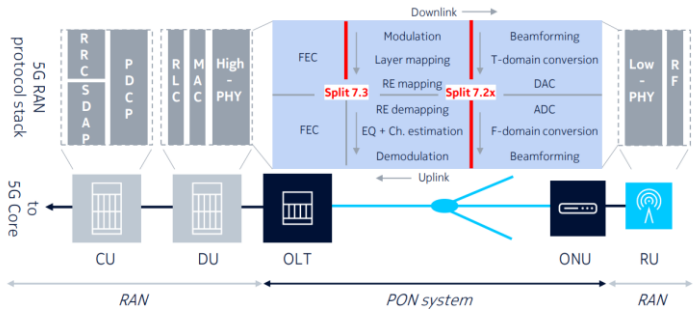


Abbildung 2: Architektur zur flexiblen Aufteilung/Anpassung der RAN-Funktionen & Netztopologie

7-3 optical transport needs per RU

Sub-6 (200MHz)	6G cellular (MIMO layer 16)	6G cell-free (MIMO layer: 2)
Peak capacity	25G	3G
Busy hour avr.	5G	1.5G
Mid-band (400MHz)	**6G cellular (MIMO layer 32)**	**6G cell-free (MIMO layer 4)**
Peak capacity	100G	15G
Busy hour avr.	20G	7.5G
mmWave (800MHz)	**6G cellular (MIMO layer 8)**	**6G cell-free (MIMO layer 2)**
Peak capacity	50G	15G
Busy hour avr.	10G	7.5G

Abbildung 3: Bandbreitenbedarf pro RU (7.3 Split)

Es wurden Möglichkeiten herausgearbeitet, wie eine hohe Dichte von 6G-Mobilfunkzellen und Hotspots kosteneffektiv durch PON unterstützt werden kann.

a) Nutzung bestehender FTTx-Infrastruktur und von ≥50 G PON-Transceivern (“brown-field scenario”)
b) Nutzung hochwertiger Transceiver in virtuellen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über die FTTx-Infrastruktur (Overlay), um noch höhere Datenraten für ausgewählte Services zu erreichen
c) cell-free MIMO-PON mit TSN-basiertem Fronthaul

Zunächst wurde eine konzeptionelle und simulative Bedarfanalyse hinsichtlich Transportkapazitäten, Datenlaufzeit (Latenz), Laufzeitunterschied (Jitter), Synchronisierungsbedarf und dynamischer Anbindung der Sub-Netze durchgeführt. Dabei wurden verschiedene funktionale Splits berücksichtigt. Abbildung 3 stellt exemplarisch die ermittelten Spitzendatenraten je Split dar. Diese Anforderungen wurden anschließend in optische Systemlösungen übersetzt. Kommerziell erwerbliche PON-Systeme wie XGS-PON und 25GS-PON ermöglichen je nach Split und Implementierung Transportkapazitäten zwischen 1 und 10 Gbps pro Funkeinheit. Für 6G-Netze werden Kapazitäten von mehreren zehn Gigabit pro Sekunde benötigt, weshalb PON-Systeme mit 50G, 100G und höheren Kapazitäten in AP 3.1 erforscht wurden. Es wurde festgestellt und experimentell nachgewiesen, dass kosteneffiziente PON-Systeme mit Intensitätsmodulation und Direktdetektion in der Lage sind, Spitzenkapazitäten bis zu 100 Gbps bereitzustellen. Weiterhin wurde analysiert, wie viele RUs je nach Split über ein einzelnes PON angebunden werden können. Für ein 50G-PON sind dies beispielsweise 45 RUs für Split 2 (HLS) und 15 RUs für Split 7.3 (LLS).

Im Rahmen der Arbeit wurden parallel Konzepte erforscht, die es erlauben die Latenz und den Jitter des Cloud-RAN-Fronthaul erheblich zu reduzieren, was für einige 6G-Services von hoher Bedeutung ist. Zu den analysierten Konzepten zählen Coordinated Transport Interface (CTI) und eine kooperative dynamische Bandbreitenzuweisung (Co-DBA), wobei Informationen zu Datenverkehr, Timing und Ressourcenzuweisung zwischen PON und RAN ausgetauscht werden. Eine echtzeitfähige Demonstration dieser Funktionen, siehe Abbildung 4, hat stattgefunden. Der PON-basierte Transport von TSN-Verkehr ermöglichte Jitter-Werte bis zu 1 µs. Im Vergleich zu festen Bandbreitenzuweisungen verbessert Co-DBA den durchgeführten Analysen zufolge die Bandbreiteneffizienz um den Faktor 15, siehe Abbildung 5. Die erarbeiteten Konzepte stellen einen wichtigen Schritt zur Koexistenz von TSN- und Nicht-TSN-Verkehr in einer gemeinsamen Transportinfrastruktur dar, wobei ein industrieller Controller die Ressourcenzuweisung der gesamten Kommunikationskette koordiniert.

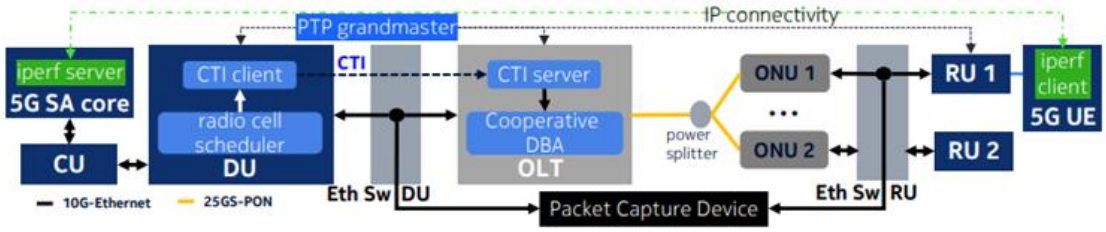


Abbildung 4: Ende-zu-Ende-Operation von CTI- und Co-DBA-unterstütztem Fronthaul über PON

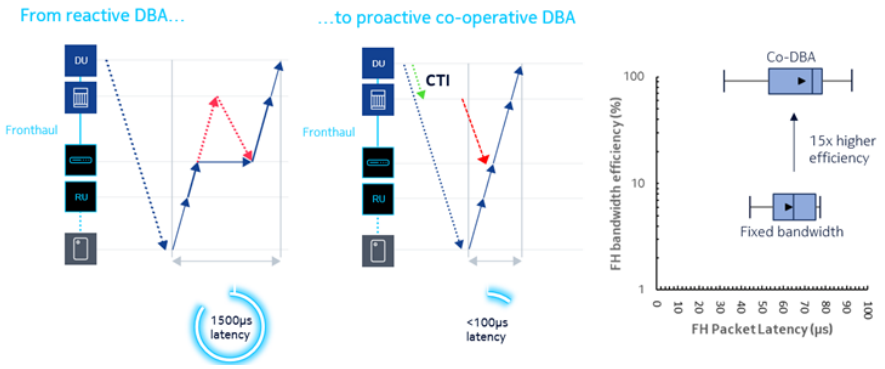


Abbildung 5: Latenz und Bandbreiteneffizienz im Fronthaul unter Ausnutzung von CTI & Co-DBA.

AP 3.2 Security & Resilience

Security

Im Rahmen des Arbeitspaketes wurden Themen zum sicheren Betrieb von Netzkomponenten in Cloudumgebungen und zur Sicherheit von Sub-Netzen behandelt.

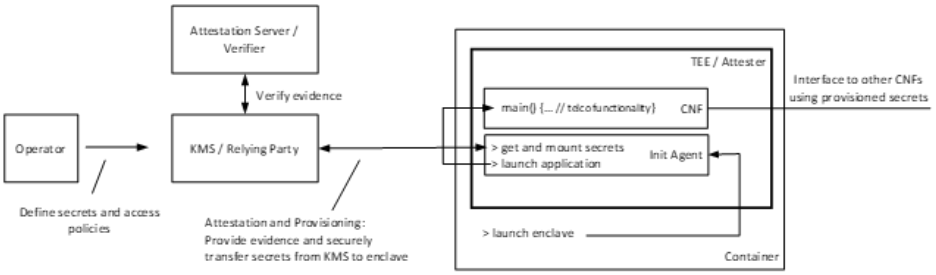
Stärker noch als bei 5G Netzen werden Netzfunktionen eines 6G Netze mittels eines Cloud-nativen Ansatzes ausgerollt. Bei 6G ist mit einer weiteren Flexibilisierung und Dezentralisierung der Installationen zu rechnen. Teile des Netzes werden auf einer virtuellen Infrastruktur betrieben, über die die Netzbetreiber oder Sub-Netzbetreiber keine volle Kontrolle haben. Trotzdem muss ein sicherer Betrieb gewährleistet werden.

Nach einer Analyse der Vertrauensbeziehungen der Aktoren einer Cloudinfrastruktur, von Angriffsvektoren und verschiedener Lösungsansätze wurde „Confidental Computing“ als ein zentraler Lösungsbaustein ausgewählt.

Beim Confidential Computing handelt es sich um Hardware-basierte Techniken zur Isolierung von ausführbarem Code und Speicherinhalten auf Prozessoren (sogenannte Trusted Execution Environments (TEE)), neuen Laufzeitumgebungen zur Cloud-nativen Ausführung von TEEs im Rahmen einer Container-Orchestrierung (typischerweise Kubernetes) und Verfahren zum Nachweis der Integrität und des Herstellens einer sicheren Verbindung zu externen Systemen (sogenannte „Remote Attestation“).

Im Rahmen des Projektes wurde eine Architektur zur Verwendung von Confidential Computing für den Betrieb von Mobilfunknetzen erstellt, prototypisch umgesetzt und evaluiert.

Als Teil der Architektur werden Cloud-native Funktionen (CNF) vollständig in einem TEE ausgeführt. Die Provisionierung der privaten Schlüssel und X.509 Zertifikate zur Sicherung des Datenaustausches zwischen CNFs erfolgt mittels eines Key Management Systems (KMS) als Teil der Remote Attestation. In anderen Worten, eine CNF bekommt die Schlüssel nur nach dem Nachweis, dass sie in einem TEE ausgeführt wird. Um die Auswirkung auf den Quellcode der CNFs zu minimieren, wird die gemeinsame Remote Attestation und Provisionierung von einem generischen „init agent“, ausgeführt, der zu der CNF gelinkt und gemeinsam in der TEE ausgeführt wird (siehe nachstehende Abbildung).



Architektur zur Verwendung von Confidential Computing für 6G

Anschließend wurde eine Analyse der Leistungseinbußen durchgeführt. Leistungseinbußen sind durchaus vorhanden, aber in den meisten Fällen im niedrigen zweistelligen Prozentbereich und somit vertretbar. Deutlichere Leistungseinbußen treten immer dann auf, wenn Daten und Code nicht lokal im Prozessorcache gehalten werden können, sondern im Extremfall verschlüsselt in den normalen Hauptspeicher ausgelagert werden müssen. Daraus folgt, dass die Skalierbarkeit der Netzfunktionen im Core Netz dadurch erzielt werden sollte, dass viele Instanzen integrierter Dienste mit hoher Datenlokalität und Kapazität für wenige Endgeräte eingesetzt werden sollten, anstelle von einzelnen Diensten mit sehr großer Kapazität und dementsprechendem größeren Speicherbedarf.

Zudem wurde eine Analyse über die Notwendigkeit der Standardisierung von Confidential Computing innerhalb der 3GPP durchgeführt. Zwar wird Confidential Computing in der Industrie unabhängig von Mobilfunk und 6G vorangetrieben. Jedoch erscheint eine Standardisierung der Schnittstelle zwischen CNFs und einem Bereitstellungsdienst bezüglich des Nachweises der Ausführung in einem gesicherten Bereich und der Bereitstellung von Identitäten und Schlüsseln machbar und sinnvoll, um die Übernahme dieser Sicherheitstechnologie für 6G zu erleichtern.

Zum Thema Sicherheit in Sub-Netzen wurde eine Analyse ausgeführt, die die drei Dimensionen, Angriffsvektoren, Grad der Autonomie und Betreibermodell, berücksichtigt.

Die Angriffsvektoren beziehen sich auf den Ursprung eines Angriffs, der über das Sub-Netz Endgerät, den Sub-Netz Controller, oder einen Angreifer in der Luftschnittstelle erfolgen kann. Der Grad der Autonomie definiert inwieweit eine Sub-Netz auch ohne Anbindung an das Core Netz funktionstüchtig sein soll. Betreibermodelle unterscheiden, ob das Sub-Netz und somit der Sub-Netz-Controller in der Verantwortung eines Endanwenders oder in der Verantwortung des Netzbetreibers liegen.

Je größer der Grad der Autonomie eines Netzes ist, umso mehr Sicherheitszuordnungen müssen auf dem Sub-Netz-Controller terminiert werden. Bei voller Autonomie müssen unter Umständen Sicherheitsschlüssel auf den Sub-Netz-Controller repliziert werden, was zu einer erhöhten Gefahr eines Diebstahls führen kann.

Grundsätzlich ist aufgrund der weiten Verteilung von Sub-Netzen und der damit verbunden physikalischen Exponierung von einer erhöhten Gefährdung auszugehen.

Falls das Sub-Netz in der Verantwortung eines Endanwenders liegt, muss sichergestellt werden, dass die Sub-Netze isoliert werden. Das heißt, bei einem Angriff auf einen Sub-Netz-Controller muss der Schaden auf den Anwender begrenzt bleiben. Zugleich muss z.B. durch Zugriffslisten verhindert werden, dass sich das Sub-Netz Endgerät eines Anwenders versehentlich mit dem möglicherweise manipuliertem Sub-Netz Endgerät eines anderen Anwenders verbinden kann.

Falls der Betreiber die Verantwortung für Sub-Netze übernimmt, muss er sicherstellen, dass die Sub-Netz-Controller nicht manipuliert werden können. In diesem Zusammenhang können Methoden des Confidential Computing, die im ersten Teil des Projekts untersucht wurden, eine wichtige Rolle spielen.

Aufgrund der Komplexität des Themas kann eine abschließende Sicherheitsarchitektur für Sub-Netze erst erstellt werden, nachdem die grundsätzliche Architektur innerhalb der Standardisierung definiert wurde.

2.1.5 AP4: Automation & Simplification

Management & Orchestration

AI-native Network Management – Management of AI/GenAI

Die zunehmende Netzkomplexität aufgrund von mehr Nutzern, Geräten und Diensten macht traditionelles, menschenzentriertes Management unzureichend, wodurch AI/ML-gesteuerte Automatisierung für die Leistung und Akzeptanz von 6G-Netzen entscheidend wird. Andererseits ist die effizienteste und automatisierteste Verwaltung von AI/ML-fähigen Netzentitäten von größter Bedeutung für die breite Einführung von AI/ML-Lösungen in den Netzen. Daher haben wir verschiedene Ansätze für das AI/ML-Management untersucht, einschließlich der Überwachung der AI/ML-Leistung und des Energieverbrauchs für Aktionen wie Re-Training, Modellauswahl usw. Zukünftige 6G-Netze werden jedoch AI-native Lösungen umfassen, einschließlich neuer Arten von AI-Ansätzen wie Generative AI und autonome AI-Agenten. Wir haben wichtige Use Case Familien identifiziert, in denen Generative AI (und insbesondere LLM – Large Language Model) die Effizienz vieler Anwendungsfälle wie Kundenkontakt, Produktentwicklung und Netzbetrieb steigern soll, beispielhaft durch intent-basiertes Management. In diesem Modell übersetzt ein Generativer AI-Agent mit Planungsfähigkeiten die Absicht eines Operators in natürlicher Sprache (z.B. "Netzverfügbarkeit verbessern") in Unteraufgaben für spezialisierte Agenten. Wir haben Konzepte entwickelt, die das Management von AI-Agenten, die Identifizierung der Fähigkeiten von AI-Agenten im Netz und das Management der AI-Agentenplanung ermöglichen. AI-Agenten verlassen sich auf Benutzereingaben und Kontextinformationen, die unpräzise sein können. Um dies zu adressieren, haben wir Konzepte entwickelt, um zusätzlichen Kontext, der vom Netz bereitgestellt wird (z.B. Benutzerstandort, Signalstärke), durch zentralisierte Sammlung und Bereitstellung an AI-Agenten zu nutzen. Darüber hinaus verbessert Retrieval-Augmented Generation (RAG) die Genauigkeit von Generativer AI/LLM, indem Modelle in externem Wissen verankert werden. Wir haben die Implikationen von RAG (z.B. Zugriffsrechte, Kosten, Latenz) analysiert und Konzepte für die Verwaltung seiner Nutzung entwickelt, einschließlich der beschränkungsbewussten Aktivierung/Deaktivierung und der Konfiguration bevorzugter RAG-Quellen.

Goal-oriented – Gemeinsame Netz- und Anwendungsoptimierung

Die ursprüngliche Aufgabe, die Bereitstellung und den Austausch von Produktions- und Industriekenntnissen zur Optimierung industrieller Netzoperationen zu bewerten, wurde auf allgemeine Anwendungsfälle in industriellen und öffentlichen Netzen ausgeweitet, wobei der Fokus auf der gemeinsamen Optimierung von Anwendungen und Netzen zur Verbesserung der Benutzererfahrung liegt. Dies erfordert die Definition spezifischer Schnittstellen, um sowohl Netz- als auch Anwendungsanforderungen zu erfüllen und es wurde eine Lösung zur optimalen Platzierung von Edge-Cloud-Ressourcen für interaktive Multi-User-

Anwendungssitzungen entwickelt. Dabei können Anwendung und Netz Informationen mit einer dritten Entität austauschen, um eine optimale Ressourcenzuweisung basierend auf Anforderungen und Fähigkeiten zu berechnen, wobei die technische Lösung Design, Schnittstellen und Signalisierung umfasst.

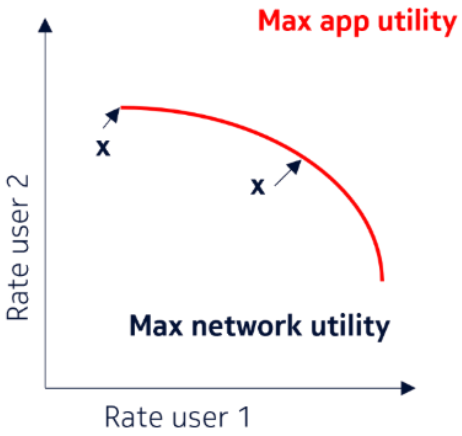


Abbildung 6 Ziel-orientierte Optimierung

Ein zentraler Ansatz zur gemeinsamen Optimierung von Netz und Anwendung, insbesondere in Multi-User-Szenarien, ist ein allgemeiner Rahmen basierend auf der Optimierung von Mehrziel-Funktionen. Als Beispiel dient ein Diagramm, dessen Achsen den erreichbaren Nettodurchsatz für zwei Benutzer innerhalb derselben Anwendungssitzung darstellen, siehe Abbildung 6. Hierbei werden die multiplen Ziele deutlich: Die rote Kurve im obigen Diagramm repräsentiert die Menge der Pareto-optimalen Punkte, die die Anwendungsoptimierung oder den Nutzen für die Benutzer maximieren – ein Zustand, in dem kein Benutzer bessergestellt werden kann, ohne einen anderen schlechter zu stellen. Im Gegensatz dazu stellt ein schwarzes Kreuz einen Punkt dar, der die Netzoptimierung oder den Nutzen aus Sicht des Netzes maximiert, welcher oft nicht mit dem Anwendungsoptimum übereinstimmt. Die Herausforderung besteht darin, eine optimale Lösung oder Gleichgewichtslösung zu finden, die die unterschiedlichen Prioritäten von Anwendung (Benutzererfahrung) und Netz (Ressourceneffizienz) ausbalanciert. Dies wird im Diagramm durch die Projektion des netzseitig optimalen Punktes (schwarzes Kreuz) auf die anwendungsseitig optimale Kurve (rot) veranschaulicht, um einen Kompromiss zu finden, der für alle beteiligten Benutzer akzeptabel ist. Die Entwicklung solcher Lösungen kann durch multi-objektive Optimierungsalgorithmen, wie evolutionäre Algorithmen oder Spieltheorie, oder durch multi-agenten Verstärkungslernalgorithmen erfolgen, bei denen Anwendung und Netz als interagierende Agenten agieren. Erste Untersuchungen für diesen Ansatz wurden erfolgreich im Anwendungsfall des Online-Cloud-Gamings durchgeführt, der sowohl die Platzierung von Edge-Cloud-Ressourcen als auch die gemeinsame Netz-Anwendungs-Optimierung für mehrere Spieler umfasst.

Digital Twins & Extended Reality

Digital Twinning Architektur

Zusammen mit dem Projektpartner Bosch haben wir eine Architektur für Digitale Zwillinge (DT) erstellt und im AP4 Konsortium weiter verfeinert. Ziel der Architektur war es, Digitale Zwillinge in bestehende Architekturen zu integrieren und die Möglichkeiten der DT aufzuzeigen. Die resultierende Architektur ist in Abbildung 7 dargestellt.

Die Architektur besteht aus fünf verschiedenen Schichten, die eng miteinander verzahnt sind. Auf der untersten Schicht befinden sich die „Physical Entities“, was sowohl Kommunikationsnetze sein können, als auch Sensoren, Umgebungen oder ähnliches. Diese Physical Entities generieren die Daten, aus denen die DTs erzeugt werden. Um die Daten zu strukturieren und zu verarbeiten, gibt es eine Data Handling Schicht. Neben der Komprimierung, Datenbereinigung und der Verarbeitung der Daten werden diese auch an entsprechenden Orten gespeichert und der DT Plattform zur Verfügung gestellt. Die DT Plattform beinhaltet die eigentlichen DTs, die unterschiedliche Ausprägungen haben können. So kann es sich dabei um einen einzelnen oder mehrere DTs handeln oder aber die DTs werden hierarchisch angeordnet. Die Data Modeling & Augmentation Schicht verwendet die Digitalen Zwillinge für verschiedene Zwecke, wie die reine Visualisierung in Form von Dashboards, für Simulationen und Emulationen, für die Lokalisierung, für die

übergeordnete Kontrolle der einzelnen Physical Entities oder aber für die Vorhersage, z.B. der Mobilität oder Netzzustände. Die Anwendungen und Dienste befinden sich auf der obersten Schicht und greifen auf die Datenmodelle zu.

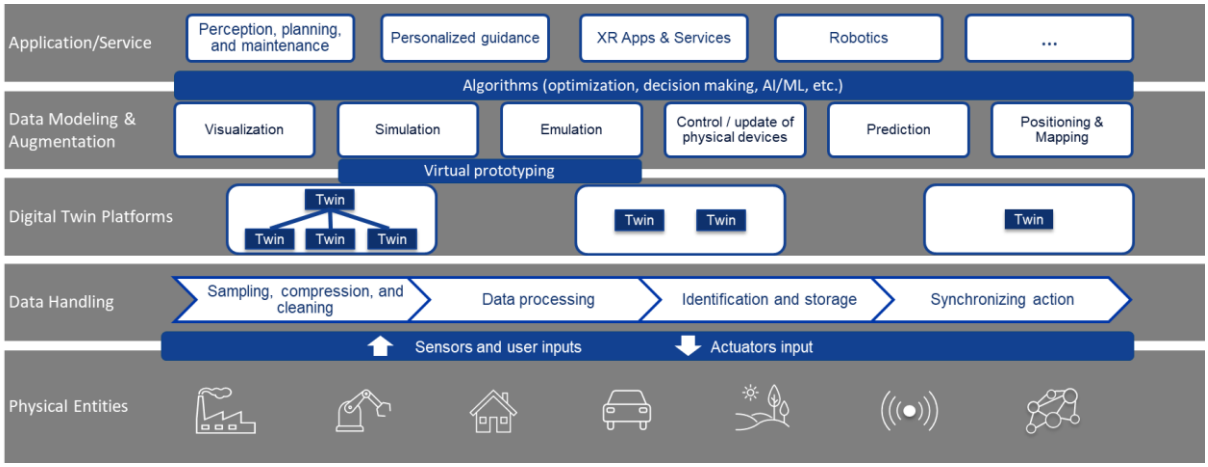


Abbildung 7: Digital Twinning Architektur

Graph Neural Network for Digital Twinning

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, werden DTs aus Daten erstellt, die von den Physical Entities produziert werden, um sie als digitale Duplikate darzustellen. Ein vielversprechendes datenbasiertes Werkzeug, um digitale Duplikate von Physical Entities zu erstellen, sind Graph-Neural Networks (GNNs). GNNs sind neuronale Netze, die darauf ausgelegt ist, auf graphenstrukturierten Daten, wie Knoten, Kanten und Beziehungen zwischen ihnen, zu arbeiten. Um auf graphenstrukturierten Daten arbeiten zu können, verwenden GNNs das neuronale Nachrichtenübertragungsframework, das es Knoten ermöglicht, Informationen mit ihren benachbarten Knoten auszutauschen und diese Informationen zu aggregieren, um ihre eigenen Darstellungen zu aktualisieren. Auf diese Weise können GNNs sowohl die strukturelle Information des Graphen, als auch die mit jedem Knoten/Kante verbundenen Merkmale erfassen. Als Ergebnis können GNNs detaillierte Darstellungen von Knoten/Kanten erstellen, die sowohl lokale als auch globale Kontexte berücksichtigen. GNNs können verwendet werden, um komplexe Graphen zu modellieren, Knoten- und Kantenmerkmale vorherzusagen, für graphische Klassifikationstasks und für graphische Generierungsaufgaben. GNNs sind flexibler als klassische neuronale Netz-Schichten Ansätze (z.B. Convolutional Neural Network oder LSTM), da ihre Architektur nicht von der Anzahl der Eingaben abhängt, sondern von der Dimension der Knoten/Kantenmerkmale und den Knotenbeziehungen. Auf diese Weise kann die gleiche GNN-Architektur in einem kleineren (in Bezug auf die Anzahl der Knoten/Kanten) Szenario trainiert werden, ohne dass das Modell neu trainiert werden muss, was die gute Generalisierungsfähigkeit dieses Werkzeugs beweist. GNNs stellen ein vielversprechendes Werkzeug für die Erstellung allgemeiner DTs dar, das aufgrund des Designs die Fähigkeit zur was-wäre-wenn-Analyse unterstützt. GNNs können als funktionale Modelle verwendet werden, um einen DT aus einer Zusammensetzung von spezialisierten Modellen zu erstellen. Zum Beispiel kann ein GNN die Ende-zu-Ende Verzögerung eines UEs modellieren, während ein anderes GNN die UE-QoS unter Verwendung der UE-Zähler und KPIs modelliert. Dann kann ein DT des Netzes erstellt werden, der für mehrere Dienste Einblicke in den UE-Zustand bietet, indem mehrere elementare Modelle zusammengesetzt werden. GNN-Modelle ermöglichen es, den erhaltenen DT für eine unterschiedliche Anzahl von UEs und Netzknoten zu testen, ohne dass die spezialisierten Modelle geändert werden müssen.

Vorläufige Ergebnisse, die von GNNs bereitgestellt werden, deuten darauf hin, dass DTs, die mit diesen Modellen erstellt wurden von oberen Schichten verwendet werden können, um je nach Anwendungszweck was-wäre-wenn-Analysen, Simulationen oder Vorhersagen durchzuführen.

Real-time Digital Twinning

Die Herausforderung des Real-time Digital Twinning besteht darin, Veränderungen der realen Welt zeitnah zu erkennen und entsprechend im digitalen Zwilling abzubilden. Im Projekt wurde unterschieden zwischen großflächigen digitalen Zwillingen und kleinen, lokalen Zwillingen. Für die großflächigen Zwillinge wurden Sensordaten von Fahrzeugen mit Daten des Integrated Communication and Sensing (ICAS) kombiniert, um

Fahrzeugführer auf Gefahren hinzuweisen. Dieser Ansatz, das so genannte Mobility Metaverse, wurde als Proof of Concept umgesetzt und wird im AP5 näher beschrieben.

Der zweite Ansatz, die lokalen digitalen Zwillinge, wurde zusammen mit dem Projektpartner Hololight entwickelt und umgesetzt. Die Idee war es, einen digitalen Zwilling eines Raumes von einem Server auf eine VR Brille zu streamen, dessen Nutzer sich in der realen Umgebung befindet und frei bewegen kann. Zusätzlich bewegen sich Fahrzeuge im Raum, deren Positionen in Echtzeit auf die Brille dargestellt werden, so dass es zu keiner Kollision mit dem Brillenträger kommt.

Interaction between Network and XR Application

Für die Interaktion zwischen dem Kommunikationsnetz und der Anwendung haben wir den Low Latency, Low Loss, Scalable Throughput (L4S) Ansatz implementiert, untersucht und optimiert. Das Ziel war es, die Latenz zwischen einer Cloud-basierten XR Anwendung und den dazugehörigen XR Brillen zu minimieren. In umfangreichen Messkampagnen konnte gezeigt werden, dass mittels L4S die Latenz selbst in stark ausgelasteten Netzen auf ein Minimum reduziert werden kann, während die Qualität der angezeigten 3D Modelle in den XR Brillen nur minimal verringert wird (siehe Veröffentlichung [23]).

Der gleiche Ansatz wurde zusammen mit Mimetik für eine Teleoperation Anwendung genutzt. Dabei wurde ein Roboterhund aus der Ferne mittels intelligenter Handschuhe und VR Brillen gesteuert. Hier gab es neben den Latenzanforderungen für die Übertragung der Kamera, die auf dem Roboterhund montiert war, noch die Niedriglatenz-Anforderungen der Handschuhe zur Steuerung des Hundes. Ein Schaubild des Szenarios ist in Abbildung 8 zu sehen.

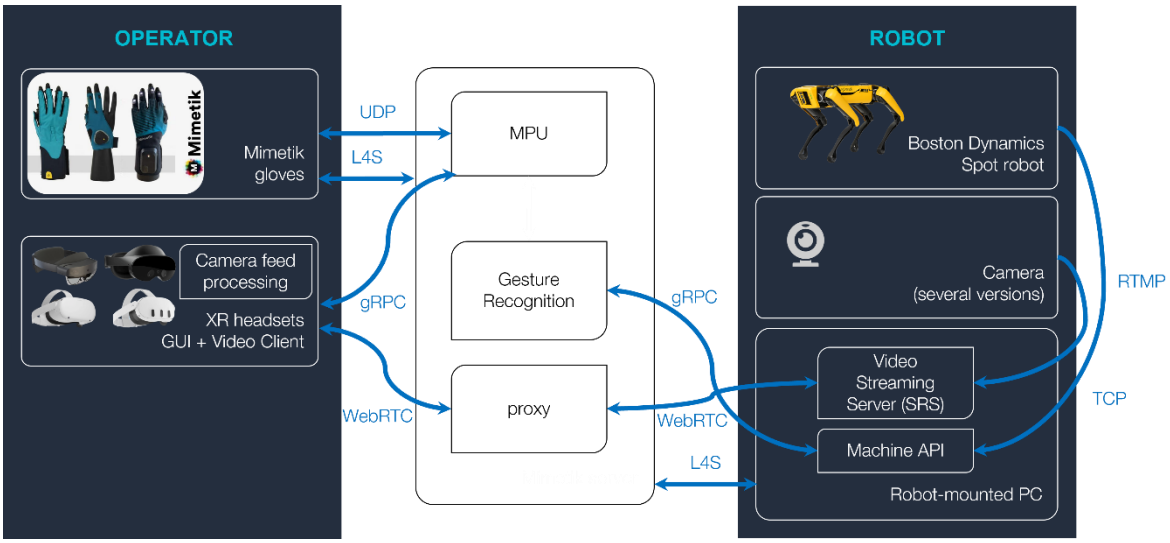


Abbildung 8: Teleoperation Setup zur Steuerung eines Roboterhundes.

6G Network Optimization for XR Applications

Extended-Reality-(XR-)Anwendungen erfordern einen kontinuierlichen, hochvolumigen Datenaustausch zwischen Endgeräten und der Cloud, was hohe Anforderungen an Latenz, Bandbreite und Netzstabilität stellt. Benutzermobilität und variierende Interaktionsmuster führen zu dynamischen Änderungen in der Netztopologie, die zu Überlastung und Leistungsabfällen führen können. Die Bewältigung dieser sich schnell verändernden Bedingungen ist entscheidend, um eine konsistente und hochwertige XR-Nutzererfahrung sicherzustellen.

In dieser Arbeit besteht der wesentliche Beitrag in der Entwicklung eines netztopologiebasierten Optimierungsansatzes, der adaptive und effiziente Konnektivität für latenzkritische, bandbreitenintensive und hochmobile Anwendungen wie XR ermöglicht. Die vorgeschlagene Systemarchitektur umfasst vier koordinierte Komponenten: XR-Benutzer, XR-Server, einen topologiebewussten Detektionsalgorithmus mit einer Expositionsschnittstelle sowie einen Provisioning-Server, der Benutzer dynamisch den optimalen XR-Servern zuordnet. Durch kontinuierliche Überwachung von Topologievariationen – darunter Linkqualität, Auslastung, Latenz und Benutzerbewegung, sowie die Vorhersage zukünftiger Änderungen stellt das System eine reaktionsfähige und ressourceneffiziente Netzbetriebsweise sicher.

Zur Unterstützung einer realen Integration haben wir diese Komponenten der 3GPP-Netzarchitektur zugeordnet: XR-Benutzer entsprechen UEs, XR-Server entsprechen EAS/AS, der Detektionsalgorithmus entspricht NWDAF, die Topology-API entspricht NEF und der Provisioning-Server entspricht AF. Diese Abbildung bietet einen praktischen Weg, das vorgeschlagene Optimierungsframework in zukünftige Mobilfunknetze einzubetten. Ein Proof-of-Concept wurde zusammen mit den Partnern Smart Mobile Labs und der TU Braunschweig entwickelt und auf der 6G Konferenz 2025 in Berlin demonstriert, wodurch die Machbarkeit des Ansatzes und seine Fähigkeit zur Leistungsverbesserung unter dynamischen Netzbedingungen bestätigt wurden.

Distributed Applications & Artificial Intelligence

Der Fokus dieses Tasks liegt auf der Optimierung verteilter Anwendungen und künstlicher Intelligenz durch die effiziente Übertragung von Wissen zwischen mehreren KI-Agenten. Dies wird durch den Einsatz von Transfer Learning, Multi-Agent Deep Reinforcement Learning, und dem Information Bottleneck Ansatz ermöglicht.

Network-Slicing ermöglicht es Betreibern, diverse Anwendungen effizient auf einer gemeinsamen Infrastruktur zu unterstützen. Die zunehmende Komplexität von Netzen, verstärkt durch Interzell-Interferenzen, erfordert jedoch eine agile und anpassungsfähige Ressourcenverwaltung. Während Deep Learning Lösungen für den Umgang mit Komplexität bietet, ist seine Anpassungsfähigkeit an dynamische Konfigurationen begrenzt. In [2] und [6] haben wir einen neuartigen hybriden Deep-Learning-Algorithmus namens IDLA (Integrated Deep Learning with the Lagrangian Method) vorgeschlagen. Dieser integrierte Ansatz zielt darauf ab, die Skalierbarkeit, Flexibilität und Robustheit von Lösungen zur Ressourcenallokation im Slicing zu verbessern, indem er die hohe Approximationsfähigkeit von Deep Learning und die starke Generalisierung klassischer nichtlinearer Optimierungsmethoden nutzt.

Als Folgeuntersuchung [13] stellen wir nun einen Ansatz zur Domänenadaption (DA) mit einem variablen Informations-Bottleneck (VIB) vor, um die Anpassungsfähigkeit von IDLA in verschiedenen Netzumgebungen und -bedingungen zu verbessern. Wir schlagen vor, einen VIB-basierten Quality-of-Service (QoS)-Schätzer vorzutrainieren, der Slice-spezifische Eingaben verwendet und über alle Slices im Quellbereich hinweg geteilt wird. Dieser Schätzer kann von jedem Slice im Zielbereich eingesetzt werden, um seine QoS vorherzusagen und die Ressourcenallokation des Slices mithilfe des IDLA-Algorithmus zu optimieren. Der VIB-basierte Schätzer wird kontinuierlich mit einer Mischung aus Stichproben aus dem Quell- und Zielbereich feinabgestimmt, bis die Konvergenz erreicht ist.

Die Arbeit in [19] stellt ein modulares Multi-Agenten-Lernframework für selbstorganisierende Netze vor, das globale Optimierungsprobleme in kooperierende, lokal lernende Agenten zerlegt und so eine verteilte Entscheidungsfindung ermöglicht. Durch kompositionelles Lernen und eine hierarchische Agentenstruktur wird die Skalierbarkeit und Sample-Effizienz gegenüber klassischen Multi-Agent-RL-Ansätzen deutlich verbessert. Die Lösung kombiniert zentrales Training mit dezentraler Ausführung und erlaubt eine effektive Zusammenarbeit heterogener Agenten auf Basis lokaler Beobachtungen. Simulationsergebnisse zeigen signifikante Leistungsgewinne in realistischen Netzszenarien und unterstreichen den Mehrwert verteilter KI für große Multi-Agenten-Systeme.

Sustainability & Trustworthiness

In Task 4.4 wurde eine Reihe von Standardisierungslösungen entwickelt, die sich am 3rd Generation Partnership Project (3GPP) orientieren, um ein vertrauenswürdiges, effizientes und robustes Framework für künstliche Intelligenz/maschinelles Lernen (KI/ML) für die herstellerunabhängige und dynamische Umgebung von 6G-Mobilfunknetzen bereitzustellen. In einem gemeinsam mit den 6G-ANNA-Partnern eingereichten Beitrag [25] geben wir einen Überblick über die bestehende 5G-Advanced-Standardisierung im Bereich KI/ML. Unsere Forschung untersuchte und behandelte darüber hinaus wichtige 6G Standardisierungsanforderungen bezüglich Daten- und Signalverfahren, die die grundlegende Voraussetzung für KI/ML-Training, Inferenz und Überwachung in den Bereichen Radio Access Network (RAN) und Service and System Aspects (SA) sind.

Ein zentraler Bestandteil unserer Forschung identifizierte verschiedene Aspekte der Datenqualität und stellte Lösungen vor, um Sparsamkeit zu erreichen, d.h. einen sparsamen Umgang mit Netzdaten und Netzressourcen. Zu diesem Zweck wurde die semantische Kommunikation als leistungsstarkes Werkzeug identifiziert und eingesetzt. Die semantische Kommunikation berücksichtigt, dass, wenn die über das Netz übertragenen Daten als Eingabe für KI-/ML-Modelle dienen, eine exakte Rekonstruktion dieser Daten auf der Empfängerseite nicht erforderlich ist, da ein KI/ML-Modell ein gewisses Maß an Verzerrungen wie

Rauschen und fehlende Werte bei seiner Eingabe verarbeiten kann. Beispielsweise spezifiziert die 3GPP eine einfache feste 7-Bit-Quantisierung (und 4-Bit-Differenz) für Funkmessungen wie die empfangene Referenzsignalleistung, was für viele KI/ML-Anwendungen unnötig präzise ist. Um dieser Einschränkung zu begegnen, haben wir adaptive Quantisierungsfunktionen für Endgeräte vorgeschlagen, die über die Konfiguration aus dem Netz gesteuert werden und auch als neue Freiheitsgrade bei der verbesserten Planung genutzt werden können. In einer weiteren Fallstudie wurde ein effizienteres Wiederholungsprotokoll vorgeschlagen, bei dem die statistischen Informationen von Benutzergeräten zur Bewertung der Schwere fehlender Informationen und zum Überspringen einiger Wiederholungen verwendet werden.

Als weitere Lösung zur Realisierung von Sparsamkeit haben wir die Verwendung synthetischer Datengenerierung in Verbindung mit einer Verbesserung der Netzdatenanalysefunktion im Core Netz vorgeschlagen, die die Genauigkeit und Nützlichkeit der synthetisch generierten Daten überwacht und diese an den Generator synthetischer Daten meldet. Dieser Ansatz mindert die Leistungsbeeinträchtigungen, die durch den Ersatz realer Daten durch synthetische Daten verursacht werden. In einer weiteren Fallstudie konzentrierten wir uns auf die Reduzierung der Funkmessungen für die Vorbereitung und Durchführung eines Handovers. Um diesen Signalisierungsaufwand zu reduzieren, wurden neue bereichsbasierte Bedingungen sowohl für die Handover-Vorbereitung als auch für die Ausführung vorgeschlagen.

Über die Datensparsamkeit hinaus wurden kritische Probleme hinsichtlich der Datenkontinuität und -konsistenz identifiziert, die sich direkt auf die Zuverlässigkeit und Robustheit von KI/ML auswirken. Bestehende Verfahren zur Minimierung von Tests (MDT) und zur Funkressourcensteuerung (RRC) werden unterbrochen, wenn Endgeräte zwischen verbundenen und inaktiven Zuständen wechseln. Um dieses Problem zu lösen, haben wir eine vom Netz verwaltete temporäre UE-Kennung vorgeschlagen, die über RRC-Übergänge hinweg beibehalten wird und eine unterbrechungsfreie Erfassung von Trainingsdaten gewährleistet. Wir haben uns auch mit Inkonsistenzen zwischen Trainings- und Inferenzphasen befasst, die durch die Verwendung logischer Identifikatoren (z.B. Positionsreferenzsignal-Ressourcen-IDs) verursacht werden, die im Laufe der Zeit nicht mehr denselben physikalischen Strahlbedingungen entsprechen. In der vorgeschlagenen Lösung teilt das Netz abstrahierte physikalische Parameter, wodurch sichergestellt wird, dass die Inferenz unter physikalischen Bedingungen erfolgt, die mit den Trainingsdaten übereinstimmen, während gleichzeitig das geistige Eigentum des Anbieters geschützt wird. In einer dritten Fallstudie wird zur Ermöglichung einer geringen Latenz für die Trainingsdatenerfassung vom UE eine verbesserte Signalisierung und Verhandlung für die Protokollierung von Trainingsdaten am UE eingeführt, die die UE-Fähigkeiten und den Status in Bezug auf den Batteriestand oder den Access Stratum Buffer berücksichtigt.

Mit der zunehmenden Verbreitung von KI/ML werden föderiertes Lernen (FL) und Inferenz immer praktikabler. Daher führten wir eine Informationsquelle über FL-Jobs und die Auswahl von Knoten ein, die durch Konfliktminderung Ressourcenverschwendung vermeidet. Abschließend haben wir eine Architektur für die umgebungsbewusste Orchestrierung von föderierter Inferenz eingeführt, um Inferenzaufgaben auf Knoten zu verteilen, die den CO2-Fußabdruck minimieren, ohne Latenzbeschränkungen zu verletzen [4].

Durch die Ergänzung der bestehenden 5G-A-Standardisierung um Mechanismen für Datenkontinuität, sparsamen und KI-bewussten Umgang mit Daten sowie verbesserte Signalisierung legen die vorgeschlagenen Lösungen eine klare Grundlage für den Aufbau eines widerstandsfähigen und vertrauenswürdigen KI-nativen 6G-Netzes.

2.1.6 AP5: Testbeds & Proof of Concepts

Die Arbeiten am AP5 sollten nach Projektplan im Juli 2023 starten. Aufgrund der Berlin 6G Konferenz im Juni 2023 und einer anvisierten ersten Version eines Proof of Concepts (PoCs) wurde jedoch bereits früher mit den Arbeiten am AP5 begonnen. Die Arbeiten im AP5 unterteilten sich in Arbeiten an den Testbeds an den beiden involvierten Nokia Standorten München und Stuttgart und den Arbeiten an verschiedenen PoCs.

Digital Creativity Lab Testbed

Das Digital Creativity Lab (DCL) am Standort München unterteilt sich in einen Showroom und einen Serverraum. Für 6G-ANNA wurden beide Bereiche genutzt. Hier stand neben Wi-Fi 6 und Ethernet auch ein privates 5G Netz zur Verfügung. Für die Arbeiten in AP 4.2 wurde zusätzlich noch ein „Ground Truth“ Positionierungssystem installiert. Damit ist es möglich, die Positionierungsgenauigkeit mit 6 Freiheitsgraden exakt zu bestimmen. Neben den unten aufgeführten PoCs wurden noch drei weitere Testumgebungen installiert und aufgesetzt.

Digital Physical Fusion

Beim Thema Digital-Physical Fusion geht es um die Verschmelzung der virtuellen mit der realen Welt. Dazu wurde ein fotorealistischer digitaler Zwilling des DCL Showrooms erstellt. Dieser digitale Zwilling ist nahezu identisch mit seinem realen Counterpart. Wie genau der digitale Zwilling bezüglich der Platzierung der Objekte im Showroom und der Skalierung ist, wurde mittels einer VR Brille getestet. Die Testperson mit der VR Brille sieht den digitalen Zwilling, während sie sich in der realen Umgebung aufhält. Die Tests haben gezeigt, dass sich die Testperson frei im DCL bewegen kann, ohne dass sie in Objekte wie Tische, Demostände, etc. hineinläuft (siehe AP 4.2).

Confidential Computing

In enger Zusammenarbeit mit AP 3.2 wurde im DCL eine Testumgebung in Betrieb genommen, die die praktische Verifizierung der in AP 3.2 entwickelten Konzepte zum Confidential Computing ermöglicht. Die Testumgebung besteht aus zwei im Rahmen des Projektes angeschafften Testcomputern (Intel NUC) mit der benötigten Sicherheitstechnologie und einem von Nokia bereitgestelltem Server. Auf der Testumgebung wurde ein Kubernetes Cluster eingerichtet und ein teilweise im Confidential Computing Modus betriebenes 5G Core Netz sowie ein RAN und UE Simulator ausgeführt.

6G Mobility Metaverse

Der 6G Mobility Metaverse Proof of Concept entstammt aus einer Zusammenarbeit zwischen Bosch und Nokia. In einer ersten Ausbaustufe 2023 beinhaltete der PoC die beiden Themen Echtzeit digitaler Zwilling und Sub-Netze. Er bestand aus einem Aufbau eines Tisches mit einer Straßenkreuzung und dem identischen digitalen Zwilling. Der PoC veranschaulichte, dass heutzutage zwar Fahrzeuge über eigene Sensoren verfügen, über die sie den Bereich um das Fahrzeug erfassen, jedoch sich nicht mit anderen Fahrzeugen austauschen. 6G ermöglicht es, nicht nur die Informationen der verschiedenen Fahrzeuge zu erfassen und zu fusionieren, sondern auch durch Integrated Communication and Sensing (ICAS) einen digitalen Zwilling der Umgebung mittels der 6G Basisstation zu erstellen. Damit kann beispielsweise ein Autofahrer vor Hindernissen gewarnt werden, die die Sensoren seines Autos nicht erfassen können. Zum Thema Sub-Netze fokussierte sich der PoC auf die Illustration von Sub-Netzen in Fahrzeugen und Möglichkeiten, wie diese Sub-Netze an ein öffentliches 6G Netz angebunden werden. Weiterhin wurde evaluiert, wie die Frequenzzuteilung auf die Fahrzeug-Sub-Netze erfolgen kann, um die Interferenz zwischen den Fahrzeugen zu minimieren. Die Arbeiten dazu wurden zusammen mit der TUM veröffentlicht, [18]. Für die erste Erweiterungen in Richtung Extended Reality (XR) wurde der Projektpartner Vodafone hinzugezogen. Die Erweiterungen beinhalten 1. XR Erlebnis (VR und AR), 2. Unterschiedliche Sichten auf den digitalen Zwilling und 3. Gamification Ansatz. Zusätzlich wurde die Demo dem Partner NTT DOCOMO im Rahmen der Projekt Erweiterung mehrfach gezeigt, mit ihm in verschiedenen persönlichen Treffen und Telefonkonferenzen diskutiert und Feedback in die Demo integriert.

6G In-Vehicle Sub-Netze

Dieser PoC basiert auf dem zuvor vorgestellten Mobility Metaverse Ansatz. Wir haben untersucht und gezeigt, wie man 6G Sub-Netze im Fahrzeug umsetzen kann. Das Ziel war es, die dafür nötigen Komponenten möglichst klein zu halten und zu schauen, was nötig ist, um eine Integration der Sub-Netze in ein Parent Netz zu ermöglichen. Dafür haben wir vier verschiedene Szenarien entwickelt und mit den Projektpartnern Bosch und NTT Docomo diskutiert. Anschließend haben wir die vier Szenarien praktisch umgesetzt unter Zuhilfenahme von 5G Komponenten. Beim PoC werden im Fahrzeug integrierte

Kamerasysteme mittels Quectel Modems an einen Sub-Netz-Controller angebunden. Der Sub-Netz-Controller besteht aus einer Nokia Kolibri Basisstation, einem kompletten Core Netz und einem Modem, was zur Anbindung an das Parent Netz dient. Als Parent Netz wurde ein 5G Netz verwendet, was am Standort München verfügbar war. Der Anwendungsfall wurde zusammen mit dem Projektpartner Bosch als Demonstrator umgesetzt und auf der Berlin 6G Konferenz und dem ThinkNet Workshop der breiten Öffentlichkeit präsentiert.

L4S enabling Multi-User XR Experience

Der in AP 4.2 beschriebene Ansatz zur Unterstützung von Anwendungen, die eine niedrige Latenz erfordern, wurde als Proof of Concept zusammen mit dem Unterauftragnehmer Hololight umgesetzt. Ziel des PoCs war es, dass mehrere Personen unter Zuhilfenahme von XR Brillen gemeinsam an 3D Objekten arbeiten. Ein Beispiel eines solchen Anwendungsfalls war der Entwurf eines neuen Fahrzeugs. Das Rendern des 3D Objektes für die Darstellung in der Brille erfolgt aufgrund der Komplexität des Modells auf einer Edge Cloud. Gibt es neben dem gerenderten Videostrom noch weiteren Verkehr auf der Luftschnittstelle, kommt es zu Verzögerungen, was ein gemeinsames Arbeiten unmöglich macht. Im PoC wurde anschaulich gezeigt, wie L4S hilft, die Latenz auf einem Minimum zu halten, trotz starkem Hintergrundverkehr. Der PoC wurde auf dem Brooklyn 6G Summit der Öffentlichkeit präsentiert.

6G Network-of-Networks (NoN) Machbarkeitsnachweis: Hybride Netze

Für den Nachweis der Machbarkeit eines Network-of-Networks (NoN) wurde der Anwendungsfall „Hybride Netze“ ausgewählt: an ein NoN angeschlossene Endgeräte können ad-hoc reversibel selbst zu einem Netz des NoN werden und somit für andere Netze oder Endgeräte als Zugangspunkt dienen. Der spezielle Anwendungsfall ist angelehnt an eine Erstversorgung im Katastrophenfall (Disaster Recovery): mehrere Drohnen suchen nach z.B. Erdbebenopfern, die Kommunikation erfolgt über ein „Rucksack“- Mobilfunknetz (Basisstation + Core). Die Drohnen können im Fall einer Funkabschattung (z.B. durch Gebäude- oder Trümmerteile) sich selbst zu einem Netz des NoN machen und anderen Drohnen als Zugangspunkt zum NoN dienen. Die Machbarkeit wurde für jeweils zwei Outdoor-Drohen und zwei Indoor-Drohnen gezeigt. Realisiert wurde ein Indoor-Demonstrator bestehend aus zwei Drohnen, zwei Controllern, einer beliebigen Anzahl von Tablets (drei in der Demo), einer NoN-Zentraleinheit, sowie einer Vorrichtung zum absichtlichen Stören einer Funkverbindung. Gezeigt wurde, wie zwei Drohnen ausschwärmen, wobei die Kontrolle beider über ein Tablet oder zwei Tablets erfolgt, sowie dass die Kontrolle an weitere Tablets beliebig übergeben werden kann, Koppelflug und spezielle Flugmanöver. Die Drohnen suchen nach einer Person (erkennbar durch ihre Farbe) und im Falle eines Fundes nähern sie sich dieser. Hierbei wird eine bewusste Störung der Funkverbindung herbeigeführt, so dass die Kommunikation abzureißen droht. Das NoN System kann nun so reagieren (einstellbar), dass eine Drohne zu einem Netz mutiert (an das sie sich selbst anschließt) und somit als Gateway für die erste Drohne dient und diese Funktion wieder aufgibt, falls diese nicht mehr benötigt wird.

6G Home Automation

In diesem PoC wurde zusammen mit den Projektpartnern Vodafone und Bosch untersucht und gezeigt, welche Vorteile 6G Netze für den Endanwender zuhause bringen. Dabei wurde mittels VR Brille gezeigt, wie ICAS im Heimbereich genutzt werden kann, um vor Gefahren zu warnen und wie bestehende Smart Home Standards in 6G nahtlos integriert werden können. Ein dazu entwickelter Demonstrator wurde auf dem IEEE 6G Summit in Dresden und auf der Berlin 6G Konferenz gezeigt.

6G Service Based Radio Access Network

Ziel des PoCs war es, die in AP2 entwickelte Cloud RAN Architektur zu zeigen. Dazu wurde ein Microservice-basierter Ansatz genutzt bei dem der RAN-seitige Protokoll-Stack emuliert wurde und ein Real-time Nutzer Scheduler implementiert wurde. Im PoC konnte gezeigt werden, wie QoS-basiertes RAN Slicing funktioniert und wie die Control Plane in eine UE-spezifische und eine Zellen-spezifische Control Plane aufgeteilt werden kann. Der PoC wurde auf der Berlin 6G Konferenz präsentiert.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Fördermittel in Höhe von 4.158.983,55 Euro setzen sich zusammen aus den ursprünglich bewilligten 4.050.621,85 Euro und der Aufstockung im Rahmen der deutsch-japanischen Zusammenarbeit in Höhe von 108.361,70 Euro.

Die Gesamtprojektkosten beliefen sich auf 9.058.161,14 Euro. Der Großteil der Kosten (92%, 8.361.303,47 Euro) sind Personalkosten, die etwas höher waren, als in der Vorkalkulation. Weitere Kosten sind durch FE-Fremdleistungen (360.000 Euro), sonstige unmittelbare Vorhabenkosten (298.681,07 Euro), Materialkosten (20.639,47 Euro) und Reisekosten (17.537,13 Euro) entstanden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Die vom Zuwendungsempfänger erbrachten Leistungen sowie die enge und kontinuierliche Abstimmung mit den Konsortialpartnern haben maßgeblich zum wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Erfolg des Vorhabens beigetragen. Die Projektdurchführung folgte im Wesentlichen dem im Antrag definierten Arbeitsplan. Gleichzeitig wurden während der Laufzeit relevante technologische Entwicklungen, insbesondere die dynamische Fortschritte im Bereich der AI/ML, systematisch berücksichtigt und in den Arbeitsplan integriert. Die Anpassung an die sich daraus ergebenden Anforderungen erfolgte konsequent. Sämtliche Meilensteine wurden fristgerecht erreicht und die zugehörigen Berichte termingerecht erstellt. Aufgrund der frühen Phase der 6G-Entwicklung zum Zeitpunkt der Projektdurchführung konnten die erarbeiteten innovativen Konzepte noch nicht unmittelbar in Produkte überführt werden, fließen jedoch in die Standardisierung von 6G innerhalb der 3GPP ein.

Im Fokus des Projekts stand die Entwicklung einer sicheren, nachhaltigen und flexiblen 6G-Architektur, die vom Zuwendungsempfänger entsprechend priorisiert vorangetrieben wurde. Die Ausarbeitung und insbesondere die Standardisierung einer derartigen Architektur erfordern eine enge domänenübergreifende Abstimmung sowie die Einbindung einer Vielzahl von Stakeholdern. Das komplementär aufgestellte und breit gefächerte Konsortium sowie der intensive fachliche Austausch während der Projektlaufzeit stellten hierbei einen wesentlichen Erfolgsfaktor dar. Dies ermöglichte die Entwicklung einer konsistenten und umfassenden Sicht auf Systemarchitekturen und Schnittstellen. Weiterführende Details zu den einzelnen Arbeiten sind Kapitel 2.1 zu entnehmen.

Die dort beschriebenen Aktivitäten haben insgesamt einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der definierten Projektziele geleistet und waren sowohl inhaltlich erforderlich als auch in ihrem Umfang angemessen.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Anwendungsmöglichkeiten

Aufgrund des bereits in Kapitel 2.3 beschriebenen langen Zeithorizonts bis zur Markteinführung von 6G (nach 2030) ist eine unmittelbare Überführung der im Projekt erzielten Ergebnisse in marktfähige 6G-Produkte nicht zu erwarten. Der Fokus liegt daher primär auf der aktiven Mitgestaltung der 6G-Standardisierung innerhalb der 3GPP. In enger Abstimmung mit den Projektpartnern wurde hierfür eine konsistente Gesamtsicht erarbeitet, die jetzt durch die beteiligten Industriepartner gezielt in die Standardisierung eingebracht wird.

Parallel dazu werden die im Projekt entwickelten Konzepte, die in Form von Proof of Concepts (PoC) umgesetzt wurden, gemeinsam mit externen Partnern, die nicht unmittelbar am 6G-ANNA-Projekt beteiligt sind, weiter diskutiert und vertieft. Dies erfolgte bereits unter anderem im Rahmen internationaler Kooperationen, beispielsweise der deutsch-japanischen Zusammenarbeit. Darüber hinaus wurden die entwickelten PoCs neben Präsentationen auf relevanten Fachkonferenzen auch Kunden, Projektpartnern sowie potenziellen Interessenten vorgestellt. Die daraus resultierenden Diskussionen haben neben den ursprünglich definierten Anwendungsfällen zusätzliche Einsatzmöglichkeiten aufgezeigt, unter anderem im Bereich der Luftfahrt. Im Rahmen der weiteren Verwertung wird nun analysiert, welche spezifischen Anpassungen für unterschiedliche Anwendungsszenarien erforderlich sind und wie die entsprechenden Anforderungen zielgerichtet in die 6G Standardisierung eingebracht werden können.

Der erwartete Mehrwert von AI/ML für zukünftige 6G-Netze ist erheblich und erstreckt sich über sämtliche Netzdomänen, von AI-gestützten RAN-Architekturen über ein AI-natives Core Netz bis hin zu intelligentem, automatisiertem Netzmanagement. Im Projekt wird daher systematisch untersucht, welche der entwickelten Ansätze auf bestehender Hardware realisierbar sind und in welchen Bereichen spezialisierte Beschleuniger erforderlich werden. Ergänzend dazu wurden umfassende Messungen durchgeführt, um die spezifischen

Anforderungen und Charakteristika von AI/ML Datenverkehr im Netz zu analysieren. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse fließen kontinuierlich in die Weiterentwicklung der 6G-Architektur ein.

Die im Rahmen des Mobility Metaverse untersuchten und als PoC umgesetzten 6G Sub-Netze stoßen in verschiedenen Bereichen auf großes Interesse. Dazu gilt es jetzt die verschiedenen Anforderungen aus den Bereichen zu evaluieren und entsprechend in die Standardisierung und Produkte einfließen zu lassen. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die untersuchten Echtzeit-Digital-Twins nicht nur für das Netzmanagement von hoher Relevanz sind, sondern auch für externe Anwendungen, beispielsweise im Bereich der Objekterkennung, einen signifikanten Mehrwert bieten.

2.5 Fortschritt bei anderen Stellen auf dem Gebiet des Vorhabens während seiner Durchführung

Während der Laufzeit des Vorhabens haben sich die Schwerpunkte der 6G Entwicklung deutlich verschoben, insbesondere durch die rasanten Fortschritte im Bereich AI/ML. Diese führen dazu, dass 6G-Netze nicht mehr nur den effizienten und sicheren Transport von AI/ML-Daten gewährleisten müssen, sondern zunehmend als „AI-native“ Systeme konzipiert werden, in denen AI integraler Bestandteil aller Netzfunktionen ist.

Diese Entwicklung beeinflusste sämtliche Arbeitspakete: von der Weiterentwicklung hin zu AI-gestützten 6G-Architekturen (AP1), über die Integration von AI in Cloud-native RAN-Umgebungen (AP2), bis hin zu neuen Sicherheitsanforderungen in AI-basierten Systemen (AP3) sowie dem verstärkten Einsatz von AI für Netzmanagement und digitale Zwillinge (AP4). Insgesamt zeigt sich ein klarer Übergang zu intelligenten, adaptiven und weitgehend autonom agierenden Netzsystemen.

2.6 Veröffentlichung der Ergebnisse

Invited Talks / Keynotes

1. S. Redana, “German 6G Lighthouse Project”, EuCNC 2022, 09.06.2022, Grenoble, France. (vor Projektstart)
2. M Hoffmann, “Concept for a German 6G Lighthouse Project“, 5G++ Summit, 12.05.2022, Dresden, Germany. (vor Projektstart)
3. M. Hoffmann, “German 6G Lighthouse Project”, Thinknet 6G Summit, 16.09.2022, Munich, Germany.
4. R. Pries, “Overview 6G-ANNA“, Rohde & Schwarz Expert Days, 14.11. – 15.11.2022, Munich, Germany.
5. V. Ziegler, “6G-ANNA - German 6G Lighthouse Project”, EuCNC 2023, 08.06.2023, Grenoble, France.
6. E. Ozturk, ”6G-ANNA Architecture”, Technical Session, Berlin 6G Conference 2023, 27.06.2023, Berlin, Germany.
7. V. Ziegler, “6G Roadmap / Timeline”, WG: ROADMAP - 6G Vision, Use Cases, & Case Studies, Berlin 6G Conference 2023, 27.06.2023, Berlin, Germany.
8. P. Merz, “All Good Things”, 6G Platform Event 2023, 28.06.2023, Berlin, Germany.
9. J. Urban, “6G-ANNA – Insights on 6G Lighthouse Project”, Zukunft der Netze 2023, 07.09.2023, Potsdam, Germany.
10. Rastin Pries, Philipp Landgraf, “Conquering Network Complexity – How to Unlock New Realms of Immersive Experiences”, Rohde & Schwarz 6G Expert Days, 08.-09.04.2024, München, Deutschland.
11. Gerald Kunzmann, “Sustainable and Secure Architecture & System Design”, EuCNC, June 2024, Antwerp, Belgium.
12. P. Merz, “Harnessing the transformational nature of AI for 6G”, Berlin 6G Conference 2024, 03.07.2024, Berlin, Germany.
13. P. Schefczik, “Service-Based 6G RAN Control Plane”, Technical Session - Control Plane Aspects of 6G Technology, Berlin 6G Conference 2024, 04.07.2024, Berlin, Germany.
14. G. Kunzmann, “Advances towards 6G architecture - a 6G platform view”, Fraunhofer FUSECO Forum, 7.11.2024, Berlin, Germany.
15. G. Kunzmann, “Sustainable and Secure Architecture & System Design - an update”, Hexa-X II 6G Series Workshop, 11.02.2025, online.

16. Q. Liao, “Rethinking Network Automation: From Semantics to Multi-Agent Intelligence”, ANMS Workshop, IEEE ICDCS 2025, July 2025.
17. P. Merz, “Industry Perspective on 6G”, Berlin 6G Conference 2025, 01.07.2025, Berlin, Germany.
18. R. Pries, “Spatial Computing in Industrial Environments“, Technical Session - 6G-Powered Industrial Internet of Things: Advancing Reliability, Security, and Sustainable Connectivity, Berlin 6G Conference 2025, 02.07.2025, Berlin, Germany.
19. R. Pries, “Digital Twin Architecture“, Technical Session - Architecting the Future: Exploring 6G Architectural Innovations, Berlin 6G Conference 2025, 02.07.2025, Berlin, Germany.
20. U. Toseef, “GenAI & O-RAN: Accelerating the Autonomous 6G Network”, Technical Session – Higher-Layer Aspects of 6G Technology, Berlin 6G Conference 2025, 03.07.2025, Berlin, Germany.
21. S. Das, “PON for Industrial Communications”, Technical Session – Optical Access and Transport for 6G”, Berlin 6G Conference 2025, 03.07.2025, Berlin, Germany.
22. C. Mannweiler, “6G-ANNA - Project Outcomes and 6G Design Recommendations”, International Conference on Networked Systems 2025 / Zukunft der Netze, 04.09.2025, Ilmenau, Germany.
23. C. Mannweiler, “6G-ANNA - Project Outcomes and 6G Design Recommendations”, Thinknet 6G Summit 2025, 29.10.2025, Nuremberg, Germany.

Papers / Journals

1. S. Rezwan et.al., “cXR+ Voxel-Based Semantic Compression for Networked Immersion”, IEEE ACCESS, 05.2023, DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3279503.
2. T. Hu et.al., “Inter-cell network slicing with transfer learning empowered multi-agent deep reinforcement learning”, IEEE OJCOM, 05.2023, DOI: 10.1109/OJCOMS.2023.3273310.
3. M. Hoffmann et.al., “A Secure and Resilient 6G Architecture Vision of the German Flagship Project 6G-ANNA”, IEEE ACCESS, 10.2023, DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3313505.
4. H. Wu et.al., “Architectural Enhancement of Environmental-Aware Federated Inference Orchestration for Sustainable AI/ML Management”, European Wireless 2023, 02.10. – 04.10.2023, Rome, Italy.
5. M. Elwekeil, L. Galati Giordano, P. Baracca, and S. Buzzi, “Distributed MIMO for 6G sub-networks in the unlicensed spectrum,” in Proc. IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN), Munich (Germany), Nov. 2023.
6. T. Hu et.al., “Fast and scalable network slicing by integrating deep learning with Lagrangian methods”, IEEE GLOBECOM, 04.12. – 08.12.2023, Kuala Lumpur, Malaysia.
7. Bidkar, Sarvesh, et al., "Demonstration of cooperative transport interface enabled cooperative DBA for 5G fronthaul over TDM-PON", IET Conference Proceedings CP839. Vol. 2023. No. 34. Stevenage, UK: The Institution of Engineering and Technology, 2023.
8. Xin Su, Sebastian Eger, Adam Misik, Dong Yang, Rastin Pries, Eckehard Steinbach, „HPF-SLAM: An Efficient Visual SLAM System Leveraging Hybrid Point Features,” IEEE ICRA 13.-17.05.2024, Yokohama, Japan.
9. Endri Goshi, Hasanin Harkous, Shohreh Ahvar, Rastin Pries, Fidan Mehmeti, Wolfgang Kellerer, „Joint UPF and Edge Applications Placement and Routing in 5G & Beyond”, Oktober 2024, Seoul, Korea.
10. P. Gautam, R. Sharan, P. Baracca, C. Bockelmann, T. Wild, and A. Dekorsy, “Dynamic interference prediction for in-X 6G sub-networks”, in Proc. ITG International Conference on Systems, Communications and Coding (SCC), Karlsruhe (Germany), Mar. 2025.
11. F. Wilhelmi, P. Baracca, G. Fontanesi, and L. Galati Giordano, “ConPA: A Contention-Free Mechanism With Power Adaptation for Beyond Listen-Before-Talk,” in Proc. IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia (Spain), Sep. 2024.
12. M. Milani, D. Bega, M.Gramaglia, P. Serrano, and C. Mannweiler, “ATELIER: Service Tailored and Limited-Trust Network Analytics Using Cooperative Learning”, IEEE Open Journal of the Communications Society, 2024.
13. Tianlun Hu, Qi Liao, Qiang Liu, Georg Carle, "Information Bottleneck-based Domain Adaptation for Hybrid Deep Learning in Scalable Network Slicing", IEEE Transactions on Machine Learning in Communications and Networking (TMLCN), 2024
14. K. Christodoulopoulos et al., "Deterministische passive optische Netzwerke", Journal of Optical Communications and Networking, Bd. 16, Nr. 2, S. 180-192 (2024).
15. S. Das, et al., "Low latency Low-Jitter Bandwidth-Efficient PON for Industry applications", European Conference on Optical Communications 2024 (Demo-Track).

16. V. Zirwas et al., “A Novel Sparse Transmission Scheme for Efficient Mobile Radio Communications”, March 2025, Mailand, Italy.
17. P. Steininger, R. Pries, Y. Deshpande, A. Yash, C. Chang, K. de Schepper, W. Kellerer, „Performance Evaluation of L4S in XR Scenarios”, IFIP Networking Conference (IFIP Networking), May 2025.
18. V. Haider et al., “Dynamic Frequency Planning for Autonomous Mobile 6G in-X Subnetworks”, May 2025, Honolulu, USA.
19. Q. Liao and P. Bhattacharjee, “Compositional Decision-Making: A Modular Approach for Multi-Agent Self-Organizing Networks”, May 2025, Barcelona, Spain.
20. P. Schefczik, U. Toseef, P. Baracca, R. Klotsche, T. Dudda, M.-A. Phan, L. Miretti, D. Ginthoer, and B. Han, “Flexible and High-Performance Radio Access Networks for upcoming Sixth-Generation (6G) Systems”, arXiv:2509.24417, Sep. 2025.
21. B. Banerjee et al.,“6G PHY: Insights from 6G-ANNA Research Initiative”, IEEE Open Journal of the Communications Society, accepted for publication.
22. F. Fellhauer et al., “6G Sub-Networks: From Use Cases and Requirements to Concept and Architecture”, IEEE Open Access, DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3644124, December 2025.
23. Z. Ennaceur, B. Mounir, A. Jukan, C Keuker, H. Wu, and R. Pries, "On Efficient Topology Management in Service-Oriented 6G Networks: An Edge Video Distribution Case Study.", NOMS 2025-2025 IEEE Network Operations and Management Symposium, pp. 1-5. IEEE, 2025.
24. S. Rezwan, H. Wu, J A. Cabrera, P. Seeling, M. Reisslein, and F. HP Fitzek, "MLcXR+: Multilevel semantic compression for 3D immersion over 5G networks.", IEEE Access, 2025.
25. S. Shafaei et al., “Toward AI in 6G: Concepts, Techniques, and Standards”, 10.1109/ACCESS.2025.3595752, IEEE Access, 2025.
26. P. Gautam, R. Sharan, P. Baracca, C. Bockelmann, T. Wild, and A. Dekorsy, “CQI-based interference prediction for link adaptation in industrial dub-Networks”, IEEE Wireless Commun. Letters, vol. 15, pp. 1145-1149, 2026.

Poster

“Security for 6G”, BMBF Nationale Konferenz IT-Sicherheitsforschung 2023, 23.03.2023, Berlin, Germany.

Workshops / (Technical) Sessions

1. G. Kunzmann, “System architecture and 6G concepts”, Technical Session, Berlin 6G Conference 2023, 27.06.2023, Berlin, Germany.
2. G. Kunzmann, “6G Design Principles”, International Plenary Session, Berlin 6G Conference 2024, 03.07.2024, Berlin, Germany.
3. R. Pries, “Large Scale Experimentation Facilities”, Technical Session, Berlin 6G Conference 2024, 03.07.2024, Berlin, Germany.
4. R. Pries, Beyond 5G/6G Panel Session – The 5th Germany-Japan Beyond 5G/6G Research Workshop, 21.01.2025, Sendai, Japan.
5. G. Kunzmann and A. Jukan, “Panel discussion: Paving the way to 6G architecture – do we need a revolution?”, Technical Session, Berlin 6G Conference 2024, 03.07.2024, Berlin, Germany.
6. G. Kunzmann and A. Jukan, “6G on the Horizon: Converging Towards a Practical 6G System Architecture”, Technical Session, Berlin 6G Conference 2025, 01.07.2025, Berlin, Germany.
7. G. Kunzmann and A. Jukan, “Architecting the Future: Exploring 6G Architectural Innovations”, Technical Session, Berlin 6G Conference 2025, 02.07.2025, Berlin, Germany.

Demos / PoC

1. “6G Mobility Metaverse”, Berlin 6G Conference 2023, 25.06. – 28.06.2023, Berlin, Germany.
2. “L4S enabling Multi-User XR Experience”, Brooklyn 6G Summit, 31.10. – 02.11. 2023, New York, US.
3. “6G Mobility Metaverse”, Digital Gipfel 2023, 20.11.2023, Jena, Germany.
4. “6G Mobility Metaverse”, IEEE 6G Summit, 13.-15.05.2024, Dresden, Germany.
5. “6G-ANNA“, EuCNC 6G Summit, 3.-6.06.2024, Antwerpen, Belgium.
6. “6G Mobility Metaverse”, Berlin 6G Conference 2024, 1.07. – 4.07.2024, Berlin, Germany.
7. “Trustworthy 6G Services”, Berlin 6G Conference 2024, 1.07. – 4.07.2024, Berlin, Germany.
8. “6G Mobility Metaverse”, 6G Open Lab Day, 18.10.2024, Munich, Germany.
9. “6G Mobility Metaverse”, Brooklyn 6G Summit, 23.10. – 25.10. 2024, New York, US.
10. “6G-ANNA”, IEEE Globecom, 8.-12.12.2024, Kapstadt, South Africa.

11. “6G Mobility Metaverse”, The 5th Germany-Japan Beyond 5G/6G Research Workshop, 21. – 22.01.2025, Sendai, Japan.
12. “6G enabled Smart Home“, IEEE 6G Summit, 14. – 15.05.2025, Dresden, Germany.
13. “6G Mobility Metaverse”, Berlin 6G Conference 2025, 30.06. – 3.07.2025, Berlin, Germany.
14. “6G In-Vehicle Subnetworks”, Berlin 6G Conference 2025, 30.06. – 3.07.2025, Berlin, Germany.
15. “Trustworthy 6G Services”, Berlin 6G Conference 2025, 30.06. – 3.07.2025, Berlin, Germany.
16. “6G enabled Smart Home”, Berlin 6G Conference 2025, 30.06. – 3.07.2025, Berlin, Germany.
17. “6G In-Vehicle Subnetworks”, Thinknet 6G Summit 2025, 28. - 29.10.2025, Nuremberg, Germany.

Erfindungsmeldungen

Während der Projektlaufzeit wurden 42 Erfindungsmeldungen von Nokia eingereicht.

Standardisierungsbeiträge

Es wurden 5 Beiträge beim 3GPP Standardisierungsgremium eingereicht.