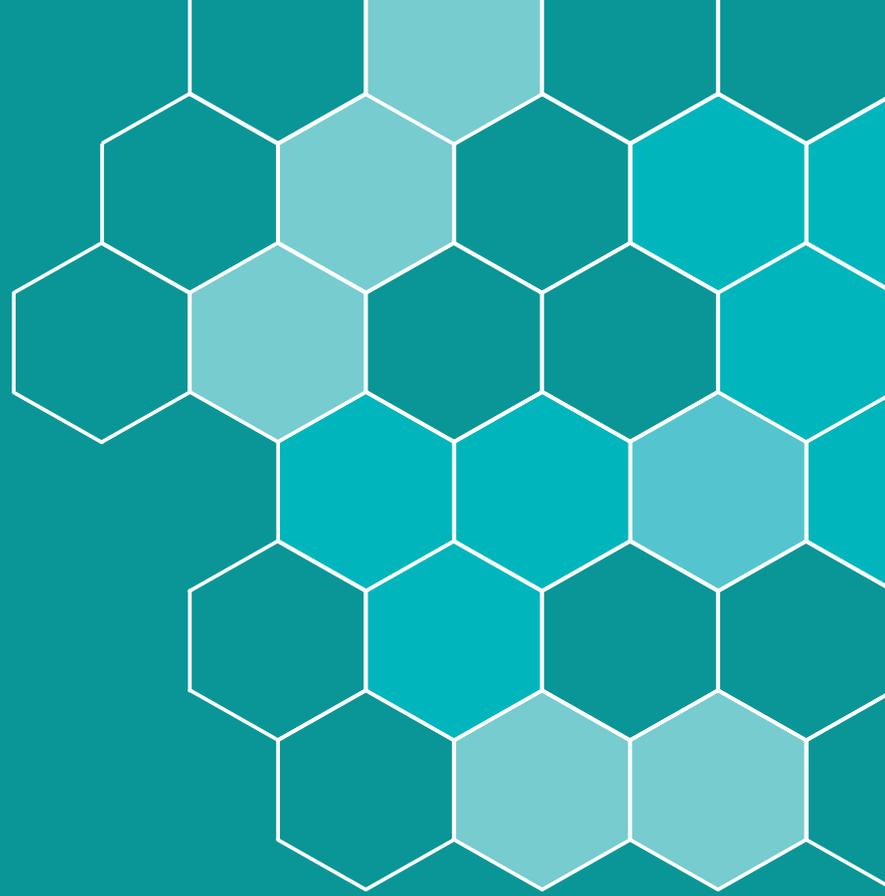


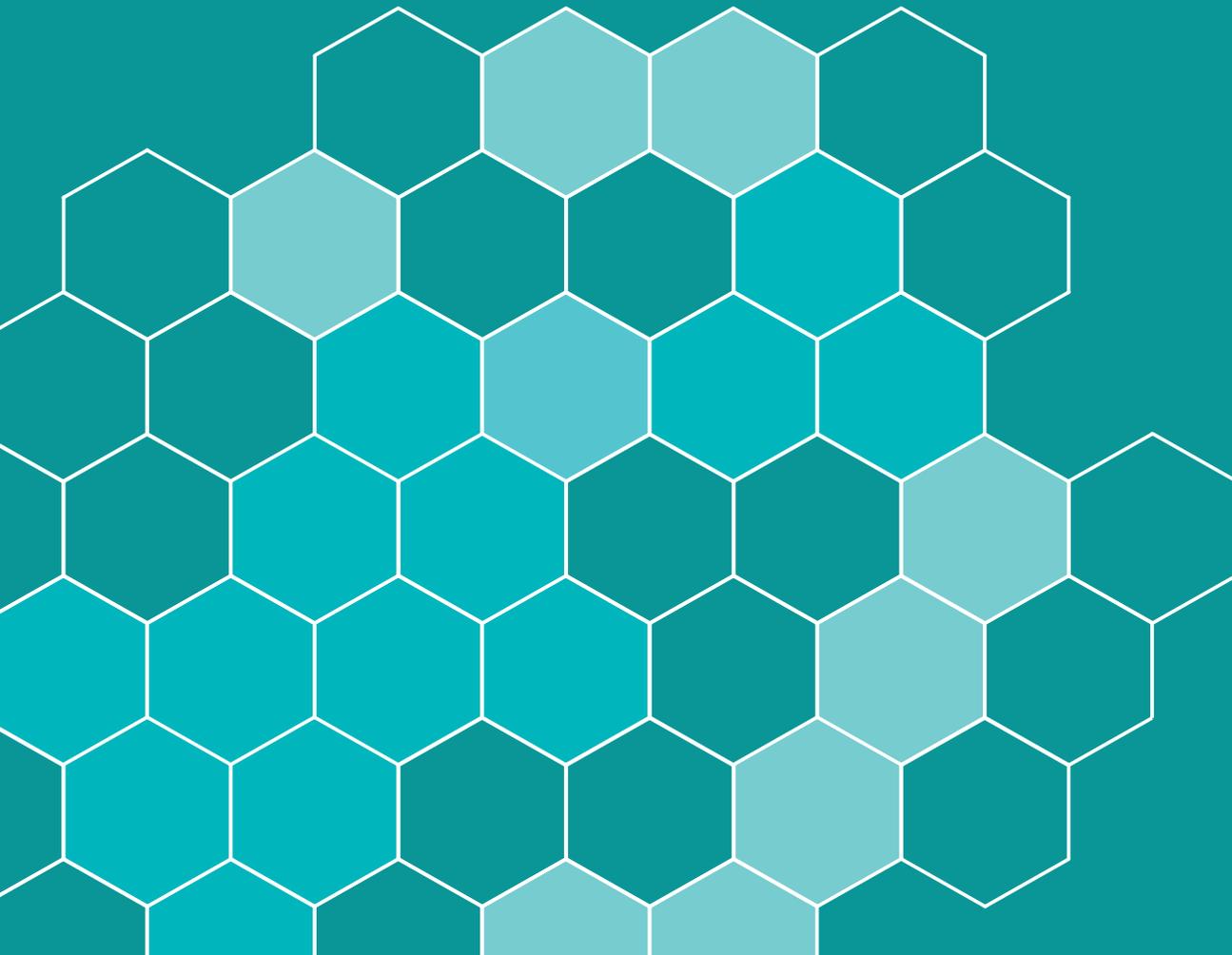


**5G.NRW**

Competence Center



**INTEGRIERTE LEISTUNGSBEWERTUNG  
PRODUKTIVER 5G-CAMPUSNETZE**



# IMPRESSUM

## Autoren:

Christian Arendt · Technische Universität Dortmund

Stefan Böcker · Technische Universität Dortmund

Lukas Stratmann · FIR e. V. an der RWTH Aachen

Murtaza Abbas · FIR e. V. an der RWTH Aachen

## Herausgeber:

FIR e. V. an der RWTH Aachen · 5G.NRW Competence Center · Technische Universität Dortmund

## Satz und Design:

Julia Quack van Wersch, M.A. · FIR e. V. an der RWTH Aachen

## Korrektur:

Simone Suchan, M.A. · FIR e. V. an der RWTH Aachen

## Bildnachweise:

S. 6: © denisismagilov – stock.adobe.com



Gefördert durch:

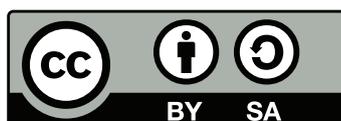


Lehrstuhl für Kommunikationsnetze  
Communication Networks Institute  
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Ministerium für Wirtschaft,  
Industrie, Klimaschutz und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen



## LIZENZBESTIMMUNGEN/COPYRIGHT



Open Access: Dieses Whitepaper wird unter der Creative-Commons-Lizenz Namensnennung – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht ([creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.de)).

© 2023

FIR e. V. an der RWTH Aachen

Campus-Boulevard 55

52074 Aachen

Tel.: +49 241 47705-0

E-Mail: [info@fir.rwth-aachen.de](mailto:info@fir.rwth-aachen.de)

[fir.rwth-aachen.de](http://fir.rwth-aachen.de)

Bitte die Publikation folgendermaßen zitieren:

Arendt, C.; Böcker, S.; Stratmann, L.; Abbas, M.: Integrierte Leistungsbewertung produktiver 5G-Campusnetze. FIR e. V. an der RWTH Aachen, Aachen 2023.



# INHALTSVERZEICHNIS

EXECUTIVE-SUMMARY .....	5
1 ERWEITERTES KONZEPT FÜR 5G.NRW-VOR-ORT-EXPERIMENTALPLATTFORM .....	7
2 KONTINUIERLICHE LEISTUNGSBEWERTUNG UND VERTEILTE LASTERZEUGUNG ALS ERWEITERTE 5G.NRW-VOR-ORT-PLANUNGSHILFE.....	9
2.1 STING-Systemübersicht: Lösung für engmaschige Überwachung von 5G-Anwendungsanforderungen.....	9
2.2 Einführung von Testverfahren .....	10
2.2.1 Single-User-Tests (abdeckungsgetrieben) .....	11
2.2.2 Multi-User-Tests (kapazitätsgetrieben) .....	11
2.3 Ausblick: Weitere STING-Einsatzmöglichkeiten.....	12
3 CASE-STUDYS: ERPROBUNG DES STING-SYSTEMS IM REALLABOR DER TU DORTMUND UND FELDUMGEBUNG DES 5G INDUSTRY CAMPUS EUROPE .....	14
3.1 Transferlabor TU Dortmund .....	14
3.2 5G Industry Campus Europe – DFA Demonstrationsfabrik Aachen GmbH .....	15
3.3 Ergebnisse Single-User-Tests .....	17
3.3.1 Receiver-Sensitivity .....	18
3.3.2 Ergebnisse Multi-User-Tests.....	18
4 ZUSAMMENFASSUNG .....	20
5 LITERATURVERZEICHNIS .....	21

## ANSPRECHPARTNER



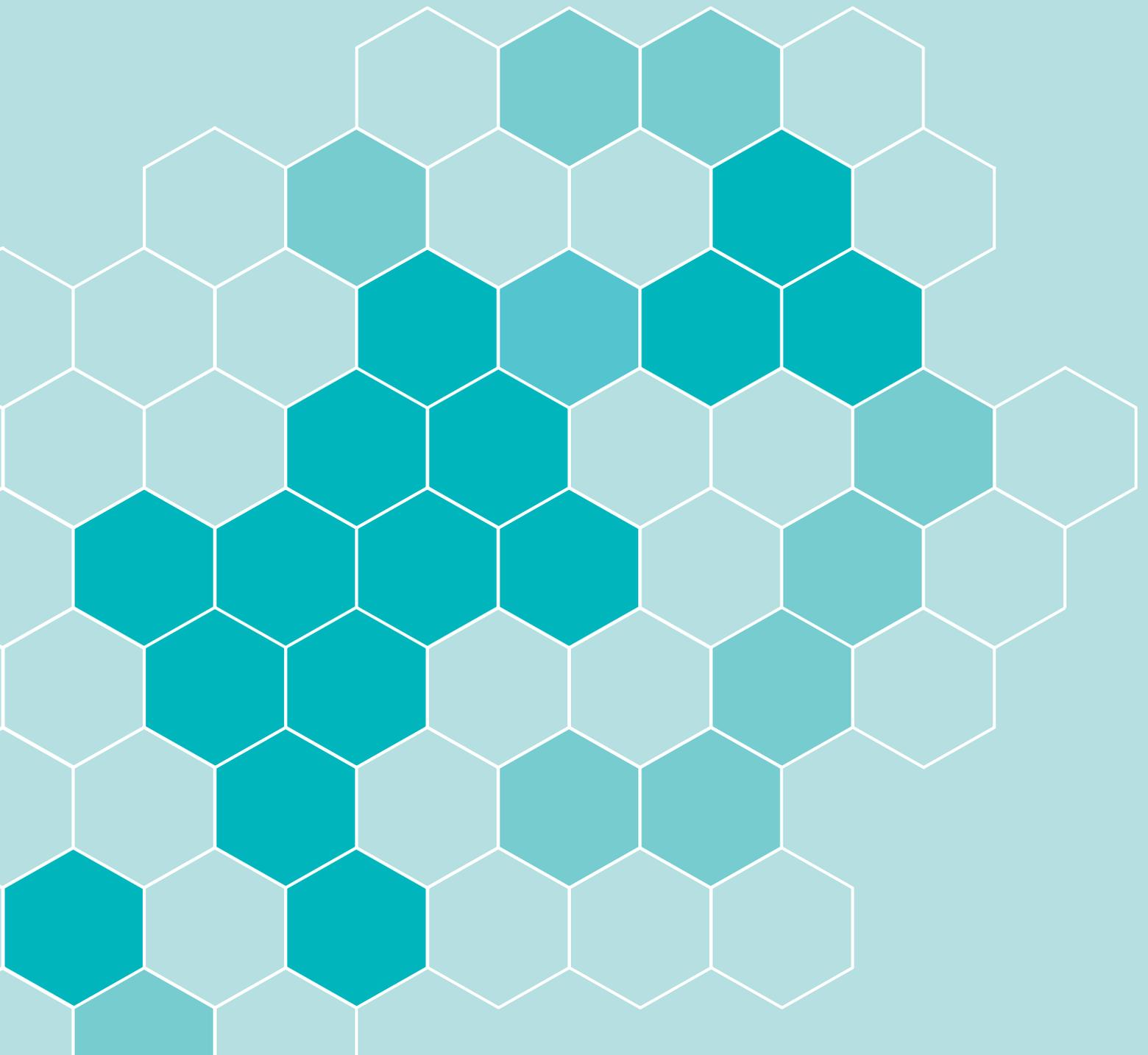
Lukas Stratmann, M.Sc.  
FIR e. V. an der RWTH Aachen  
Bereich Business Transformation  
Tel.: + 49 241 47705-317  
E-Mail: [Lukas.Stratmann@fir.rwth-aachen.de](mailto:Lukas.Stratmann@fir.rwth-aachen.de)



Oberingenieur  
Dipl.-Ing. Stefan Böcker  
Technische Universität Dortmund  
Lehrstuhl für Kommunikationsnetze  
Tel.: +49 231 755 7004  
E-Mail: [stefan.boecker@tu-dortmund.de](mailto:stefan.boecker@tu-dortmund.de)



**Der Betrieb lokaler privater Mobilfunknetze in lizenzierten Frequenzbändern ist eine der Kerninnovationen aktueller 5G- und zukünftiger 6G-Netze.**





## EXECUTIVE-SUMMARY

Der Betrieb lokaler privater Mobilfunknetze in lizenzierten Frequenzbändern ist eine der Kerninnovationen aktueller 5G- und zukünftiger 6G-Netze. Die prognostizierte Leistungsfähigkeit privat verfügbarer und störungsfreier Frequenzbereiche, wie z. B. privater 5G-Netze, sogenannter Campusnetze, ist für Industrieunternehmen oft von großem Interesse. Die Integration der 5G-Netzwerkinfrastruktur in bestehende Brownfield-Umgebungen muss jedoch erhebliche technische und Management-Herausforderungen überwinden. Im Vergleich zu selten anzutreffenden Greenfield-Szenarien kann das Potenzial von 5G nur gezeigt werden, wenn signifikante Leistungsvorteile gegenüber bestehender drahtloser Netzwerkinfrastruktur (z. B. Wi-Fi) nachgewiesen werden können und gleichzeitig eine nahtlose Integration in die Prozessumgebung in der Praxis gewährleistet werden kann.

Vor diesem Hintergrund stellt das *Competence Center 5G.NRW* in diesem Beitrag ein agiles System zur kontinuierlichen, netzwerkübergreifenden Überwachung von Ende-zu-Ende-Leistungsgarantien in Bezug auf Durchsatz, Latenz und Zuverlässigkeit vor. Während einzelne punktuelle Messungen während der Netzwerk-Inbetriebnahme und -Erprobung oft die erwarteten Leistungsspitzen anzeigen, untersucht dieser Beitrag speziell das Potenzial eines räumlich verteilten Stresstests, der die Netzwerkqualität aktiv und kontinuierlich während des Produktivbetriebs überwacht. Anhand einer umfangreichen Fallstudie wird die Leistungsfähigkeit des verteilten Ansatzes für die Leistungsbewertung von Mehrbenutzer- und Zellenrandumgebungen demonstriert.



010 10

0101 0110 010 1000

0101 0110 010 1

110 010 1000

0101

10 010 1000



# 1 ERWEITERTES KONZEPT FÜR 5G.NRW-VOR-ORT-EXPERIMENTALPLATTFORM

Im Rahmen der ersten CC5G.NRW-Projektphase hat die *TU Dortmund* eine mehrstufige Planungshilfe für den bedarfsgerechten Einstieg in das Thema der 5G-Campusnetze zur Durchführung entwickelt. Dabei bringt das mobile 5G-Labor der *TU Dortmund* als einzigartige 5G-Technologieplattform eine vollständige 5G-Netzlösung direkt in die Unternehmen. Dadurch wird Unternehmen ermöglicht, bereits in der Konzeptionierungsphase mit sehr niedriger Einstiegsschwelle, konkrete Erfahrungen mit den Leistungsmerkmalen von 5G in der späteren Zielumgebung zu sammeln<sup>1</sup>.

Ergänzend zum Angebot des bundesweit einzigartigen 5G-Campusnetzplaners<sup>2</sup> leistet das *Competence Center 5G.NRW* mit dem *5G.NRW Vor-Ort* einen konkreten Beitrag zu den wesentlichen Schritten in Richtung 5G-Campusnetz in mehreren Phasen (s. Bild 1).



Bild 1: Mehrphasiges Konzept zur Durchführung der 5G.NRW-Vor-Ort-Termine

## Aktivierungsphase: Vorgespräche und Konzeptentwicklung mit interessierten Unternehmen

In der Aktivierungsphase begleitet das Projektteam den industriellen Partner in Form von Vorgesprächen und einer Strategieentwicklung für die nachfolgenden Phasen. Je nach Erfahrung und Kenntnisstand des jeweiligen Unternehmens kann diese Phase erweitert werden und schließt Kurzschulungen und die Vermittlung verschiedener Anwendungsprofile sowie eine Schnittstellendefinition mit ein. Im Rahmen der erweiterten Aktivierung werden je nach Erfahrung und Fachkenntnis geeignete Anwendungsfelder identifiziert und in die Vorbereitung der Integration überführt. Hierbei werden passende Schnittstellen definiert, um im Sinne eines Retrofit-Ansatzes Geräte und Anlagen einer industriellen Brownfield-Umgebung des jeweiligen Unternehmens für die 5G-Anbindung zu ertüchtigen.

<sup>1</sup> [gigabitbuero.de/praxisbeispiel/das-mobile-5g-labor-der-tu-dortmund-eine-case-study](https://gigabitbuero.de/praxisbeispiel/das-mobile-5g-labor-der-tu-dortmund-eine-case-study)

<sup>2</sup> [5g.nrw/campusnetzplaner](https://5g.nrw/campusnetzplaner)

## 5G-Aktionstag: Durchführung des Vor-Ort-Termins inklusive Lösen möglicher Herausforderungen vor Ort innerhalb eines Tages

Im Anschluss an die vorbereitende Aktivierungsphase erfolgt am sogenannten Aktionstag die Einrichtung eines temporären 5G-Campusnetz-Reallabors innerhalb weniger Stunden. Dabei bietet das mobile 5G-Labor den Betrieb von Ende-zu-Ende-Mobilfunklösungen basierend auf unterschiedlichen kommerziellen privaten 5G-Infrastruktur-Plattformen, sowie je nach Zielsetzung quelloffener Software-Defined-Radio(SDR)- und Software-Defined-Networking(SDN)-Realisierungen, die eine bedarfsgerechte Anpassung an spezifische Anwendungsanforderungen ermöglichen. Durch die ergänzende Bereitstellung verschiedener 5G-Endgeräte-Typen und -Klassen ist ein flexibler und kurzfristiger Einsatz in beliebigen Anwendungsumgebungen möglich. Betrieben werden die Lösungen im dediziert für lokale 5G-Zellen zugewiesenen Frequenzbereich bei 3,7 Gigahertz (sog. 5G-Campusnetze)<sup>3</sup>.

Zusammenfassend ermöglicht der flexible Einsatz des mobilen 5G-Labors die Realisierung temporärer 5G-Campusnetz-Reallabore für an jeweils spezifische Industrieanforderungen angepasste Testräume bei gleichzeitig geringem Aufwand für den jeweiligen Industriepartner.

## Nachbereitung: Diskussion zur Aufbereitung und Sicherung der gesammelten Erfahrung und zur Definition und Vermittlung möglicher Handlungsempfehlungen für Unternehmen

In der Nachbereitungsphase werden die gesammelten Erfahrungen gesichert und aufbereitet. Darauf aufbauend werden Handlungsempfehlungen für den Betrieb ausgesprochen, um die Eintrittshürden so weit wie möglich zu senken.

---

<sup>3</sup> [www.bundesnetzagentur.de/lokalesbreitband](http://www.bundesnetzagentur.de/lokalesbreitband)





## 2 KONTINUIERLICHE LEISTUNGSBEWERTUNG UND VERTEILTE LASTERZEUGUNG ALS ERWEITERTE 5G.NRW-VOR-ORT-PLANUNGSHILFE

Mit dem 5G.NRW-Vor-Ort-Angebot und dem 5G-Campusnetzplaner leistet das *Competence Center* seit Projektbeginn einen Beitrag für den Erfolg regionaler und lokaler 5G-Netzlösungen. Dabei dient es bisher insbesondere als Ansprechpartner für Unternehmen, welche besonders bei der ersten Anbahnung und dem Aufzeigen individueller technischer Möglichkeiten im Hinblick auf die Nutzung von 5G-Technologien Unterstützung benötigen.

In der zweiten Projektphase erweitert das Team des *Competence Centers* 5G.NRW die 5G.NRW-Vor-Ort-Planungshilfe um ein System für kontinuierliche Leistungsbewertung und verteilte Lasterzeugung, welches im Ergebnis eine eingängige Bestimmung von 5G-Campusnetz-Systemgrenzen im Vergleich zu Kommunikationslösungen ermöglicht (z. B. Wi-Fi 6). Hintergrund ist, dass sich das Potenzial von 5G insbesondere für Brownfield-Szenarien in der Praxis nur dann ausprägen kann, wenn signifikante Leistungsvorteile gegenüber existierenden drahtlosen Netzinfrastrukturen nachgewiesen werden können und dabei gleichzeitig eine nahtlose Integration in die Industrie-4.0-Prozesslandschaft möglich ist.

Vor diesem Hintergrund bringt die *TU Dortmund* ein bestehendes, technologieunabhängiges System zur verteilten Lasterzeugung<sup>4</sup> ein und erweitert dieses mit Blick auf den Einsatz im Rahmen der 5G.NRW-Vor-Ort-Potenzial- und Anforderungsanalysen. Eine 5G-spezifische Systemausprägung zur verteilten Lasterzeugung<sup>5</sup> ermöglicht im Rahmen der 5G.NRW-Vor-Ort-Planungshilfe folglich auch räumlich verteilte Stresstests, mit denen die Netzqualität kontinuierlich aktiv überwacht und bewertet werden kann. Durch eine ergänzende enge Wechselwirkung mit dem 5Guarantee-Projekt<sup>6</sup> können neben systematischen, anwendungslosen Testverfahren auch industrie-/produktionsspezifische Anwendungsszenarien berücksichtigt werden.

In unterschiedlichen Facetten soll das so getaufte STING<sup>6</sup> (*Spatially distributed Traffic and Interference Generation*)-Konzept ein kontinuierliches Monitoring und zentral gesteuerte Lastgeneration ermöglichen. Ziel ist es zum einen, dass die Einhaltung erforderlicher Anwendungsanforderungen engmaschig überwachbar wird. Zum anderen ermöglicht das STING-System einen kritischen Abgleich beworbener 5G-Potenziale (Marketingversprechen) mit in der industriellen Praxis erreichbaren Werten.

### 2.1. STING-Systemübersicht:

#### Lösung für engmaschige Überwachung von 5G-Anwendungsanforderungen

Das STING-System besteht aus zwei Hauptteilen, wie in Bild 2 (s. S. 10) dargestellt. Einem zentralen Verwaltungs- und Kontrollsystem und den verteilten Endgeräten, die für die Verkehrserzeugung verwendet werden und in den folgenden Abschnitten kurz beschrieben werden. Diese Einheiten können mit unterschiedlichen und vielfältigen Netzinfrastrukturen verwendet werden.

---

<sup>4</sup> s. KAULBARS ET AL. 2015, S. 1

<sup>5</sup> s. ARENDT ET AL. 2022, S. 2

<sup>6</sup> [5g.nrw/best-practice/5guarantee](https://5g.nrw/best-practice/5guarantee)

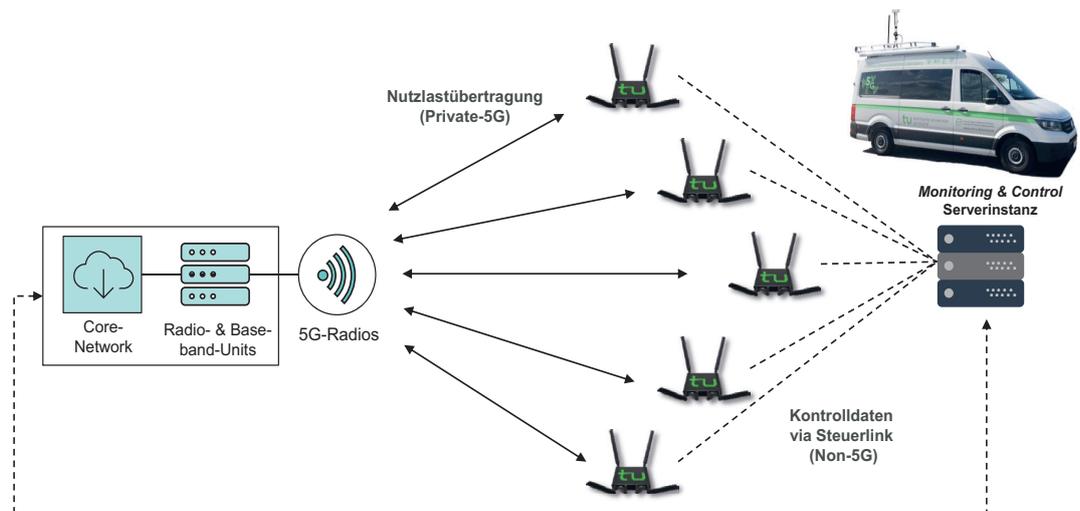


Bild 2: STING – Übersicht verteiltes Last- und Kontrollsystem-Konzept (eigene Darstellung)

## 1) Monitoring- & Control-Serverinstanz

Der zentrale Server des Systems fungiert als Gegenstück zu den Endgeräten für die Verkehrserzeugung. Das System wird über eine Webschnittstelle auf dem zentralen Server konfiguriert, in der die Verkehrsparameter festgelegt werden. Die Konfigurationen werden dann über das Message-Queuing-Telemetry-Transport(MQTT)-Protokoll an die Endgeräte verteilt. Leistungsmetriken über die Übertragungen werden dann zurück an den Server gespiegelt und in einer Datenbank zur weiteren Analyse gespeichert. Dieser Kontrollverkehr wird über ein alternatives Netzinterface oder zeitlich separat zu den Tests durchgeführt, um diese nicht zu beeinflussen. Auf diese Weise können lokale oder globale Mängel einer Netzinfrastruktur ermittelt und behoben werden, bevor eine eigentliche Anwendung implementiert wird.

## 2) Verteilte STING-Endgeräte

Die Endgeräte basieren auf einem auf Netzwerkanwendungen spezialisierten Embedded-PC, der die Verwendung verschiedener Netzwerkadapter in Form von M.2-Modulkarten ermöglicht. In der später/ im weiteren Verlauf dargestellten Fallstudie wird ein Quectel-RM500Q-GL 5G-Modem verwendet. Die Geräte können in einem verteilten Testszenario, z. B. einer Fertigungshalle, eingesetzt werden und den Verkehr einer oder mehrerer Zielanwendungen emulieren. Leistungskennzahlen wie Durchsatz oder Latenz des aufgebauten Verkehrsflusses werden über ein Wi-Fi-Interface zur Echtzeitauswertung an die Serverinstanz übertragen.

Ein mögliches Einsatzgebiet des STING-Konzepts ist die holistische Leistungsbewertung auf Basis systematischer Testverfahren, die den Fokus dieses Whitepapers darstellt. In verschiedenen Schritten, die im folgenden Kapitel beschrieben werden, kann so die Leistungsfähigkeit der vorliegenden Netzwerkinfrastruktur belastbar und unter verschiedenen Begebenheiten bewertet werden, bevor verschiedene anwendungsbezogene Testmöglichkeiten durchgeführt werden können.



## 2.2 Einführung von Testverfahren

In diesem Abschnitt werden systematische Testverfahren vorgestellt, die zur Leistungsbeurteilung einer bestehenden Netzinfrastruktur dienen und einen ersten Schritt zur Planung realer Anwendungen darstellen.

Dazu zeigt Bild 3 die schematische Darstellung eines möglichen Testablaufs, welcher die Basis für die im weiteren Verlauf dargestellten Fallstudien am 5G-Industry-Campus-Europe in Aachen sowie am Campus der *TU Dortmund* darstellt.

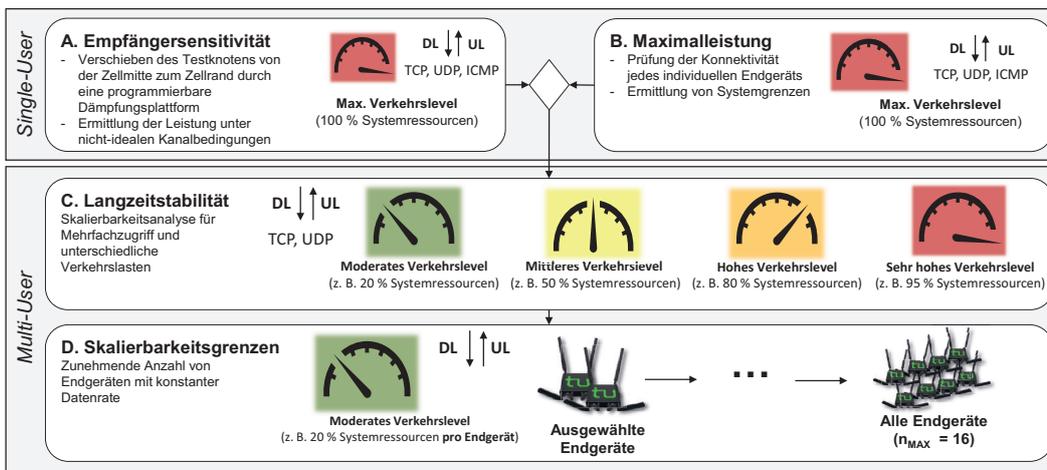


Bild 3: Überblick über systematische Testverfahren zur Anwendung mit dem STING-System (eigene Darstellung)

Die einzelnen Testverfahren werden im Folgenden motiviert und beschrieben.

### 2.2.1. Single-User-Tests (abdeckungsgetrieben)

Die Leistungstests für Einzelbenutzer:innen gliedern sich in zwei Abschnitte: Zunächst wird die Empfängersensitivität untersucht, indem unter Zuhilfenahme einer programmierbaren Dämpfungsmatrix eine 1-zu-1-Kommunikation zwischen einem Endgerät und der Basisstation kontrolliert gedämpft wird. Dies dient dazu, das Verhalten des Systems bei Verschlechterung der Kanaleigenschaften zu bewerten. Eine schematische Darstellung dieses Aufbaus ist in Bild 11 (s. S. 18) gemeinsam mit exemplarischen Ergebnissen dargestellt.

Im zweiten Schritt wird ein Test unter maximaler Verkehrslast mit allen Endgeräten durchgeführt, um sicherzustellen, dass alle Endgeräte betriebsbereit sind und um eine erste Einschätzung der Netzkapazität für die Dimensionierung der anspruchsvolleren Tests zu erhalten.

Bei diesem Verfahren erzeugen alle installierten Knoten nacheinander TCP-Verkehr sowohl in Uplink- als auch in Downlink-Richtung, gefolgt von UDP-Verkehr in beide Richtungen. Das Verkehrsaufkommen sollte so hoch sein, dass die maximale Kapazität des Kanals für einen Benutzer:in erreicht wird, was die maximale Systemleistung angibt. Dieser Wert wird dann für die Dimensionierung des Verkehrs in den folgenden Testsequenzen verwendet.

### 2.2.2. Multi-User-Tests (kapazitätsgetrieben)

Im Anschluss an die Single-User-Tests, bei denen nur einzelne Endgeräte gleichzeitig aktiv sind, werden in den Multi-User-Testverfahren mehrere Endgeräte gleichzeitig verwendet. Dies dient der Untersuchung des Einflusses von Mehrfachzugriffseffekten auf die Leistungsfähigkeit des Netzes.

Auch diese Testverfahren werden zweistufig durchgeführt. Zunächst werden anhand der im Single-User-Test ermittelten Maximalleistung anteilige Laststufen definiert. Diese werden auf die aktiven Endgeräte verteilt, sodass die Ressourcenbelegung der Endgeräte in Summe der Laststufe entspricht (in diesem Fall 20 Prozent, 50 Prozent, 80 Prozent und 95 Prozent der Maximalauslastung). Dadurch wird die Stabilität des Systems unter konstanter Last bewertet.

Die zweite Stufe dient der Untersuchung des Systems bei Überschreitung der Kapazitätsgrenzen. Dazu wird eine feste Last pro Endgerät definiert, und die Anzahl aktiver Endgeräte im Laufe des Tests sukzessive erhöht. Dadurch kann bewertet werden, wie fair die zur Verfügung stehenden Kapazitäten im Falle einer Überlast verteilt werden. Des Weiteren erlaubt dies den Test intelligenterer Priorisierungsverfahren, wenn die geplanten Anwendungen dies erfordern.

### 2.3. Ausblick: Weitere STING-Einsatzmöglichkeiten

Die flexible dezentrale Struktur des Systems ermöglicht es, verschiedene Schritte in der Leistungsbewertung von Netzwerkinfrastruktur durchzuführen, die zusammenfassend in Bild 4 dargestellt sind. Neben der in diesem Beitrag vorgestellten systematischen Leistungsbewertung von 5G-Campusnetzen (*Test-Systematische Leistungsbewertung*), unterstützt STING zusätzlich Verfahren zur Emulation realer Kommunikationscharakteristiken (*Scale*) und Stress-tests für Real-Anwendungen (*Challenge*).

#### *Scale* – Emulation realer Kommunikationscharakteristiken

Die STING-Plattform ermöglicht zusätzlich zur generischen Verkehrserzeugung die Emulation realer Anwendungen und Nutzungsprofile. Dadurch kann eine zu untersuchende Anwendung über die Emulation weiterer Verkehrsströme virtuell hochskaliert werden, bevor diese real umgesetzt wird. Dieses Vorgehen unterstützt so eine angemessene Entscheidungsfindung darüber, ob die angestrebten Anwendungsfälle mit einer gegebenen Netzkonfiguration auch unter hoher Last erreicht werden können. Jedes Endgerät kann als eine oder mehrere reale Anwendungen fungieren. Der Verkehrserzeugungsprozess ist modular aufgebaut, sodass verschiedene Arten von Verkehrsprozessen sequenziell oder parallel ablaufen können. Streaming-Datenverkehr wird mit einem Open-Source-Verkehrsgenerator emuliert, während stochastische Datenübertragungen anhand der ihnen zugrunde liegenden Verkehrscharakteristiken erzeugt werden. Um den realen Anwendungsverkehr nachzubilden, ist es möglich, einen zuvor aufgezeichneten Datenverkehrsstrom vielfach abzuspielen oder als Grundlage für stochastischen Verkehr mit denselben Eigenschaften zu verwenden<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> s. MÜLLER ET AL. 2022, S. 4

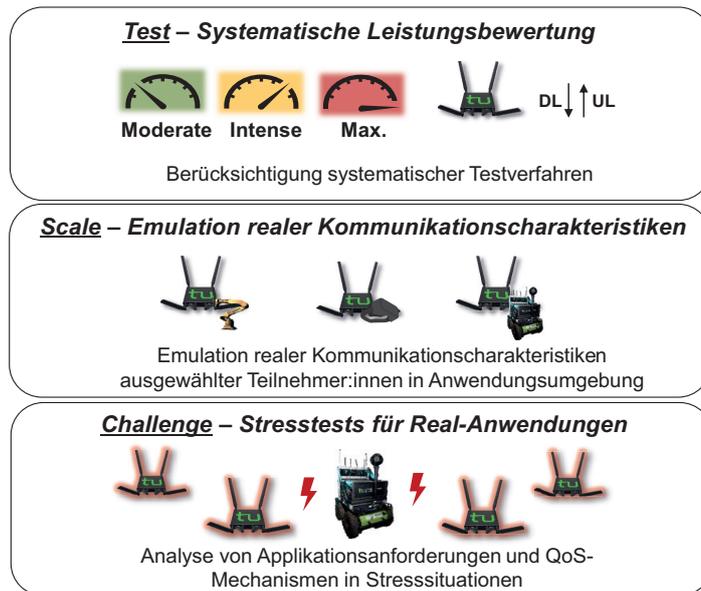


Bild 4: Übersicht STING-Einsatzvarianten (eigene Darstellung)

## Challenge–Stresstests für Real-Anwendungen

Insbesondere für kritische, sicherheitsrelevante Anwendungen ist es essenziell, Störungen (Interferenz) und Konkurrenzeffekte (Vielfachzugriff) innerhalb der eigenen Netzinfrastruktur mitzudenken. Die STING-Plattform liefert eine Möglichkeit, Störverkehr verschiedener Natur zu generieren und die Resilienz einer Anwendung dahingehend zu testen<sup>8</sup>. Dieser Störverkehr kann, wie zuvor beschrieben, systematisch oder aber anhand realer, parallel zu betreibender Dienste modelliert werden. Dies ermöglicht es, die Robustheit einer Anwendung gegenüber herausfordernder Kommunikationseigenschaften zu untersuchen und ggf. zu optimieren.

<sup>8</sup> s. ARENDT ET AL. 2021, S. 5

### 3 CASE-STUDYS: ERPROBUNG DES STING-SYSTEMS IM REALLABOR DER TU DORTMUND UND FELD-UMGEBUNG DES 5G INDUSTRY CAMPUS EUROPE

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags wurden Testkampagnen in einer 5G-New-Radio-Stand-alone(SA)-Campusnetzlösung im Transferlabor der *TU Dortmund* sowie einer 5G-New-Radio-Non-Stand-alone(NSA)-Campusnetzlösung in der anwendungs- und produktionsnahen *Demofabrik* des *FIR* auf dem *5G Industry Campus Europe* in Aachen durchgeführt. Nach einer kurzen Testfeld-Einführung werden im Folgenden die erzielten Ergebnisse diskutiert.

#### 3.1. Transferlabor *TU Dortmund*

Der Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der *TU Dortmund* verfügt neben dem bereits eingeführten mobilen 5G-Labor zusätzlich über ein kontinuierlich erweitertes Mobilfunklabor<sup>9</sup> mit umfangreichem stationärem Laborequipment, in dem Kommunikationsnetze verschiedenster drahtloser Technologien in einer kontrollierten und realistischen Umgebung betrieben und auf ihre Leistungsfähigkeit hin untersucht werden können.

Das Multi-Technology-Networking-Lab bietet umfangreiche Möglichkeiten zur Funknetz-emulation, zu reproduzierbaren Messungen sowie zu einer betreiber- und herstellerunabhängigen Auswertung. Komplexe Funkumgebungen können, motiviert durch anwendungsorientierte Forschungsthemen, in vielseitigen Laborsettings (Software/Hardware-in-the-Loop, Kanalemulation etc.), zum Beispiel in Vorbereitung auf umfangreiche Feldtests, evaluiert werden. In Erweiterung der Laborumgebung hat die *TU Dortmund* die Möglichkeit, über eine exponierte Outdoor-Testing-Site auf dem Campus großflächig einen professionellen Mobilfunkbetrieb zu realisieren und verfügt dazu über die notwendigen Frequenzuteilungen seitens der Bundesnetzagentur für private LTE- und 5G-Netze (3,7 und 26 Gigahertz) sowie Low-Power-Wide-Area(LPWAN)-Systeme in unlizenziierten Frequenzbändern.

Ergänzend kann der Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der *TU Dortmund* auf ein Transferlabor in einer etwa 300 Quadratmeter großen Anwendungshalle zugreifen, um ausgedehnte Experimentalumgebungen, z. B. mit Mobilitätsanforderungen im Robotikkontext, zu realisieren. In diesem in Bild 5 illustrierten Transferlabor wurden insgesamt 16 verteilte STING-

<sup>9</sup> [cni.etit.tu-dortmund.de/research/cni-laboratories](http://cni.etit.tu-dortmund.de/research/cni-laboratories)

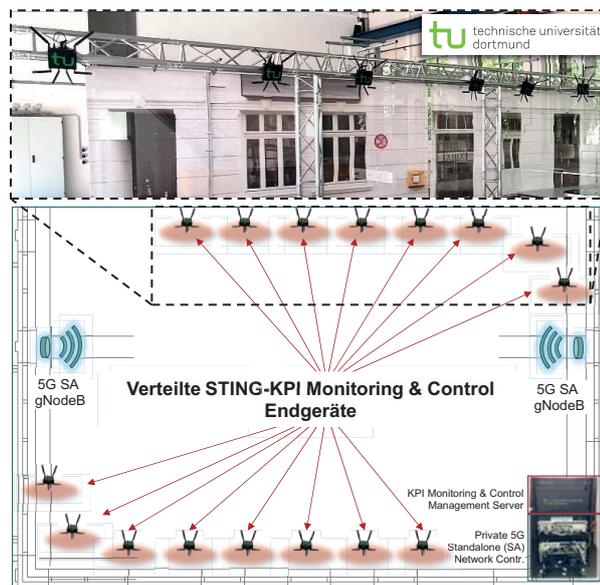


Bild 5: Deployment des STING-Systems im Transferlabor der *TU Dortmund*



Endgeräte für die Leistungsbewertung einer 5G-New-Radio-Campusnetzlösung eingesetzt. Die Konfiguration der Campusnetzlösung ist den folgenden Abschnitten der vergleichenden Leistungsbewertung zu entnehmen.

### 3.2. 5G Industry Campus Europe – DFA Demonstrationsfabrik Aachen GmbH

Der 5G Industry Campus Europe ist eine Forschungsinfrastruktur auf dem Campus Melaten der RWTH Aachen und dient dazu, industrielle 5G-Anwendungen in der Produktion und Mobilität in vorwettbewerblichen Projekten zu entwickeln und zu testen. Dazu zeichnet sich der Campus durch zwei Faktoren aus: eine vollständige 5G-Infrastruktur, die bereits 2020 installiert wurde, und die Kooperation von den drei Produktionsforschungsinstituten Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen und FIR e. V. an der RWTH Aachen. Netzausrüster ist Ericsson, die Hardwarekomponenten und einen kontinuierlichen Service liefern. Die Installation umfasst Indoor-Netze in den Maschinenhallen der beteiligten Institute sowie ein Outdoor-Netz, das die Freiflächen auf dem Campus Melaten ausleuchtet (s. Bild 6). Das Non-Stand-alone-Netz wurde technisch mit einem 4G-Ankerband bei 2,3 Gigahertz und einem 5G-Netz mit 60 Megahertz Bandbreite im Frequenzbereich 3,7 bis 3,8 Gigahertz (Band n78) realisiert.

Die betrachteten Tests wurden in der Produktionshalle der Demofabrik Aachen (DFA) durchgeführt, die baulich direkt an das FIR an der RWTH Aachen anschließt. Die DFA wurde im Jahr 2012 mit dem Ziel gegründet, den Forschungsinstituten des RWTH Aachen Campus eine Möglichkeit zur Prototypisierung und Umsetzung seiner anwendungsorientierten Forschung zur Verfügung zu stellen. Dazu bietet die DFA eine fortschrittliche, digitale Infrastruktur in einer vollständigen Produktionsumgebung, das neben dem 5G-Netzwerk auch eine Wi-Fi-6-Infrastruktur umfasst. Bisher wurden über 30 innovative Usecases mit über 50 führenden Industrieunternehmen in der DFA entwickelt.

Das Hallenlayout folgt einem wertstromoptimierten Aufbau, der mit dem Logistikbereich (Bild 7 oben rechts) beginnt und über den metallverarbeitenden Bereich (Bild 7 unten rechts und Mitte, s. S. 16) zum Montagebereich (Bild 7 unten links, s. S. 16) führt. Zusätzliche Bereiche beinhalten Forschungsdemonstratoren (oben links) und einen Schweißbereich (oben Mitte). Die Halle wird durch einen zentralen Gang, an dessen Ende sich jeweils Industrietore befinden, getrennt. Wie in Bild 7 (s. S. 16) zu sehen, wurde der zentrale Gang für den Aufbau



Bild 6: Panorama des 5G Industry Campus Europe auf dem Campus Melaten der RWTH Aachen mit Visualisierung der 5G-Abdeckung und Antennenplatzierung  
(Quelle: [5g-industry-campus.com/infrastructure](https://5g-industry-campus.com/infrastructure))



Bild 7: Hallenplan und Positionierung der STING-Devices (eigene Darstellung)

der STING-Devices genutzt, um die besten Messergebnisse der 5G-Radio-Dots zu erhalten, die an den äußeren, tragenden Säulen der Industriehalle installiert sind.

Bild 8 zeigt Impressionen dieses Aufbaus. Das mobile 5G-Labor der TU Dortmund (oben links) dient als zentrale Monitoring- & Steuereinheit der Versuche. Die STING-Endgeräte (oben rechts) wurden wie beschrieben in der zu untersuchenden Umgebung verteilt (unten rechts) und ermöglichen bei Bedarf durch einen möglichen Akkubetrieb auch einen flexibel mobilen und zeitweise unabhängigen Betrieb von stationärer Stromversorgung (unten links). Das STING-System wurde folglich dazu eingesetzt, den in Kapitel 2.2 beschriebenen systematischen Testablauf durchzuführen, um eine umfassende Leistungsbewertung der jeweils verbauten 5G-Infrastruktur erzielen zu können.



Bild 8: Mobiles 5G-Labor der TU Dortmund und Deployment des STING-Systems in Demofabrik am 5G Industry Campus Europe, Aachen



### 3.3. Ergebnisse Single-User-Tests

Die Bilder 9 und 10 illustrieren den erreichten Durchsatz sowohl für das TCP- als auch für das UDP-Protokoll und sowohl in Uplink- als auch in Downlink-Richtung für alle STING-Endgeräte im NSA-Netz in Aachen (s. Bild 9) sowie im SA-Netz in Dortmund (s. Bild 10). Die erreichten Spitzendatenraten liegen bei etwas über 600 Megabit/Sekunde in Downlink-Richtung und etwa 50 Megabit/Sekunde in Uplink-Richtung (NSA, 60 Megahertz), bzw. 500 Megabit/Sekunde Downlink und 90 Megabit/Sekunde Uplink (SA, 50 Megahertz). Daran wird der höhere Uplink-Fokus in der SA-Netzkonfiguration deutlich, was sich insbesondere in der Wahl des Time-Division-Duplex(TDD)-Patterns begründet. Die Differenz zwischen Uplink- und Downlink-Datenrate in beiden Zellen erklärt sich neben dem TDD-Pattern außerdem durch die nutzbare Multiple-Input-Multiple-Output(MIMO)-Konfiguration der Antennen. Im Uplink unterstützen beide Systeme 2x2 MIMO, während im Downlink 4x4 MIMO möglich ist.

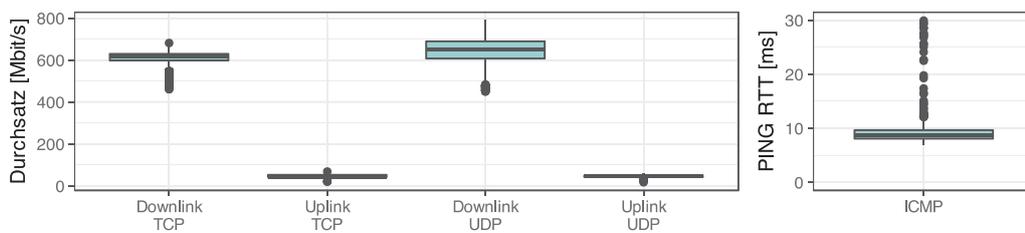


Bild 9: Durchsatz und Paketumlaufzeit im 5G-NSA-Netz in Aachen (60 Megahertz Bandbreite) (eigene Darstellung)

Diese Raten werden als Basis für die folgenden Multi-User-Tests verwendet. Im rechten Teil ist jeweils das Ergebnis eines Ping-Tests für alle STING-Endgeräte dargestellt, der eine typisch niedrige Round-Trip-Time (RTT) von durchschnittlich kleiner als 18 Millisekunden zeigt.

Ausgehend von den Ergebnissen der Single-User-Tests werden im Folgenden aggregierte und normierte Ergebnisse diskutiert, da die Charakteristik beider Systeme sehr ähnlich ausfällt.

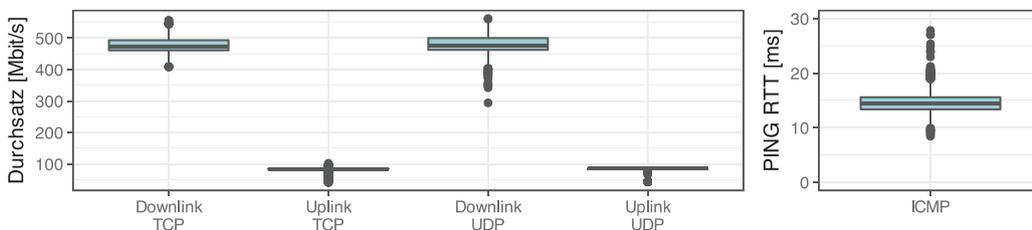


Bild 10: Durchsatz und Paketumlaufzeit im 5G-SA-Netz in Dortmund (50 Megahertz-Bandbreite, DDSU TDD-Pattern) (eigene Darstellung)

### 3.3.1. Receiver-Sensitivity

Bild 11 zeigt die Leistung eines Knotens unter abnehmenden Kanalbedingungen. Unter Verwendung der zuvor in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Kanalmatrix wurde eine zusätzliche Dämpfung auf die Übertragungswege vor den UE-Antennen angewendet.

Es ist zu erkennen, dass die erreichbare Datenrate mit höherer Dämpfung erwartungsgemäß abnimmt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das System ein robusteres Modulations- und Codierungsverfahren (MCS) wählt, um trotz der abnehmenden Kanalqualität eine möglichst zuverlässige Kommunikation anbieten zu können. Bei Erreichen einer zusätzlichen Dämpfung von 57 Dezibel wurde die Verbindung unterbrochen.

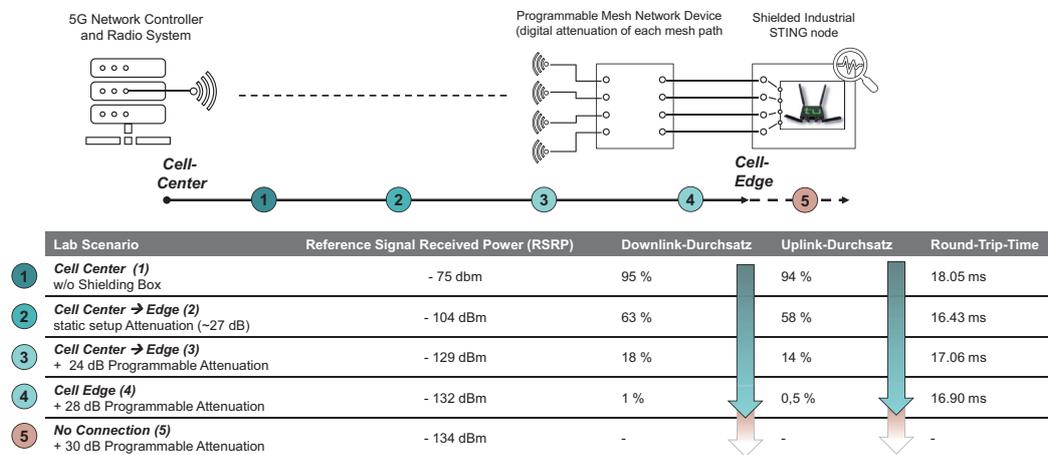


Bild 11: Virtuelle Erhöhung der Distanz zwischen Basisstation und Endgerät

### 3.3.2. Ergebnisse Multi-User-Tests

Bild 12 illustriert die Ergebnisse der Langzeitstabilitätstests, wobei die Ergebnisplots in der ersten Diagrammzeile den individuellen Anteil am Durchsatz ausweisen, den jedes STING-Endgerät im Multi-User-Test erzielt. Die untere Diagrammzeile illustriert davon ausgehend jeweils die aggregierte Systemauslastung aller 16 STING-Endgeräte. Im Folgenden wird die vergleichende Leistungsanalyse ausgehend von den UDP-Testreihen diskutiert.

Es ist zu erkennen, dass alle Geräte über alle Zustände der Zielsystemauslastung hinweg einen sehr stabilen individuellen Durchsatz erreichen. Selbst bei einer Annäherung an die Gesamtsystemkapazität von bis zu 95 Prozent sinkt die Gesamtleistung bei einer konstanten Last über 10 Minuten nicht.

Das Verhalten der Systeme bei Überschreitung ihrer maximalen Kapazität ist in Bild 12 (s. S. 19) dargestellt. Auch hier ist in der oberen Zeile der individuelle Anteil am Durchsatz und unten die aggregierte Systemauslastung dargestellt. Die x-Achse zeigt jedoch die Anzahl der aktiven STING-Endgeräte, alle mit einem konstanten Nutzdatenverkehr von 20 Prozent in beiden Richtungen.

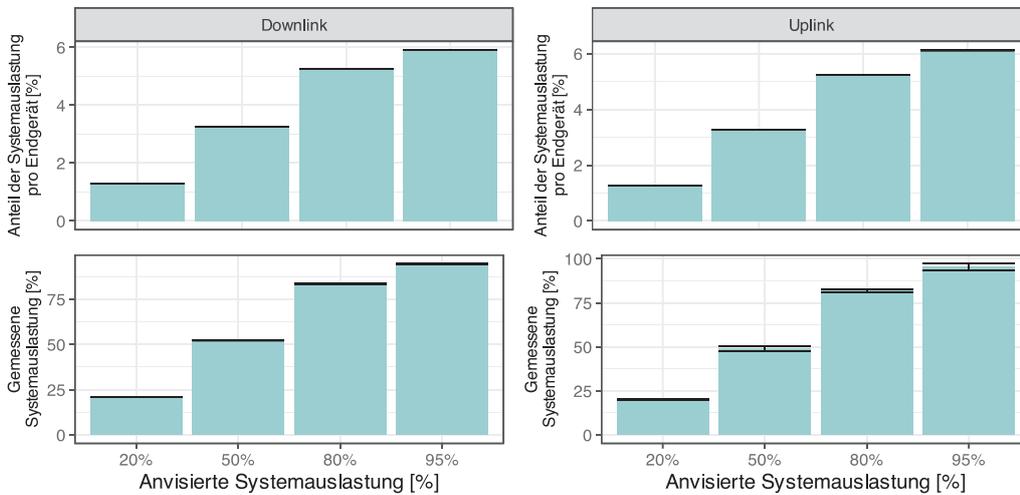


Bild 12: Ergebnisse des Multi-User-Stabilitätstests (eigene Darstellung)

Bei zwei und vier aktiven STING-Endgeräten ist das Verhalten ähnlich wie in Bild 11 (s. 18), da alle Geräte ihren Zieldurchsatz erreichen und die aggregierte Systemauslastung unter der Gesamtkapazität des Systems bleibt. Mit zunehmender Anzahl aktiver Geräte wird jedoch die Systemkapazität erreicht und überschritten. Dies führt erwartbar zu einer Verringerung des Durchsatzes der einzelnen STINGs. Ein Blick auf die Streuung der Auslastung zeigt, dass der Durchsatz aller Geräte gleichmäßig sinkt und kein Gerät völlig verdrängt wird.

Die hier diskutierten Ergebnisse deuten damit auf einen stabilen und zuverlässigen Betrieb der betrachteten Campusnetzlösungen hin. Unterhalb der Systemkapazität sind auch bei hoher Auslastung keine Einschränkungen zu erwarten. Bei Erreichen der Kapazitätsgrenze werden die verfügbaren Ressourcen fair aufgeteilt, was den gewünschten Betrieb für ein System ohne Priorisierung darstellt.

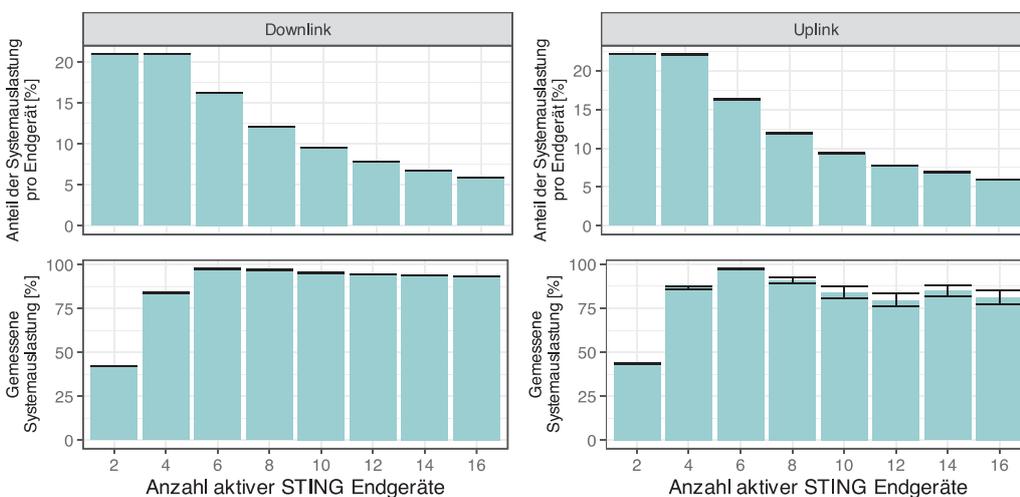


Bild 13: Ergebnisse des Multi-User-Skalierbarkeitstests (eigene Darstellung)

## 4 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Whitepaper wurde mit dem STING-System ein verteiltes Testsystem vorgestellt, welches im Rahmen von 5G.NRW-Vor-Ort-Terminen unterstützend für die Planung und Dimensionierung von Campusnetzen sowie die Leistungsbewertung und Durchführung von Stress-Tests existierender Infrastruktur und Anwendungen verwendet werden kann. Der hier dargestellte Fokus liegt auf privaten 5G-Netzwerken; die modulare Umsetzung des STING-Systems ermöglicht jedoch, verschiedene Technologien (vergleichend) zu analysieren.

Zusätzlich wurde ein Ansatz für systematische Testverfahren vorgestellt, die eine umfassende Bewertung einer Netzwerkinfrastruktur in einem mehrstufigen Prozess von Single- und Multi-User-Tests ermöglichen.

Exemplarische Ergebnisse aus Fallstudien am Campus der *TU Dortmund* sowie der Demofabrik des *5G Industry Campus Europe* in Aachen zeigen einen wünschenswerten, stabilen Betrieb in Multi-User-Szenarien, wenn die Systemauslastung unterhalb der maximalen Netzwerkkapazität gehalten wird. Bei Annäherung an die maximale Kapazität und deren Überschreitung werden die Leistungseinbußen gleichmäßig auf alle Endgeräte verteilt.



## 5 LITERATURVERZEICHNIS

ARENDR, C.; PATCHOU, M.; BÖCKER, S.; TIEMANN, J.; WIETFELD, C.: Pushing the Limits: Resilience Testing for Mission-Critical Machine-Type Communication. In: 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC-Fall), Virtual Event, September 2021. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9625209> (Link zuletzt geprüft: 31.01.2023)

ARENDR, C.; BÖCKER, S.; BEKTAS, C.; WIETFELD, C.: Better Safe Than Sorry: Distributed Testbed for Performance Evaluation of Private Networks. In: 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF), Montreal, Canada, October 2022, 7 S. [https://cni.etit.tu-dortmund.de/storages/cnietit/r/Research/Publications/2022/Arendt\\_2022\\_FNWF/fnwf\\_2022\\_STING\\_cr.pdf](https://cni.etit.tu-dortmund.de/storages/cnietit/r/Research/Publications/2022/Arendt_2022_FNWF/fnwf_2022_STING_cr.pdf) (Link zuletzt geprüft: 31.01.2023)

KAULBARS, D.; SCHWEIKOWSKI, F.; WIETFELD, C.: Spatially Distributed Traffic Generation for Stress Testing the Robustness of Mission-Critical Smart Grid Communication. In: IEEE GLOBECOM 2015 Workshop on SmartGrid Resilience, San Diego (CA), December 2015, 6 S. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&number=7414168&tag=1> (Link zuletzt geprüft: 31.01.2023)

MÜLLER, M.; KNORR, J.-M.; BEHNKE, D.; ARENDR, C.; BÖCKER, S.; BEKTAS, C.; WIETFELD, C.: Enhancing Reliability by Combining Manufacturing Processes and Private 5G Networks. In: IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'22. July 2022, Australia. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9976081> (Link zuletzt geprüft: 31.01.2023)





**5G.NRW**  
Competence Center

Ministerium für Wirtschaft,  
Industrie, Klimaschutz und Energie  
des Landes Nordrhein-Westfalen



FIR e. V.  
an der RWTH Aachen  
Campus-Boulevard 55  
52074 Aachen

Tel.: +49 241 47705-0  
E-Mail: [publikationen@fir.rwth-aachen.de](mailto:publikationen@fir.rwth-aachen.de)  
[www.fir.rwth-aachen.de](http://www.fir.rwth-aachen.de)