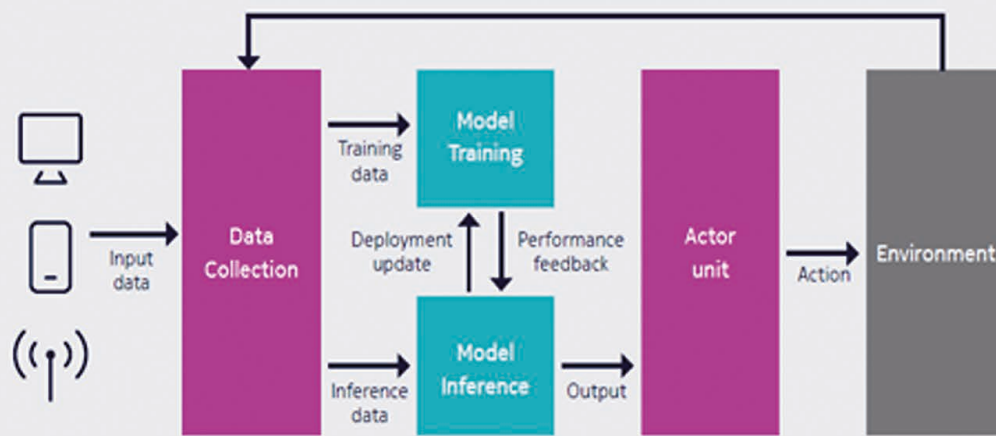


Überblick über 5G-Advanced



Ein generisches Framework für RAN-Intelligenz, vorgeschlagen von 3GPP

5G-Advanced baut auf der grundlegenden 5G-Standalone-Architektur auf und integriert KI, ML und Extended Reality für mehr Energieeffizienz und ultra-zuverlässige Kommunikation mit geringer Latenz (URLLC). Dies eröffnet neue Dienste, Geschäftsmodelle und Umsatzmöglichkeiten und erweitern die Skalierbarkeit des IoT.

Gesamtüberblick über Release 18+

Netzwerktechnologie tritt in eine neue Ära der Intelligenz, Effizienz und Reichweite. Im Mittelpunkt steht die KI-native Optimierung, bei der KI in das RAN und die Kerninfrastruktur integriert wird, um eine automatisierte Verwaltung zu ermöglichen. Netzwerke können sich nun durch vorausschauende Wartung und dynamisches Slicing selbst verwalten, was die Nachfragesituation grundlegend verändert.

Auch die Energieeffizienz wird verbessert. Innovationen wie Zell-Ruhemodi, adaptive Antennenkonfigurationen und bedingte Übergaben reduzieren den Energieverbrauch um 15...30%.

Um den wachsenden Anforderungen an immersive Technologien und die Skalierbarkeit des IoT zu entsprechen, werden Netzwerke für die Erweiterung

von XR und IoT optimiert. Geringere Latenz und mehr QoS verbessern die XR-Unterstützung. Gleichzeitig ermöglicht die Weiterentwicklung von (e) RedCap und Ambient IoT die nahtlose Einbindung von Milliarden kostengünstiger IoT-Geräte in das Netzwerk. Abdeckung und Kapazität werden durch fortschrittliches Beamforming, Massive MIMO und nicht-terrestrische Integration erweitert. So gelingt es, dichte städtische und abgelegene ländliche Gebiete mit höherer Zuverlässigkeit und Durchsatzrate zu versorgen.

Die Integration nicht-terrestrischer Netzwerke (NTN) in terrestrische Systeme ist ein entscheidender Fortschritt. GEOs, LEOs sowie Höhenplattform-Systeme (HAPS) und unbemannte Flugsystemen (UAS) können Netzwerke nun selbst in den anspruchsvollsten Umgebungen verbessern.

Strategische Auswirkungen

Für Betreiber erfordert der wachsende Datenbedarf hochwertige, auf Service Level Agreements (SLA) basierende Dienste. KI-native Automatisierung verbessert die Leistung, senkt die Betriebskosten (OpEx) und erhöht die Agilität. Unternehmen erhalten Zugang zu präziser Positionierung und

garantierter Konnektivität mit geringer Latenz, die transformative Anwendungsfälle ermöglichen – von der industriellen Automatisierung in Echtzeit bis hin zu fortschrittlicher Robotik und Logistik. Private 5G-Netze bieten sichere, maßgeschneiderte Lösungen, um Innovationen der Industrie 4.0 voranzutreiben.

Regulierungsbehörden müssen bestehende Rahmenbedingungen modernisieren und Vorschriften erlassen, die der wachsenden Bedeutung von KI und ML im Netzbetrieb Rechnung tragen. Priorität haben die gemeinsame Nutzung von Frequenzen, Datensicherheit, Datenschutz und Nachhaltigkeit.

Von 5G-Advanced zu 6G

Release 18-20 legt ein solides Fundament für 6G einschließlich KI-nativer Netzwerke, integrierter Sensorik und Kommunikation (ISAC), energieeffizienter und nachhaltiger Architekturen, energieautonomen 6G-IoT-Netzwerken und 6G-Systemen mit allgegenwärtiger, dreidimensionaler Konnektivität.

Die Entwicklung zu 5G-Advanced in den Releases 15-20 hat zu erheblichen Verbesserungen von 5G NR und 5G Core (5GC) gebracht, wodurch 5G-Advanced-Netzwerke intelligenter, effizienter und nachhaltiger geworden sind. 5G entstand in Release 15 und bietet verbesserte mobile Breitbanddienste, URLLC und massive Machine-Type Communications (mMTC). Release 16 optimierte Slicing, Latenz und integriertes industrielles IoT. Release 17 führte NR-Light für IoT und erste NTN-Unterstützung ein. Release 18 markiert den Beginn von 5G-Advanced und baut auf diesen Grundlagen auf, indem es KI/ML über das gesamte RAN und den Kern hinweg einbettet, die Energieeffizienz verbessert und fortschrittliche XR-, RedCap- und NTN-Funktionen. Release 19 erweitert die AI/ML-gestützte RAN-Optimierung, führt IoT-Geräte

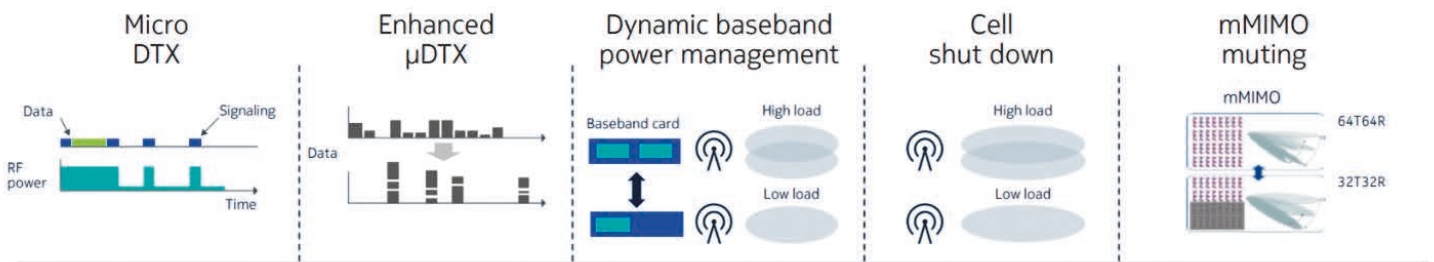
Quelle:

Whitepaper 2025

„5G-Advanced Overview“

5G Americas

<https://www.5gamericas.org/>
übersetzt und gekürzt von FS



Darstellung der wichtigsten energiesparenden RAN-Software-Funktionen

mit geringer Komplexität und geringem Stromverbrauch wie fortschrittliches RedCap und Ambient IoT ein und verbessert Energie- und Spektraleffizienz und Abdeckung weiter.

Voraussetzungen

Um die Vorteile von 5G-Advanced nutzen zu können, ist eine strategische Abstimmung zwischen Kern-, RAN-, Frequenz-, Automatisierungs- und Geschäftssystemen erforderlich. Betreiber müssen diese grundlegenden Elemente aufbauen, bevor sie 5G-Advanced-Funktionen bereitstellen, um dessen volles Potenzial auszuschöpfen. Während Mobilfunknetzbetreiber sich darauf vorbereiten, die in 3GPP Release 18 und darüber hinaus definierten 5G-Advanced-Funktionen zu aktivieren, müssen fünf technische und betriebliche Voraussetzungen erfüllt sein, um die nächste Phase der 5G-Entwicklung voll ausschöpfen zu können:

1. Bereitschaft der Kern- und RAN-Infrastruktur

Ein 5G Standalone Core ist für den vollständigen Zugriff auf 5G-Advanced-Funktionen unerlässlich, da viele wichtige Funktionen von Release 18 von Fähigkeiten abhängen, die nur in einem 5G SA Core vorhanden sind. Er ist erforderlich für intelligentes Network Slicing, URLLC, AI/ML-native Netzwerkoptimierung und erweiterte QoS-Verarbeitung. Diese erweiterten Funktionen sind direkt mit der modularen, cloud-nativen, service-basierten Architektur des 5G SA Core

verbunden, die eine dynamische Zusammensetzung und Bereitstellung von Diensten ermöglicht. Die RAN-Hardware muss außerdem eine Reihe von erweiterten Funktionen unterstützen, die für 5G-Advanced erforderlich sind. Diese Funktionen zielen darauf ab, die Leistung, Effizienz und Spektrumflexibilität zu verbessern und neue Gerätetypen zu unterstützen. Beispiele hierfür sind MIMO höherer Ordnung, dynamische Beamforming, Multiband-Unterstützung und Carrier Aggregation, die alle für die Verbesserung der Uplink/Downlink-Leistung, eine breitere Abdeckung und einen verbesserten Durchsatz für Nutzer am Rand der Zelle unerlässlich sind. Gleichzeitig muss das RAN auch schmalere Kanalbandbreiten, vereinfachte Signalisierung und weniger komplexe User Equipment Logic unterstützen, um RedCap-Geräte und -Dienste effektiv zu unterstützen. Schließlich sollte das RAN in der Lage sein, KI/ML-Funktionen zu unterstützen, darunter Echtzeitlelemente, APIs, offene Schnittstellen sowie präzise Zeitsteuerung und Synchronisation. Diese Funktionen sind entscheidend für die agile Bereitstellung von 5G-Advanced-Diensten, die Automatisierung und kontinuierliche Innovation.

2. Frequenzspektrum und Transportinfrastruktur

Der Zugang zu Frequenzen im mittleren Band (z.B. 2,5 oder 3,5 GHz) und im Millimeterwellenbereich ist entscheidend für die Ausschöpfung des vollen Potenzials von 5G-Advanced. Diese Frequenzbereiche sind

unerlässlich, um sowohl eine breite Abdeckung als auch die hohe Kapazität, geringe Latenz und Dienstflexibilität zu gewährleisten, die für Anwendungsfälle der nächsten Generation erforderlich sind. Technisch gesehen unterstützen sie RAN-Verbesserungen wie Massive MIMO, Leistungssteigerungen im Uplink, Carrier Aggregation und integrierte Sensorik und befördern URLLC- und RedCap-Geräte. Die Funktionen von 5G-Advanced erhöhen sowohl den Datenverkehr als auch die Komplexität der Dienste und führen zu einer steigenden Nachfrage nach Front- und Backhaul-Infrastruktur. Sie erzeugen mehr Datenverkehr in der Benutzer- und Steuerungsebene, erfordern extrem niedrige Latenzzeiten und eine Echtzeitkoordination zwischen verteilten und zentralisierten Einheiten, insbesondere in cloud-nativen oder virtualisierten (v)RAN-Architekturen.

3. Betriebs- und Automatisierungsfunktionen

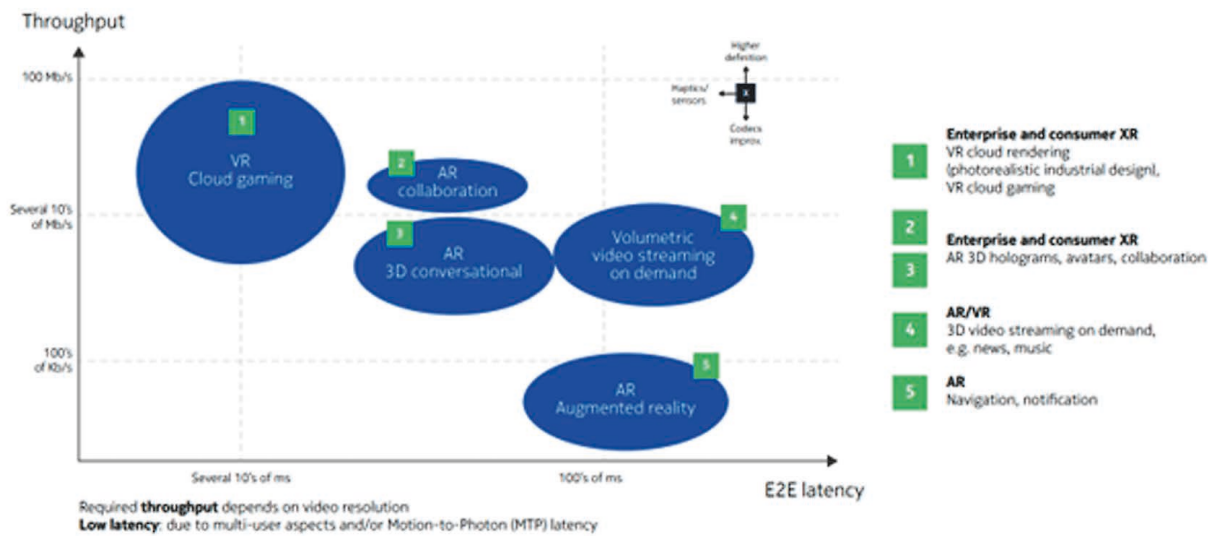
Die Bereitschaft von OSS und BSS aufgrund der erhöhten Netzwerkkomplexität, der Dienstvielfalt und der Verlagerung hin zur Echtzeitautomatisierung erfordert intelligentere, agilere und datengesteuerte Abläufe. Funktionen wie Netzwerk-Slicing, KI-native Optimierung, dynamische Services und cloud-native Architekturen erfordern OSS/BSS-Plattformen, die End-to-End-Services orchestrieren, die Einhaltung von SLAs gewährleisten und hybride, virtualisierte Umgebungen in Echtzeit verwalten können.

4. Sicherheit und Einhaltung gesetzlicher Vorschriften

Netzwerksicherheit ist für die Implementierung von 5G-Advanced unerlässlich, da Kernkomponenten wie Network Slicing, Edge Computing, AI-gesteuerte Automatisierung und API-basierte Funktionsbereitstellung die Angriffsfläche erheblich vergrößern und das Risiko von Cyberangriffen erhöhen. 5G-Advanced wird in hochdynamischen, programmierbaren Multi-Tenant-Umgebungen betrieben, die ein robustes Identitätsmanagement, eine Isolierung der Slices, Datenschutz auf Edge-Ebene und eine sichere Orchestrierung virtualisierter Netzwerkfunktionen erfordern. Darüber hinaus sind unternehmens- und missionskritische Anwendungsfälle auf strenge Sicherheitsgarantien angewiesen, um regulatorische Standards zu erfüllen und das Vertrauen in allen Branchen aufrechtzuerhalten.

5. Geräteverfügbarkeit

Diese ist für die Bereitstellung von 5G-Advanced-Funktionen von entscheidender Bedeutung, da Funktionen wie erweiterte Carrier-Aggregation, RedCap, Slicing und KI-gestützte Optimierung kompatible, standardbasierte Geräte erfordern, um effektiv zu funktionieren. Sie müssen die relevanten Frequenzbänder unterstützen und in der Lage sein, die Verbesserungen von Release 18 wie Uplink-MIMO und Advanced QoS sowie Flexibilität für zukünftige Upgrades.



Latenz- und Durchsatzanforderungen für XR- und Cloud-Gaming-Anwendungsfälle. Cloud-Gaming ist zwar kein XR-Anwendungsfall im eigentlichen Sinne, aber Virtual- und Augmented-Reality ähnlich

Wichtige Funktionen

5G-Advanced bietet eine umfassende Plattform für die Transformation der Netzwerkleistung, die Erschließung neuer Einnahmequellen und die Optimierung des Betriebs. Diese Netzwerke bieten ein verbessertes Nutzererlebnis durch erstklassige, konsistente Leistung, hohe Datenraten vom Zellzentrum bis zum Zellrand und gleichzeitig eine verbesserte Energieeffizienz der Geräte. Dies ermöglicht neue Funktionen wie Echtzeiterlebnisse bei Live-Events, eine präzise Positionierung für die industrielle Automatisierung und autonome Fahrzeuge, RedCap und eRedCap für kostengünstige IoT-Geräte und Wearables sowie dynamisches Slicing zur Priorisierung von Ressourcen für gezielte Anwendungsfälle. Gleichzeitig ist die Erreichung operativer Exzellenz

von entscheidender Bedeutung. 5G-Advanced integriert KI-gesteuerte autonome Abläufe sowohl in gNBs als auch auf der Ebene Service Management and Orchestration (SMO). Außerdem reduziert es den Energieverbrauch durch immer ausgefeilteres Management.

Aufbauend auf 5G SA bietet 5G-Advanced einen flexiblen Entwicklungspfad hin zu 6G und kombiniert dabei aktuelle Funktionen mit der Grundlage für zukünftige Innovationen.

KI-native Netzwerkfunktionen

In den letzten zehn Jahren haben sich KI und RANs rasant entwickelt. Das Datenvolumen ist aufgrund von Videos, Smartphones und neuen Anwendungsfällen wie FWA und IoT sprunghaft angestiegen. Innovationen wie Massive MIMO haben eine beispiellose Spektraleffizienz

ermöglicht, aber auch zu einer erhöhten Komplexität und Unvorhersehbarkeit geführt. Einmal trainiert und fein abgestimmt, kann KI Heuristiken bei der Optimierung und Entscheidungsfindung übertreffen. Mit 5G-Advanced wird KI zu einem integralen Bestandteil und Standardisierungsthema und legt damit den Grundstein für 6G.

Mit Release 17 hat 3GPP die Grundlagenarbeit für KI-native RAN begonnen. Das Framework 3GPP TR 37.817 definiert Intelligenzfunktionen – Datenerfassung, Modellinferenz und Training – innerhalb einer kontinuierlichen Feedbackschleife, die sowohl Trainings- als auch Inferenzdaten verfeinert, um die Modellleistung und die Gesamteffizienz des Netzwerks zu verbessern. Release 18 geht noch weiter. 3GPP TR 38.843 untersucht die Anwendung von KI/ML-Techniken zur Verbes-

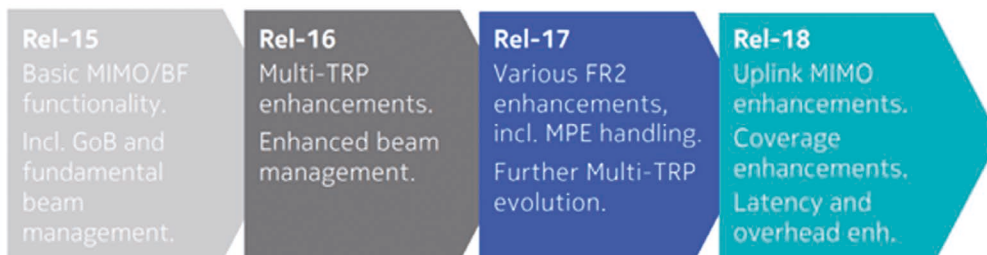
serung der NR-Luftschnittstelle, wobei der Schwerpunkt auf der Verbesserung der Leistung und der Reduzierung der Komplexität liegt. Durch die direkte Einbettung von KI in Basisstationen werden vielfältige RAN-Anwendungsfälle über die Schichten 1 bis 3 hinweg ermöglicht.

Zu den neuen Anwendungen gehören LLM-gesteuerte generative Agenten für den Lastausgleich im Leerlauf, die historische RAN-Metriken und Betreiberabsichten analysieren, um Frequenzversätze zu empfehlen, behandeln transformatorbasierte Carrier-Aggregationsmodelle die Auswahl von Primärzellen (PCell) und Sekundärzellen (SCell) als sequenzielle Aufgabe, um Durchsatz und Latenz zu optimieren. Diese KI-Funktionen ersetzen komplexe Heuristiken durch adaptive, datengesteuerte Prozesse.

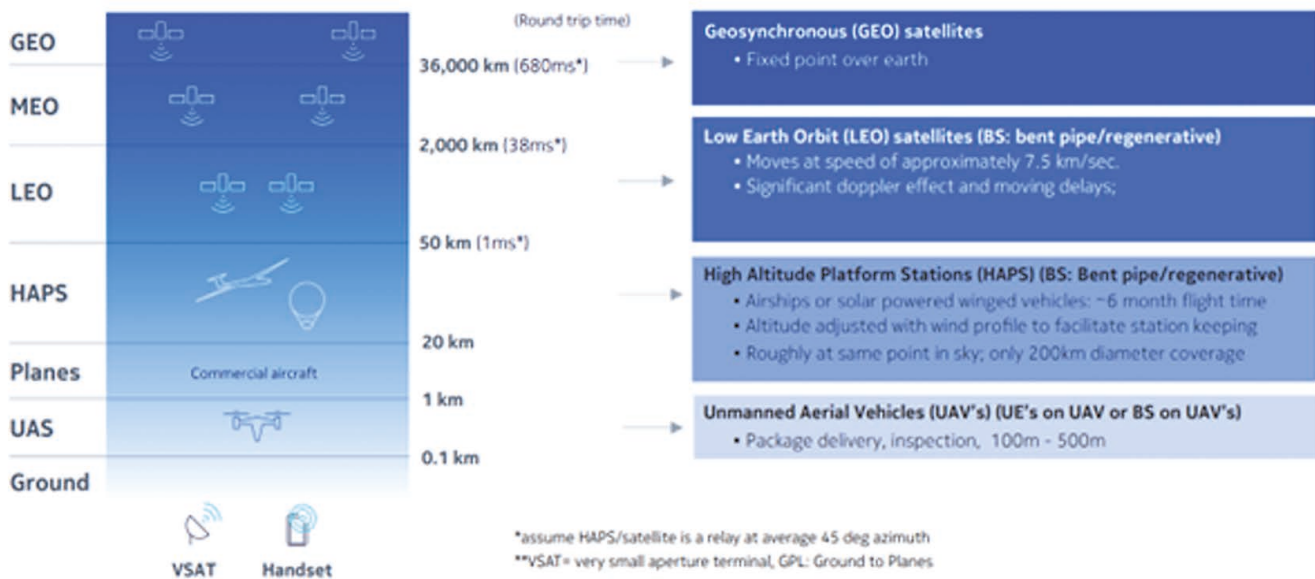
Mit Blick auf die Zukunft wird 6G von Anfang an eine KI-native Architektur umfassen, die Intelligenz in alle Netzwerkschichten integriert.

Innovationen bei der Energieeffizienz

Da das RAN 80...90% des Energieverbrauchs mobiler Netzwerke ausmacht, ist die Optimierung seiner Effizienz eine Priorität.



Entwicklung der MIMO- und Beamforming-Funktionen von 5G Legacy (Release 15) bis 5G-Advanced (Release 18)



NTN bestehend aus Satelliten (GEO, MEO und LEO), HAPS und anderen UAS

Release 18 führt zwei wesentliche Mechanismen ein, die zu erheblichen Energieeinsparungen führen. Erstens ermöglicht es mehr Schlafphasen für Zellen durch die Optimierung von Übertragungsmustern und die Eliminierung unnötiger Signale. Zweitens erleichtert es energieeffiziente Übertragungen durch die dynamische Anpassung von Funkressourcen, einschließlich Leistungsstufen, Antennenkonfigurationen und Bandbreitennutzung. Diese Muster wurden sorgfältig entwickelt, um die Auswirkungen auf ältere Geräte zu minimieren und gleichzeitig die Energieeinsparungen in Nebenzeiten zu maximieren.

Die Antennenanpassung bietet eine weitere Effizienzsteigerung durch dynamisches Umschalten zwischen verschiedenen Antennenkonfigurationen.

Die Entwicklung hin zu mehr Energieeffizienz wird in Release 19+ fortgeschrieben durch Funktionen wie Multi-TRP-Energiekoodination, Leistungsanpassung pro Beam und pro Antennenpanel sowie optimierte Übertragungsmodi für Synchronization Signal Block (SSB) und System Information Block (SIB1). Zur Unterstützung kostengünstiger IoT-Geräte mit extrem geringem Stromverbrauch wurden Studien

zu Umgebungs-IoT-Lösungen initiiert. Diese arbeiten mit Leistungsbereichen von 1 μ W bis zu einigen hundert μ W und gewinnen ihre Energie aus Funksignalen. Umgebungs-IoT hat ein großes Potenzial für nachhaltige IoT-Ökosysteme und legt den Grundstein für zukünftige energieautarke 6G-IoT-Implementierungen.

Verbesserungen bei Latenz und Zuverlässigkeit

Diese eröffnen neue Möglichkeiten für immersive und interaktive Benutzererlebnisse. Um die End-to-End-Latenz zu reduzieren und die Zuverlässigkeit zu verbessern, integriert 5G-Advanced mehrere Innovationen. Dabei ist Low Latency, Low Loss, Scalable Throughput (L4S) ein Durchbruch. L4S reduziert Warteschlangenverzögerungen – die größte Quelle für Netzwerklatenz – auf nahezu Null.

Alle XR-Anwendungen weisen eine Kombination typischer Verkehrsmuster auf:

- Anhaltend hoher Durchsatz, Videostreams mit geringer Latenz von cloud-generierten Inhalten zum Benutzergerät
- Upstream-Aktivitäten mit geringer Latenz und Positionsinformationen an einen Cloud-Rendering-Prozess

- Upstream- und Downstream-Sprachkommunikation für Multi-User-Erlebnisse

Dafür unterstützt 5G-Advanced garantierte Bitraten und spezifische QoS-Anforderungen durch dedizierte 5G-QoS-Identifikatoren (5QIs). Diese Funktionen ermöglichen es dem Netzwerk, gleichzeitig eine geringe Latenz und einen hohen Durchsatz aufrechtzuerhalten, was für cloud-generierte XR-Inhalte und Split-Processing-Architekturen, die eine Echtzeitinteraktion zwischen Gerät und Edge erfordern, von entscheidender Bedeutung ist.

Die in Release 18 mit der Einführung von QoS-Attributen für Paketdateneinheiten (PDU) eingeführte XR-Anwendererkennung wird in Release 19 weiter verfeinert. Release 18 unterstützt auch andere XR-fähige RAN-Verbesserungen, darunter Verbesserungen bei Configured Grant (CG), semipersistente Planung und traffic-bewusstes RRM.

Über XR hinaus verbessert 5G-Advanced auch die IoT-Fähigkeiten für Unternehmen. Neue Funktionen unterstützen präzise Zeitsteuerung und Synchronisation – entscheidend für die industrielle Automatisierung. RedCap und seine Weiterentwicklung zu eRedCap (Release 18) bieten erhebliche Möglich-

keiten zur Verbesserung von IoT-Diensten. Die Einführung von RedCap ermöglicht es Betreibern, 5G-IoT-Lösungen einzusetzen, indem sie die Lücke zwischen massiven IoT- und High-End-Breitbandgeräten schließen.

Release 19 lässt Ambient IoT (A-IoT) folgen, es werden noch einfachere Geräte mit niedrigeren Spitzengeschwindigkeiten eingeführt. RedCap- und A-IoT-Geräte können nahtlos mit anderen NR-Geräten koexistieren, die denselben 5G NR-Design-Prinzipien folgen. Im Vergleich zu RedCap-Geräten erzielen A-IoT-Geräte noch größere Energieeinsparungen, indem sie Energie aus Funksignalen gewinnen. Zusammen bieten Ambient IoT, RedCap und eRedCap kostengünstige, skalierbare IoT-Lösungen bei gleichbleibend hoher Leistung.

Um den Wert der fortschrittlichen 5G-Advanced-Funktionen, insbesondere für XR und IoT, zu demonstrieren, müssen Netzwerke modularer und programmierbarer werden, neue Gerätetypen integrieren und anwendungsorientierter werden. Mit Blick auf die Zukunft bilden diese Fortschritte in Bezug auf Latenz und Zuverlässigkeit eine solide Grundlage für noch anspruchsvollere Anwendungen im 6G-Zeitalter.

Spektraleffiziente und Massive-MIMO-Fortschritte

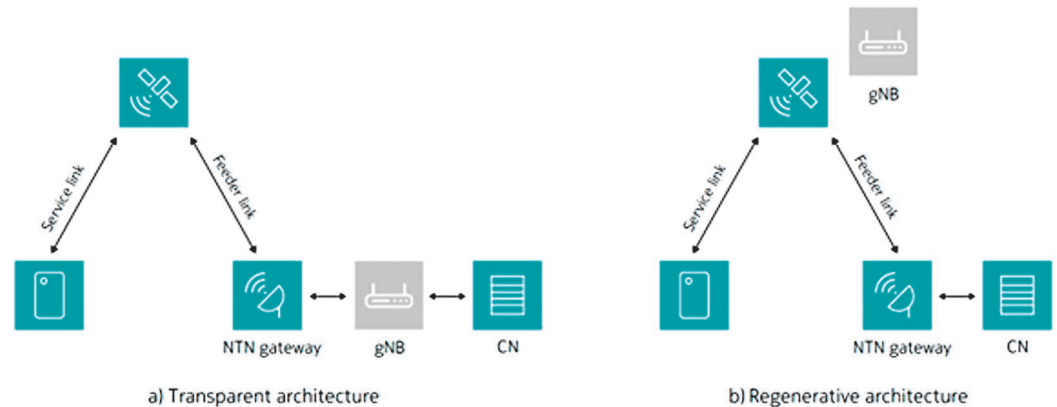
Die kontinuierliche Weiterentwicklung mobiler Netzwerke führt durch fortschrittliche Massive-MIMO-Technologien zu erheblichen Kapazitäts- und Effizienzsteigerungen. Das ursprünglich in 5G eingeführte massive MIMO nutzt mehrere Antennen zum Senden und Empfangen paralleler Datenströme und erhöht so den Durchsatz und die Zuverlässigkeit, ohne zusätzliches Spektrum zu verbrauchen. Multi-User MIMO (MU-MIMO) verbessert dies, indem es mehrere Nutzer gleichzeitig bedient, wodurch die Gesamtkapazität des Netzes verbessert und die Überlastung in Umgebungen mit hohem Datenverkehr verringert wird. In 5G-Advanced werden diese Fähigkeiten insbesondere im Uplink weiter ausgebaut, sodass Geräte bis zu acht Übertragungsketten unterstützen können. Release 19 führt MIMO-Verbesserungen sowohl für den Downlink als auch für den Uplink ein.

Aktuelle 5G-Implementierungen erreichen mit einer Bandbreite von 100 MHz Time Division Duplex (TDD) Spektraleffizienzen zwischen 10 und 80 bps/Hz und liefern Spitzenzellkapazitäten von bis zu 6 Gbps sowie durchschnittliche Zellkapazitäten von 0,8 Gbps. Die Entwicklung hin zu 6G zielt darauf ab, diese Werte zu steigern.

NTN-Anwendungen mit erweiterter Abdeckung

Die Integration von NTN in die terrestrische Infrastruktur markiert eine bedeutende Entwicklung in der Mobilkommunikation. Diese Konvergenz bewältigt kritische Herausforderungen bei der Abdeckung und eröffnet gleichzeitig neue Dienstmöglichkeiten für abgelegene und mobile Szenarien.

Das NTN-Ökosystem umfasst mehrere Orbitalschichten sowie HAPS. Diese mehrschichtige Architektur ergänzt terrestrische Netzwerke, indem sie die Abdeckung auf die 85% der



Transparente und regenerative Architekturen für NTN

Erdoberfläche außerhalb der herkömmlichen Mobilfunkabdeckung ausweitet. Release 17 hat die grundlegende NTN-Unterstützung für 5G NR- und IoT-Dienste etabliert und wichtige Mechanismen eingeführt, um die besonderen Herausforderungen der satellitengestützten Kommunikation zu bewältigen.

3GPP unterscheidet zwei Arten von NTN-UE: Handhelds und Very Small Aperture Terminals (VSATs). Handhelds arbeiten mit Standardantennen und niedrigeren Datenraten, während VSATs kleine Parabolantennen oder Antennenarrays verwenden und in der Regel auf höheren Frequenzen arbeiten.

3GPP hat verbesserte Handover-Mechanismen definiert, darunter zeit- oder ortabhängige bedingte Handovers. Die Spezifikation „5G-Advanced Overview 16“ unterstützt sowohl Earth-Moving Cells (EMC) als auch Earth Fixed Cells (EFC) und ermöglicht so Flexibilität bei der Bereitstellung bei gleichzeitiger Bewältigung der Komplexität häufiger Handover.

Release 18+ führen weitere Verbesserungen ein, wie z.B. die netzwerkverifizierte UE-Standortbestimmung, eine verbesserte Abdeckung und Uplink-Kapazität sowie bessere Mobilitätsfunktionen zwischen NTN- und terrestrischen Netzwerken. Etwa um die Spektraleffizienz im Uplink zu verbessern, verwendet Release 19 Orthogonal Cover Codes (OCC), damit mehrere UEs gleichzeitig über dieselben

Zeit-Frequenz-Ressourcen senden können, während die Orthogonalität erhalten bleibt.

Spektrumüberlegungen bleiben von entscheidender Bedeutung, wobei sich die ersten NTN-Implementierungen auf die L- und S-Bänder für Handheld-Geräte konzentrieren. Release 18 erweitert die Unterstützung auf Frequenzen über 10 GHz, die besonders für VSAT-Anwendungen relevant sind.

Einführung und industrielle Anwendungen

Die Einführung von 5G-Advanced-Funktionen schreitet in Nordamerika voran, angetrieben durch Verbesserungen in den 3GPP-Versionen 18 und 19 und aufbauend auf der robusten 5G-SA-Architektur. 5G SA ermöglicht eine verbesserte Netzwerkleistung durch höheren Datendurchsatz, geringere Latenzzeiten und höhere Zuverlässigkeit, wodurch fortschrittliche Anwendungsfälle wie AR, VR, Echtzeit-Cloud-Gaming und zuverlässige Hochgeschwindigkeits-Internetverbindungen für Privathaushalte unterstützt werden.

Um die Netzwerkleistung und -abdeckung zu maximieren, nutzen Betreiber mehrere Frequenzressourcen:

• Low-Band-Frequenzen (unter 1 GHz)

bieten eine flächendeckende Versorgung und dienen als Grundlage für die landesweite 5G-Konnektivität, wodurch ein

konsistenter Service in weiten geografischen Regionen gewährleistet ist.

• Mid-Band-Frequenzen (1...6 GHz)

bieten ein optimales Gleichgewicht zwischen Kapazität und Abdeckung und ermöglichen einen höheren Durchsatz und geringere Latenzzeiten in vorstädtischen und städtischen Umgebungen.

• mmWave-Bänder (24...100 GHz)

bieten extrem hohe Kapazitäten und Multi-Gigabit-Geschwindigkeiten in dichtbesiedelten städtischen Gebieten und an Orten mit hoher Nachfrage, wie Stadien und Verkehrsknotenpunkten.

5G-Advanced

stellt einen strategischen Wendepunkt für die Telekommunikationsbranche dar. Durch den Einsatz von KI/ML-gesteuerter Automatisierung, die Implementierung ausgefeilter Energiespartetechniken und die Erweiterung der Abdeckung durch NTN- und RedCap-Technologien sind Betreiber in der Lage, differenzierte Dienste anzubieten, neue Einnahmequellen zu erschließen und Nachhaltigkeitsziele voranzutreiben. Diese Entwicklung legt den Grundstein für die nächste Generation: 6G.

Wichtigste Erkenntnisse

• KI als Kernstück

Die Einbettung von Intelligenz in alle Netzwerkschichten ist für die Erreichung von autonomem Betrieb, Kosteneffizienz und Skalierbarkeit unerlässlich.

• Energie und Nachhaltigkeit

Funktionen wie Zell-Ruhemodi und Antennenanpassung bieten unmittelbare Vorteile in Form von OpEx-Reduzierung und geringeren Umweltauswirkungen.

• Ökosystem-Enablement

Fortschritte in den Bereichen XR, IoT, NTN und private Netzwerke eröffnen neue Märkte und Anwendungsfälle.

• Harmonisierung der Regulierung

Fortschritte hängen von einer vorausschauenden Politik in den Bereichen KI, Frequenzteilung, Sicherheit, globale Harmonisierung von NTN und IoT sowie umweltfreundliche Lizenzierung ab.

Die folgenden 5G-Advanced-Funktionen werden derzeit in Nordamerika eingeführt oder getestet:

• 5G-SA-Architektur

5G-Advanced-Netze werden unter der SA-Architektur eingeführt, die vollständig vom 5G-SA-Kern unterstützt wird, ohne auf die alte 4G-Infrastruktur angewiesen zu sein, wie dies bei der Non-Standalone-Architektur (NSA) der Fall ist. Die SA-Architektur ermöglicht erweiterte Funktionen wie Network Slicing, extrem niedrige Latenzzeiten und verbesserte Downlink- und Uplink-Leistung.

• Network Slicing

ermöglicht die Erstellung mehrerer isolierter, durchgängiger logischer Netzwerke (Slices) auf einer gemeinsam genutzten physischen Infrastruktur. Jeder Slice ist auf bestimmte Anwendungsfälle und Leistungsanforderungen zugeschnitten – beispielsweise für Notfalldienste, industrielle Automatisierung oder Multimedia-Anwendungen für Verbraucher – und bietet garantierte QoS.

• Verbesserungen im UL

Die Uplink-Leistung wird durch Übertragungsschaltung, Trägeraggregation und UL-MIMO über TDD- und FDD-Frequenzspektrum (Frequency Division Duplex) optimiert. In gemeinsamen Tests zwischen Betreibern und Ökosystempartnern

wurden Uplink-Geschwindigkeiten von über 500 Mbit/s nachgewiesen.

• Verbesserungen im DL

Die Downlink-Leistung wird durch Massive MIMO mit höherer Modulationsordnung (256 und 1024 QAM) und DL-MU-MIMO-Funktionen deutlich verbessert, was eine höhere Kapazität und einen höheren Durchsatz ermöglicht.

• KI-gesteuerte Lösungen

werden in 5G-Advanced-Netzwerken integriert, um die Netzwerkleistung dynamisch zu optimieren und so eine Echtzeit-Ressourcenallokation, vorausschauende Wartung und adaptive Abstimmung zu ermöglichen, wodurch die Gesamteffizienz und das Nutzererlebnis verbessert werden.

Unterstützung für RedCap-Geräte

Reduced Capability (RedCap), auch bekannt als NR-Light, unterstützt 5G-IoT-Anwendungsfälle mit geringer Bandbreite, geringem Stromverbrauch und geringer Komplexität (z.B. Wearables, Sensoren und industrielle Geräte).

• 3GPP-standardisierte Positionierungstechnologien

werden implementiert, um sowohl kommerzielle als auch regulatorische standortbezogene Dienste zu unterstützen.

• Kommerzialisierte private und hybride 5G-Netzwerke

werden bereitgestellt, um die spezifischen Geschäftsanforderungen von Unternehmen, Industrie und Behörden zu erfüllen. Private Netzwerke bieten dediziertes Spektrum, lokale Kontrolle, erhöhte Sicherheit, hohe Zuverlässigkeit und geringe Latenzzeiten. Integriertes Edge-Computing trägt zur Reduzierung der Backhaul-Latenz bei, ermöglicht Echtzeitanalysen und unterstützt zeitkritische industrielle Anwendungen wie Robotik, AR/VR und Autonomation. Hybride 5G-Advanced-Netzwerke kombinieren private Netzwerkfunktionen mit dem Zugang zur öffentlichen Infrastruktur, um nahtlose Konnektivität und Skalierbarkeit zu ermöglichen.

• NTN-Integration

Direkt auf Geräte gerichteten Satellitendienste sollen Konnektivitätslücken schließen und Ausfallsicherheit bieten, indem sie LEO-Satelliten in weltraumgestützte Mobilfunkmasten verwandeln.

Der Weg zu 6G

6G wird die Mobilkommunikation grundlegend verändern. Es wird als kognitive und umgebungsbezogene Infrastruktur konzipiert, die Hyperkonnektivität, KI-native Funktionen, Nachhaltigkeit und Sicherheit integriert. Kommunikation, Datenverarbeitung, Sensorik, Steuerung und KI werden in einer eng integrierten Architektur vereint. Die Konnektivität wird sich über Menschen, Maschinen, Sensoren und digitale Zwillinge erstrecken. KI-native Netzwerke werden einen autonomen Betrieb und eine Selbstoptimierung für alle Schichten ermöglichen, von der physikalischen Schicht bis zur Anwendungsschicht. Das 6G-Netzwerk wird auf Nachhaltigkeit ausgelegt sein, einen Netto-Null-Energieverbrauch anstreben und durch Umgebungsenergiegewinnung und intelligente Arbeitszyklen eine lange Lebensdauer der Geräte unterstützen.

Brückenschlag zwischen 5G-Advanced und der zukünftigen Netzwerkentwicklung

5G-Advanced wird weiterentwickelt, wobei 3GPP die Fertigstellung von Release 19 bis Ende 2025 plant. Die Arbeiten an Release 20 werden Ende 2025 beginnen, zunächst mit Verbesserungen der physikalischen Schicht (gebilligt in 3GPP RP-250812 für RAN REL-20). Im Laufe mehrerer Release-Zyklen von 5G-Advanced werden Verbesserungen, die neue Hardware und Untersuchungsgegenstände erfordern, die Grundlage für zukünftige 6G-Spezifikationen bilden mit neuen Funktionen, wie KI/ML, NTN, Energieeffizienzverbesserungen, Abdeckungserweiterungen und Kapazitätssteigerungen.

5G-Advanced wurde in den Releases 18 bis 20 standardisiert und stellt eine wichtige Evolutionsphase in Mobilfunknetzen dar. Verbesserungen in den Bereichen KI/ML, MIMO, Energieeinsparung, NTN, Cloud-RAN und Edge-Computing sowie die Kanalmodellierung in ISAC bilden eine solide Grundlage für die Entwicklung von 6G.

Die modulare, service-orientierte und intelligente Architektur von 5G-Advanced schafft die Voraussetzungen für eine absichtsgesteuerte, slice-bewusste Orchestrierung in 6G.

Die Forschung im Bereich Frequenzerkennung und dynamische Frequenzstrategien wird für die intelligente Frequenzteilung und effiziente Nutzung von entscheidender Bedeutung sein.

Die Entwicklung von 6G wird in mehreren Phasen von der frühen Forschung bis zur kommerziellen Einführung erfolgen, abgestimmt mit den Aktivitäten von 3GPP, ITU und anderen globalen Standardisierungsgremien.

Diese Entwicklungen führen zu mehreren strategischen Schlussfolgerungen für Interessengruppen, darunter Regulierungsbehörden, Analysten und Entscheidungsträger. ◀