technische universität dortmund

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Communication Networks Institute
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Abschlussbericht zum Projekt

6G-ANNA

Gefördert durch

Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Vorhabenbezeichnung:
6G-Access, Network of Networks, Automation & Simplification (6G-ANNA)

Teilprojekt:
Methoden zur empirischen Bestimmung von 6G Systemgrenzen (6G-ANNA-TUDo)

Förderkennzeichen:
16KISK101

Zuwendungsempfänger:

Technische Universität Dortmund

Laufzeit des Vorhabens:
01.07.2022 – 30.06.2025

Berichtszeitraum:
01.07.2022 – 30.06.2025

Inhalt

1 Kurzbericht 3
1.1 Aufgabenstellung 3
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde 3
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde 3
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 4
2 Eingehende Darstellung 5
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele 5
2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises 23
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 23
2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans 23
2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen 24
2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6. 24

1 Kurzbericht

1.1 Aufgabenstellung

Das Projekt 6G-ANNA hatte die Aufgabe, Grundlagen und Konzepte für ein ganzheitliches 6G-System zu entwickeln, das den Menschen und gesellschaftliche Werte in den Mittelpunkt stellt. Ziel war es, technologische Innovationen mit Aspekten wie Nachhaltigkeit, digitaler Souveränität und Sicherheit zu verbinden und dabei die besonderen Anforderungen der deutschen Industrie und Forschung zu berücksichtigen. Das Konsortium bündelte nationale Kompetenzen, bereitete internationale Standardisierungsprozesse vor und brachte deutsche Interessen in globale Gremien ein. Darüber hinaus konzipierte es neue Ansätze für Netzarchitekturen, Automatisierung durch künstliche Intelligenz sowie resiliente Kommunikationsstrukturen und validierte diese in Testumgebungen.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde im Rahmen des nationalen 6G-Forschungsprogramms umgesetzt und profitierte von einer engen Einbindung in die deutsche und europäische Forschungslandschaft. Das Konsortium vereinte führende Industrieunternehmen, Forschungseinrichtungen und Hochschulen mit hoher technischer Expertise in Mobilfunktechnologien und Netzarchitekturen. Bestehende Testbeds, Simulationsumgebungen sowie umfangreiche Erfahrungen in der Standardisierung bildeten eine solide Grundlage für die Projektdurchführung. Die aktive Beteiligung an der nationalen 6G-Plattform ermöglichte einen kontinuierlichen Austausch mit anderen Projekten und relevanten Stakeholdern.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Projektplanung folgte einem kombinierten Top-Down- und Bottom-Up-Ansatz, um internationale Rahmenbedingungen ebenso wie nationale Anforderungen zu berücksichtigen. Im Bottom-Up-Prozess integrierten die Partner Konzepte, Anforderungen und Teillösungen aus Industrieprojekten, Forschungshubs und Partnerinstitutionen. Der Top-Down-Prozess berücksichtigte globale Entwicklungen im Bereich der Standardisierung wie bei 3GPP. Die Arbeiten waren in fünf zentrale Arbeitspakete gegliedert: System Engineering (AP1), technische Schwerpunkte zu Access, Network of Networks sowie Automation & Simplification (AP2, AP3, AP4) und Validierung durch Proof-of-Concepts (AP5). Der Ablauf erfolgte iterativ mit regelmäßiger Abstimmung innerhalb der Fachgruppen der 6G-Plattform zur Sicherstellung einer kohärenten Gesamtarchitektur.

Die Schwerpunkte der TU Dortmund lagen in der Weiterentwicklung des 6G Crossband KPI Monitoring & Control Systems, das reproduzierbare Testverfahren für 6G-spezifische Stresstests bereitstellt. Diese Verfahren sind gezielt auf die Anforderungen vertikaler Industrien ausgerichtet und dienen der verteilten Bewertung von Systemgrenzen zukünftiger Netzkomponenten und -funktionen. Die entwickelten Methoden wurden als integraler Bestandteil in die entstehende 6G-Netzarchitektur eingebettet, um eine realistische Erfassung anwendungsgerechter Datenverkehrsprofile sowie system- und umgebungsspezifischer Störeinflüsse anhand definierter Metriken zu ermöglichen. Durch die empirische Analyse des System-, Umgebungs- und Anwendungsverhaltens entstanden fundierte Einschätzungen zum Zustand von Netz und Anwendungen, wodurch direkte Maßnahmen zur Erhöhung der Resilienz bei kritischen Situationen unterstützt wurden.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Projekt knüpfte an den Stand der Technik moderner Kommunikationssysteme auf Basis von 5G New Radio an sowie an Erkenntnisse aus europäischen Initiativen wie dem EU-geförderten Hexa-X-Projekt. Während Hexa-X erste Strukturen für die Entwicklung von 6G-Technologien definierte, setzte 6G-ANNA neue Akzente durch stärkere Berücksichtigung industrieller Anforderungen, integrierter Sicherheitsmechanismen auf physikalischer Ebene sowie KI-basierter Automatisierungskonzepte. Technisch-wissenschaftlich baute das

Vorhaben auf bestehenden Ansätzen zu Open RAN, Frequenznutzung im Sub-THz-Bereich, MIMO-Systemen und Netzkonvergenz auf und erweiterte diese um innovative Methoden zur Steigerung von Resilienz, Datenschutz und Energieeffizienz.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die TU Dortmund vertiefte ihre Zusammenarbeit mit externen Partnern, um Forschungsergebnisse praxisnah weiterzuentwickeln und in bestehende Netzwerke einzubringen. Über das vom Land Nordrhein-Westfalen geförderte Competence Center 5G.NRW förderte sie den Austausch zwischen Forschungseinrichtungen, Technologieanbietern und Unternehmen. Zudem beteiligte sich die Universität an internationalen Initiativen wie der O-RAN Alliance e.V. und der 6G Flagship Initiative der Universität Oulu, um Beiträge zur Weiterentwicklung und Standardisierung zukünftiger 6G-Technologien zu leisten.

2 Eingehende Darstellung

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Innerhalb des 6G-ANNA Projektes war die TU Dortmund besonders an den Arbeitspaketen (APs) 2 und 5 beteiligt, wobei im Rahmen von AP 2 die Entwicklung eines 6G Crossband KPI Monitoring & Control Systems forciert wurde, welches in AP5 gemeinsam mit weiteren 6G-ANNA Partnern innerhalb eines Proof of Concepts (PoC) validiert und evaluiert wurde. Die Erprobung erfolgte dabei in drei Stufen: zunächst im Labor, anschließend in einer Transferumgebung und schließlich unter Realbedingungen. Besonders die Transferumgebung an der TU Dortmund profitierte maßgeblich von der engen Verknüpfung mit dem 6GEM-Projekt, da es den Aufbau eines mmWave-Netzwerks ermöglichte und damit die Grundlage für das dortige Lab schuf. Dieses Umfeld erlaubte es, mehrere Untersuchungen im Rahmen von 6G-ANNA erfolgreich umzusetzen und die entwickelten Konzepte praxisnah zu validieren.

Die TU Dortmund adressierte die geplanten 6G-ANNA Forschungsfragestellungen im Rahmen der folgenden individuellen Arbeitsschritte.

Arbeitspaket 2: 6G Access

AP-Nr. 2.1: *Access Overview, Interworking & Spectrum Usage*

AS 2.1.1-TUDo: *Bedarfsgerechte Modellierung eines 6G-spezifischen System-, Umgebungs- und Anwendungsverhaltens*

Ziel des Arbeitsschrittes war es, das 6G-spezifische System-, Umgebungs- und Anwendungsverhalten modellhaft zu erfassen und klassifizieren zu können. Als Basis eines multidimensionalen und systemübergreifenden 6G KPI (Key Performance Indicator) Monitoring Systems wurden hierfür anwendungsgerechte Datenverkehrsprofile, sowie system- und umgebungsspezifische Störeinflüsse über entsprechend definierte Metriken realistisch und reproduzierbar erfasst. Dazu brachte die TU Dortmund ein Konzept für ein erprobtes, technologieunabhängiges verteiltes Testsystem zur Entwicklung und Durchführung von Engpass- und Stresstestanalysen[1] in das 6G-ANNA Projekt ein und entwickelte dieses mit Hinblick eines 6G Crossband KPI Monitoring & Control Systems weiter. Das in diesem Zusammenhang weiterentwickelte Konzept sieht dabei eine wechselseitige Integration in ein übergreifendes 6G Netz vor (vgl. Abbildung 1).

[1] C. Arendt, S. Böcker, C. Bektas, C. Wietfeld, "Better Safe Than Sorry: Distributed Testbed for Performance Evaluation of Private Networks", In *2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF)*, Montreal, Canada, October 2022. [PDF]

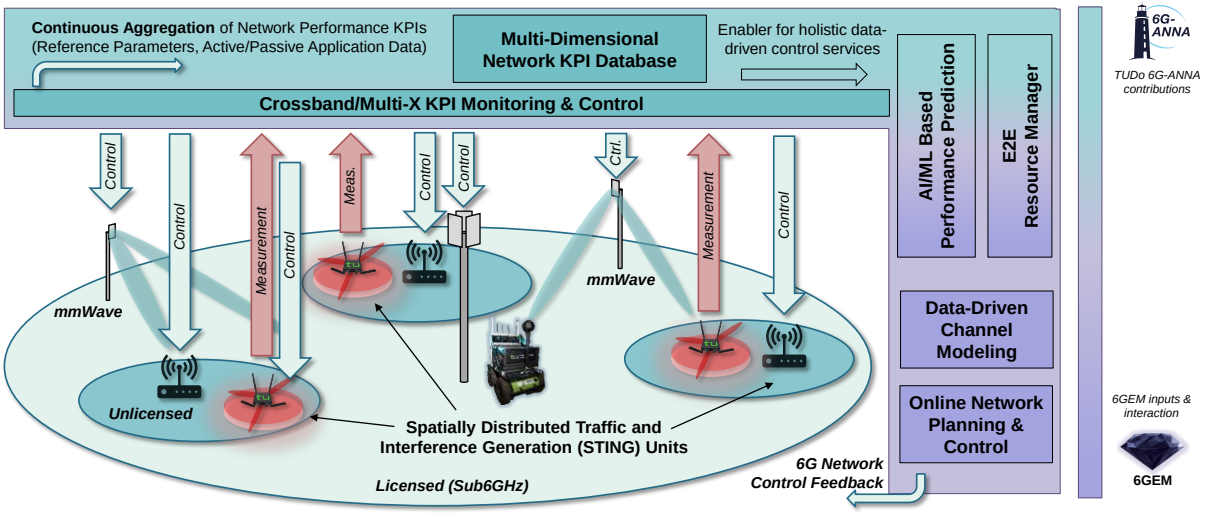

Abbildung 1: Weiterentwickeltes Konzept für ein 6G Crossband KPI Monitoring & Control System als integraler Bestandteil zukünftiger 6G Netze

Dabei wurde die Grundidee verfolgt, dass zukünftige 6G Netze als Multi-X[2] System z.B. mehrere lizenzierte und unlizenzierte Frequenzbänder (*Multi-Band*) und Zugangstechnologien (*Multi-RAT*) umfassen. Zur Erfassung der Heterogenität dieser vielfältigen 6G Ausprägungsmöglichkeiten werden verteilte 6G STING (*Spatially Distributed Traffic and Interference Generation*) Einheiten mit erweiterter Multi-X Funktionalität innerhalb zukünftiger 6G Deployments verteilt. Die zentrale Steuerung dieser verteilten Einheiten ermöglicht eine kontinuierliche Netzüberwachung und die Umsetzung verschiedenster Stresstestverfahren, welche die Grundlage einer vergleichenden Leistungsbewertung darstellen und damit netz- sowie anbieterübergreifend als einheitliches Ground-Truth System eingesetzt werden können.

Die kontinuierlich aufgezeichneten KPI-Daten werden in multidimensionalen 6G KPI-Datenbanken persistiert und dem 6G Netz als Anreichungsdaten bereitgestellt (vgl. Abbildung 2; *Enrichment Data*). In einem offenen 6G Netz können diese Daten z.B. über einen an die O-RAN Spezifikation angelehnten 6G RIC (*Radio Access Network* (*RAN) Intelligent Controller*) verschiedensten 6G Netzfunktionen und Services als Grundlage datengetriebener Kontroll- und Optimierungsprozesse dienen. In diesem Zusammenhang führte die TU Dortmund innerhalb des 6G-ANNA Projektes eine prototypische Entwicklung und Erprobung beispielhafter 6G Netzfunktionen (z.B. *Radio Resource Management*, RRM oder KI-basierte Zustandsschätzung) durch, brachte darüber hinaus Netzfunktionen sowie -anwendungen aus

[2] N. H. Mahmood, S. Böcker, …, C. Wietfeld, … "Machine type communications: key drivers and enablers towards the 6G era", In EURASIP Journal on Wireless Comm. & Netw., June 2021.

dem 6GEM Forschungshub in das 6G-ANNA Projekt ein und reicherte damit den Industrietransfer an.

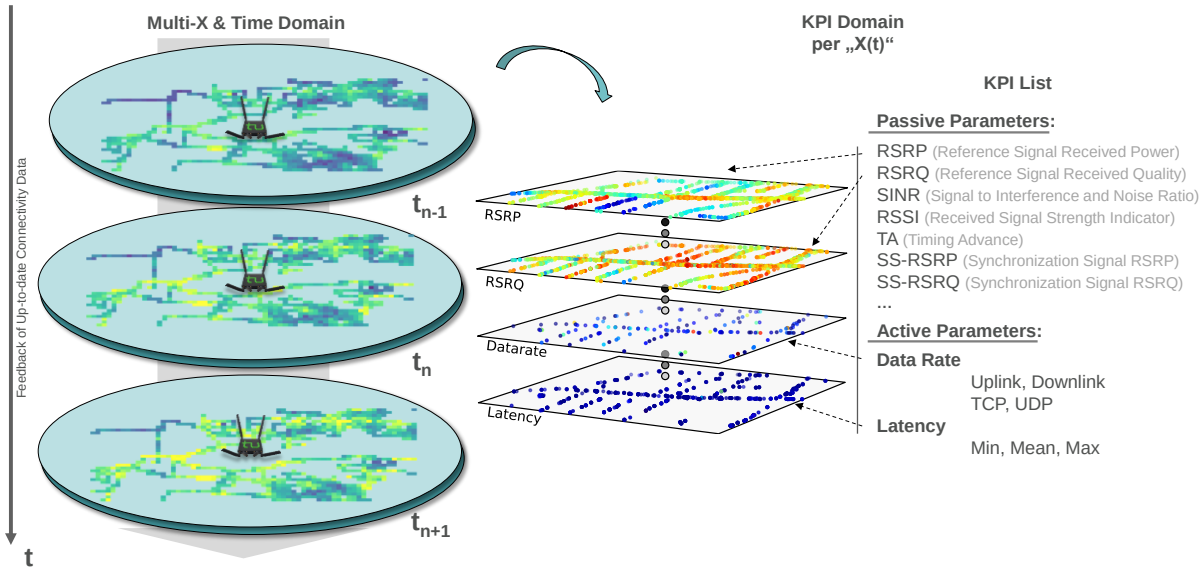

Abbildung 2: Entwurf für ein zukünftiges 6G Mobilfunknetz KPI Daten-Management in Form mehrdimensionaler Konnektivitätskarten

Der in Abbildung 2 dargestellte Entwurf für ein zukünftiges 6G Mobilfunknetz KPI Daten-Management in Form mehrdimensionaler Konnektivitätskarten sieht das Konzept vor, welches pro Multi-X Domäne jeweils flächendeckend (Ort) und kontinuierlich (Zeit) pro Zugangstechnologie und Frequenzband relevante KPIs persistiert. Dies kann zum einen die Situation betrachteter Spektrumallokationen von lizensiertem und unlizenziertem Spektrum, sowie aktive (z.B. Datenrate und Latenz) und passive (z.B. *Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio*, SINR) Parameter umfassen. Im Ergebnis ermöglicht das Konzept zum Beispiel die Umsetzung zielgerichteter Engpassanalysen und eine Identifikation relevanter Metriken zur Erfassung eines 6G-spezifischen System-, Umgebungs- und Anwendungsverhaltens, sowie die Ableitung eines anwendungsgerechten und reproduzierbaren 6G Verkehrs- und Störeinfluss-Modells in verschiedenen Referenzszenarien (AS 2.3.2).

Die aufgestellte Liste relevanter Metriken zur Erfassung des 6G-spezifischen System-, Umgebungs- und Anwendungsverhaltens wurde im 6G-ANNA Projekt zusätzlich um mmWave-spezifische Metriken erweitert. Während dieses Spektrum eine große Menge an Funkressourcen bietet und somit skalierbare Netzkapazitäten ermöglicht, um den wachsenden Anforderungen an Mobilfunknetze gerecht zu werden, ist der Einsatz zugehöriger Frequenzen herausfordernder als im Sub-6 GHz Bereich aufgrund von höheren Pfadverlusten. Letztere können durch eine gesteigerte Antennenrichtwirkung, Beamforming und -steering, sowie alternative Pfade kompensiert werden, falls die Sichtverbindung (Line-of-Sight (LOS)) zwischen Sender und Empfänger unterbrochen wird. Um in zukünftigen 6G Mobilfunknetzen überprüfen zu können, ob eine LOS-Verbindung besteht, sind somit zeit- und ortsbezogene Informationen der Endgeräte sowie des Netzwerks notwendig, die im KPI Datenmanagement erfasst werden müssen.

Auf Seite der Endgeräte wurde dementsprechend die Liste an relevanten Konnektivitäts-Metriken um Positionsinformationen ergänzt. Dem gegenüber war die Erfassung Netzwerk-

spezifischer Parameter eine Neuerung im eingeführten Crossband KPI Monitoring & Control Systems. Letztere bestehen ebenfalls, wie bei den Endgeräten, aus passiven und aktiven KPIs. Diese umfassen beispielsweise bei einem mmWave Netzwerk das eingesetzte Modulation and Coding Scheme (MCS), die Auslastung der verfügbaren Physical Resource Blocks (PRBs), sowie die Beam Indizes, die während einer aktiven Datenübertragung von der mmWave Zelle eingesetzt werden. Durch die getrennte Betrachtung der Endgeräte- und Netzwerkseite können Störeinflüsse auf die Gesamtperformance genauer analysiert werden und ermöglichen somit eine detailliertere Modellierung zukünftiger 6G Systeme.

Durch die Ableitung eines anwendungsegerechten und reproduzierbaren 6G Verkehrs- und Störeinfluss-Modells, welches auf Eingaben aus dem 6GEM Forschungshub sowie identifizierten, relevanten und frequenzabhängigen Metriken beruht, wurde der Beitrag zu MS1 (M12) erfüllt. Das Modell wurde als Input für das 6G Crossband KPI Monitoring & Control System weiterverwendet, um Stresstestmethoden als Basis reproduzierbarer Testverfahren zu entwickeln (AS 2.3.2).

AP-Nr. 2.3: *RAN protocols & Cloud-based Architecture*

AS 2.3.1-TUDo: *Weiterentwicklung 6G Methoden zur empirischen Bestimmung von Systemgrenzen (6G Crossband KPI Monitoring & Control)*

In diesem Arbeitsschritt hat die TU Dortmund als Basis des 6G Crossband KPI Monitoring & Control Systems die an der TU Dortmund entwickelte STING[1] Plattform eingebracht und diese mit Hinblick der Erweiterung in Richtung 6G Methoden zur empirischen Bestimmung von Systemgrenzen essenziell weiterentwickelt. Im ersten Schritt ist entstand ein erweitertes Architekturkonzept, welches die in AS 2.1.1 beschriebene Multi-X Perspektive aufgreift und dazu verschiedene Radio-Zugangstechnologien, sowie technologieunabhängige Software-Defined Radio Lösungen integriert.
Das System besteht aus einer zentralen Management & Control Einheit, einem Backend, sowie einer Vielzahl verteilter Endgeräte, welche eine holistische Sicht auf die Netzperformance und insbesondere auch Multi-User Effekte ermöglichen. Eine modulare Bauweise erlaubt eine flexible Erweiterung um lizenzierte sowie unlizenzierte Technologien. Die zentrale Management & Control Einheit dient dabei als Gegenstelle für die Endgeräte und ermöglicht die zentrale Koordinierung passiver und aktiver Tests und Monitoringaufgaben.

Das Backend stellt neben der Persistierung diverser Performance KPIs (bspw. spektrale- und Energieeffizienz, RSRP, RSRQ, Latenzen, SINR, RSSI, PER, vgl. Abbildung 2) eine Schnittstelle zur Nutzung dieser KPI-Datenbank zur Verfügung, welche diverse intelligente Dienste wie ML/KI-basierte Netzplanung und Kanalmodellierung ermöglicht (vgl. Abbildung 1). Diese Schnittstelle erlaubt ebenfalls die Anbindung eines zentralen Nutzerinterfaces, welches als Funktionsmuster in Abbildung 3 dargestellt ist. Neben der zentralen Definition der Umgebungsszenarien und Verortung der Endgeräte („Map“) stellt dieses Nutzerinterface ein umfassendes Bild der Netzwerkperformance und aktueller KPIs, sowie eine Statusübersicht der eingebrachten Endgeräte zu Verfügung („Network Health“). Des Weiteren lassen sich über diese Schnittstelle aktive Leistungsmessungen definieren, verwalten und durchführen („Test Control“).

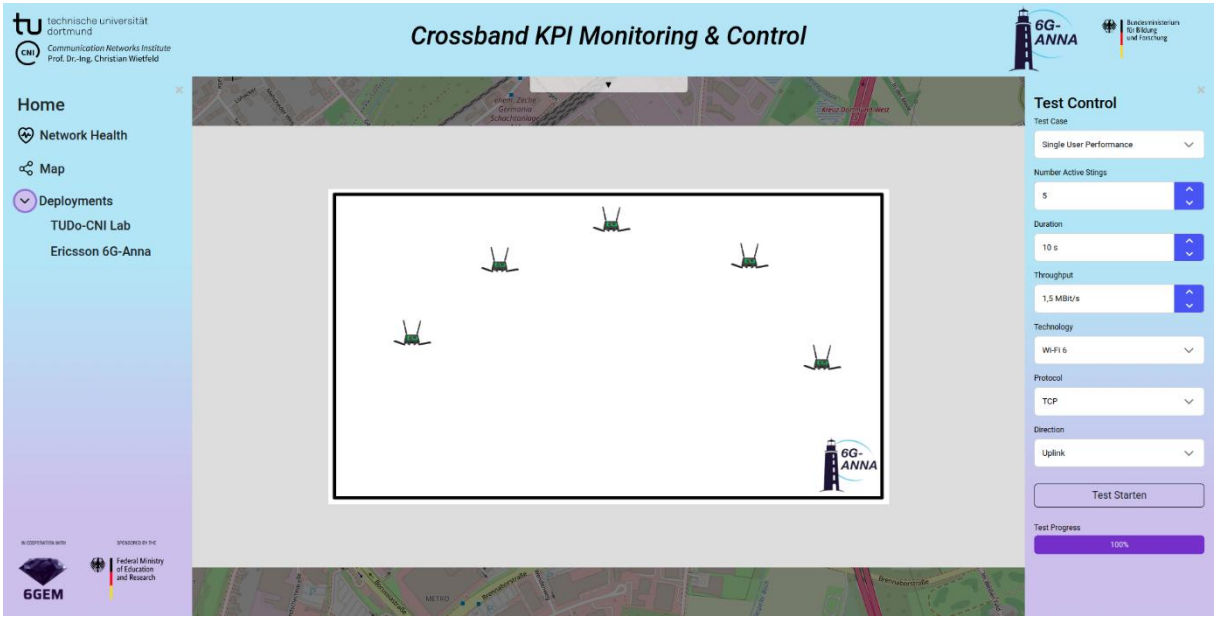

Abbildung 3: Übersicht zu aktuellem Entwicklungsstand des Management Interfaces des 6G Crossband KPI Monitoring & Control Systems

Das eingeführte, modulare STING System wurde im 6G-ANNA Projekt im Hinblick auf die Anwendung als Crossband KPI Monitoring & Control System maßgeblich um die 5G mmWave Technologie erweitert. Eine Systemarchitektur für diese Anwendung ist in Abbildung 4 zu sehen. Das erweiterte STING KPI-Monitoring & Control System besteht aus verteilten statischen STING Einheiten sowie einer mobilen STING Einheit, welche jeweils über diverse Netzwerkschnittstellen verfügen (Wi-Fi 6, 5G mmWave, 5G sub-6 GHz). Dabei wird eine Technologie (in dieser Konfiguration Wi-Fi) als vom zu untersuchenden Netz entkoppelter Kontrollkanal verwendet. Die verteilen STING-Einheiten erlauben es neben der Aufzeichnung passiver Parameter (RSRP, RSRQ, SINR, etc.) eine kontrollierte Last in das Netz zu bringen. Dabei liegt der Fokus der statischen Einheiten auf der Untersuchung von Multi-User Effekten auf den Kanalzugriff, während es die mobile Einheit erlaubt, ein umfassendes Bild der Netzperformance in Bezug auf die Anwendungsumgebung in Form einer Radio Environmental Map (REM) aufzuzeichnen. Zusätzlich zu diesen dezentralen KPIs ermöglicht es die Architektur über eine zentrale Schnittstelle zum zu untersuchenden Netz zentrale KPIs abzurufen, insofern das netzseitige Backend dies unterstützt. So können beispielsweise die zentrale Zellauslastung oder Informationen über die verwendeten mmWave Beams gemeinsam mit den dezentral aufgezeichneten KPIs zu einer „Enrichment Data“ Datenbank zusammengeführt werden, um als Basis für eine Optimierung des Netzes dienen zu können.

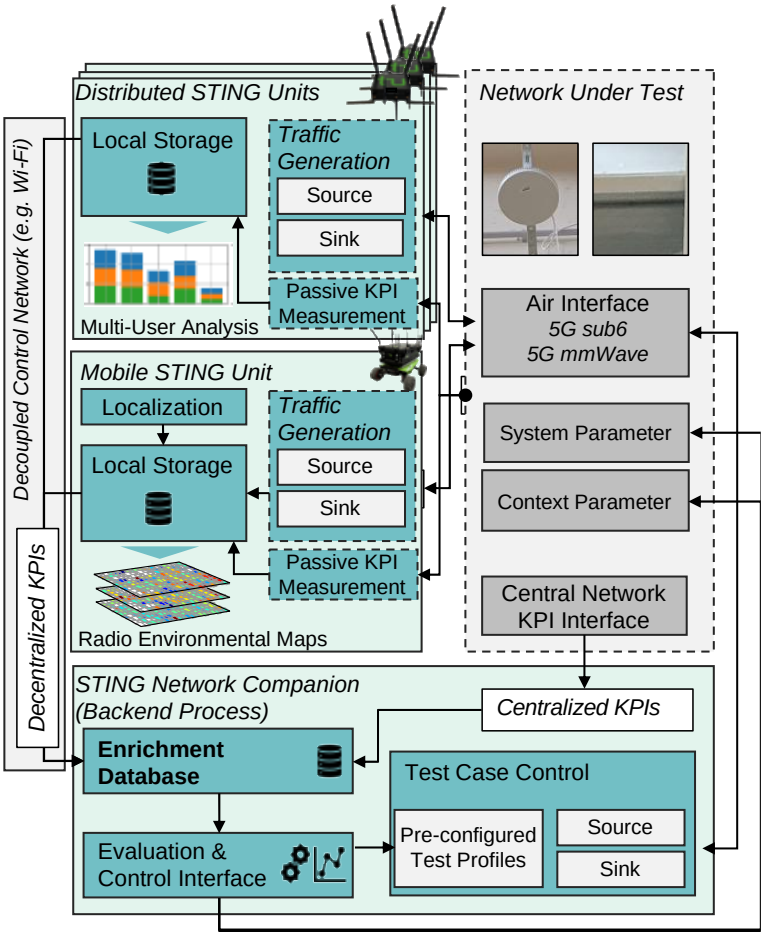

Abbildung 4: Aktualisierte Systemarchitektur des 6G Crossband KPI-Monitoring & Control Systems

Für die Vielzahl an Metriken, die sowohl auf Endgeräte- als auch auf Netzwerkseite technologieübergreifend durch das implementierte Crossband KPI Monitoring & Control System aufgezeichnet werden, wurden einheitliche Auswertungsmethoden erstellt, um während der kontinuierlichen Messung der KPIs, unabhängig von der jeweiligen Messumgebung, eine zeitnahe Leistungsevaluation durchführen zu können. Während ortsbezogene Informationen, wie beispielsweise die oben beschriebenen Beam Indizes einer mmWave Zelle, in REMs dargestellt werden können, können mithilfe statistischer Auswertungen mögliche Ausreißer während einer länger andauernden Messung besser identifiziert werden. Für zukünftige 6G-Netzwerke sollte die Auswertung ortsbezogener und statistischer Informationen miteinander kombiniert werden, um relevante KPIs einheitlich und anwendungsübergreifend zu untersuchen.

Mit der technologieunabhängigen, flexiblen Erweiterung des KPI Monitoring & Control Systems sowie der daraus resultierenden Bereitstellung einheitlicher Bewertungsmethoden, welche im Folgenden für Performanceevaluationen angewendet wurden.

AS 2.3.2-TUDo: *Entwicklung multidimensionaler Stresstestmethoden als Basis reproduzierbarer Testverfahren (6G Crossband KPI Monitoring & Control Test Cases)*

Neben der maßgeblichen Erweiterung des Crossband KPI Monitoring & Control Systems um die 5G mmWave Technologie wurden ebenfalls die Stresstestmethoden ergänzt. Dabei lag der Fokus vorerst auf Test Cases für Funktechnologien in Frequency Range (FR) 2. Da die höheren Pfadverluste in diesem Frequenzbereich unter anderem durch stärkere Antennenrichtwirkungen und Beamsteering Funktionalitäten kompensiert werden können, werden im Vergleich zum sub-6 GHz Bereich unterschiedliche Methoden benötigt, um die Leistung entsprechender Systeme herauszufordern und zu prüfen. Nachfolgend werden im

Projekt entwickelte und erprobte systematische Multi-User Testverfahren aufgelistet und beschrieben, mit denen FR2-spezifische Lasterzeugungen realisiert werden können:

1. *Co-Located*: mehrere Endgeräte werden möglichst nah aneinander platziert, wobei alle Geräte in Sichtverbindung zur Zelle stehen und durch denselben Beam mit Letzterer verbunden sind. Somit kann analysiert werden, wie hoch die maximale Systemleistung ist, wenn kein Beamswitching notwendig ist.
2. *Multi-Angle*: mehrere Endgeräte werden equidistant aber in unterschiedlichen Winkeln zur Zelle platziert, sodass jedes Gerät durch einen unterschiedlichen Beam mit Letzterer verbunden ist. Mit diesem Aufbau gelingt es, den Einfluss des Beamsteerings genauer zu analysieren.
3. *Multi-Distance*: mehrere Endgeräte werden im selben Winkel jedoch in unterschiedlichen Abständen zur Zelle platziert. Während die Geräte durch diesen Aufbau auch durch unterschiedliche Beams verbunden sein können, liegt der Fokus dieses Testverfahrens auf dem Einfluss der Distanz zwischen Endgerät und Zelle.

Neben den aufgelisteten Testverfahren wurde ebenfalls ein Anwendungsszenario entwickelt, um die Konnektivität unter herausfordernden Obstructed-LOS (OLOS) und Non-LOS (NLOS) Bedingungen zu testen. Orientiert an Beispielen aus der Industrie wurde in diesem Zusammenhang ein stark dämpfender, metallischer Käfig konstruiert. Mit diesem Aufbau wird eine Roboterzelle aus der Industrie nachgeahmt, in der beispielsweise Schweißarbeiten durch einen Roboter durchgeführt werden. Da solche Prozesse in Zukunft ebenfalls in 6G-Netzwerke eingebunden werden können, gilt es, die Konnektivität in solch abgeschatteten Bereichen zu erproben. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen[3] können verwendet werden, um Optimierungsansätze für die Funkverbindung zu realisieren. Somit werden die eingeführten Stresstestmethoden durch Lösungsansätze ergänzt, die in Realumgebungen implementiert werden können. Ein Beispiel für dieses Vorgehen, welches zuerst in der Transferlaborumgebung der TU Dortmund erprobt wurde, ist Abbildung 5 dargestellt.

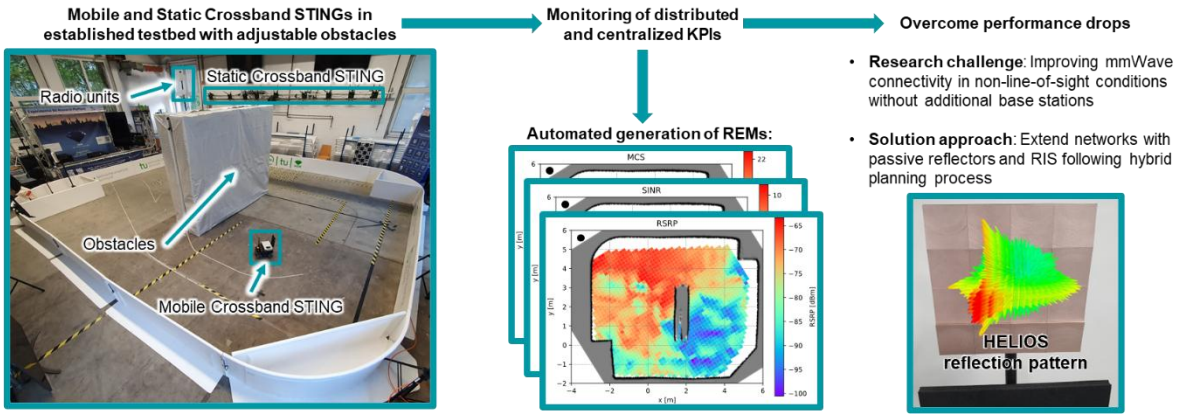

Abbildung 5: Crossband 6G KPI Monitoring & Control Testbed zur Optimierung der Netzwerkperformance

Da die Funkstrecke im mmWave-Frequenzbereich sensitiv auf Richtungs- und Winkeländerungen der Empfangsantenne im Verhältnis zur Sendeantenne reagiert, wurde im Rahmen des Projekts ein flexibler Roboterarm mit bis zu sieben Freiheitsgraden beschafft, um auf dessen Grundlage reproduzierbare Prüfverfahren (vgl. Abbildung 6) dieser lage- und positionsabhängigen mmWave-Charakteristik zu erstellen. Somit können systematisch 3D-Positionen und Bewegungsmuster abgefahren werden, um Endgeräte auf deren Leistungsfähigkeit zu prüfen sowie Lösungen für einen optimierten mmWave Einsatz zu

[3] M. Danger, S. Häger, K. Heimann, S. Böcker, C. Wietfeld, "Empowering 6G Industrial Indoor Networks: Hands-On Evaluation of IRS-Enabled Multi-User mmWave Connectivity", in *European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit)*: Operational & Experimental Insights, Antwerp, Belgium, June 2024.

erproben und zu erhärten[4]. Neben dem Einsatz als Basisplattform für anspruchsvolle Prüf- und Testverfahren wurde der Roboterarm ebenfalls zur Entwicklung anschaulicher Forschungsdemonstratoren eingesetzt.

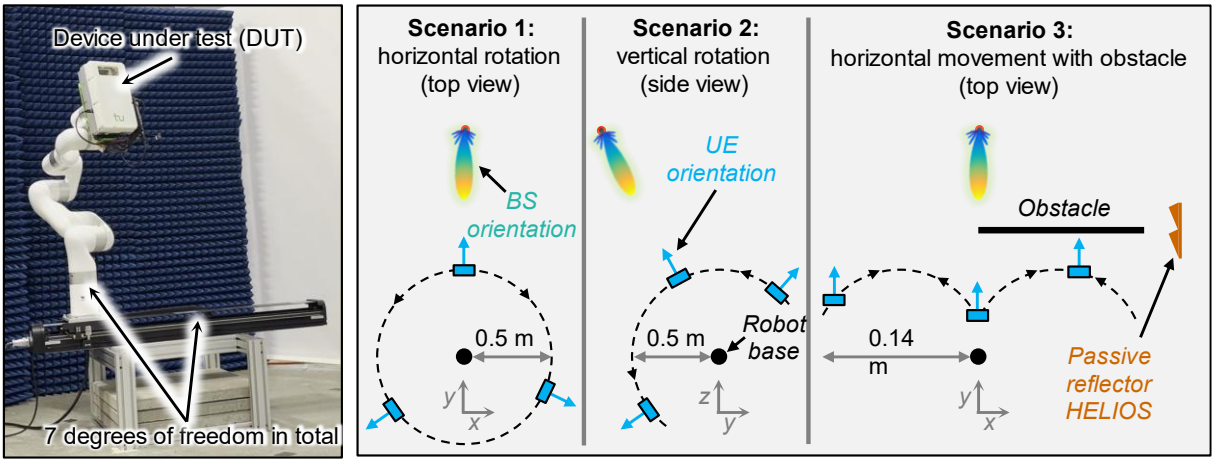

Abbildung 6: Roboterarmaufbau und Konzept reproduzierbarer Prüfverfahren

Zusätzlich zu FR2 wurde das STING System um Software-Defined Radio (SDR) Komponenten erweitert, um technologieunabhängig Störeinflüsse auf der physikalischen Ebene zu erzeugen und zu untersuchen. Ziel ist es, bekannte Signale innerhalb eines Frequenzbereichs zu identifizieren, um potenzielle Anomalien zu erkennen. Das System nutzt SDRs zur Erfassung von Power Spectral Density (PSD) Wasserfalldiagrammen, die dann KI-basiert analysiert werden. Die Ergebnisse werden mit einer Wissensdatenbank verglichen, um die Gültigkeit der beobachteten Signale zu bewerten (vgl. Abbildung 7).

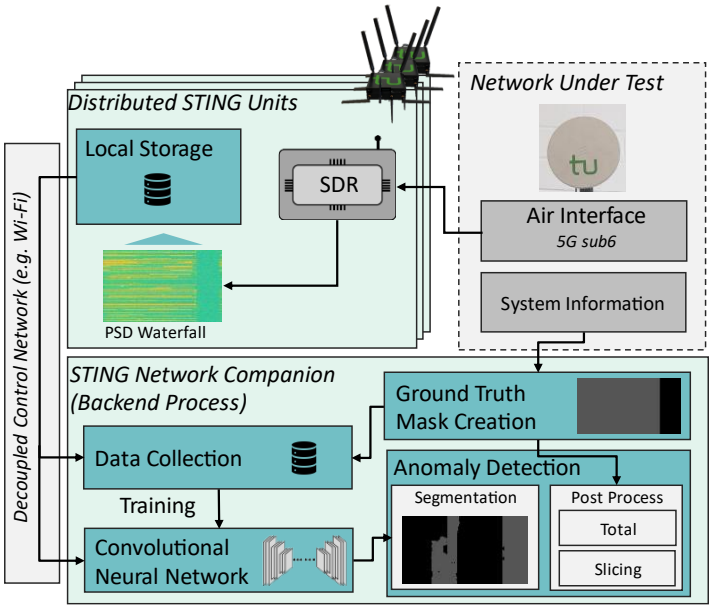

Abbildung 7: Architektur für KI-basierte Anomaliedetektion

Die aufgezeichneten Wasserfalldiagrame werden in Teilsegmente aufgeteilt, und pro Segment jeweils auf Abweichungen zur Ground Truth untersucht (siehe Abbildung 8). Auf diese Weise

[4] M. Danger, M. Khalili, S. Böcker, C. Wietfeld, "Improving Energy Efficiency of Industrial mmWave Connectivity with Context-Sensitive IRS Support," in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Istanbul, Türkiye, September 2025.

konnte eine Anomaliedetektion auf Basis etablierter Modelle zur Bilderkennung genutzt werden. Dieser Ansatz wurde in der Laborumgebung der TU Dortmund erprobt und evaluiert (vgl. AS 5.1).

Zusammen mit den eingeführten Multi-User Testverfahren ist in diesem Arbeitsschritt die Entwicklung multidimensionaler, bedarfsgesrechter Stess- und Interferenztestmethoden abgeschlossen, auf deren Grundlage reproduzierbare Referenzszenarien in Labor-, Transfer- und Realumgebungen (vgl. AS 5.2) erprobt wurden und zu den Meilensteinen MS1 (M12) und MS2 (M24) beigetragen haben.

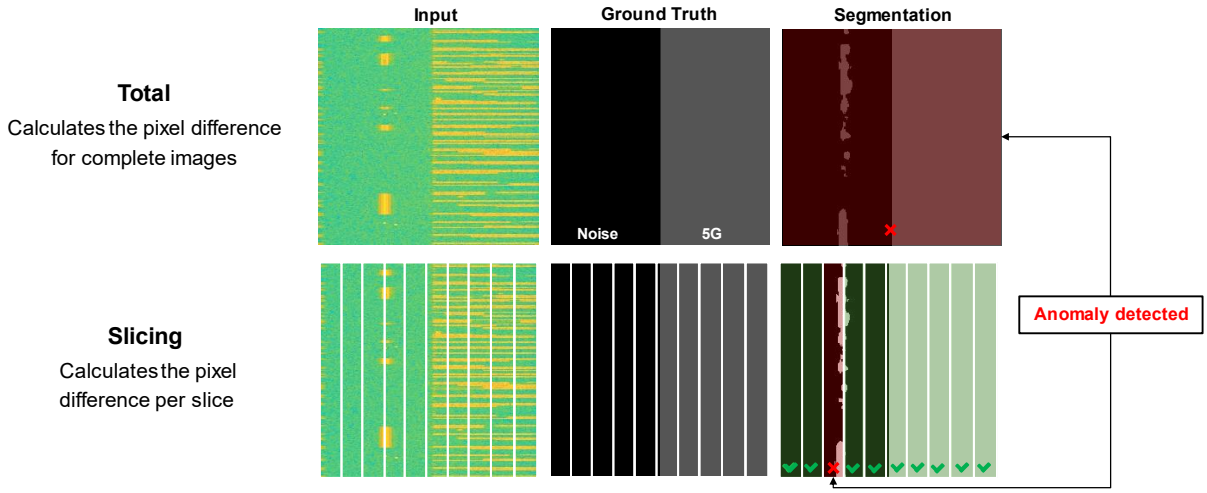

Abbildung 8: Segmentierung von Wasserfalldiagrammen zur Anomaliedetektion

AS 2.3.3-TUDo: *Design und Entwicklung einer Steuerschnittstelle für Anbindung externer 6G-ANNA Dienste und Systeme (6G Crossband KPI Monitoring & Control API)*

Um eine automatisierte Durchführung und Auswertung der durch das Crossband KPI Monitoring & Control System ermöglichten Messungen und Testverfahren zu ermöglichen, wurde eine Programmierschnittstelle zu dem System implementiert. Diese erlaubt den Start systematischer Testverfahren (Single- und Multi-User, technologieunabhängig) sowie eine Abfrage der aktiven und passiven, kontinuierlichen Messergebnisse des Monitoring & Control Systems in Form einer REST API. Die Funktionen sind formal beschrieben in Abbildung 9.

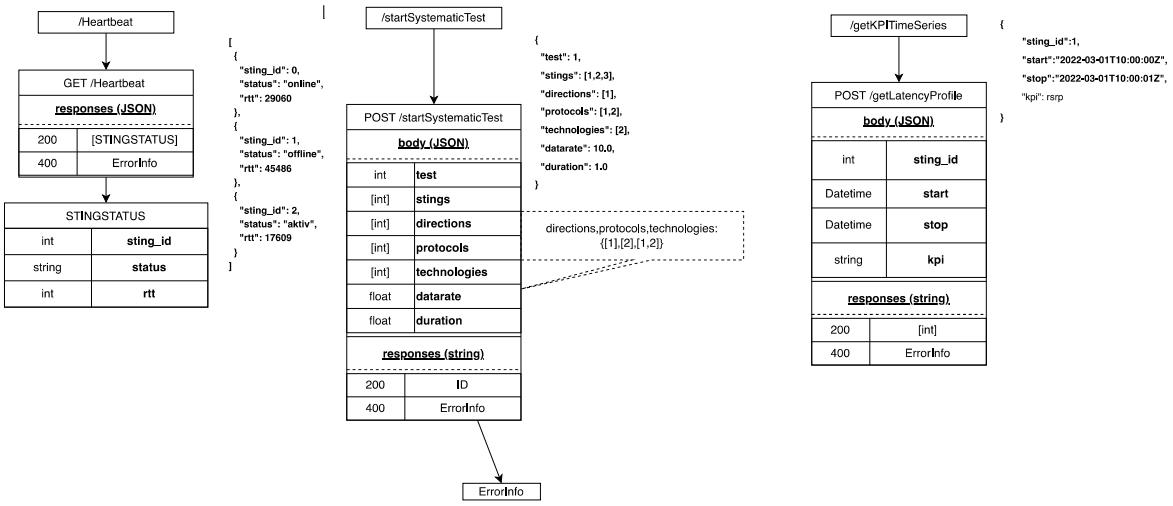

Abbildung 9: Klassendiagramm der Crossband Monitoring & Control KPI

Neben dem externen Zugriff auf das Monitoring & Control System kann dieses seinerseits auf Schnittstellen der zugrundeliegenden Netze einbinden, um zentrale Netzwerk-KPIs analysieren sowie die SDR-basierte Signalerzeugung (Konfiguration von Sendeleistungen, Frequenz- und Bandbreite) und Anomaliedetektion ansteuern zu können. Darüber hinaus können die dezentralen Performancemetriken der STING Module durch Informationen über die Netzauslastung und, im Falle von mmWave, den verwendeten Beamkonfigurationen ergänzt werden.

Arbeitspaket 5: Testbeds & PoCs

AS 5.1-TUDo: *Wechselseitige Validierung 6G Crossband KPI Monitoring & Control in Labor- und Feldumgebung*

In einem ersten Arbeitsschritt integrierte die TU Dortmund das in AP 2.3 entwickelte 6G Crossband KPI Monitoring & Control System wechselseitig in das in Abbildung 10 dargestellte Testbed in einer Experimentalumgebung der TU Dortmund, um es im Wechselspiel mit lizenzierten und unlizentierten Funknetzen unterschiedlicher Ausprägung in einem Multi-/Crossband Ansatz zu validieren und weiterzuentwickeln. Ergänzend konnten auf Basis von Modellbau-Optionen authentische Anwendungssituationen nachgebildet werden.

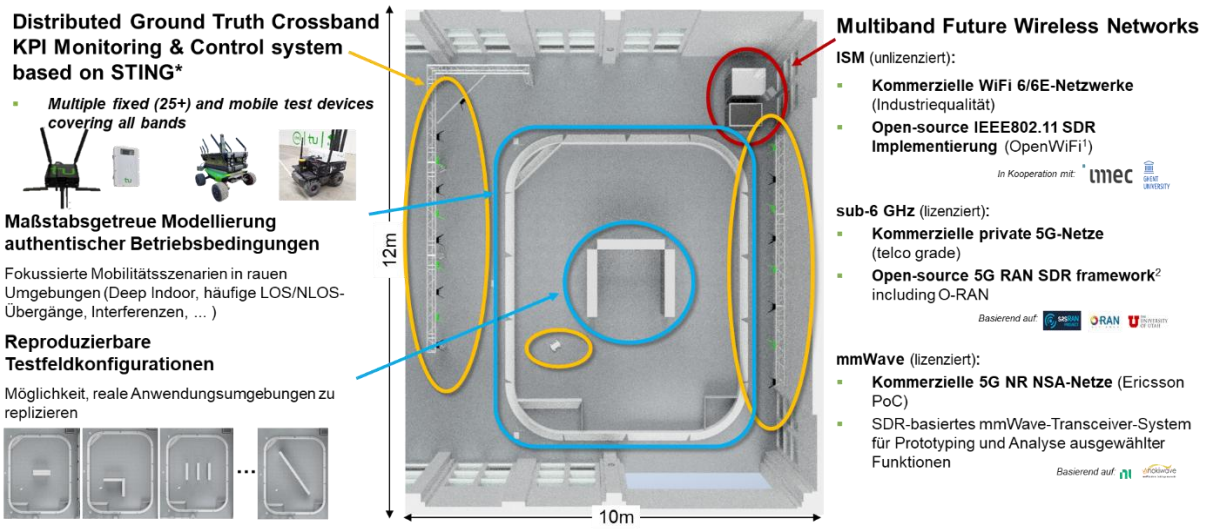

Abbildung 10: Übersicht Crossband KPI Monitoring & Control Testbed der TU Dortmund

Somit bestand das Crossband KPI Monitoring & Control Testbed aus folgenden Komponenten:

- Multiband Drahtlosnetzwerke (unlizenziert/lizenziert)
- Verteiltes Ground Truth Crossband KPI Monitoring & Control System (STING Network Companion)
- Maßstabsgetreue Modellierung authentischer Betriebsbedingungen über reproduzierbare Testfeldkonfigurationen

Dies stellte die Grundlage für die im Projekt entwickelten reproduzierbaren und bedarfsorientierten 6G-Testfälle (Benchmarks) für Anwendungen im Bereich Produktion und Logistik dar. Über den verteilten Ansatz und die Möglichkeit mobiler STING Module lag der Fokus dabei unteranderem auf Multi-User-Szenarien in statischen und mobilen Topologien. Im Ergebnis war es pro Testfall möglich, durchgängiges 6G-Netz-/Systemwissen in Form eines multidimensionales Mobilfunk-KPI-Datenmanagements aufzuzeichnen und in der Nachbearbeitung einer umfangreichen Leistungsbewertung zu unterziehen.

Auf dieser Basis entwickelte und erprobte die TU Dortmund bedarfsgerechte Benchmarks durch die Nutzung unterschiedlicher Funkumgebungen. Dabei wurden die Validierungsergebnisse und das Anwenderfeedback eng mit dem 6G-ANNA Partner Ericsson abgestimmt, um eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Systemhärtung zu gewährleisten. Diese Vorgehensweise garantierte eine ressourceneffiziente Leistungsbewertung der realen Produktionsumgebung und minimierte aufwändige Integrationsarbeiten vor Ort auf ein mögliches Minimum.

Evaluierung industrieller mmWave Netze

Die in AS 2.3.2 genannten Konzepte wurden zuerst im Testbed der TU Dortmund (Transferumgebung) evaluiert. Abbildung 11 zeigt die zugehörigen Ergebnisse mit Schwerpunkt auf mmWave und den eingeführten Multi-User Testverfahren (Co-Located, Multi-Distance und Multi-Angle), welche in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung festgehalten wurden[5].

Auf der linken Seite wird eine von einem mobilen STING-Gerät erstellte Beam-ID-Karte angezeigt, um die Beam-Konstellation innerhalb des Transferlabors zu visualisieren. Es wurden fünf Positionen definiert, um die Szenarien Co-Located, Mixed-Distance und Multi-Angle zu erstellen. Das erste Ergebnis auf der rechten Seite zeigt den Durchsatz eines einzelnen Benutzers an der zentralen Position bei steigender Bandbreite und dient als Grundlage für die Tests mit mehreren Benutzern. Es ist zu erkennen, dass der Downlink-Durchsatz des getesteten mmWave Netzwerks bei 2 Gbit/s gedeckelt ist, die mit einer Bandbreite von 800 MHz erreicht werden. Der Uplink-Durchsatz erreicht dagegen maximal 670 Mbit/s.

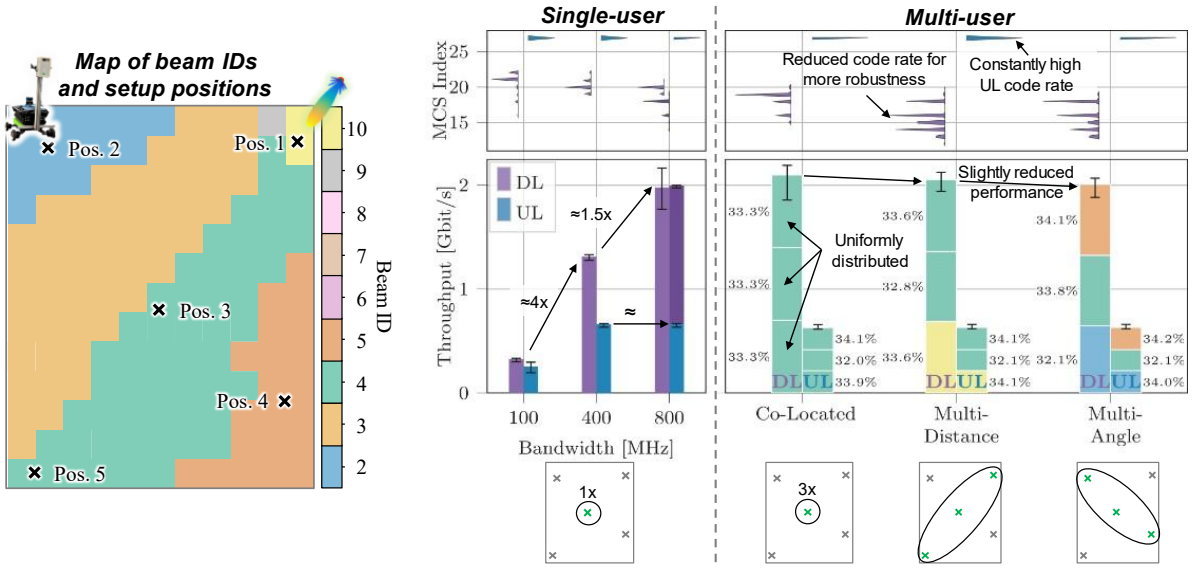

Abbildung 11: Messung der Beam-IDs im Transferlabor sowie Bewertung der LOS-Leistung für Single- und Multi-User Szenarien

Als Nächstes werden die Ergebnisse für mehrere Benutzer angezeigt. Es ist ersichtlich, dass in den Co-Located-Szenarien die oben genannten Durchsätze in der Summe von drei UEs erreicht werden, wobei jedes einen fairen von 33,3 % erhält, wie es unter nicht priorisierten Bedingungen zu erwarten ist. Im Mixed-Distance-Szenario wird ein ähnliches Ergebnis

[5] M. Danger, S. Häger, K. Heimann, S. Böcker, C. Wietfeld, "Empowering 6G Industrial Indoor Networks: Hands-On Evaluation of IRS-Enabled Multi-User mmWave Connectivity", in *European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit): Operational & Experimental Insights*, Antwerp, Belgium, June 2024.

beobachtet, jedoch verwendet das UE an Pos. 1 in der Nähe der Basisstation eine andere Beam-ID, da sich der vertikale Winkel zur Basisstation ändert. Das UE mit dem größten Abstand an Pos. 5 erhält einen geringeren Durchsatzanteil, der jedoch weiterhin nahe an einer fairen Verteilung liegt. Das Multi-Angle-Szenario führt erwartungsgemäß zur Verwendung von drei verschiedenen Beams, was jedoch weiterhin zu einer nahezu gleichmäßigen Verteilung zwischen den drei UEs führt, wobei die Gesamtleistung nur geringfügig abnimmt, was die erwartete Funktionsweise des mmWave Netzwerks bestätigt.

Die in der Transferumgebung der TU Dortmund erprobten Multi-User Testverfahren wurden anschließend skaliert, um sie ebenfalls in der großflächigen Realumgebung des Fraunhofer IPT als Teil einer mehrphasigen Systemerprobung einzusetzen. Die Ergebnisse der systematischen Evaluierung in der Realumgebung sind detailliert in AS 5.1 beschrieben.

KI-basierte Anomaliedetektion

Zusätzlich zur Evaluierung industrieller mmWave Netze wurde die in AS 2.3.2 beschriebene Anomaliedetektion ebenfalls in der Laborumgebung der TU Dortmund evaluiert und auf Basis dessen eine wissenschaftliche Veröffentlichung abgeleitet[6]. In Erweiterung des Basisergebnisses aus AS 2.1 wurden dabei verschiedene Konstellationen von Nutzkommunikation und zufallsbasierten, sinusoiden Störsignalen für die Erprobung der Anomaliedetektion erzeugt. Abbildung 12 zeigt eine exemplarische Auswahl der Evaluierungsdaten.

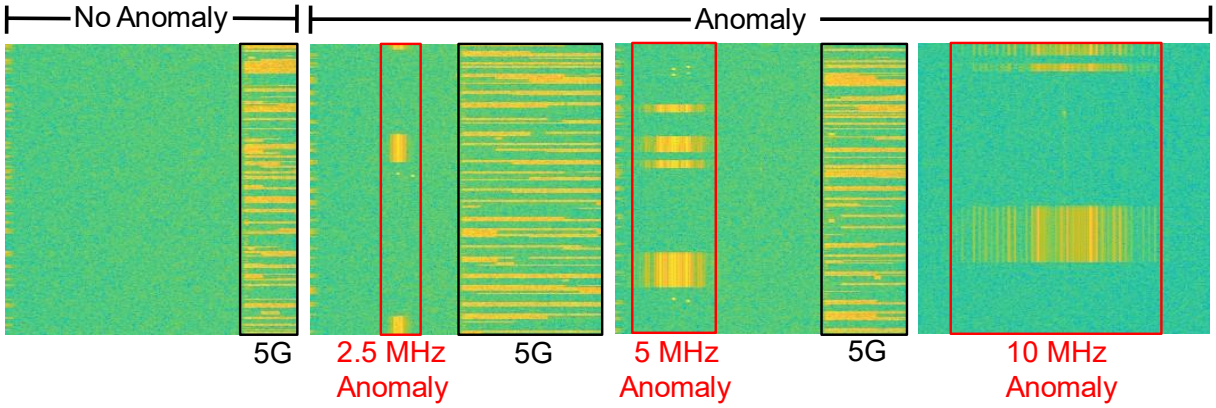

Abbildung 12: Exemplarische Ausschnitte der Evaluierungsdaten für die Anomaliedetektion

Die Anomalieerkennung erfolgte durch den Vergleich der segmentierten Ergebnisse mit einer Ground Truth-Maske, die aus den bekannten Systeminformationen erstellt wurde. Zwei Strategien zur Anomalieerkennung wurden verwendet: die „Total“-Methode, bei der die Gesamtzahl der unterschiedlichen Pixel über das gesamte Bild berechnet wird, und die „Slicing“-Methode, bei der das Bild in mehrere Abschnitte unterteilt wird. Abbildung 13 zeigt den Vergleich der beiden Methoden.

[6] K. I. Šabanović, C. Arendt, S. Fricke, M. Geis, S. Böcker, C. Wietfeld, "AI-based Anomaly Detection for Industrial 5G Networks by Distributed SDR Measurements", in *IEEE International Symposium on Measurements and Networking (M&N)*, Rome, Italy, July 2024.

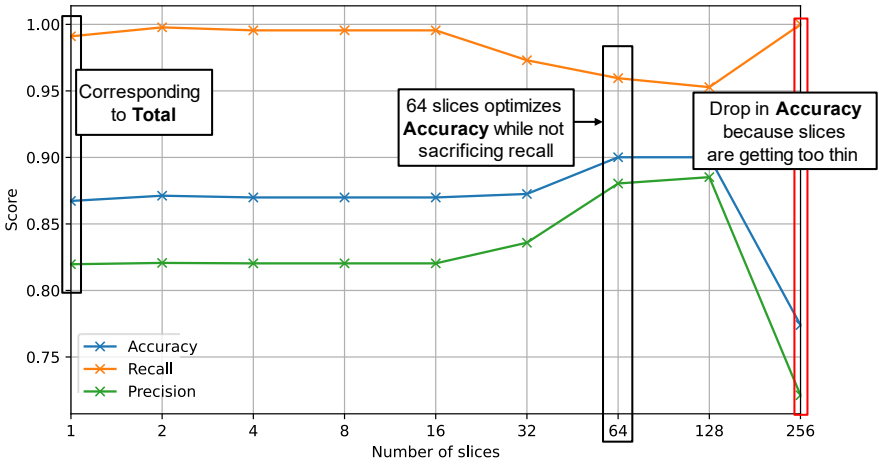

Abbildung 13: Vergleich der Slicing und Total Methoden zur Anomalieerkennung

Die Evaluierung des Systems zeigte, dass die Slicing-Methode in der Lage ist, kleinere Unterschiede effektiver zu erkennen, was zu einer höheren Präzision führt. Die Optimierung der Pixelunterschiede ist entscheidend für die Leistung des Systems (vgl. Abbildung 14), wobei die besten Ergebnisse bei einer Schwelle von 79,3 % erzielt wurden. Dies ermöglicht eine zuverlässige Erkennung potenziell bösartiger Aktivitäten und die Einleitung von Gegenmaßnahmen.

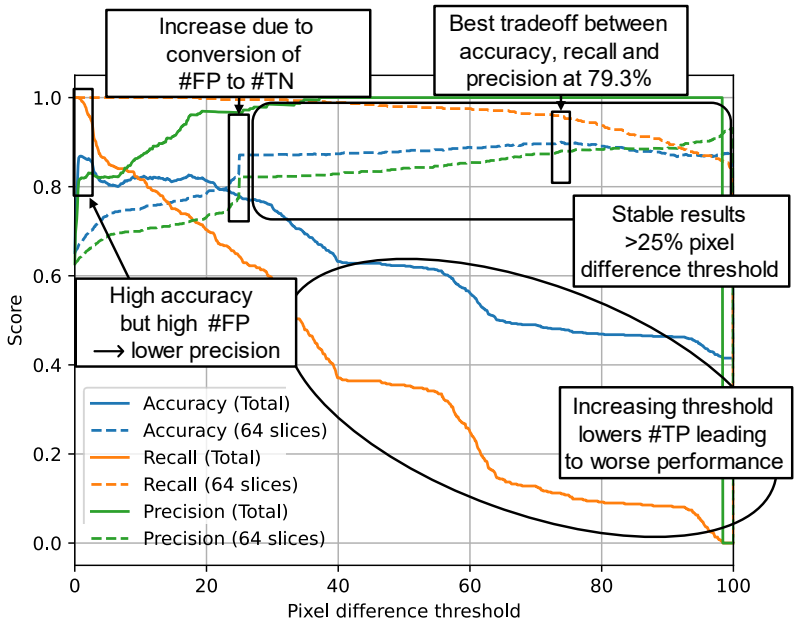

Abbildung 14: Evaluierung der Prädiktionsgüte in Abhängigkeit der Erkennungsschwelle für Anomalien

Im Rahmen des Projektes wurde das Crossband KPI-Monitoring & Control Testbed an der TU Dortmund zur reproduzierbaren Analyse mobiler Störszenarien eingesetzt und in Kooperation mit den Partnern der Universität Bremen für die Validierung und Weiterentwicklung einer KI-basierten SINR-Prädiktion angewandt. Dazu wurden SINR-Daten eines UEs aufgezeichnet, das unter dem Einfluss von bis zu zwei mobilen Störern steht (vgl. Abbildung 15).

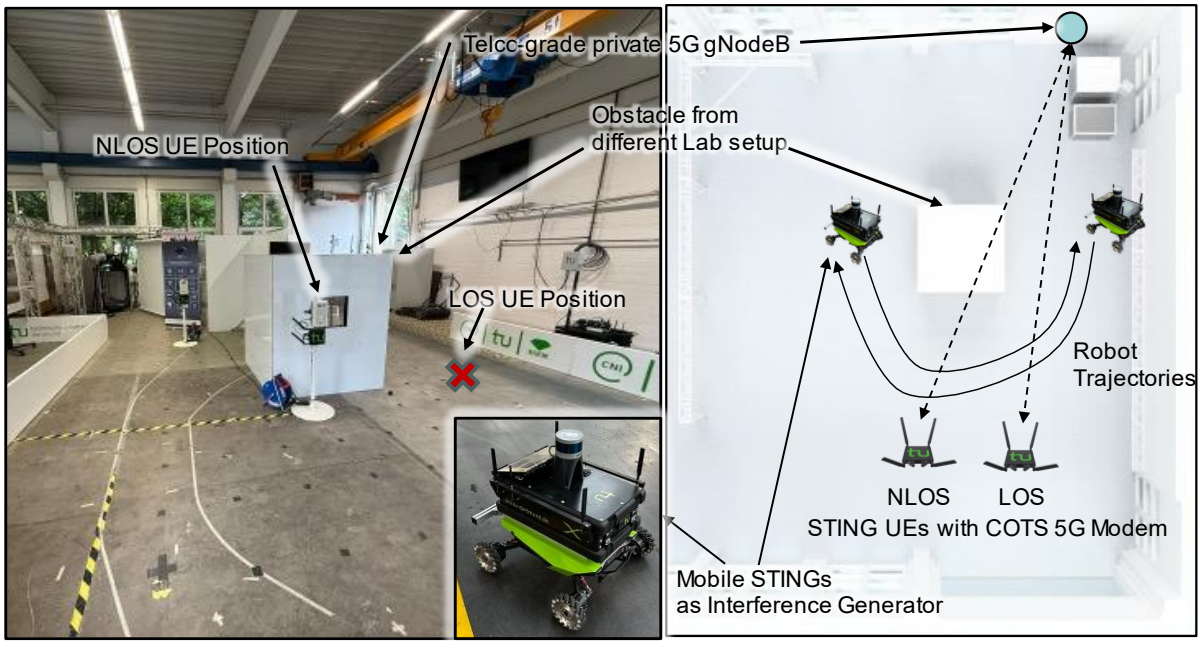

Abbildung 15: Schematische Testbedumgebung für SINR-Prädiktion

Die so aufgezeichneten Daten wurden dann durch die Universtät Bremen zur Prädiktion des SINR-Verlaufes und darauf basierend der Entwicklung eines optimierten Ressourcenzuweisungsalgorithmus verwendet. Eine gemeinsame Veröffentlichung dazu wurde zur IEEE ICC 2026 eingereicht[7]. Zum Abschluss dieses Berichts befindet sich diese noch im Reviewprozess.

AS 5.2-TUDo Systematische Evaluierung in Realumgebung

In einem zweiten Schritt wurde das in der Laborumgebung getestete System in der realistischen Produktionsumgebung des Fraunhofer IPT eingesetzt, wie in Abbildung 16 dargestellt, um die gewonnenen Erkenntnisse zu validieren und die Skalierbarkeit des KPI-Überwachungs- und Steuerungssystems zu bewerten.

[7] P. Gautam, C. Arendt, S. Fricke, C. Bockelmann, A. Dekorsy, and C. Wietfeld, “RASP: Reliability-Aware SINR Prediction for Realistic Industrial Subnetworks,” submitted to 2026 IEEE International Conference on Communications, Glasgow, Scotland, May 2026.

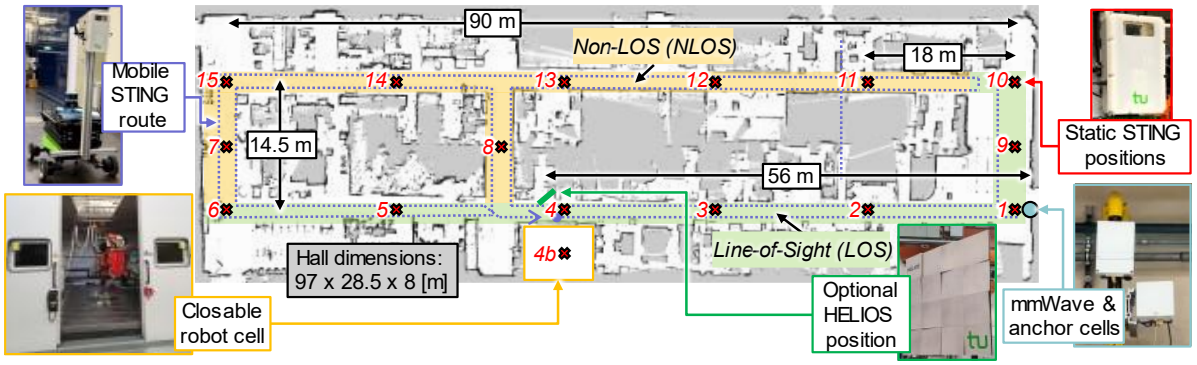

Abbildung 16: Grundriss einer industriellen Indoor-Umgebung mit den Positionen der STINGs und Messeinheiten für die praktische Leistungsbewertung

Abbildung **17** zeigt Impressionen der STING Aufbauten mit sieben statischen und einer mobilen Einheit(en) (links/mitte), wobei eine statische Einheit in einem verschließbaren Roboterkäfig positioniert wurde, um verschiedene Ausbreitungssituationen zu untersuchen (rechts).

Abbildung 17: Statische und mobile STING Module in Realumgebung beim Fraunhofer IPT

In dieser Funkumgebung sind die Bedingungen für die Kanäle aufgrund der größeren Grundfläche und der hohen Anzahl an (metallischen) Hindernissen herausfordernder als in der zuvor betrachteten Transferumgebung. Dies hatte Auswirkungen auf der Netzwerkleistung, welche eine höhere Varianz/Schwankung als zuvor aufweiste. Abbildung 18 zeigt die Ergebnisse für mehrere Nutzer in dieser Realumgebung, wobei verschiedene Positionen mit unterschiedlichen Abständen und Hindernissen zur Basisstation verwendet wurden, wie in Abbildung 16 markiert.

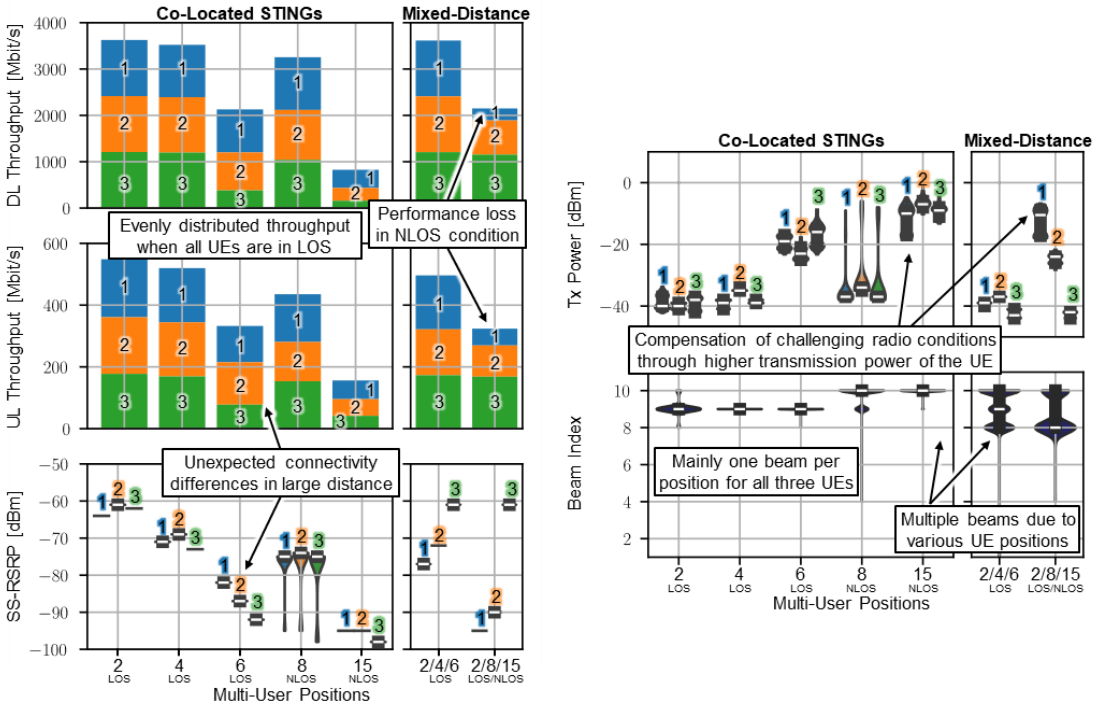

Abbildung 18: Multi-User Performace statischer STINGs in Co-Located und Mixed-Distance Szenarien unter LOS und NLOS Bedingungen

Einerseits lag der Systemdurchsatz bei etwa 3,5 Gbit/s und damit höher als in der Transferlaborumgebung. Andererseits zeigten die Leistungsergebnisse in den Co-Located Szenarien bei guten Kanalbedingungen die gleiche Charakteristik. Bei größerer Entfernung aller drei Modems verringerte sich der Durchsatz, wenn die Entfernung nicht durch eine höhere Sendeleistung ausgeglichen werden konnte. Dasselbe konnte bei NLOS-Bedingungen beobachtet werden. Bei den Szenarien mit gemischten Entfernungen (Mixed-Distance) mussten Geräte mit größerer Entfernung ihre Sendeleistung erhöhen und waren dennoch nicht in der Lage, den Einfluss der Entfernung vollständig zu kompensieren, während UEs, die näher an der Basisstation lagen, ihren stabilen Anteil am Gesamtsystemdurchsatz beibehielten. Die Ergebnisse der Realumgebung wurden erfolgreich als Teil einer wissenschaftlichen Publikation[8] veröffentlicht und dokumentieren die vollständige Erfüllung der Meilensteinbeiträge (MS2, M24) der TU Dortmund.

Die realistische Produktionsumgebung (Reallabor Fraunhofer IPT) wurde im Anschluss an die oben beschriebene, erste Messreihe für eine erweiterte, kontinuierliche Messkampagne eingesetzt. Im Vergleich zum vorherigen Aufbau wurde das Single-Cell mmWave Netzwerk um eine weitere mmWave Radio Unit erweitert, sodass die Auswirkungen dieser nun vorliegenden, komplexeren Multi-Cell Konfiguration auf das System, die Funkausbreitung innerhalb der Umgebung sowie verschiedene Anwendungen untersucht werden konnte. Zusätzlich wurde der Einfluss beweglicher Maschinen, der Endgeräte-Mobilität sowie -Ausrichtung mithilfe der kontinuierlich aufgezeichneten Metriken untersucht.

Abbildung 19 zeigt den Grundriss sowie die bemaßten Positionen der für die Messkampagne relevanten Hardwarekomponenten. Neben den beiden erwähnten mmWave Radio Units sind des Weiteren die Trajektorie des mobilen Endgeräts, die Position mehrerer statischer Nutzer

[8] M. Danger, C. Arendt, H. Schippers, S. Böcker, M. Muehleisen, P. Becker, J. B. Caro, G. Gjorgjievska, M. A. Latif, J. Ansari, N. Beckmann, N. König, R. Schmitt, C. Wietfeld, "Performance Evaluation of IRS-enhanced mmWave Connectivity for 6G Industrial Networks", in *IEEE International Symposium on Measurements and Networking (M&N)*, Rome, Italy, July 2024. (*Best Paper Young Author Award.*)

sowie die Lage der beweglichen Industriekräne, von welchen lediglich einer für die folgenden Messungen bewegt wurde.

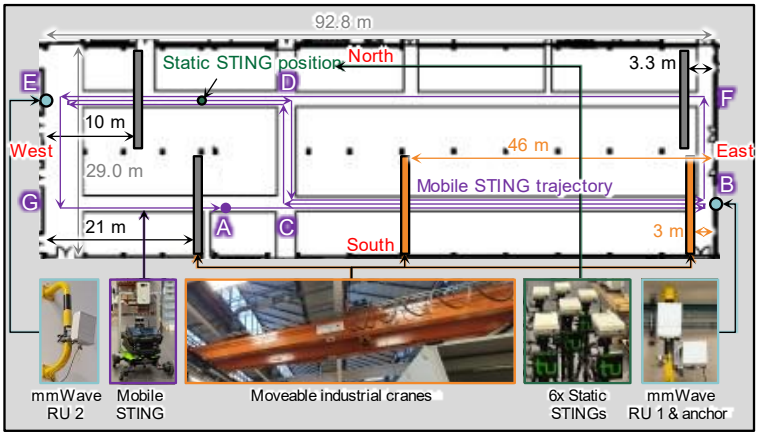

Abbildung 19: Grundriss und Positionierung von statischen und mobilen Hardwarekomponenten der dynamischen Industrieumgebung.

Um die Auswirkung der Multi-Cell Konfiguration auf die Funkausbreitung und Performance des Systems zu evaluieren, wurden zuerst simulierte und gemessene Werte eines einzelnen Nutzers miteinander verglichen. Die zugehörigen Ergebnisse sind in Abbildung 20 dargestellt. Sie zeigen, dass in der vorliegenden Industrieumgebung drei Wechselzonen entstehen, in denen die Verbindung eines Nutzers teils mehrfach zwischen den beiden mmWave Radio Units wechselt, wodurch die Empfangsleistung und Performance kurzzeitig einbrechen kann.

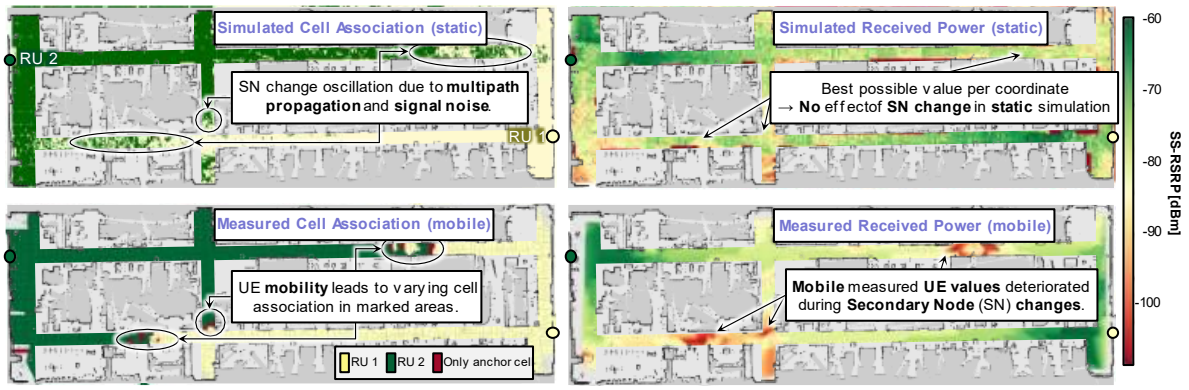

Abbildung 20: Vergleich der simulierten und mobil gemessenen mmWave Zellzuordnung sowie Empfangsleistung für die horizontale Endgeräteausrichtung.

Im zweiten Schritt der Messkampagne wurden die Auswirkung der Endgeräteausrichtung sowie Änderungen innerhalb der Funkumgebung genauer untersucht. Die Analyse in Abbildung 21 zeigt, dass die Ausrichtung des User Equipments (UE) und Veränderungen in der Umgebung einen erheblichen Einfluss auf die Konnektivität und Leistung haben. Eine Änderung der UE-Ausrichtung von horizontal zu vertikal führt dazu, dass sich die Wechselbereiche zwischen den Zellen verschieben und die Oszillation zwischen den Zellen, insbesondere im südlichen Korridor, reduziert wird. Dies verbessert die Konnektivität durch eine explizitere Zellzuordnung und minimiert häufige Zellwechsel. Im nördlichen Korridor hingegen verschlechtert sich die Datenrate bei vertikaler Ausrichtung an bestimmten Stellen um etwa 100 Mbit/s, da keine direkte Sichtverbindung zur Basisstation besteht. Dennoch bleibt die Leistung aufgrund der reflektierenden metallischen Umgebung auf einem hohen Level.

Veränderungen in der Umgebung, wie das Verschieben eines metallischen Krans innerhalb der Halle, beeinflussen ebenfalls maßgeblich das Funknetz. Die Abschattung des Krans verschlechtert die Verbindung zur mmWave Basisstation am westlichen Ende des südlichen

Korridors, während neue Reflexionspfade am östlichen Ende entstehen und dort die Datenrate verbessern. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass eine intelligente und positionsabhängige Ausrichtung des UE dessen Konnektivität, Performance und Effizienz verbessern kann. Gleichzeitig bestätigen sie den konstruktiven Effekt reflektierender metallischer Umgebungen auf die Konnektivität in herausfordernden Funkbedingungen. Die Analyse verdeutlicht zudem, dass dynamische Veränderungen in Produktionsumgebungen, wie beispielsweise bewegliche Hindernisse, bei der Netzwerkplanung berücksichtigt werden müssen, um deren Auswirkungen auszugleichen und eine stabile Funkverbindung zu gewährleisten.

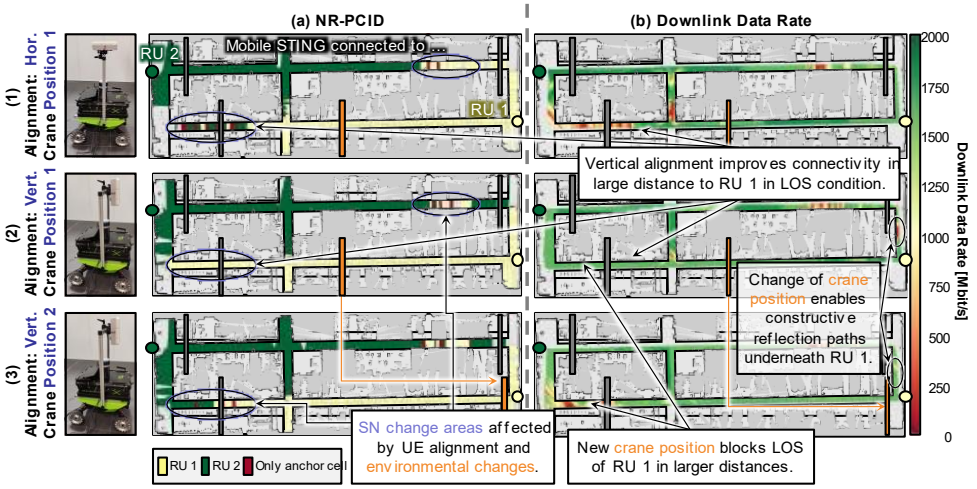

Abbildung 21: Auswirkungen der UE-Ausrichtung [(1) zu (2)] und Umweltveränderungen [(2) zu (3)] auf die Netzwerkleistung, dargestellt durch (a) NR PCID und (b) Downlink Datenrate.

Zuletzt wurde ein weiteres Testverfahren innerhalb der Messkampagne durchgeführt, in welchem mehrere statische Nutzer für eine hohe Auslastung innerhalb einer der beiden mmWave Radio Units sorgen, während die Ressourcen der anderen mmWave Zelle lediglich durch ein einzelnes, mobiles Endgerät beansprucht werden können. Wenn das mobile Endgerät nun eine festgelegte Trajektorie abfährt, können mehrere Aspekte anhand der Messergebnisse untersucht werden, welche in Abbildung 22 dargestellt sind.

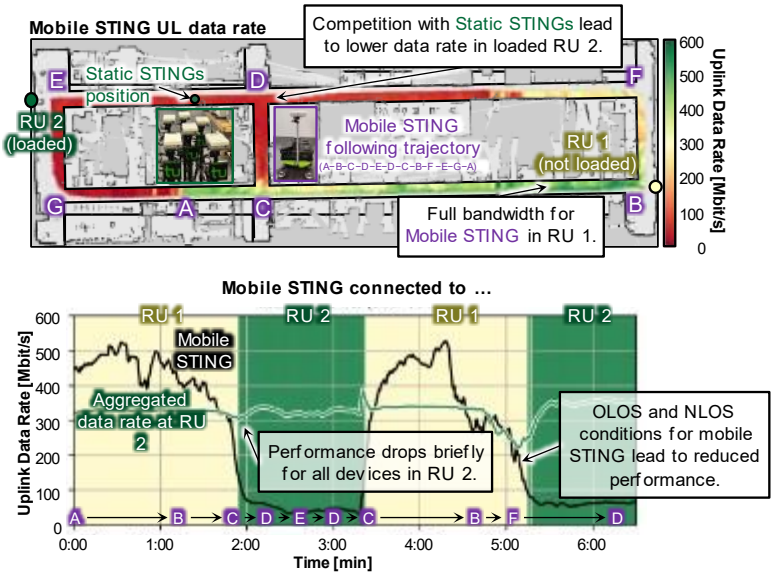

Abbildung 22: Standortspezifische UL-Datenrate von mobilem Endgerät während sechs aktive, statische UEs mit RU 2 verbunden sind.

Die Evaluation zeigt, wie sich die Bewegung des mobilen Endgeräts und zusätzliche Last durch statische Nutzer auf die Leistung in einem Multi-Cell Netzwerk auswirken. Solange das mobile Gerät mit der weniger ausgelasteten Zelle 1 verbunden ist, bleibt die Upload Datenrate hoch bei über 400 Mbit/s. Beim Wechsel zur stärker ausgelasteten Zelle 2 sinkt die Datenrate deutlich auf durchschnittlich 50 Mbit/s, da Ressourcen zwischen mobilen und statischen Nutzern geteilt werden müssen. In Bereichen mit eingeschränkter Sichtverbindung (OLOS/NLOS) verschlechtert sich zudem die Verbindung des mobilen Geräts sowie die Durchsatzrate der statischen Geräte aufgrund von Interferenzen und niedriger MCS-Werte. Die Ergebnisse veranschaulichen die Bedeutung einer effizienten Ressourcenverwaltung und Kapazitätsplanung, um eine stabile Netzleistung und hohe Servicequalität auch unter dynamischen Bedingungen sicherzustellen.

Durch die Veröffentlichung[9] der aufgezeigten Ergebnisse der oben beschriebenen bedarfsgerechten Testverfahren, die in der zweiten, erweiterten Messkampagne durchgeführt wurden, ist Meilenstein MS3 (M36) ebenfalls erfüllt.

2.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die im Rahmen des Projekts beschafften Steuerrechner (Pos. 1), Software-Defined-Radios (SDRs; Pos. 2), mmWave 5G Modems (n257; Low und High Power; Pos. 3 und 4) und der Backend Server (Pos. 5) wurden dafür eingesetzt, um das beschriebene 6G Crossband KPI Monitoring & Control Systems zu erweitern und skalierbar einsetzen zu können. Die daraus resultierenden Forschungsergebnisse sind in Abschnitt 2.1 in mehreren Arbeitsschritten im Detail beschrieben.

Der Roboterarm (Pos. 6), der mit dem Änderungsbescheid im Januar 2024 zur Liste der Gegenstände hinzugefügt wurde, diente als Basisplattform zur Erstellung und Durchführung FR2-spezifischer Testverfahren, die ebenfalls in Abschnitt 2.1 (AS 2.3.2-TUDo) beschrieben wurden. Des Weiteren wurde der Roboterarm als Teil anschaulicher Forschungsdemonstratoren eingesetzt, welche unter anderem auf der 6G-Plattform Konferenz im Jahr 2024 der 6G-Plattform präsentiert wurden.

2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Rahmen des Projekts 6G-ANNA durchgeführten Arbeiten waren notwendig, um die Grundlagen für zukünftige Kommunikationssysteme der sechsten Mobilfunkgeneration zu schaffen. Die technische Komplexität von 6G sowie die hohen Anforderungen an Sicherheit, Resilienz und Energieeffizienz machten eine koordinierte Forschungsarbeit über verschiedene Disziplinen hinweg erforderlich. Die TU Dortmund leistete hierbei einen wesentlichen Beitrag durch die Entwicklung und Validierung von Methoden zur Leistungsbewertung und Stabilitätsanalyse von Netzkomponenten unter realistischen Bedingungen. Die Arbeit war in Umfang und Tiefe angemessen, da sie sowohl wissenschaftliche als auch industrielle Anforderungen abdeckte und unmittelbar zur Erreichung der Projektziele beitrug.

2.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die im Projekt erzielten Ergebnisse bilden eine wichtige Grundlage für die Weiterentwicklung zukünftiger Mobilfunknetze und deren Integration in industrielle Anwendungen. Insbesondere

[9] M. Danger, C. Arendt, H. Schippers, S. Böcker, N. Beckmann, R. Schmitt, C. Wietfeld, "6G Industrial Networks: Mobility-Centric Evaluation of Multi-cell mmWave Systems," in IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC-Spring), Oslo, Norway, June 2025.

die von der TU Dortmund entwickelten Test- und Bewertungsmethoden ermöglichen eine präzisere Analyse von Systemgrenzen sowie eine verbesserte Einschätzung von Netzresilienz und Leistungsfähigkeit. Diese Erkenntnisse sind direkt verwertbar für Hersteller, Netzbetreiber sowie Forschungseinrichtungen, die an der Gestaltung sicherer und effizienter Kommunikationsinfrastrukturen beteiligt sind. Darüber hinaus fließen die gewonnenen Erkenntnisse in Standardisierungsprozesse ein, wodurch sie langfristig zur technologischen Souveränität Deutschlands beitragen.

Die TU Dortmund wird ihr 6G Crossband KPI Monitoring & Control System zudem in 2026 startenden Projekten fortlaufend weiterentwickeln, insbesondere im Blick auf FR3 sowie auf latenzkritische und zeitsynchrone Kommunikation.

2.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Während der Laufzeit des Projekts wurden international mehrere parallele Forschungsaktivitäten beobachtet, insbesondere innerhalb europäischer Programme wie Horizon Europe Smart Networks and Services (SNS) sowie Initiativen wie Hexa-X oder 6G Flagship an der Universität Oulu. Diese Arbeiten bestätigten den eingeschlagenen Weg von 6G-ANNA hinsichtlich Themen wie Netzautomatisierung, KI-basierter Optimierung und Architekturflexibilität. Die TU Dortmund stand hierzu im regelmäßigen fachlichen Austausch mit relevanten Akteuren aus Wissenschaft und Industrie, um Synergien zu nutzen und Überschneidungen frühzeitig abzugleichen.

2.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6.

Wissenschaftliche Publikationen

Die erfolgten Veröffentlichungen wurden bereits in Abschnitt 2.1 zusammen mit den zugehörigen Ergebnissen beschrieben. Zur vollständigen Übersicht folgt hier eine Liste der Publikationen:

[CW1] C. Arendt, S. Böcker, C. Bektas, C. Wietfeld, "Better Safe Than Sorry: Distributed Testbed for Performance Evaluation of Private Networks", In 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF), October 2022

[CW2] C. Arendt, S. Fricke, S. Böcker, C. Wietfeld, "Empowering the Convergence of Wi-Fi and 5G for Future Private 6G Networks", In European Wireless 2023, Rome, Italy, October 2023.

[CW3] M. Danger, S. Häger, K. Heimann, S. Böcker, C. Wietfeld, "Empowering 6G Industrial Indoor Networks: Hands-On Evaluation of IRS-Enabled Multi-User mmWave Connectivity", In European Conference on Networks and Communications & 6G Summit (EuCNC/6G Summit): Operational & Experimental Insights, Antwerp, Belgium, June 2024.

[CW4] K. Šabanović, C. Arendt, S. Fricke, M. Geis, S. Böcker, C. Wietfeld, "AI-based Anomaly Detection for Industrial 5G Networks by Distributed SDR Measurements", In IEEE International Symposium on Measurements and Networking (M&N), Rome, Italy, July 2024.

[CW5] M. Danger, C. Arendt, H. Schippers, S. Böcker, M. Muehleisen, P. Becker, J. B. Caro, G. Gjorgjievska, M. A. Latif, J. Ansari, N. Beckmann, N. König, R. Schmitt, C. Wietfeld, "Performance Evaluation of IRS-enhanced mmWave Connectivity for 6G Industrial Networks", In IEEE International Symposium on Measurements and Networking (M&N), Rome, Italy, July 2024.

[CW6] S. Häger, M. Danger, S. Böcker, C. Wietfeld, "On Link-level Performance of Passive IRS-boosted Indoor mmWave Communications and Road Ahead", In IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN), Boston, USA, July 2024.

[CW7] S. Häger, M. Danger, K. Heimann, Y. Gümüs, S. Böcker, C. Wietfeld, "Custom Design and Experimental Evaluation of Passive Reflectors for mmWave Private Networks", In IEEE International Symposium on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN), Boston, USA, July 2024.

[CW8] C. Arendt, S. Fricke, S. Böcker, C. Wietfeld, "Distributed Performance Evaluation of 5G and Wi-Fi for Private Industrial Networks", In IEEE Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC) - Workshop (WS12) on Industrial Wireless Networks, Valencia, Spain, September 2024.

[CW9] C. Arendt, S. Böcker, H. Schippers, C. Wietfeld, T. Ploch, M. Kuhn, V. Venjakob, S. Hunger, "Towards Future Industrial Connectivity: Evaluation of Private 5G and Wi-Fi Networks in Professional Industrial Environments", In 21st IEEE International Conference on Factory Communication Systems (WFCS), Rostock, Germany, June 2025.

[CW10] M. Danger, C. Arendt, H. Schippers, S. Böcker, N. Beckmann, R. Schmitt, C. Wietfeld, "6G Industrial Networks: Mobility-Centric Evaluation of Multi-cell mmWave Systems", In IEEE 101st Vehicular Technology Conference (VTC-Spring) Oslo, Norway, June 2025.

[CW11] S. Shafaei, M. Danger, C. Wietfeld et al., "Towards AI in 6G: Concepts, Techniques, and Standards", In IEEE Access, vol. 13, August 2025, DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3595752

[CW12] M. Danger, M. Khalili, S. Böcker, C. Wietfeld, "Improving Energy Efficiency of Industrial mmWave Connectivity with Context-Sensitive IRS Support", In IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), Istanbul, Türkiye, September, 2025.

Fachveranstaltungen

Des Weiteren wurden im Rahmen des Projekts verschiedene Demonstratoren auf mehreren Fachveranstaltungen präsentiert. Dazu gehörten sowohl die jährlichen 6G-Plattform Events als auch Fachmessen, wie die Hannover Messe, auf der Demonstratoren in Kooperationen mit dem 6GEM Projekt ausgestellt wurden.

Beim 6G-Plattform Event 2024 wurde zusammen mit den Projektpartnern Ericsson und Fraunhofer IPT ein Demonstrator präsentiert, der Forschungsergebnisse vorausgegangener, gemeinsamer Messreihen kleinskaliert und anschaulich zeigte (siehe Abbildung 23). Dabei wurde eine industrielle Anwendung am Beispiel eines Schweißroboters, welcher mithilfe des im 6G-ANNA Projekt beschafften Roboterarm abgebildet werden konnte, über das FR2 Band per Mobilfunk und mithilfe des STING Systems angebunden, um „Monitoring & Control“ zu ermöglichen. Durch den Einsatz eigens entwickelter passiver IRSs, sogenannte HELIOS Reflektoren, konnte gezeigt werden, dass auch in abgeschatteten Bereichen, wie dem modellierten Sicherheitskäfig einer Roboteranwendung, eine hohe Performance möglich ist.

Abbildung 23: Aufbau der TU Dortmund in Zusammenarbeit mit Ericsson und Fraunhofer IPT zur Demonstration einer energieautarken Funkumgebungsanpassung für nahtlose Konnektivität in herausfordernden Industrieumgebungen

Auf der 6G-Plattform Konferenz 2025 in Berlin wurde das STING Konzept weiterhin als Teil eines gemeinsamen Demonstrators mit Ericsson, dem Fraunhofer IPT und dem Lehrstuhl DSP der RWTH Aachen dargestellt. Der Demonstrator zeigte die konzeptionierte Interaktion zwischen einem digitalen Zwilling einer Produktionsanwendung und einem digitalen Netzwerkzwilling, dessen UE-seitige Grundlage das STING System darstellt (siehe Abbildung 24).

Abbildung 24: Gemeinsamer Demonstrator von Ericsson, Fraunhofer IPT, RWTH-DSP und der TU Dortmund auf der 6G-Plattform Konferenz 2025 in Berlin

Dabei wurde das STING System als Monitoringsystem verwendet, um die Funkumgebung zu überwachen. UE seitige Informationen aus dem STING System wurden mit KPIs der Zellseite

kombiniert, um Änderungen der Anbindungsqualität eines Fabrikmodells, welches reale industrielle Kommunikationsprotokolle abbildet, prädizieren zu können. Mit dem Demonstrator konnte dargestellt werden, dass durch die Kombination der Informationen aus beiden digitalen Zwillingen dynamisch auf Änderungen sowohl in der Anwendungsumgebung, als auch den Netzwerkbedingungen reagiert werden kann, um Engpässe zu verhindern und einen durchgängigen störungsfreien Betrieb zu realisieren.