



GEMEINSAMER SACHBERICHT

zum Projekt

5G-ECONET

Energy Consumption Optimization for Campus Network Applications



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

5G-Econet ist gefördert von



5G-ECONET

Energy Consumption Optimization for NetworkApplications

Julia Kolb

Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS

Konsortialführer:

Fraunhofer IIS / FKZ: 19OI22011A

Projektpartner:

AiVader GmbH / FKZ: 19OI22011B

Keysight Technologies GmbH / FKZ: 19OI22011C

TU Ilmenau / FKZ: 19OI22011D

exceeding-solutions GmbH / FKZ: 19OI22011E

Inhalt

Management Summary	5
1. Projektmanagement.....	6
2. Private 5G Anwendungsfälle bei der Keysight Deutschland GmbH	7
Order Fulfillment Technology.....	7
Global Repair and Hardware Services.....	7
Global Sales und Professional Services	7
3. Aufbau des 5G-Campusnetzes	8
3.1 Vorbereitende Maßnahmen am Standort.....	8
3.2 Initialer Aufbau beim Systemintegrator	8
3.3 Aufbau der 5G-Campusnetzinfrastruktur in Böblingen	9
4. Anwendbarkeit verschiedener Energieverbrauch-optimierungsstrategien	11
4.1 TU Ilmenau „ML-Driven Self-Organizing Network Functions in O-RAN“	11
ML-gesteuerte SON-Funktionen für eine energieeffiziente O-RAN-Optimierung	11
Realisierung des CCO/ICIC-Optimierungsalgorithmus	12
Implementierung und funktionale Validierung der CCO/ICIC-Lösung in einem O-RAN-Testbed.....	13
Leistungsbewertung, Energieeinsparpotenzial und gewonnene Erkenntnisse	14
4.2 Energy-Saving Management for O-RAN Campus Networks von AlVader.....	16
Konzept und Design von ML-gesteuerten Energiesparmaßnahmen in O-RAN-Campus-Netzwerken.....	16
Vom Konzept zur Umsetzung: ML-gestütztes ESM in O-RAN.....	16
Integration, Validierung und Interoperabilitätstests in O-RAN-Testumgebungen.....	17
4.3 Energy-saving in O-RAN Campusnetzen - Fraunhofer IIS	19
Konzeption & Design Energiesparmaßnahmen	19
Systemebene-Simulationen.....	20
Integration einer oder mehrerer Energiemaßnahmen in die Testbeds.....	22
4.4 Messung und Dokumentation der Dienstqualität und des Energieverbrauchs in der energieoptimierten Netzkonfiguration	22
Exceeding Solutions „Industrielle Energiemessung auf Basis der Smart Meter Infrastruktur“ (Vorstellung vom Prototyp)	22
Fraunhofer IIS: Energieersparnisse im Campusnetz auf Basis von effizienten Netzwerkkonfiguration	26
5.1 Verwertung von Prototypen.....	28
Entwicklung des Prototypens als Blaupause für iRLM über CLS exceeding solutions.....	28
Erfolge, Ergebnisse und zukünftige Ausrichtung für nachhaltiges 5G - Al Vader	29
5.2 Industrial Impact.....	30
5.3 Academic Impact.....	31

5.4 Erfolge bei der Standardisierungsarbeit.....32

Management Summary

Im Rahmen des 5G-ECONET Projekts haben die Projektpartner von 5G-ECONET innovative Lösungen konzeptionell, prototypisch entwickelt und auf ihre Wirksamkeit geprüft.

Wir entwickelten zwei Prototypen der intelligenter Engines, die maschinelles Lernen nutzen, um den Netzwerkdatenverkehr vorherzusagen und die Aktivitäten der Basisstationen dynamisch zu steuern. Eine dieser Implementierungen, die EnergySaving-xApp (AiVader), demonstrierten wir 2024 beim O-RAN Global PlugFest interoperabel und belegten damit ihre technologische Reife und Anschlussfähigkeit an das O-RAN-Ökosystem.

Parallel dazu erforschten wir neuartige Netzfunktionen, die Verkehrsmuster als Grundlage nutzen, und erarbeiteten Algorithmen, die in last-armen Zeitfenstern eine gezielte Deaktivierung der RAN-Bestandteile ermöglichen, wodurch erhebliche Energieeinsparungen realisiert werden können. Die erzielten Erkenntnisse wurden veröffentlicht und bilden die Grundlage für reproduzierbare Energiesparstrategien.

Zur Sicherung der Dienstabdeckung in Wechselzuständen haben wir eine Software zur Anpassung der Sendeleistung der Basisstationen an aktuelle Netzwerkbedingungen implementiert, die die Ausgangsleistung an aktuelle Netzbedingungen anpasst und so Abdeckungslücken beim Ein- und Ausschalten vermeidet.

Für eine belastbare Bewertung der Effekte haben wir einen Smart-Meter-Prototyp entwickelt, der den Energieverbrauch netzwerknahe erfasst und für Analysen bereitstellt.

Des Weiteren entwickeln wir eine Testumgebung, um den Partnern zu ermöglichen, die entwickelten Netzfunktionalitäten zu erproben. Messungen im bestehenden Open-RAN-Testbed und Experimente mit der EnergySaving-xApp zeigen bereits Energieeinsparungen von bis zu 10 % in nicht-öffentlichen, kleineren privaten Campusnetzen mit aktueller Hard- und Software. Deutlich größeres Energie-Einsparpotential mit aktuellen und zukünftigen Mobilfunk-Standards haben wir mittels Simulationen aufgezeigt.

Unsere wissenschaftlichen Ergebnisse haben wir in vier Fachbeiträgen veröffentlicht und auf internationalen Konferenzen präsentiert. Damit belegen wir sowohl die technische Machbarkeit als auch den praktischen Nutzen der entwickelten Lösungen und schaffen eine belastbare Basis für den Transfer in industrielle 5G-Campusnetze.

Als positiver Nebeneffekt unserer Kooperation haben wir wechselseitig viel gelernt: zum Technologiereifegrad kommerziell verfügbarer O-RAN-basierter Netzinfrastrukturen – insbesondere der RIC-Komponenten – und darüber, dass die maßgeblichen Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch in Campusnetzen andere sind als in den öffentlichen Netzen von Mobilfunkbetreibern.

1. Projektmanagement

Das Projektmanagement von 5G-ECNET war auf eine klare Struktur mit fünf Teilprojekten (TP) und definierten Meilensteinen ausgerichtet (siehe Figure 1). Bei einer Laufzeit von zwei Jahren, verlängert um drei Monate, lag der Schwerpunkt auf TP4 „Anwendbarkeit verschiedener Energieverbrauchsoptimierungsstrategien“, das als umfangreichstes TP die Konzeption, das Design, die Implementierung und die Wirksamkeitsmessung neuartiger KI-basierter Energiesparlösungen im Netz umfasste. Die fünf Projektpartner arbeiteten entlang klar abgegrenzter Verantwortlichkeiten und Schnittstellen zusammen.

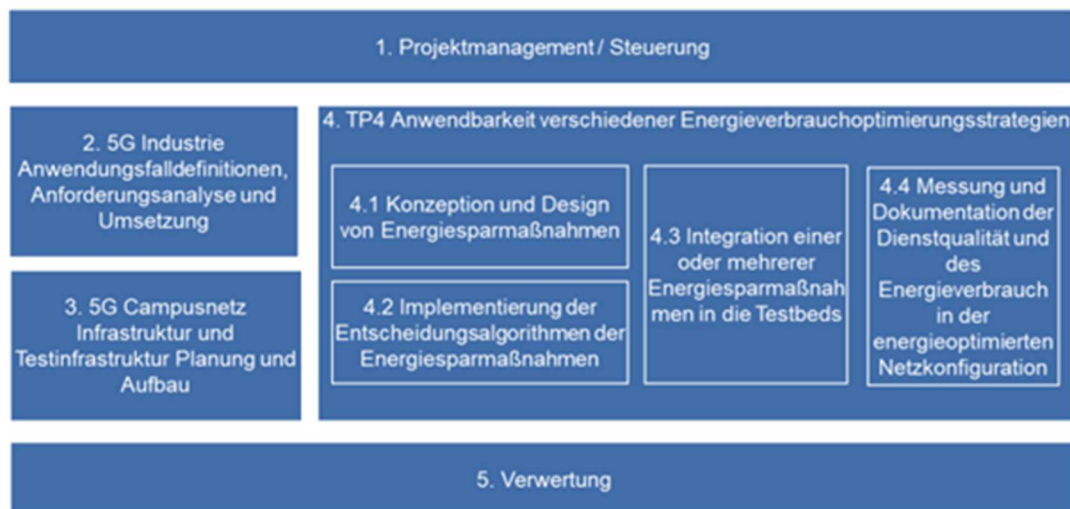


Figure 1 Fünf Teilprojekte in 5G-ECNET

Transparenz und Qualitätssicherung wurden durch regelmäßige Abstimmungen und dokumentierte Entscheidungen sowie festgelegte nächste Schritte in Form von Besprechungsprotokollen gewährleistet. Den Projektträger hielten wir über strukturierte Zwischenberichte zum Arbeitsstand, zur Zielerreichung und zu Abweichungen informiert. Die zusammenfassende Projekt-Präsentation „Projektreview“ des Konsortialführers Fraunhofer IIS sowie die individuellen Präsentationen der fünf Projektpartner und vier Demonstrationen beim Abschlusstreffen am 30. Juli 2025 bildeten die Grundlage für den Ergebnistransfer an den Projektträger. Damit wurde die kooperative Zusammenarbeit der Partner effektiv gesteuert und die termingerechte, qualitätsgesicherte Erreichung der Projektziele unterstützt.

2. Private 5G Anwendungsfälle bei der Keysight Deutschland GmbH

Die Keysight Deutschland GmbH ist mit vier Standorten in Deutschland vertreten, wobei sich der Hauptsitz in Böblingen befindet. Die Analyse möglicher Anwendungsfälle für ein privates 5G-Netz erfolgte am Standort Böblingen, da hier verschiedene Geschäftsbereiche des globalen Keysight-Konzerns vertreten sind. Neben administrativen Funktionen wie Controlling, Personalwesen und Gebäudemanagement sind hier unter anderem folgende Einheiten angesiedelt:

- Order Fulfillment Technology
- Global Repair and Hardware Services
- Global Sales and Professional Services
- Automotive & Energy Solutions
- Network and Datacenter Solutions
- Broadband and Photonic Center of Excellence

Im Rahmen des Projekts wurden folgende potenzielle Anwendungsfälle für 5G untersucht:

Order Fulfillment Technology

In diesem Bereich werden Produktionsaufgaben durchgeführt. Es handelt sich jedoch nicht um eine klassische Massenproduktion, und die eingesetzten Geräte sind weitgehend stationär. Eine drahtlose Anbindung über 5G würde zwar mehr räumliche Flexibilität ermöglichen, ist aber für den aktuellen Produktionsprozess nicht erforderlich.

Global Repair and Hardware Services

Böblingen ist eines der europäischen Zentren für Reparatur- und Kalibrierdienstleistungen. Hier wurden zwei konkrete 5G-Anwendungsfälle identifiziert:

1. **Drahtlose Anbindung von Testsystemen** („cut-the-wire“): Dies würde mehr Flexibilität bei der Platzierung und Nutzung der Systeme ermöglichen.
2. **Lokalisierung von Geräten im Reparaturprozess**: Eine Ortung mit einer Genauigkeit von 3–4 Metern wäre ausreichend, um den Standort eines Geräts innerhalb bestimmter Bereiche (z. B. Wareneingang, Servicebereich, Warenausgang) zu bestimmen.

Global Sales und Professional Services

Im Bereich Professional Services werden unter anderem Systemlösungen für Kunden entwickelt und getestet – insbesondere im Zusammenhang mit Open RAN-Technologien. Eine 5G-Verbindung ermöglicht es, diese Systeme unter realistischen Bedingungen zu prüfen, bevor sie an Kunden ausgeliefert werden.

3. Aufbau des 5G-Campusnetzes

3.1 Vorbereitende Maßnahmen am Standort

Frequenzzuteilung

Die Frequenzzuteilung durch die Bundesnetzagentur erfolgte zügig und unkompliziert. Der interne Abstimmungsprozess war jedoch aufwendiger als erwartet, da Keysight nur Mieter auf dem Campus in der Herrenberger Straße ist. Die Beantragung musste daher mit dem Vermieter abgestimmt und vertraglich geregelt werden.

Kabelinfrastruktur

Die Verlegung der notwendigen Kabel (z. B. zwischen Funkmodulen, Servern, GPS-Antenne und dem internen Netzwerk) wurde intern beauftragt. Die Umsetzung war komplex, da mehrere Subunternehmer eingebunden werden mussten.

Auswahl von Systemintegrator und Netzkomponenten

Obwohl Keysight über umfangreiche Fachkenntnisse im Bereich Open RAN verfügt, wurde ein externer Dienstleister für die Integration beauftragt. Die Wahl fiel auf die Opticom GmbH, ein regionales mittelständisches Unternehmen. Bei der Auswahl der Netzkomponenten wurden Synergien mit dem EU-Projekt „6G-Sandbox“ berücksichtigt. Eingesetzt wurden:

- **Benetel** (Funkmodule – Radio Units)
- **IS-Wireless** (digitale Netzkomponenten – O-DU, O-CU, RIC)
- **Druid** (5G-Kernnetz – Core)

3.2 Initialer Aufbau beim Systemintegrator

Die Netzkomponenten wurden zunächst im Labor der Opticom GmbH integriert. Erste Tests zeigten eine Datenrate von ca. 700 Mbit/s im 5G-Kernnetz. Nach separaten Tests der Virtualisierungskomponenten (vBridge) mit bis zu 2 Gbit/s konnte die Leistung der Software bestätigt werden.

Ein Problem trat bei der Integration der Funkmodule auf: Die Schnittstelle zwischen den Komponenten von Benetel und IS-Wireless entsprach nicht vollständig dem Open RAN-Standard. Dadurch war ein umfassender Test mit einem Simulator vor der Lieferung der Funkmodule nicht möglich. Nach deren Lieferung konnte das System erfolgreich mit einem Test-Smartphone (Keysight NEMO) geprüft werden.

3.3 Aufbau der 5G-Campusnetzinfrastruktur in Böblingen

Beim Aufbau vor Ort stellte sich heraus, dass das verlegte Kabel für die GPS-Antenne ungeeignet war. Als Übergangslösung wurde ein GPS-Simulator eingesetzt, um einen vollständigen Funktionstest durchzuführen. Erste Tests zur Netzabdeckung im Gebäude wurden ebenfalls erfolgreich durchgeführt.

Nach der Modifikation eines Funkmoduls mit externen Antennenanschlüssen konnte ein Endgeräte-Simulator (Keysight UESim) angeschlossen werden. Damit war es möglich, gezielt Datenverkehr zu erzeugen und verschiedene Nutzungsszenarien zu simulieren.

Im weiteren Verlauf kam es zu wiederholten Softwareabstürzen der DU-Komponente. Diese Probleme konnten erst gegen Ende des Projekts durch Software-Updates und Konfigurationsanpassungen behoben werden.

Aufbau der 5G-Testumgebung bei Keysight in Böblingen

Parallel zur Netzinstallation wurde eine umfassende Testumgebung aufgebaut:

- **Endgerätesimulation (Keysight UESim):** Simuliert viele Geräte mit unterschiedlichen Daten- und Bewegungsprofilen. Unterstützt die Fehlersuche durch Protokollierung der Netzkommunikation.

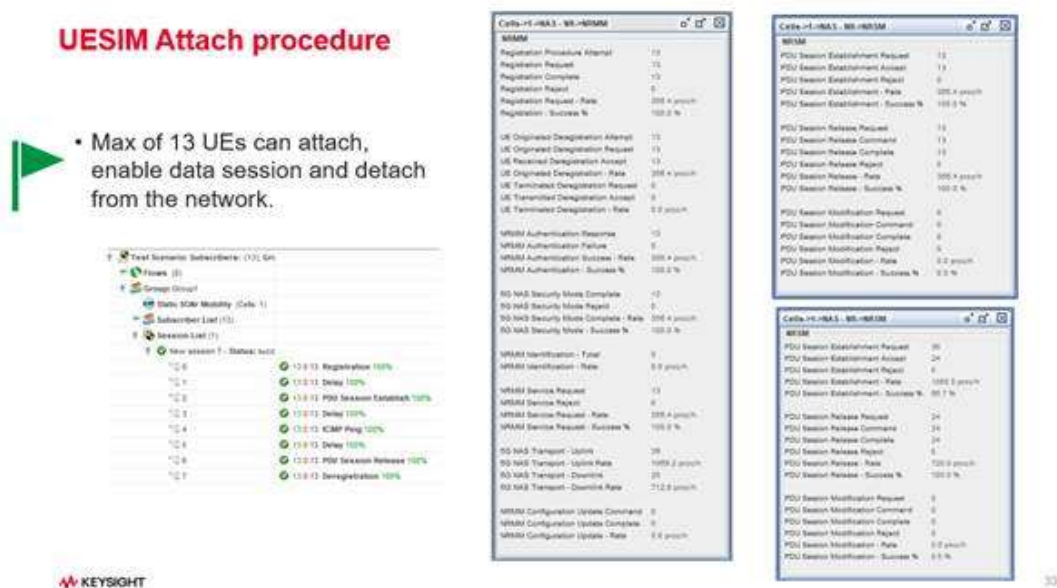
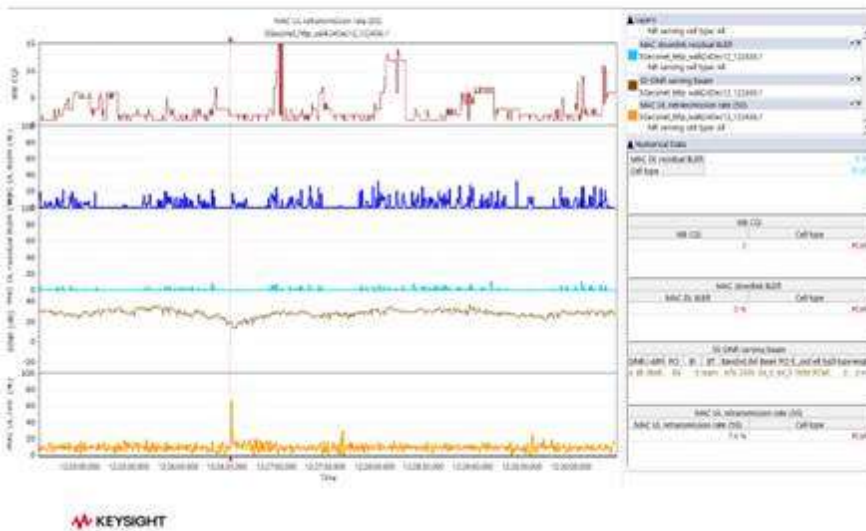


Figure 2. Keysight Darstellung Eingabe von User Equipment für die Simulationssession

- **Ende-zu-Ende-Messung (Keysight Hawkeye):** Testet das Netz auf IP- und Anwendungsebene durch installierte Softwareagenten.
- **Lasttests des 5G-Kernnetzes (Keysight LoadCore):** Simuliert die gesamte Funkzugangsarchitektur (RAN) und hilft bei der Fehlereingrenzung.
- **Netzqualität aus Anwendersicht (Keysight Nemo):** Ein Smartphone mit spezieller Testsoftware misst Netzqualität und Signalisierung. Dabei wurde ein bisher ungelöstes Problem in der Open Fronthaul-Schnittstelle festgestellt.

Throughput analysis

Assumptions



- High BLER with High MAC retransmission is usually linked to poor radio link quality:
- Too Low Power, Too High Power, Frequency Error, Timing Error, poor decoding, Poor Transmitted Signal Quality (UE or eNB/gNB)
BUT in our case
 - SNR is very good > 20 dB
 - One single PCI and one single UE attached
 - Conduct spectrum analysis check to better understand the behavior

Figure 4. Darstellung Initiale Messung mit Keysight UESim

Wavejudge Analysis

- We performed Wavejudge Analysis to understand the CRC and BLER issue:
 - Phase and frequency error were observed, high rotation in the baseband reports from UESIM => can only be fixed on the Phluido Fronthall interface
 - Sampling frequency error of 41Hz
 - DMRS symbol rotation over threshold (2°): 4.54c rad (2.6 deg) per symbol

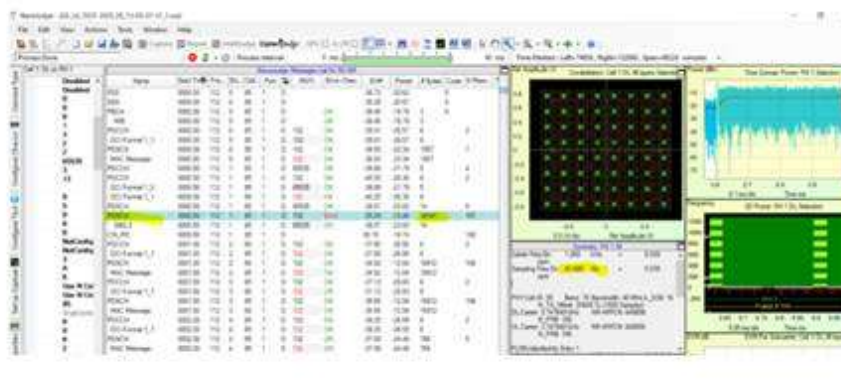


Figure 3. Detail Analyse mit Keysight Wavejudge Analysis

4. Anwendbarkeit verschiedener Energieverbrauch- optimierungsstrategien

4.1 TU Ilmenau „ML-Driven Self-Organizing Network Functions in O-RAN“

ML-gesteuerte SON-Funktionen für eine energieeffiziente O-RAN- Optimierung

Die TU Ilmenau befasste sich mit der Herausforderung, die Energieeffizienz in 5G-O-RAN-Campus-Netzwerken zu verbessern. Ein wesentlicher Schwerpunkt ist dabei Self-Organizing Network (SON)-Funktionen, insbesondere Coverage and Capacity Optimization (CCO) und Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) als Kernforschungsgebiete im 5G-ECONET-Projekt. CCO optimiert das Nutzererlebnis in Bereichen mit geringer Signalstärke oder limitierter Kapazität, während ICIC die Interferenzen zwischen benachbarten Zellen reduziert.

SON-Funktionen zielen darauf ab, eine robuste Netzabdeckung und hohe Dienstgüte (Quality-of-Service, QoS) in Campus-Netzwerken zu gewährleisten, ohne hohe Investitions- oder Betriebskosten. Dies ist besonders relevant bei Energiesparmaßnahmen wie der selektiven Abschaltung von Zellen im Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN). In solchen Szenarien können CCO und ICIC-Versorgungslücken mindern und als Ausgleichsmechanismus wirken. Gleichzeitig reduzieren konsistente Abdeckung und geringere Interferenzen direkt Signalisierungsaufwand, unnötige Neuübertragungen und Funkverbindungsabbrüche, wodurch die Energieeffizienz in Bits pro Joule für Netz und Endgeräte steigt.

Das Zusammenspiel von CCO und ICIC ist eine komplexe Mehrzieloptimierung: CCO erweitert die Abdeckung durch Anpassung von Antennenparametern wie Neigung, Azimut oder Sendeleistung, während ICIC dieselben Parameter zur Begrenzung von Interferenzen nutzt. Ein optimales Gleichgewicht erfordert durch Maschinelles Lernen (ML) ermöglichte dynamische, kontextbezogene Steuerung. Im O-RAN-Framework wird diese Intelligenz über xApps und rApps auf RAN Intelligent Controllers (RICs) realisiert und unterstützt kontinuierliche Closed-Loop-Optimierung.

Zur Bereitstellung des CCO/ICIC-Anwendungsfalls dokumentierte die TU Ilmenau systematisch alle technischen und betrieblichen Anforderungen, einschließlich relevanter O-RAN-Komponenten, Schnittstellen, KPIs, Steuerungsparameter und Servicemodelle. Diese Anforderungen bildeten die Basis für Gesamtsystemarchitektur, Netzwerkkonfiguration, Umsetzungsmethodik und Leistungsziele. Die Lösung ermöglicht Echtzeit-Erkennung von Abdeckungs- oder Interferenzverschlechterungen und intelligente, automatisierte Antennenparameteranpassungen über xApps und rApps, was

zu messbaren QoS-Verbesserungen führt. Alle Funktionen sind vollständig O-RAN- und 3GPP-kompatibel und unterstützen Near-RT- sowie Non-RT-RIC-Operationen.

Realisierung des CCO/ICIC-Optimierungsalgorithmus

Aufbauend auf den Anforderungen und der Systemarchitektur entwickelte die TU Ilmenau eine maschinell lernende Optimierungsstrategie für eine flexible und effiziente CCO/ICIC-Lösung in einem O-RAN-basierten 5G-Campusnetzwerk.

Eine strukturierte Bewertung ermittelte die effektivste Entscheidungsfindungsmethodik für diese multiobjektive Optimierungsaufgabe. Drei Ansätze, nämlich Heuristiken, Empfehlungssysteme (RecSys) und Autoencoder wurden hinsichtlich Anpassungsfähigkeit an dynamische Netzwerkbedingungen, Interpretierbarkeit und Rechenaufwand geprüft. Heuristiken waren zu einfach, um die Komplexität der CCO/ICIC-Optimierung abzubilden. Autoencoder boten starke nichtlineare Modellierung, wurden aber wegen hohem Rechenaufwand und Datenbedarf ausgeschlossen. Empfehlungssysteme (RecSys) zeigten die beste Balance aus Anpassungsfähigkeit, Genauigkeit, Interpretierbarkeit und Effizienz.

Parallel bewertete die TU Ilmenau zentralisierte und föderierte ML-Trainingsansätze. Zentralisiertes Training, bei dem alle Netzwerkdaten gesammelt und Modelle an einem Ort trainiert werden, verursachten hohen Kommunikationsaufwand und Latenzzeiten. Föderiertes Lernen reduziert dies, indem Modelle an Edge-Knoten trainiert und nur Updates an einen zentralen Koordinator gesendet werden. Aufgrund des Reifegrads der verfügbaren O-RAN-Plattformen und begrenzter Einsatzbereitschaft föderierten Lernens wurde für dieses Projekt zentralisiertes Training gewählt, um sofort einsatzfähige Lösungen auf Testumgebungen zu gewährleisten.

Zur Balance der widersprüchlichen Ziele von CCO und ICIC wurde eine multikriterielle globale KPI-Funktion (GKPI) eingeführt:

$$GKPI = \alpha \times (RSRP) - (1 - \alpha) \times (IFC)$$

wobei α Netzbetreibern erlaubt, Präferenzen zwischen Abdeckung und Interferenz festzulegen. Durch Einbeziehung der erzeugten Interferenz (IFC) berücksichtigen Anpassungen der Antennenparameter deren Auswirkungen auf benachbarte Zellen.

Das implementierte RecSys-Modell prognostiziert die optimale Zellübertragungsleistung (PTX), die die GKPI-Werte auf Basis historischer KPIs und konfigurierbarer Parameter maximiert. PTX wurde als primärer steuerbarer Parameter gewählt, da Azimut und Neigungswinkel der Antenne in der Indoor-Campus-Konfiguration festbleiben. Das Modell verarbeitet KPI- oder ENV-Daten wie Reference Signal Received Power (RSRP), Signal-to-Interference Ratio (SIR), Gesamtnutzerzahl, Ausfallquote und Degree of interference Created (DIC). Eine zentrale Innovation ist die direkte Einbettung der

Interferenzsteuerung in die CCO-Logik, wodurch ein separater ICIC-Prozess entfällt. Diese Integration ist besonders vorteilhaft bei Hard Frequency Reuse (HFR)-Schemata, bei denen alle Zellen auf demselben Träger arbeiten.

Implementierung und funktionale Validierung der CCO/ICIC-Lösung in einem O-RAN-Testbed

Nach der Entwicklung des Optimierungsalgorithmus führte die TU Ilmenau eine funktionale Validierung der ML-basierten CCO/ICIC-Lösung durch, die als xApp sowie als ML-Agent, der die Funktionalität einer rApp emuliert, in einem O-RAN-konformen Testbed implementiert wurde, um die Betriebsbereitschaft zu demonstrieren.

Da zu Beginn keine kommerziellen O-RAN-Testumgebungen verfügbar waren, nutzte die TU Ilmenau die Open-Source-SD-RAN-Plattform der Open Networking Foundation (ONF) als primäres Testbed. Diese bot eine vollständige O-RAN-Architektur mit Near-RT-RIC, E2-Schnittstelle und RAN-Simulator für gNBs und UEs, inklusive Zugriff auf physikalische Schicht-KPIs und Steuerungsparameter. Darüber hinaus wurde aufgrund des Fehlens eines Non-RT-RIC während des Projekts ein externes ML-Framework der AiVader GmbH integriert, um Non-RT-RIC-Funktionalitäten und rApp-Fähigkeiten zu emulieren.

Eine vergleichende Analyse mehrerer O-RAN-Plattformen zeigte, dass SD-RAN für die CCO/ICIC-Tests besonders geeignet war. Es ermöglichte groß angelegte RAN-Knotensimulationen und direkten Zugriff auf physikalische Parameter. Alternative Plattformen beschränkten sich auf höhere Schichten (RLC/PDCP) und unterstützten nur minimale Tests mit bis zu zwei gNBs.

Das simulierte Netz umfasste sieben Zellen in 2-3-2-Hexagonalanordnung, 250 m Abstand, n78-Band, und 100 UEs mit Random-Walk-Mobilität. Jeder E2-Knoten (BS) hatte eine Rundstrahlantenne. Die Funkausbreitung wurde über Free Space Path Loss (FSPL) modelliert.

Die in Golang entwickelte CCO/ICIC-xApp kommuniziert mit allen E2-Knoten und deren Servicemodellen über die E2-Schnittstelle. ENV-Daten wurden über Key Performance Measurement-Service Modell (KPM-SM) erfasst, PTX-Pegel über RAN Control-Service Modell (RC-SM) angepasst. Für das Training generierte eine zufällige Erkundungsphase etwa 40.000 ENV-PTX-GKPI-Tupel, die verschiedene Netzwerkzustände abbildeten. Die Daten wurden in Sparse-Matrixformat vorverarbeitet und für Training und Inferenz des RecSys-Modells genutzt. Alle ML-Aufgaben wurden innerhalb des entwickelten ML-Agents ausgeführt, der in das AiVader-ML-Framework integriert ist.

Das SVD-basierte RecSys erzielte bei einer 75/25-Trainings-/Test-Aufteilung einen RMSE von 2,6 und einen MAE von 1,6, was solide Vorhersagekapazität demonstriert. In der Closed-Loop-Validierung übertrug die xApp kontinuierlich ENV-, PTX- und GKPI-Daten an

das trainierte RecSys, das optimale PTX-Empfehlungen zur Maximierung des GKPI lieferte. Diese wurden über RC-SM nahezu in Echtzeit umgesetzt, wodurch Abdeckung, Kapazität und Interferenz in der simulierten O-RAN-Umgebung dynamisch optimiert wurden. Figure 5 zeigt die Gesamtarchitektur der durch ein SVD-basiertes Empfehlungssystem gesteuerten CCO/ICIC Lösung innerhalb des O-RAN-Frameworks für koordinierte Steuerung und Interferenzmanagement.

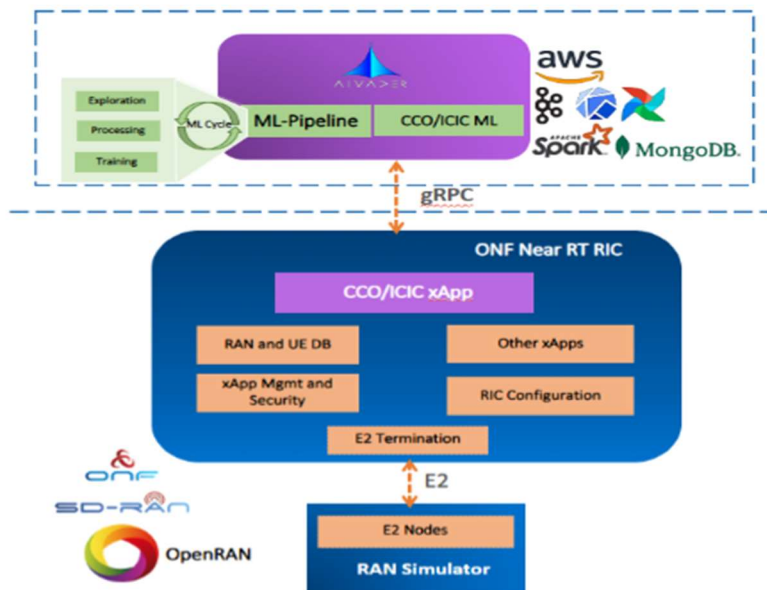


Figure 5. Architektur der durch ein SVD-basiertes Empfehlungssystem gesteuerten CCO/ICIC xApp-ML agent (rApp) in O-RAN

Leistungsbewertung, Energieeinsparpotenzial und gewonnene Erkenntnisse

Die Leistungsbewertung des ML-basierten CCO/ICIC Lösung der TU Ilmenau fokussierte sich auf Netzwerkleistung und Energieeinsparpotenzial in Campus-Netzwerken. Die Ergebnisse zeigen, dass die Lösung Leistungsabfälle in Echtzeit erkennt und durch Closed-Loop-Regelung optimale Betriebsbedingungen wiederherstellt.

In einem Testszenario (Figure 6) wurden alle Zellen zunächst auf PTX = 12 dBm gesetzt (T1). Zur Simulation einer Verschlechterung wurde der PTX-Wert von zwei Zellen auf 8 dBm bzw. 9 dBm reduziert, was die Global KPI (GKPI)-Werte senkte (T2). Die CCO/ICIC-Lösung analysierte Live-ENV-Daten über xApp und das trainierte SVD-RecSys-Modell im ML-Framework von AiVader und empfahl die Wiederherstellung der PTX-Werte. Nach Anwendung kehrten die GKPI-Werte auf optimales Niveau zurück (T3), mit einer kombinierten Abdeckungs- und Kapazitätssteigerung von bis zu 6,7 %.

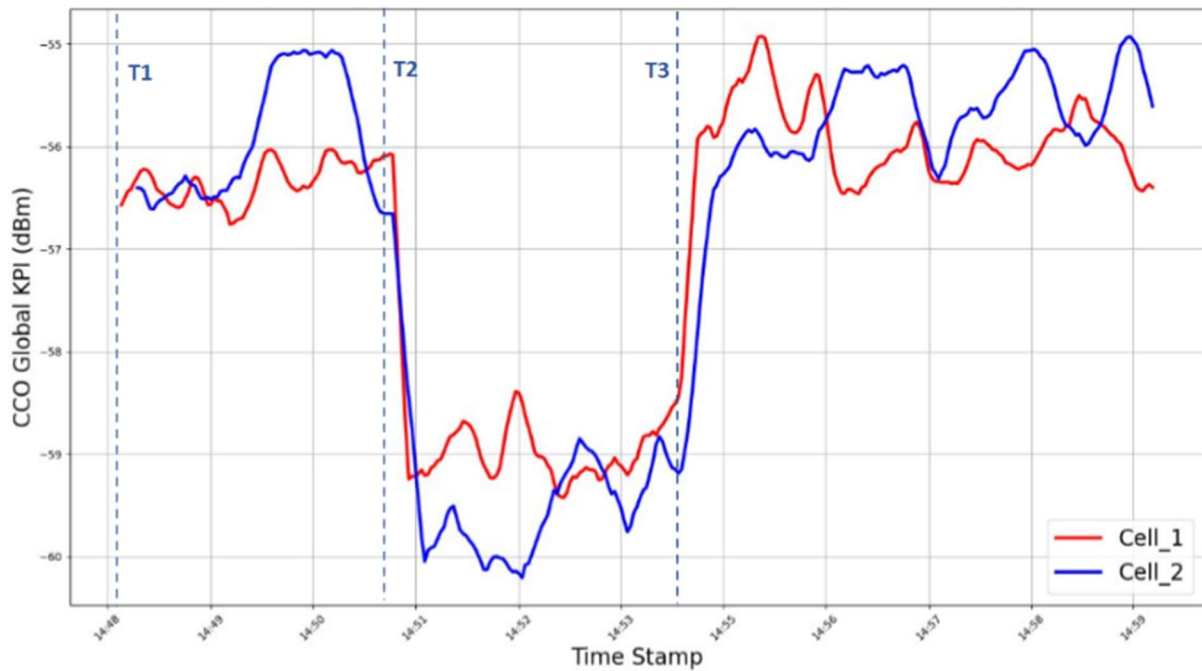


Figure 6. Dynamische Optimierung der Zelleistung mit SVD-RecSys CCO/ICIC xApp-ML-Agent (rApp)

Neben der Leistungswiederherstellung wurde die Fähigkeit bewertet, die Dienstgüte (Quality of Service, QoS) während energiesparender Maßnahmen zu erhalten. In einer Konfiguration mit sieben Zellen, wobei angenommen wurde, dass drei nicht ausgelastete Zellen, während eines ununterbrochenen fünfstündigen Nachtzeitraums selektiv deaktiviert würden, könnte im RAN eine geschätzte Energieeinsparung von 9 % erzielt werden. Die CCO/ICIC-Lösung könnte dann die daraus entstehenden Versorgungslücken wirksam kompensieren, um eine konsistente QoS sicherzustellen.

Das SVD-RecSys-basierte CCO/ICIC-xApp-ML Agent (rApp)-Framework demonstriert eine neuartige, praxisnahe Anwendung von RecSys für O-RAN-Optimierung. Es ermöglicht adaptives, kontextbezogenes, vollautomatisches Netzwerkmanagement und erfüllt die Anforderungen von Campus-Netzwerken sowie die Architekturprinzipien von O-RAN und 3GPP. Dabei zeigt sich die Rolle des RAN Intelligent Controller (RIC) als zentraler Enabler für fortgeschrittene SON-Funktionen in O-RAN-Ökosystemen.

Die Bereitstellung solcher Lösungen in heterogenen RIC-Umgebungen bleibt jedoch aufgrund der sich ständig weiterentwickelnden O-RAN-Spezifikationen, der unterschiedlichen E2-Knoten-Fähigkeiten und der variierenden Konformitätsgrade der Anbieter eine Herausforderung.

Zukünftig plant die TU Ilmenau, die Lösung in Live-O-RAN-Campus-Netzen zu validieren und ihre Anwendbarkeit auf dynamische, herstellerunabhängige und öffentliche Umgebungen auszudehnen.

4.2 Energy-Saving Management for O-RAN Campus Networks von AiVader

Konzept und Design von ML-gesteuerten Energiesparmaßnahmen in O-RAN-Campus-Netzwerken

Im Rahmen des 5G ECONET-Projekts adressierte AiVader eine zentrale Herausforderung künftiger Campus-Netzwerke: den steigenden Energiebedarf von 5G-Funkzugangsnetzen (RAN), insbesondere im Open RAN (O-RAN). Der Fokus lag auf Konzeption, Design und Umsetzung von Energiesparmaßnahmen (ESM) mittels Künstliche Intelligenz (KI)/ Maschinelles Lernen (ML)-fähiger Netzwerksteuerungsanwendungen (xApps, rApps), integriert in RAN Intelligent Controller (RICs).

Laut dem NGMN-Network Energy Efficiency Phase 2 Report verursacht das RAN fast 75% des Stromverbrauchs mobiler Netze, wobei Basisstationen die Hälfte ausmachen. Schon Reduzierungen von 30-40 % auf Radioeinheiten (RU)-Ebene können bis zu 12% Gesamtersparnis bringen, ein deutlicher Hinweis auf die Relevanz der AiVader-Lösung.

Die O-RAN-Spezifikationen nennen verschiedene ESM-Ansätze: vollständige Zellen- oder Trägerabschaltung, RF-Kanalneukonfiguration, erweiterte Sleep-Modes und O-Cloud-Energieoptimierung. Ihre Machbarkeit in Campus-Umgebungen musste empirisch überprüft werden. AiVader führte eine Energiemesskampagne mit einer kommerziellen NodeB-Basisstation durch. Ergebnisse: Eine Reduktion der Sendeleistung um 7 dB senkte den Verbrauch unter hoher Last nur um 5–10 %. Die RF-Kanalneukonfiguration und Sleep-Modes wurden hingegen von der verwendeten Hardware nicht unterstützt. Die vollständige Abschaltung erzielte rund 21 W Einsparung.

Darauf aufbauend definierte AiVader einen Anwendungsfall und eine Architektur für ML-gestütztes ESM im Einklang mit O-RAN Working Group (WG) 2 (Architektur und Schnittstellen), WG3 (Dienstmodelle) und 3GPP TS 28.310. Die Lösung nutzt ML zur Prognose des Netzwerkverkehrs und zur dynamischen Steuerung des Ein-/Aus-Status von Basisstationen. Im Gegensatz zu statischen Zeitplänen reagiert der ML-Ansatz vorausschauend auf Ereignisse, Nachfragespitzen oder unregelmäßiges Nutzerverhalten und deaktiviert Zellen nur dann, wenn benachbarte Zellen die Last ohne Qualitätsverlust übernehmen können.

Vom Konzept zur Umsetzung: ML-gestütztes ESM in O-RAN

Aufbauend auf dem definierten Anwendungsfall setzte AiVader seine ML-gestützte Lösung für das dynamische Basisstationsmanagement (BS) in Campus-O-RAN-Netzwerken praktisch um. Geplant war der Einsatz von xApp und rApp in einer vollständig O-RAN-konformen Testumgebung mit Near-RT-RIC, Non-RT-RIC, O-DU, O-CU und O-RU, verbunden über die Schnittstellen E2, A1 und R1. Simulationsszenarien mit

unterschiedlichen Verkehrsprofilen dienten dem Training des ML-Modells und der Validierung der Fähigkeit, KPI-Schwankungen zu erkennen und BS-Umschaltungen einzuleiten. Ziel war eine robuste, QoS-erhaltende (Quality of Service) Regelschleife mit messbaren Energieeinsparungen. Eine Schlüsselfrage war die Abhängigkeit von herstellerunterstützten APIs, Hardware-/Software-Bereitschaft und Schnittstellenreife für den späteren Praxiseinsatz.

Algorithmisch entwickelte AiVader einen ML-basierten Entscheidungsalgorithmus auf Basis der XGBoost-Regression. Das Modell prognostiziert den gNB-Verkehr unter Berücksichtigung zeitlicher Merkmale wie wöchentliche Saisonalität und Tagesmuster. Die Vorhersagen werden mit KPIs und Energiemetriken benachbarter Zellen kombiniert, um Aktivierungs- und Deaktivierungsentscheidungen zu treffen. Dabei stellen die CCO- und ICIC-Funktionen der TU Ilmenau den Hauptmechanismus zur Sicherung von Abdeckung und Kapazität dar, sodass Energieeinsparungen ohne QoS-Einbußen erzielt werden.

Das Zielszenario umfasste mindestens drei Zellen und über zehn UEs (User Equipment) mit eMBB- und Sprachverkehr. In dieser Konfiguration überwachen xApp-rApp kontinuierlich RAN-KPIs wie UE-Zählungen, DL/UL-Physical Resource Blocks (PRB)-Nutzung, Gesamt-DL/UL-PRB, Energieverbrauch und QoS-Indikatoren. Diese sind in 3GPP TS 28.552 definiert und werden über das O-RAN Key Performance Monitoring – Service Model (KPM-SM) erfasst. Zentrale Stellgröße war die BS-Aktivierung/Deaktivierung, gesteuert durch die im Cell Configuration Control – Service Model (CCC-SM) integrierte O-CES-Energiemanagementfunktion.

Für die Umsetzung war ein robustes ML-Framework nötig, das den gesamten ML-Lebenszyklus abdeckte. Da Non-RT-RIC Plattformen während des Projekts noch unreif waren, erweiterte AiVader sein proprietäres rApp-Framework zu einer Cloud-nativen, Microservices-basierten Architektur. Es bot eine gRPC-Schnittstelle zur Replikation der A1-Funktionalität für rApp-xApp-Kommunikation und eine Kafka-NiFi-MongoDB-SparkML-Pipeline für skalierbares Daten-Streaming, -Verarbeitung und -Training. Die Containerisierung mit Docker und Bereitstellung auf AWS über CI/CD-Pipelines sicherten Modularität, Ausfallsicherheit und Cloud-Portabilität. Über die ESM-Lösung hinaus wurde das Framework von der TU Ilmenau für ihren CCO/ICIC-Anwendungsfall genutzt, ein Beleg für seine Vielseitigkeit und Wirkung im ECONET-Projekt.

Integration, Validierung und Interoperabilitätstests in O-RAN-Testumgebungen

AiVader setzte seine ML-gestützte energiesparende xApp in der Open-Source-O-RAN-Testumgebung des ICS-Labors der TU Ilmenau ein, einer standardkonformen Plattform für Hosting und Tests von Anwendung. Die Konfiguration kombinierte einen Open5GS-Kern, gNBs auf SDR-Basis von srsRAN und den Near-RT-RIC von der O-RAN Software

Community. Über eine gRPC-Schnittstelle mit dem ML-Framework ermöglichte die xApp Echtzeit-KPI-Überwachung via E2SM-KPM und führte ML-basierte Ein-/Aus-Entscheidungen über E2SM-CCC aus. Die modulare Architektur der ES-xApp ist in Figure 7 dargestellt.

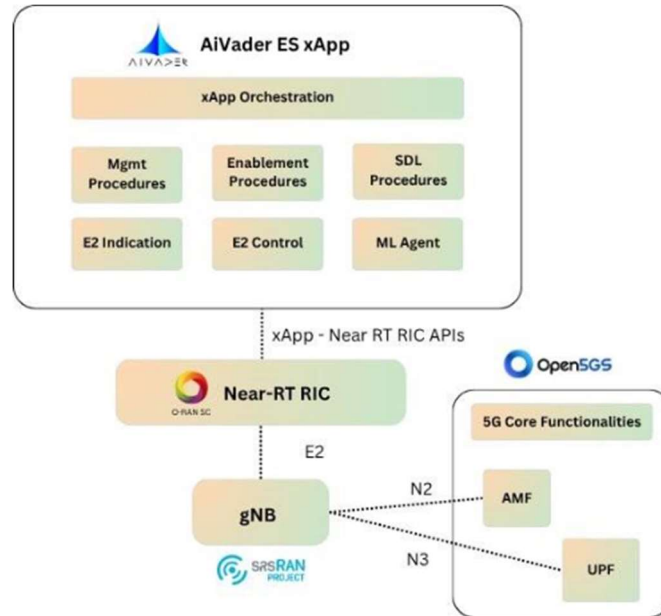


Figure 7. Modulare Architektur der ES xApp von AiVader

Das Testumfeld war zwar auf einen einzelnen gNB beschränkt und konnte die Campusdynamik nicht vollständig abbilden, bot aber ein umfassendes Open RAN-Ökosystem für Machbarkeitsprüfungen. Eine Woche lang wurde der Datenverkehr mit iPerf emuliert, basierend auf Paketgrößen aus dem GEANT-Datensatz, um realistische tägliche Schwankungen zu reproduzieren. KPIs wurden mit 1 Hz erfasst und bildeten die Grundlage für das Training des XGBoost-Regressionsmodells, das den gNB-Verkehr prognostizierte. Das Modell erreichte hohe Genauigkeit mit einem mittleren absoluten Fehler von 16–68 KPI-Einheiten (≈ 37 im Durchschnitt), entsprechend nur 3–7 % Abweichung bei Verkehrsspitzen von ~ 1000 Einheiten. Figure 8 zeigt den prognostizierten DRB_UETHpDI-KPI (Downlink-Durchsatz von UE in kbps) für einen einzelnen gNB mit XGBoost.

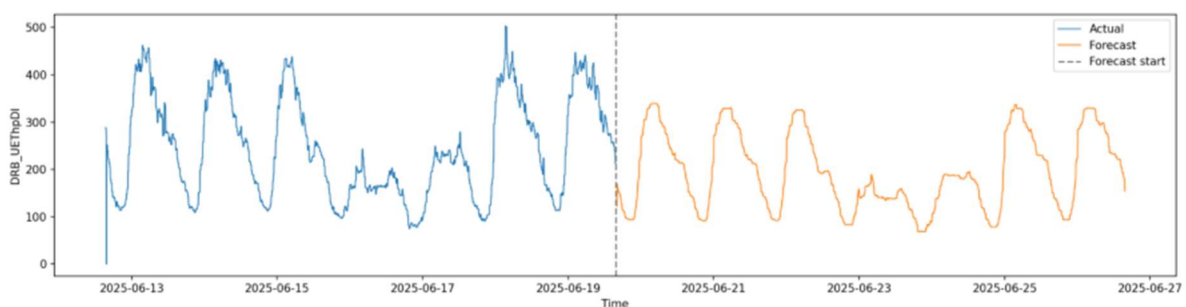


Figure 8. XGBoost-basierte Vorhersage des DRB_UETHpDI-KPI für einen einzelnen gNB

Um Einschränkungen von SDR-basierten gNBs ohne E2SM-CCC-Unterstützung zu überwinden, integrierte AiVader intelligente Stecker zur Verwaltung der BS-Leistungszustände. Diese lieferten Energiemetriken und programmierbare APIs für automatisierte Ein-/Aus-Steuerung, wodurch ML-Entscheidungen in Echtzeit umgesetzt und Energieeinsparungen direkt gemessen wurden.

Die Transparenz wurde durch ein Grafana-basiertes Visualisierungstool im ML-Framework erhöht. Das Dashboard zeigte in Echtzeit Auslastung, Energieverbrauch und gNB-Topologie, sodass Betreiber unmittelbare Effekte der ML-Maßnahmen und langfristige Trends verfolgen konnten (Figure 9).

Ein Meilenstein war die Teilnahme am Global O-RAN Fall PlugFest 2024 im i14y Lab in Berlin. Die ES-xApp wurde erfolgreich auf dem Near-RT-RIC von VVDN integriert und mit dem E2-Knotensimulator von VIAVI validiert. Alle Testfälle - Registrierung, API-Erkennung, SDL-Abonnement, E2-Konfiguration, KPI-Berichterstellung und E2-Anzeigen - wurden erfolgreich abgeschlossen. Damit wies AiVader Interoperabilität in einer O-RAN-basierten Multi-Vendor-Umgebung nach und positionierte sich als aktiver Mitwirkender im O-RAN-Ökosystem.

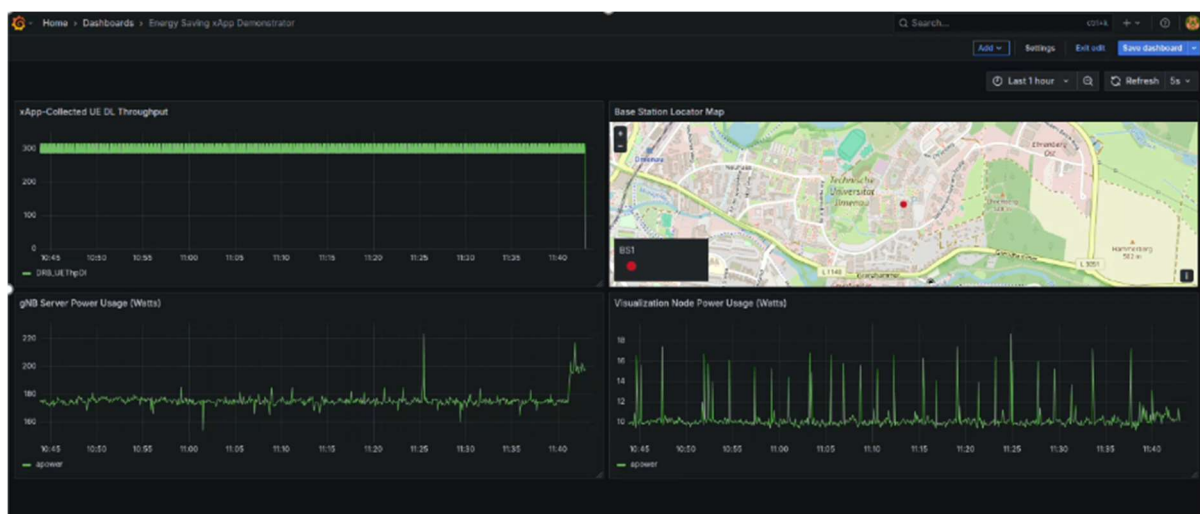


Figure 9. ESM-Dashboard

Insgesamt zeigen Testbed-Validierung, Visualisierungsframework und PlugFest-Demonstration eine wissenschaftlich validierte, standardkonforme und betrieblich transparente Lösung für energieeffiziente 5G-Campus-Netzwerke.

4.3 Energy-saving in O-RAN Campusnetzen - Fraunhofer IIS

Konzeption & Design Energiesparmaßnahmen

Das Funkzugangnetz (RAN) macht fast drei Viertel des gesamten Energieverbrauchs des 5G-Netzes aus, was die Effizienz zu einer großen Herausforderung für die Betreiber macht. Um dieses Problem anzugehen, hat 3GPP in Release 18 einen Studienpunkt zu

Netzwerk-Energieeinsparungen (NES) ins Leben gerufen, der standardisierte Techniken wie die diskontinuierliche Zellübertragung (DTX) einführt. Diese Mechanismen ermöglichen es den gNBs, zwischen aktiven Phasen und Ruhezuständen zu wechseln und so den Energieverbrauch in verkehrsarmen Zeiten zu reduzieren. Auf dieser Grundlage wurden drei dynamische Zell-DTX-Algorithmen vorgeschlagen, um die Aktivierung/Deaktivierung und Anpassung der Zell-DTX-Parameter zu steuern

In unserer Arbeit haben wir auch die NES-Techniken der Version 19 verfolgt und untersucht, mit besonderem Schwerpunkt auf der bedarfsgesteuerten SIB1-Übertragung und der Anpassung gemeinsamer Signale, die beide darauf abzielen, den unnötigen Energieverbrauch im Leerlauf oder bei geringem Verkehr weiter zu reduzieren. Wir haben Beiträge von anderen wichtigen Industrieorganisationen wie der Next Generation Mobile Networks (NGMN) Alliance berücksichtigt, die aktiv Energieeffizienzstrategien für 5G-Advanced und darüber hinaus entwickelt hat. Wir haben diese Entwicklungen und O-RAN-Spezifikationen untersucht, uns an den laufenden Diskussionen beteiligt und einen Beitrag zum 3GPP-Standardisierungsprozess geleistet (siehe letztes Kapitel).

Systemebene-Simulationen

Eine immer wiederkehrende Herausforderung bei der Erforschung drahtloser Techniken und Algorithmen ist die Bewertung und Untersuchung von Konzepten, die von den aktuellen Hardware- und Softwareimplementierungen noch nicht unterstützt werden. Ein praktischer Ansatz besteht darin, sich auf Simulationen auf Systemebene zu stützen, die detailliert modellieren, wie zellulare Netzwerke funktionieren. Im Rahmen von 5G-ECONET wurde schnell klar, dass die bestehenden O-RAN-Implementierungen weit hinter den Mobilfunkstandards zurückbleiben und dass die aktuelle Hard- und Software für Campusnetze nicht ohne Weiteres für Energieeinsparungen optimiert werden kann. Seit dieses Problem erkannt war, investierten wir noch mehr Zeit als ursprünglich geplant in Studien auf der Basis von System Level Simulation (SLS) und tatsächlich wurden solche Studien zur Grundlage für relevante Beiträge zur Standardisierung sowie für die Veröffentlichung wissenschaftlicher Ergebnisse.

Ein besonderes Merkmal der im Rahmen des Projekts weiterentwickelten SLS ist, dass nicht nur Key Performance Indicators (KPI) berechnet werden, sondern auch der Energieverbrauch jeder Zelle, Basisstation und letztlich des gesamten Netzwerks modelliert und berechnet wird. Das ausgewählte Modell ist in TR 38.864 ("Study on network energy savings for NR") beschrieben und wurde von der Industrie übernommen, um die Ergebnisse verschiedener NES-Techniken vergleichen zu können.

Simulationsbasierte Bewertung von Konzepten und Techniken

Eine beispielhafte Reihe von Ergebnissen zeigt, wie die Simulationen dabei helfen, die Kompromisse zwischen verschiedenen Techniken an verschiedenen Netzbetriebspunkten oder Parametersätzen zu bewerten.

Wir haben das Verhalten von Cell DTX gründlich untersucht und bewerten unsere vorgeschlagenen neuen Cell DTX-Algorithmen. Die Simulationsergebnisse zeigen den Kompromiss zwischen Verzögerung und Energieeffizienz. Die Algorithmen (die ersten drei in der Abbildung) brachten in Szenarien mit geringer Auslastung Einsparungen von mehr als 50 % und bei mittlerer Auslastung von 30 %, obwohl die Vorteile bei höherem Datenverkehr abnehmen.

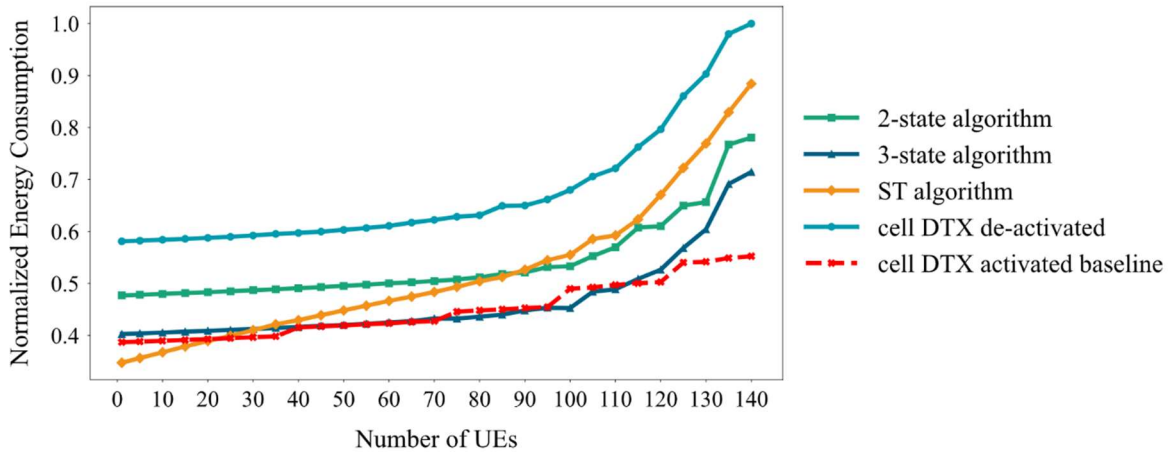


Figure 10. Übersicht von Energieverbrauch beim Einsatz verschiedener Cell DTX Algorithmen

Die nachstehende Abbildung 11 zeigt Ergebnisse, die zu 3GPP RAN1#116 (Athen) in R1-2400928 beigetragen wurden. Aus dieser Abbildung ist ersichtlich, dass die Vorteile der untersuchten Technik (SIB-1 on-demand) größer sind, wenn eine größere Anzahl von Beams verwendet wird. Sie zeigt auch, dass die realistischere Annahme einer 1-Symbol-DCI-Signalisierung im Vergleich zum theoretischen Maximum (vollständige Auslassung) immer noch signifikant ist.

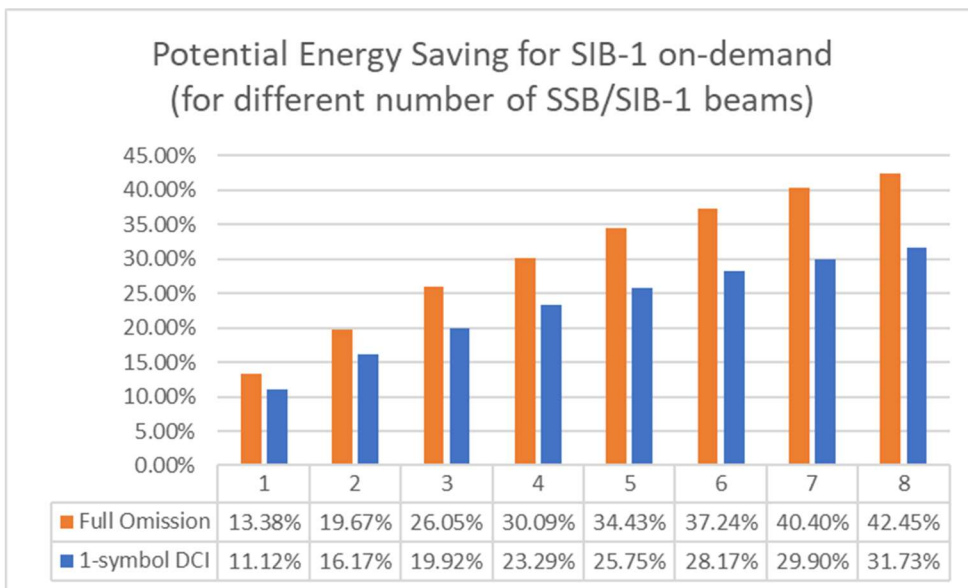


Figure 11. Potenzielle Energieersparungen für die Funktion SIB1 on-demand. Exemplarische Simulationsergebnisse. Quelle: 3GPP Tdoc zu Network Energy Saving

Modellierung von Datenverkehr zur Simulation von Anwendungsfällen

Da während der Projektlaufzeit keine realen 5G-Anwendungsfälle implementiert wurden, stand kein echter Datenverkehr für Tests zur Verfügung. Dennoch wurde eine Testumgebung geschaffen, die auch über das Projekt hinaus genutzt werden kann. Mithilfe von Simulationslösungen können sogenannte „Traffic Models“ erstellt werden, die sich an den im 5G-ACIA-Whitepaper „A 5G Traffic Model for Industrial Use Cases“ beschriebenen Szenarien orientieren.

Integration einer oder mehrerer Energiemaßnahmen in die Testbeds

Kommerzielle Geräte hinken bei der Implementierung von 3GPP- und O-RAN-Funktionen hinterher. Aus diesem Grund haben wir ein experimentelles Testbed aufgebaut, das als Staging-Umgebung für die Entwicklung von xApps dient.

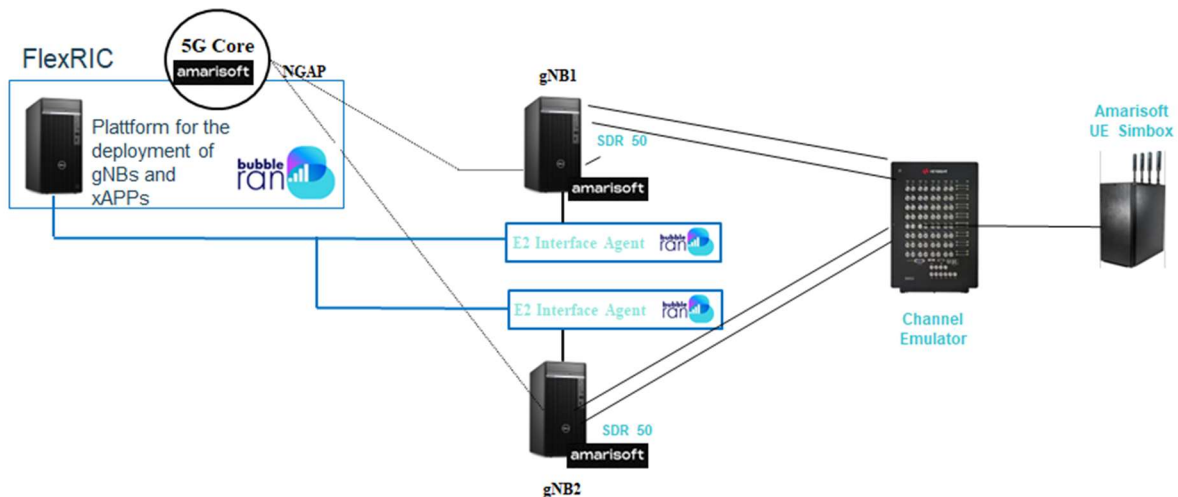


Figure 12. Labor- und Entwicklungs-Umgebung am Fraunhofer IIS

E2 Schnittstelle und Near-RT RIC werden von dem bestehenden industriellen Testbed nicht unterstützt und sind wesentliche Funktionen für die Bereitstellung und das Testen von xApps. Durch die Integration von Amarisoft Core, Amarisoft SDR für UE- und RAN-Emulation und BubbleRAN für Near-RT RIC und O-RAN SMO haben wir eine Kombination der benötigten Funktionen, die es ermöglicht, die ersten energiesparenden xApp-Prototypen zu testen, und die als Plattform für zukünftige Entwicklungen dient. Ein Diagramm des eingesetzten experimentellen Testbeds ist oben abgebildet.

4.4 Messung und Dokumentation der Dienstqualität und des Energieverbrauchs in der energieoptimierten Netzkonfiguration

Exceeding Solutions „Industrielle Energiemessung auf Basis der Smart Meter Infrastruktur“ (Vorstellung vom Prototyp)

Die Energiewende verändert die Struktur der Energieversorgung in Deutschland grundlegend. An die Stelle weniger zentraler Großkraftwerke treten zunehmend dezentrale Erzeugungsanlagen wie Photovoltaiksysteme, Batteriespeicher,

Wärmepumpen und Ladeinfrastruktur für Elektromobilität. Diese Entwicklung führt zu einer erheblich höheren Komplexität im Energiesystem, da Erzeugung und Verbrauch nicht mehr strikt voneinander getrennt sind, sondern sich auf der Ebene von Haushalten, Gewerbebetrieben und Quartieren miteinander verzahnen. Um die Stabilität der Netze zu gewährleisten und gleichzeitig die Flexibilisierungspotenziale dieser Anlagen nutzbar zu machen, ist der Ausbau intelligenter Stromnetze (Smart Grids) erforderlich.

Eine Schlüsseltechnologie zur Realisierung von Smart Grids ist das Smart Metering. Intelligente Messsysteme (iMSys), bestehend aus moderner Messeinrichtung und Smart-Meter-Gateway (SMGW), ermöglichen nicht nur eine präzise und zeitnahe Verbrauchserfassung, sondern auch die sichere Übermittlung dieser Daten an berechnigte Marktakteure. Grundlage hierfür sind die Vorgaben des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG), das sowohl die technische Architektur als auch die datenschutzrechtlichen Rahmenbedingungen vorgibt. Über standardisierte Kommunikationsschnittstellen schaffen iMSys die Voraussetzung für netzdienliche Steuerungsmaßnahmen sowie für die Umsetzung variabler Tarife und neuer Geschäftsmodelle.

Das Smart-Meter-Gateway nimmt dabei eine zentrale Rolle ein. Es fungiert als hochsichere Kommunikationszentrale mit integriertem Sicherheitsmodul, das durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) zertifiziert ist. Über das Gateway werden Messdaten verschlüsselt übertragen und Steuerungsbefehle empfangen. Ergänzend kommen sogenannte CLS-Komponenten (Controllable Local Systems) zum Einsatz, etwa Steuerboxen, die eine gezielte Ansteuerung von Verbrauchseinrichtungen wie Wärmepumpen oder Ladepunkten ermöglichen. Auf diese Weise wird eine bidirektionale Kommunikation realisiert, die sowohl Netzbetreibern als auch Energiedienstleistern den Zugriff auf flexible Lasten erlaubt – selbstverständlich unter strengen rechtlichen und sicherheitstechnischen Vorgaben.

Von besonderer Bedeutung ist der Datenschutz, da Energiedaten Rückschlüsse auf das individuelle Verbrauchsverhalten und damit auf sensible Lebensgewohnheiten zulassen. Das BSI-Schutzprofil für das SMGW setzt daher höchste Anforderungen an Authentifizierung, Verschlüsselung und Zugriffskontrolle. Nur durch konsequente Umsetzung dieser Sicherheitsmechanismen kann das Vertrauen der Verbraucherinnen und Verbraucher in die Technologie gewonnen werden. Dieses Vertrauen wiederum ist eine entscheidende Voraussetzung für die gesellschaftliche Akzeptanz und den flächendeckenden Rollout intelligenter Messsysteme, der für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende unverzichtbar ist.

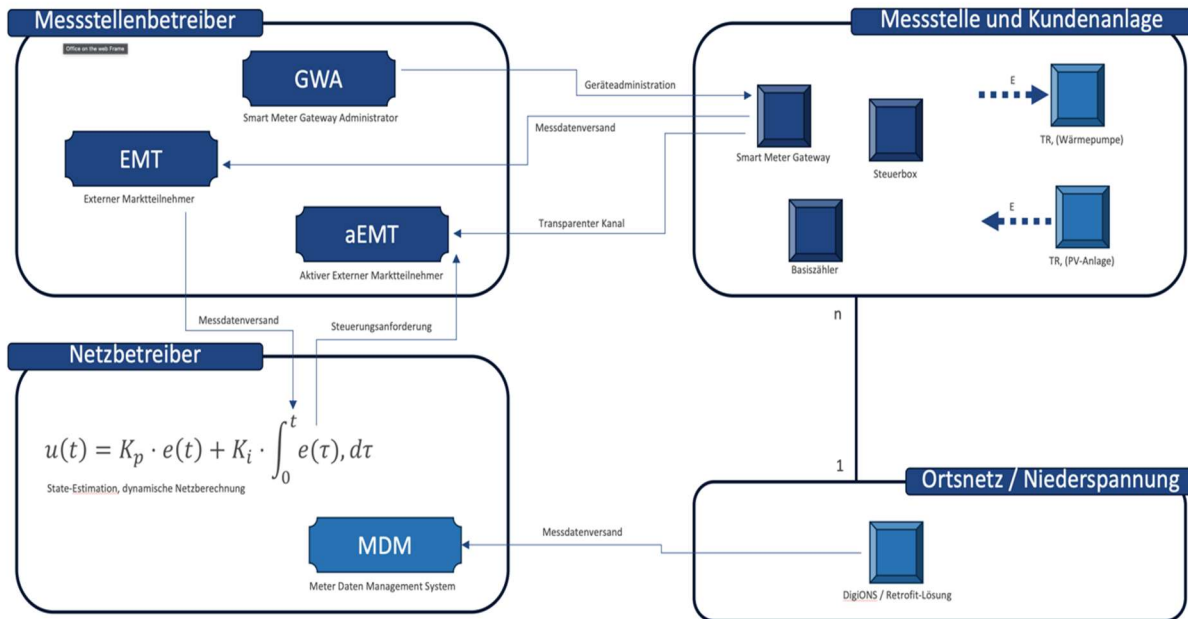


Figure 13. Smart Grid Infrastruktur

Im Rahmen des Projekts wurde ein Prototyp aufgebaut, der wesentliche Elemente der hoheitlichen Smart-Meter-Infrastruktur nach dem Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) mit zusätzlicher Messtechnik kombiniert. Grundlage bildet ein Basiszähler von LOGAREX mit aktivierter Grid-Funktion. Dieser ist gemäß den Vorgaben des § 19 MsbG über die standardisierte LMN-Schnittstelle (Local Metrological Network) an ein Smart Meter Gateway (SMGW) angebunden. Zum Einsatz kommt ein Ethernet-basiertes SMGW der Power Plus Communications AG (PPC), das nach den Anforderungen der BSI-TR-03109 zertifiziert ist und die sichere Datenkommunikation im Rahmen der hoheitlichen Smart-Meter-PKI gemäß § 22 MsbG gewährleistet.

Für die Steuerung über den CLS-Kanal (Controllable Local Systems) wurde ein Mikrotik-Gateway integriert, das als Protokollkonverter von Modbus-RTU auf Modbus-TCP fungiert. Diese Umsetzung entspricht den in der BSI-TR-03109-5 beschriebenen Anforderungen an die CLS-Schnittstelle. Darüber können netzdienliche Steuerungsanwendungen nach § 40 MsbG sowie zusätzliche Mehrwertdienste angebunden werden.

Zur präzisen Erfassung von Gleichstromgrößen wurde ein Shunt für die DC-Messung verbaut. Ergänzend dazu kommt ein Eastron-Gleichstromzähler vom Typ DCM230 mit Modbus-RTU-Schnittstelle zum Einsatz. Während für den Basiszähler und das SMGW die eichrechtliche Konformität nach dem Mess- und Eichgesetz (MessEG, §§ 25–32) sowie die Konformitätsbewertung durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) zwingend ist, handelt es sich bei der ergänzenden DC-Messtechnik um eine Erweiterung außerhalb des eichpflichtigen Bereichs. Diese kann jedoch perspektivisch in CLS-basierte Anwendungen eingebunden werden, sofern regulatorische Erweiterungen der TR oder FNN-Lastenhefte erfolgen.

Der Prototyp demonstriert damit die Kombination einer rechtskonformen hoheitlichen Infrastruktur (LOGAREX-Basiszähler, PPC-SMGW, zertifizierte Kommunikation nach § 22 MsbG und TR-03109) mit technisch flexiblen Zusätzen zur DC-Messung und Steuerung. Auf diese Weise können regulatorische Anforderungen des Rollouts erfüllt werden, während zugleich neue Anwendungsfelder – etwa in der Elektromobilität oder im Bereich dezentraler Erzeugung – erschlossen werden, die perspektivisch durch eine Erweiterung der gesetzlichen und technischen Rahmenbedingungen unterstützt werden könnten.



Figure 14. Prototyp des Zählerkastens zur Messung des Verbrauchs in einem 5G-Campusnetz – Exceeding Solutions

Grundsätzlich ist die hoheitliche Smart-Meter-Infrastruktur nach den Vorgaben des Messstellenbetriebsgesetzes (MsbG) für Messungen im Bereich der 5G-Netze geeignet. Das MsbG (§ 1 Abs. 1) definiert den rechtlichen Rahmen für den sicheren Messstellenbetrieb und legt fest, dass intelligente Messsysteme unter Wahrung höchster Datenschutz- und Datensicherheitsstandards eingesetzt werden müssen. Die zugrunde liegende Architektur basiert auf einer durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) zertifizierten Infrastruktur und verwendet die sogenannte Wirk-PKI, die im § 22 MsbG verankert ist. Diese verpflichtet alle Marktteilnehmer, ausschließlich von der Bundesnetzagentur zugelassene Zertifikatsdienste zu verwenden. Die damit verbundenen Zulassungs- und Zertifizierungsverfahren nach den Schutzprofilen und Technischen Richtlinien des BSI, insbesondere der TR-03109, stellen hohe Anforderungen an Hersteller und Betreiber.

Ein weiterer regulatorisch relevanter Punkt betrifft das Abtastintervall an der LMN-Schnittstelle (Local Metrological Network). Dieses ist durch die technischen Vorgaben in § 21 MsbG in Verbindung mit den einschlägigen BSI-Richtlinien (TR-03109-1 und -5) festgelegt. Damit wird die zeitliche Auflösung der erfassten Messwerte klar begrenzt. Für den klassischen Messstellenbetrieb ist diese Granularität ausreichend, im Kontext von 5G-Anwendungen – etwa für hochdynamische Netzzustandsmessungen – können diese Vorgaben jedoch eine Einschränkung darstellen. Anpassungen wären nur durch eine

Novellierung der Technischen Richtlinien oder durch Erweiterungen der einschlägigen FNN-Lastenhefte möglich.

Auch im Bereich der Gerätetechnik bestehen klare regulatorische Vorgaben. Nach dem Mess- und Eichgesetz (MessEG), insbesondere §§ 25–32, sind nur solche Geräte zulässig, die die Anforderungen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) erfüllen. Dies betrifft sowohl die elektrische Sicherheit als auch die Konformität mit den eichrechtlichen Bestimmungen. Erst durch die Konformitätsbewertung nach § 14 MessEG wird sichergestellt, dass die Messgeräte rechtskonform eingesetzt werden dürfen und die Messergebnisse auch rechtlich belastbar sind.

Perspektivisch wird davon ausgegangen, dass insbesondere große Verbraucher im Mobilfunkumfeld – beispielsweise 5G-Basisstationen oder Edge-Rechenzentren – in den Anwendungsbereich der Smart-Meter-Infrastruktur integriert werden. Dadurch könnten die in § 40 MsbG vorgesehenen Möglichkeiten zur netzdienlichen Steuerung künftig auch für diese Verbrauchergruppen erschlossen werden. Voraussetzung bleibt jedoch stets die Einhaltung der regulatorischen Rahmenbedingungen aus MsbG, MessEG und den einschlägigen BSI-Richtlinien, um sowohl die Rechtssicherheit als auch die gesellschaftliche Akzeptanz sicherzustellen.

Fraunhofer IIS: Energieersparnisse im Campusnetz auf Basis von effizienten Netzwerkkonfiguration

Innerhalb AP 3.3 wurden weitere Validierungen und praktische Experimente als Messkampagnen in den am Fraunhofer IIS vorhandenen Testbeds durchgeführt. Diese wurden insbesondere nach einem größeren Firmware- und Software-Update der Testbeds erforderlich.

Die neuen Messkampagnen wurden wie folgt definiert:

- Evaluierung des Potenzials der für 5G-ECONET vorgesehenen Maßnahmen zur Energieeinsparung im Netz (NES) in unserem Testbed;
- Isolierung der Abhängigkeit des Stromverbrauchs von Radio Units (RUs) durch Variation von Parametern in bestimmten Bereichen (Frequenz, Zeit, Antennen);
- Bestätigung der Anwendbarkeit von gNB-Leistungsverbrauchsmodellen aus der Literatur zur Modellierung des Verhaltens der am Fraunhofer IIS verfügbaren Hardware;
- Praktisches Know-how für weitere Projektphasen (z. B. automatisierte / kontinuierliche Messungen);
- Es bestand die Erwartung, dass der Energieverbrauch der EVUs von der Netzlast, der Bandbreite, dem TDD-Rahmen und der Sendeleistung abhängig ist. Folgende Parameter sollten dafür variiert werden:
 - RF-Bandbreite - 10 MHz, 20 MHz, 40 MHz und 100 MHz;
 - MIMO-Konfiguration 2x2 und 4x4 MIMO;

- TDD-Konfiguration: Downlink heavy, symmetrisch und Uplink heavy;
- Sendeleistung: von der Minimaleinstellung bis zur Maximaleinstellung (z. B. in 3-dB-Schritten);
- Datenverkehrslast: von Null bis zur vollen Last (z. B. in 20-Mbps-Schritten).

Da die Anzahl der Kombinationen zu hoch wäre und nur die Abhängigkeit von bestimmten Parametern erkannt werden sollte, wurden zwecks Vereinfachung zwei Referenzkonfigurationen angenommen und die Parameter dieser Konfigurationen wie folgt variiert:

- Referenz 1: maximale Last (maximale Kapazität): 100 MHz, 4x4 MIMO, DL-lastig, maximale Sendeleistung,
- Referenz 2: Null-Last (minimaler Verbrauch): 10 MHz, 2x2 MIMO, DL-lastig, minimale Sendeleistung.

Ausgehend von jeder Referenz werden die Parameter in jedem Bereich variiert. Die durchzuführenden Messungen sind daher, ausgehend von Referenz 1 und Referenz 2:

- Messung mit den verschiedenen Einstellungen der HF-Bandbreite
- Messung mit den verschiedenen Einstellungen der MIMO-Konfiguration
- Messung mit den verschiedenen Einstellungen der TDD-Konfiguration
- Messung mit den verschiedenen Einstellungen der Sendeleistung
- Messung mit verschiedenen Einstellungen der Last; Schritte können an die große Kapazität (Referenz 1) bzw. geringe Kapazität (Referenz 2) angepasst werden

Die Messungen wurden für jede verfügbare Hardware (Airspan, QCT, Indoor und Outdoor) wiederholt. Bei jeder Messung wird erwartet, dass Folgendes gemessen wird:

- EVU-Stromverbrauchs - Durchschnitt und im Falle von Instabilität auch die Standardabweichung;
- PDCP-Verkehrsaufkommen;
- RB-Last;
- Durchsatz;
- Verzögerung.

Es wurden Messungen durchgeführt, welche die obigen Szenarien abbilden.

Ergebnisse:

- Auf dem Core Server beider verwendeten Systeme hat die Konfigurationsänderung oder die Last keinerlei Einfluss auf den Stromverbrauch.
- Die BBU des QCT Systems zeigt keine Veränderung im Stromverbrauch bei Last oder Änderungen an der RU

- Der DU- und der CU-Server des Airspan Systems zeigt kaum Veränderung im Stromverbrauch bei Last oder Änderung an der DU (Änderung an der DU kleiner 5%)
- Die QCT Indoor RU zeigen geringen Einfluss auf Konfigurationsänderungen. Max Stromverbrauch 58 Watt, Min Stromverbrauch 51 Watt
- Die QCT Outdoor Units zeigen etwas mehr Einfluss (durch die höhere Sendeleistung). Max 87 Watt, Min 64 Watt
- Die Airspan Indoor Units zeigen nur sehr geringen Einfluss. Max 33 Watt, Min 31 Watt

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Konfiguration und Netzwerklast auch nach den Software-Updates nur geringen Einfluss auf die Leistungsaufnahme der RUs haben. Das liegt unter anderem am System-Split 7.2, der Schnittstellen mit hoher Datenrate voraussetzt, die unabhängig vom tatsächlichen Datendurchsatz arbeiten. Des Weiteren bestand die Erwartung, dass eine bedarfsgerechte Skalierung der Server-Ressourcen ein hohes Energiesparpotenzial bietet. Zwar bot die neue Software die Möglichkeit, zuvor laufende Dummy-Prozesse abzuschalten und serverseitige Energiesparfunktionen zu aktivieren; jedoch stiegen die Latenzen an und die Software wurde teilweise instabil. Es ist anzunehmen, dass neuere, spezialisierte Open-RAN-Servergenerationen für diese Funktionen optimiert sein werden. Im Rahmen dieses Projekts standen jedoch noch keine entsprechenden Server zur Verfügung; zudem werden sie von der verfügbaren Software derzeit nicht unterstützt.

5.1 Verwertung von Prototypen

Entwicklung des Prototypens als Blaupause für iRLM über CLS exceeding solutions

Der im Projekt entwickelte Prototyp kann als eine Art Blaupause für ein zukünftiges iRLM-System verstanden werden. Durch die Kombination eines RLM-fähigen Basiszählers mit einem BSI-zertifizierten Smart Meter Gateway sowie der zusätzlichen Integration von Modbus-basierten Komponenten wird bereits heute ein Aufbau realisiert, der in weiten Teilen den Anforderungen eines intelligenten RLM (iRLM) entspricht. Damit wird aufgezeigt, wie auch bei leistungsgemessenen Kunden eine sichere, standardisierte und regulatorisch konforme Einbindung in die Smart-Meter-Infrastruktur erfolgen kann.

Eine besondere Bedeutung kommt in diesem Zusammenhang dem CLS-Kanal (Controllable Local Systems) zu. Während dieser gemäß § 40 MsbG ursprünglich für netzdienliche Steuerungsanwendungen vorgesehen war, eröffnet die in der BSI-TR 03109-5 beschriebene Architektur nunmehr auch regulatorisch die Möglichkeit, den CLS-Kanal für erweiterte Mess- und Steuerungsanwendungen im iRLM-Umfeld zu nutzen. Dadurch können zusätzliche Komponenten – wie Modbus-basierte DC-Zähler oder Steuerboxen – sicher und interoperabel über den CLS-Kanal in die hoheitliche Infrastruktur eingebunden werden.

Darüber hinaus bietet das vom Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) veröffentlichte Lastenheft iRLM den konzeptionellen Rahmen für die Weiterentwicklung von registrierenden Leistungsmessungen in Richtung intelligenter Systeme. Der Prototyp orientiert sich in seiner Grundarchitektur bereits an diesen Vorgaben und demonstriert, wie technische Realisierungen und regulatorische Anforderungen miteinander verzahnt werden können.

In der Gesamtschau zeigt der Prototyp damit, wie die rechtliche Konformität (durch Einhaltung der Vorgaben nach §§ 19, 21 und 22 MsbG, BSI-TR 03109 sowie MessEG/ PTB-Vorgaben) mit technischer Flexibilität (über die Einbindung zusätzlicher Mess- und Steuerungstechnik über den CLS-Kanal) kombiniert werden kann. Er bildet somit eine fundierte Grundlage für die Umsetzung vollwertiger iRLM-Systeme, die künftig eine zentrale Rolle in der Digitalisierung der Energiewende und in der Integration großer Verbraucher und Einspeiser in die Smart-Meter-Infrastruktur spielen werden.

Erfolge, Ergebnisse und zukünftige Ausrichtung für nachhaltiges 5G - AI Vader

Die im 5G-ECONET-Projekt durchgeführten Arbeiten belegten die Machbarkeit und Wirkung von AI/ML-gestützten Energiesparmaßnahmen (ESM) in O-RAN-Campusnetzen. Technisch wurde die Lösung als modulare Microservices-Architektur für ML-Verarbeitung mit kommerziellen Bibliotheken umgesetzt und in einem skalierbaren Cloud-Framework bereitgestellt. Dadurch waren flexible Bereitstellung, Echtzeit-KPI-Streaming und proaktives Ein-/Ausschalten von BSs über E2SM-CCC möglich. Funktionstests bestätigten die Fähigkeit, KPI-Schwankungen zuverlässig zu erkennen, Verkehrslasten vorherzusagen und optimierte Schaltbefehle auszuführen.

Die Energiemessungen lieferten konkrete Ergebnisse für verschiedene RAN-Konfigurationen: In einer All-in-One-gNB-Konfiguration sparte die vollständige Abschaltung rund 21 W. In disaggregierten 7,2x-Architekturen ergab die Abschaltung der O-RU etwa 20 W, während die Deaktivierung der CU/DU-Virtual Machine weitere 10 W brachte. In SDR-basierten Umgebungen reduzierten das Abschalten von SDR und Host-PC den Verbrauch je nach Hardware um bis zu 180 W, z. B. 180 W bei Standard-PCs und rund 50 W bei Mini-PCs.

Daraus ergaben sich drei Erkenntnisse: Erstens erfordern signifikante Einsparungen die vollständige Abschaltung von BS oder RU, da Teilmaßnahmen wie Sendeleistungsskalierung mit aktueller Hardware und Software nur bis zu 10 % Ersparnis bringen. Zweitens ermöglicht die Kombination aus ML-Prognosen und adaptiver Steuerung eine dynamische Optimierung von Energieverbrauch und QoS. Drittens bieten Cloud-native rApps als Microservices ein skalierbares, zukunftssicheres Framework für Energieoptimierung in sich entwickelnden RIC-Ökosystemen.

Darüber hinaus zeigte das Projekt den Reifegrad des O-RAN-Ökosystems: Das architektonische Fundament in Standards für energiebewusstes Management ist vorhanden, doch zentrale Komponenten sind noch unreif. Non-RT-RICs waren kaum verbreitet, und Spezifikationen wie E2SM-CCC wurden erst seit kurzem implementiert. Interoperabilität bleibt durch uneinheitliche Standardadoption eingeschränkt, was die Portabilität über Testumgebungen hinaus erschwert.

Zukünftig sind Live-Campus-Implementierungen entscheidend, um Skalierbarkeit unter heterogenen, dynamischen Verkehrsbedingungen zu prüfen. Eine enge Zusammenarbeit mit Anbietern ist nötig, um E2SM-CCC-Unterstützung zu beschleunigen und Interoperabilität zu sichern. Die Kopplung von ML-basiertem ESM mit erweiterten Visualisierungs- und Orchestrierungstools wird Transparenz erhöhen und Betreibern helfen, Nachhaltigkeitsziele mit den hohen Leistungsanforderungen von 5G und darüber hinaus zu vereinen.

5.2 Industrial Impact

5G-ECONET hat gezeigt, dass sich der Energieverbrauch mobiler Netze um bis zu 10% senken lässt. Dieses Gesamtprojektergebnis stützt sich auf aktuell lauffähige Prototypen (AIVader), und eine am Netz messbare Evidenzbasis (Fraunhofer IIS).

Neben einem ML-gestützten rApp-Framework für cloudbasiertes Netzwerkmanagement und -optimierung wurde die EnergySaving-xApp in einer realistischen Multi-Vendor-Umgebung vorgeführt. Die Demonstration der Lösungen auf der O-RAN Alliance Presentation Week (Global PlugFest, Berlin, 19. November 2024) unterstrich die Interoperabilität der Technology in einer Open-RAN Testinfrastruktur.

Der industrielle Impact des Projekts zeigt sich durch folgende Maßnahmen, die im Projektrahmen stattfanden:

- Die Vorstellung des Network-Energy-Saving-Simulators auf „5G-Connect Advanced“ (Nürnberg, LINK-Halle Fraunhofer IIS, September 2024) adressierte gezielt Betreiber- und Integratoren-Bedarfe;
- Die Beiträge zum NGMN-White Paper „Green Future Networks: A Roadmap to Energy Efficient Mobile Networks“ (Juli 2024) positionierten die Projektergebnisse innerhalb strategischer Branchenleitlinien;
- Zwei Auszeichnungen – darunter „Best Demo“ für erklärbare KI-Techniken in selbstorganisierten Netzen beim one6G-Gipfel (Valencia, 5.–6. September 2024) – erhöhten die Glaubwürdigkeit gegenüber Netzbetreibern, Ausrüstern und Systemintegratoren;
- Flankierende Infrastrukturinvestitionen in ein kommerzielles Open-RAN-Testbed (Keysight) und eine RIC-Umgebung am Fraunhofer IIS beschleunigen den Technologietransfer in die Industrie;

- Die Teilnahme von 5G-Econet an der EuCNC & 6G Summit (Antwerpen, 3.–6. Juni 2024) – mit der EnergySaving xApp (AiVader, TU Ilmenau) und dem Vortrag „SUSTAINABILITY / ENERGY SAVING“ (Fraunhofer IIS) –, zwei weitere Vorträge mit zugehörigen Veröffentlichungen auf der VDE/ITG-Fachtagung Mobilkommunikation (Osnabrück, 15.–16. Mai 2024) sowie das MANTRA5G-Forum zu Cybersicherheit und digitaler Souveränität (Dresden, November 2024) entfalteten zusätzliche Hebelwirkung für den industriellen Impact.

In Summe verbindet 5G-ECONET einen nachgewiesenen Energiespareffekt von bis zu 10% mit interoperablen Bausteinen, reproduzierbarer Messbarkeit und hoher Branchenresonanz. Diese Basis trägt einen skalierbaren Roll-out in industriellen Campusnetzen und bereitet ein Follow-up-Projekt vor. Diese könnte die Schwerpunkte Automatisierung, großflächige Validierung und Standardkonformität weiter ausbauen, sowie mit weiterentwickelten Mobilfunk-Komponenten noch größeres Energie-Einsparpotenzial nutzen.

5.3 Academic Impact

Akademisch hat 5G-ECONET sowohl inhaltlich als auch in der Qualifizierung überzeugt. Auf Ausbildungsebene stehen eine PhD-Arbeit, zwei Masterarbeiten (TU Ilmenau, Fraunhofer IIS) und eine HiWi-Tätigkeit, wobei die Masterarbeit „Network Energy Saving in 5G NR with Refinement of Cell DTX“ (Fraunhofer IIS) für den Green ICT Award 2025 ausgewählt wurde.

Inhaltlich wurden vier peer-reviewte Beiträge auf internationalen Konferenzen platziert, darunter „Energy Savings in 5G-Advanced Radio Access Networks: Downlink Signaling Adaptation“ (IEEE VTC2024-Fall, Washington, DC), zwei Arbeiten zu ML-basierter Coverage- und Kapazitätsoptimierung für Open-RAN-Campusnetze (ITG Mobilkommunikation 2024; EuCNC 2024) sowie die eingereichte Studie „Enhancing Cell DTX for Network Energy Saving Towards 6G“. Die enge Verzahnung von Forschung und Praxis zeigt sich exemplarisch in dem gemeinsam von AiVader und der TU Ilmenau entwickelten ML-Algorithmus zur proaktiven Deaktivierung von Basisstationen, der in O-RAN-kompatible xApps/rApps überführt und im Feld demonstriert wurde.

Name	Type/Time	Venue	Beteiligte Projektpartner
Energy Savings in 5G-Advanced Radio Access Networks: Downlink Signaling Adaptation	Conference Publikation / Juni 2024	IEEE Vehicular Technology Conference (VTC)	Fraunhofer IIS: N. Vatanian, G. W. Oliveira da Costa, E. Roth-Mandutz, G. George, N. Franchi

Machine Learning-Based Coverage and Capacity Optimization xApp/rApp for Open RAN 5G Campus Networks	Vortrag / Mai 2024	28. ITG-Fachtagung	TU Ilmenau: M. Hassan, A Diab, S Parameswaran, A Mitschele-Thiel
CCO-xApp: A Novel Coverage and Capacity Optimization xApp for Open RAN 5G Campus Networks	Conference Publication / Mai 2024	European Conference on Networks and Communications (EuCNC)	TU Ilmenau: M. Hassan, A Diab, S Parameswaran, A Mitschele-Thiel
Enhancing Cell DTX for Network Energy Saving Towards 6G	Conference Publication / September 2025	IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)	Fraunhofer IIS: N. Vatanian, G. W. Oliveira da Costa, E. Roth-Mandutz, G. George, N. Franchi

5.4 Erfolge bei der Standardisierungsarbeit

Auch in der Standardisierung hat das Projekt Wirkung entfaltet. Zwei 3GPP-Beiträge (sog. TDocs) zu Network Energy Saving – R1-2400928 (SIB-1-on-demand, potenzielle Zugewinne für unterschiedliche Analog-Beam-Konfigurationen) und R2-2311260 (Cell DTX/DRX mit Bypass bestehender Restriktionen) – adressieren konkrete Stellschrauben für energieeffizientere Netze und haben die Relevanz solcher Verfahren im 3GPP-Prozess sichtbar gemacht.