



White Paper: 5G Campusnetzplaner Pro und Anwendungsgebiete

Plan & Play: Zuverlässige ad-hoc 5G-Campusnetze für den temporären Einsatz

Stand: 08.12.2023

Caner Bektas, Sven Dortmund, Sönke Kauffmann

tu technische universität
dortmund

R || RIEDEL

Fraunhofer
IML

P IDSO
Propagation Ideas & Solutions

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



Inhaltsverzeichnis

1. Einführung in das Projekt Plan & Play	1
1.1. Motivation für das Plan & Play Projekt	1
1.2. Kerninnovation 1 – PLAN: Entwicklung einer KI-basierten automatisierten Netzplanung	2
1.3. Kerninnovation 2 – PLAY: Ertüchtigung von 5G-Lösungen für den temporären Einsatz.....	3
2. Kerneergebnis PLAN: 5G Campusnetzplaner Pro	3
2.1. Einführung in den 5G Campusnetzplaner Pro	3
2.2. Schritt-für-Schritt durch den 5G Campusnetzplaner Pro.....	4
3. Kerneergebnisse PLAY: Anwendungsgebiete	7
3.1. Rennsport (Nürburgring)	7
3.2. Intralogistik	9
4. Zusammenfassung und Fazit	11

1. Einführung in das Projekt Plan & Play

1.1. Motivation für das Plan & Play Projekt

Neben dem vielfach diskutierten Referenzeinsatzfall von stationären 5G-Campusnetzen sind auch 5G-Campusnetze für den temporären Einsatz zukünftig immer dann von sehr großem Interesse, wenn lokal überaus anspruchsvolle Anforderungen an das Kommunikationsnetz zu erfüllen sind. Ein Beispiel sind internationale Großveranstaltungen (Formel1, America's Cup), bei denen große Datenmengen für den Veranstaltungsbetrieb wie auch für die „Live“-Einbindung des Publikums mit niedrigen Latenzen und großer Verlässlichkeit gefordert werden. Auch im Bereich der automatisierten Intralogistik ist der nicht-stationäre, ad-hoc 5G-Netzbetrieb für die kontinuierliche Anpassung zuverlässiger Netzlösungen an sich sehr schnell ändernde Anwendungsumgebungen zwingend erforderlich. Die daraus erwachsenden Herausforderungen für die bedarfsgerechte Planung und Selbstkonfigurationsfähigkeit des Netzes wurden im Rahmen des Projekts Plan & Play adressiert, das mit Mitteln des Landes NRW durch das Ministerium für Wirtschaft, Industrie, Klimaschutz und Energie (MWIKE) im Rahmen des Förderwettbewerbs 5G.NRW gefördert wurde. Das Konsortium besteht neben dem Konsortialführer TU Dortmund aus Riedel Communications, Fraunhofer IML und dem assoziierten Partner PIDSO.

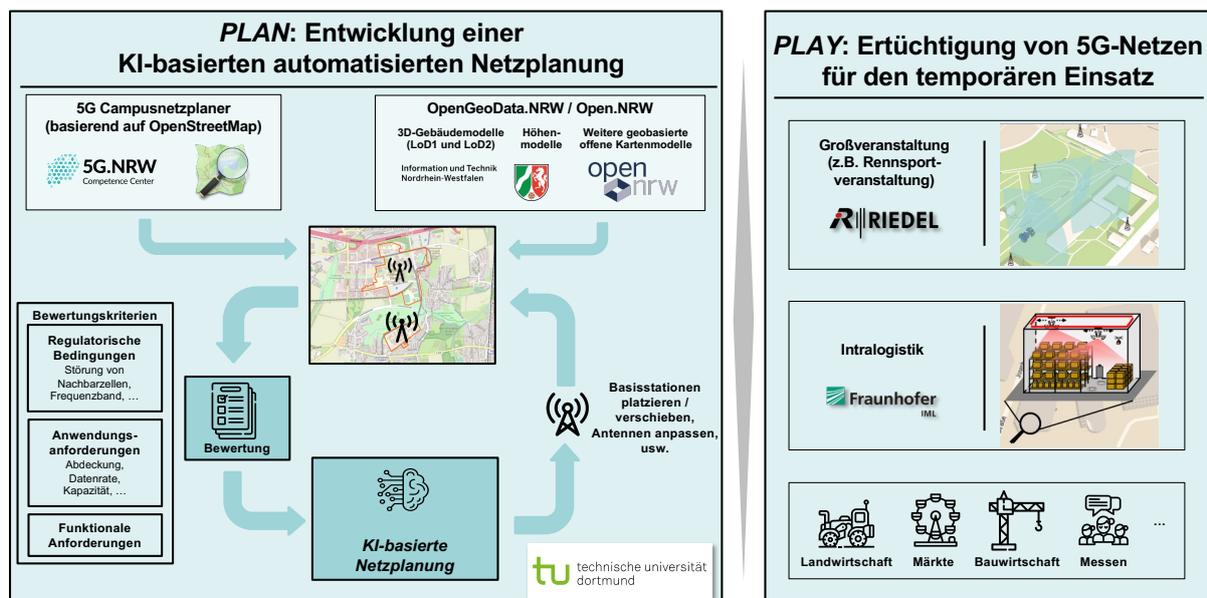


Abbildung 1: Kerninnovationen des Plan & Play-Projektes

Vor dem Hintergrund der oben dargestellten Ausgangslage und Problemstellung besteht für viele potenzielle disjunkte Anwender temporärer Campusnetze ein umfangreicher Handlungsbedarf. So ist Planung und Betrieb einer Vielzahl kurz aufeinanderfolgender Großveranstaltungen (z.B. Video- und Telemetrie-Übertragung im Rennsportumfeld) oder hochdynamischer Intralogistikumgebungen, mit jeweils bedarfsgerechter sowie höchster Planungsgüte und Stabilität, über konventionelle Planungsmethoden und Netzinfrastrukturen nicht kosteneffizient zu realisieren. Genau an dieser Stelle setzt das hier beschriebene Projektvorhaben an. Im Rahmen von Plan & Play werden die notwendigen Voraussetzungen für Planung, Aufbau und zuverlässigen Betrieb temporärer 5G Campusnetze geschaffen. Als Grundlage des Innovationsgehaltes sowie der übergreifenden Verankerung und Verstetigung werden die Kerninnovationsbereiche der vorliegenden Projektidee illustriert (vgl. Abbildung 1) und nachfolgend im Detail dargestellt.

1.2. Kerninnovation 1 – PLAN: Entwicklung einer KI-basierten automatisierten Netzplanung

Die erste Kerninnovation des vorliegenden Vorhabens setzt als Basis auf der ersten Version des sogenannten 5G Campusnetzplaners¹ mit über 36.000 Aufrufen (Stand: Dez. 2023) auf, der im Rahmen des Competence Center CC5G.NRW vom Plan & Play Konsortialführer TU Dortmund entwickelt wurde. Der eingeführte, Web-basierte Campusnetzplaner wurde hin zum **5G Campusnetzplaner Pro** (vgl. Kapitel 2) zu einem vollwertigen Netzplanungswerkzeug für temporäre ad-hoc 5G-Campusnetze ausgebaut, sodass potenzielle Anwender bei der detaillierten Bestimmung der benötigten Netzinfrastruktur effektiv unterstützt werden. Die zum Einsatz kommenden Netzplanungsfunktionen bauen auf Algorithmen des Maschinellen Lernens und wurden im Rahmen eines agilen Forschungsprozesses in Wechselwirkung mit dem Projektsegment PLAY in zwei disjunkten Anwendungsfeldern erprobt und optimiert. Hierzu wird ein maschinelles Lernverfahren eingesetzt, welches in kürzester Zeit automatisiert Netzmodelle generiert. Die einzuhaltende Planungsgüte wurde über eine schrittweise Validierung unterschiedlicher Realumgebungen ermöglicht (vgl. Kapitel 3).

¹ <https://campusnetzplaner.kn.e-technik.tu-dortmund.de/>

1.3. Kerninnovation 2 – PLAY: Ertüchtigung von 5G-Lösungen für den temporären Einsatz

Die übergreifende Zielsetzung der Netzplanung steht in enger Wechselwirkung mit der für den Betrieb notwendigen 5G Ende-zu-Ende Campusnetzlösung. Dabei gilt es, die notwendigen Integrationsschritte und darüberhinausgehenden Weiterentwicklungen, die für die Ertüchtigung von 5G Campusnetzlösungen für den temporären Einsatz notwendig werden, umzusetzen. Zum einen sollen im Innovationsfeld „PLAY“ insbesondere verfügbare private 5G Campusnetzlösungen für den ad-hoc Einsatz und den temporären Betrieb technisch ertüchtigt werden. Wesentliche Anforderungen bestehen hierbei in einer anwendungsgerechten Härtung temporärer 5G Lösungen für den Einsatz in harschen Einsatzumgebungen (vgl. Kapitel 3).

2. Kernergebnis PLAN: 5G Campusnetzplaner Pro

2.1. Einführung in den 5G Campusnetzplaner Pro

Der Campusnetzplaner Pro ist aus der Weiterentwicklung des klassischen 5G Campusnetzplaners des Competence Center 5G.NRW entstanden. Neben der klassischen Berechnung der Frequenzzuteilungsgebühr wird dem Nutzer hierbei auch eine am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund entwickelte automatisierte KI-basierte Netzplanung² angeboten. Das daraus entstandene Angebot soll insbesondere kleine und mittlere Unternehmen ohne Netzplanungsexpertise dazu befähigen, ein 5G Campusnetz zu konfigurieren, zu planen, und einen Frequenzzuteilungsantrag zu stellen. Hierbei handelt es sich nicht um ein vollwertiges, professionelles Netzplanungswerkzeug, sondern vielmehr um ein Angebot für das 5G.NRW Ökosystem, welches automatisiert mögliche Netzkonfigurationen in Abhängigkeit der Campusumgebung und Zielanwendungen vorschlägt, um eine gebührenfreie Kosten- und Aufwandsabschätzung zu ermöglichen. Die Ergebnisse des 5G Campusnetzplaner Pro sollten deshalb immer überprüft werden, bevor der Aufbau des Netzes final erfolgt.

Im Folgenden sollen die Features des 5G Campusnetzplaner Pro anhand einer einfachen Schritt-für-Schritt Vorstellung präsentiert werden.

² <https://cni.etit.tu-dortmund.de/institute/news/details/rapid-network-planning-of-temporary-private-5g-networks-with-unsupervised-machine-learning-15603/>

2.2. Schritt-für-Schritt durch den 5G Campusnetzplaner Pro

Die Startseite des 5G Campusnetzplaner Pro ist stark an den klassischen 5G Campusnetzplaner angelehnt. Hierbei ist der erste Schritt auch das zu planende 5G Campusnetz vorerst mittels einfacher Klicks abzustecken. Dabei handelt es sich meist um die Grundstücksgrenzen des Unternehmens oder der Einrichtung, für den das 5G Campusnetz geplant werden soll (vgl. Abbildung 2).



Abbildung 2: Im ersten Schritt wird das gewünschte 5G Campusnetzgebiet ausgewählt, z.B. die eigenen Grundstücksgrenzen.



Abbildung 3: Im zweiten Schritt wird die Frequenzteilung konfiguriert, z.B. Bandbreite und Laufzeit. Auf der Basis wird dann eine Zuteilungsgebühr abgeschätzt. Die Bandbreite kann auch automatisch auf Basis der nachfolgenden Anwendungsdefinition berechnet werden.

Mit einem Klick auf „Weiter“ erscheint der zweite Schritt der Planung (vgl. Abbildung 3). Hier werden die Parameter der Frequenzzuteilung konfiguriert, dies sind in erster Linie die Bandbreite und Laufzeit der Zuteilung. Wenn die benötigte Bandbreite nicht bekannt ist, kann diese auch auf Basis der nachfolgenden Definition der Anwendungsanforderungen automatisch berechnet werden. Allerdings empfiehlt es sich aufgrund der niedrigen Gebühren die volle Bandbreite zu beantragen, um die Netzplanung und den Netzaufbau zu vereinfachen, da dann weniger Basisstationen benötigt werden. Anschließend wird, wie bei dem klassischen 5G Campusnetzplaner, hier eine voraussichtliche Frequenzzuteilungsgebühr angezeigt. Die Genauigkeit der Gebührenberechnung wird durch die automatische Ermittlung der Flächenanteile (Anteile Siedlungs- und Verkehrsflächen bzw. andere Flächen) effektiv unterstützt. Diese Ermittlung basiert auf offenen Daten des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie³.

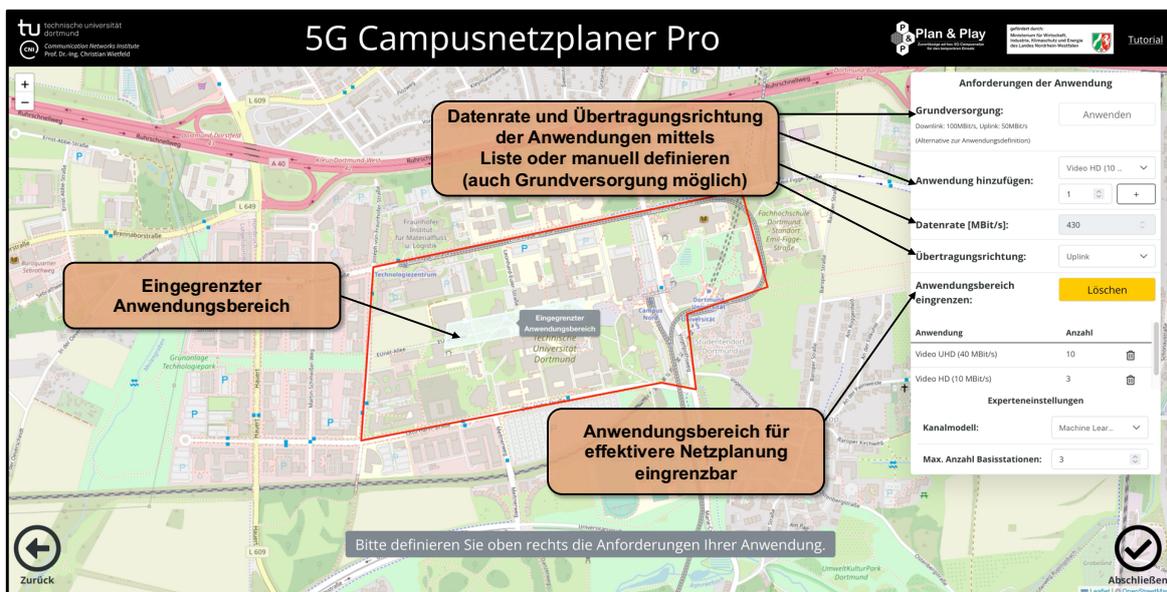


Abbildung 4: Im letzten Schritt werden die Anwendungsanforderungen manuell oder mittels einer Liste definiert (auch Grundversorgungsplanung möglich). Zudem kann der Anwendungsbereich für eine effektivere Netzplanung eingegrenzt werden.

Im letzten Schritt der Netzplanung (vgl. Abbildung 4) werden die Anwendungsanforderungen definiert. Zunächst gilt es, die benötigte Datenrate der Anwendung zu bestimmen. Hierfür können aus einer vorgegebenen Liste Anwendungen ganz einfach hinzugefügt werden. Ist die gewünschte Anwendung hier nicht enthalten, kann die Datenrate auch manuell eingegeben werden, oder aber auch eine Grundversorgungsplanung mit 100 Mbit/s Downlink und 50 Mbit/s Uplink im gesamten Campusnetzgebiet ausgewählt

³ <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/wfs-corine-land-cover-5-ha-stand-2018-wfs-clc5-2018.html>

werden. Zusätzlich wird dann die Hauptübertragungsrichtung der Anwendungen definiert. Anschließend kann noch der Anwendungsbereich eingegrenzt werden, damit eine effektivere Netzplanung durchgeführt werden kann. Ansonsten wird für das gesamte Campusnetzgebiet geplant. Als Experteneinstellungen kann das Kanalmodell angepasst sowie die maximale Anzahl an Basisstationen definiert werden, falls eine Begrenzung vorliegt. Allerdings kann dies dazu führen, dass für bestimmte hohe Anforderungen keine hohe Abdeckung mit der Zieldatenrate erreicht werden kann. Als Kanalmodell ist hier insbesondere das am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund entwickelte, Machine Learning-basierte Modell DRaGon⁴ hervorzuheben.

Sobald die Definition der Anwendungsanforderungen abgeschlossen ist, wird ein personalisierter Link zur Verfügung gestellt, womit eine Abfrage des Auftragsstatus möglich ist. Ist die Netzplanung abgeschlossen, wird dort das Ergebnis angezeigt (vgl. Abbildung 5).



Abbildung 5: Auf der Ergebnisseite wird eine Abdeckungskarte, die empfohlenen Antennenpositionen und -Konfigurationen, sowie eine Antragshilfe für die Frequenzteilung bereitgestellt.

Neben einer Abdeckungskarte werden auf der linken Seite zunächst die empfohlenen Antennenpositionen und -Konfigurationen in einer Liste sowie auf der Karte angezeigt. Diese Informationen wurden entsprechend im Hintergrund mittels der automatisierten

⁴ <https://cni.etit.tu-dortmund.de/institute/news/details/tinydragon-lightweight-radio-channel-estimation-for-6g-pervasive-intelligence-23892/>

KI-basierten Netzplanung⁵ sowie einer skalierbaren Funkfeldberechnung auf Basis von Machine Learning⁶ ermittelt.

Auf der rechten Seite werden alle Informationen sowie ein Abdeckungsergebnis in Prozent angezeigt, jeweils für eine allgemeine Grundabdeckung sowie der Abdeckung mit der Zieldatenrate. Zudem kann als Zusatzfeature die Anlage 3 des BNetzA-Antrages vorausgefüllt heruntergeladen werden. Hier werden dann allgemeine Informationen, wie die ausgewählte Laufzeit, Bandbreite, sowie der Gebietsvektor in dem vorgegebenen Format eingetragen. Zusätzlich wird für jede Basisstation jeweils ein Tabellenblatt erstellt, die mit den ermittelten Informationen befüllt ist.

Zusammengefasst lässt sich mithilfe des 5G Campusnetzplaner Pro abschätzen, wie viele Basisstationen an welchen Standorten für die Umsetzung einer bestimmten Anwendung benötigt werden. Somit werden Unternehmen und Institutionen effektiv bei der Planung, Konfiguration, Antragsstellung, und Aufbau eines eigenen 5G Campusnetzes mittels dieses gebührenfreien Angebotes unterstützt.

3. Kernergebnisse PLAY: Anwendungsgebiete

3.1. Rennsport (Nürburgring)

Zur Erprobung eines ad-hoc 5G Campusnetzwerkes für den temporären Einsatz wird die Grand-Prix Strecke des Nürburgringes als Referenzszenario ausgewählt.

Um eine spätere Integration in Produktionsumgebungen zu ermöglichen, wird eine verteilte Systemarchitektur bevorzugt, bei welcher der 5G Core auf dem Wuppertaler Campus des Projektpartners Riedel verbleibt und nur die *Base-Band-Units* und *Remote-Radio-Heads* vor Ort installiert werden. Letztere werden hierzu auf dem Race-Tower an der Start/Ziel-Linie installiert.

⁵ C. Bektas, S. Böcker, B. Sliwa and C. Wietfeld, "[Rapid Network Planning of Temporary Private 5G Networks with Unsupervised Machine Learning](#)," 2021 IEEE 94th Vehicular Technology Conference (VTC2021-Fall), Norman, OK, USA, 2021

⁶ M. Geis, B. Sliwa, C. Bektas and C. Wietfeld, "[TinyDRaGon: Lightweight Radio Channel Estimation for 6G Pervasive Intelligence](#)," 2022 IEEE Future Networks World Forum (FNWF), Montreal, QC, Canada, 2022

Die in Abbildung 6 illustrierte, relative Qualität des Empfangssignals auf der gesamten Grand-Prix-Strecke zeigt einen in Pfadverlust begründeten, signifikanten Abfall im südwestlichen Streckenabschnitt. Gegenüber einer mittleren Signalstärke von ca. -83 dBm auf der verkürzten Grand-Prix-Strecke sinkt das mittlere RSRP auf -93 dBm auf der Gesamtstrecke. Ferner wird das RSRP Minimum von ca. -103 dBm auf der Teilstrecke mit -127dBm (unterer numerischer Grenzwert der Datenaufzeichnung) auf der Gesamtstrecke erfasst. In diesem Streckenabschnitt ist für den gewählten Antennenaufbauort keine Videoübertragung möglich.

Darüber hinaus sind durch lokale Abschattungseffekte zwei weitere Bereiche (rot markiert) mit RSRP-Werten von unter -90 dBm zu beobachten welche in der parallel laufenden Videoaufzeichnung zu Stottereffekten durch erhöhte Latenz führen.

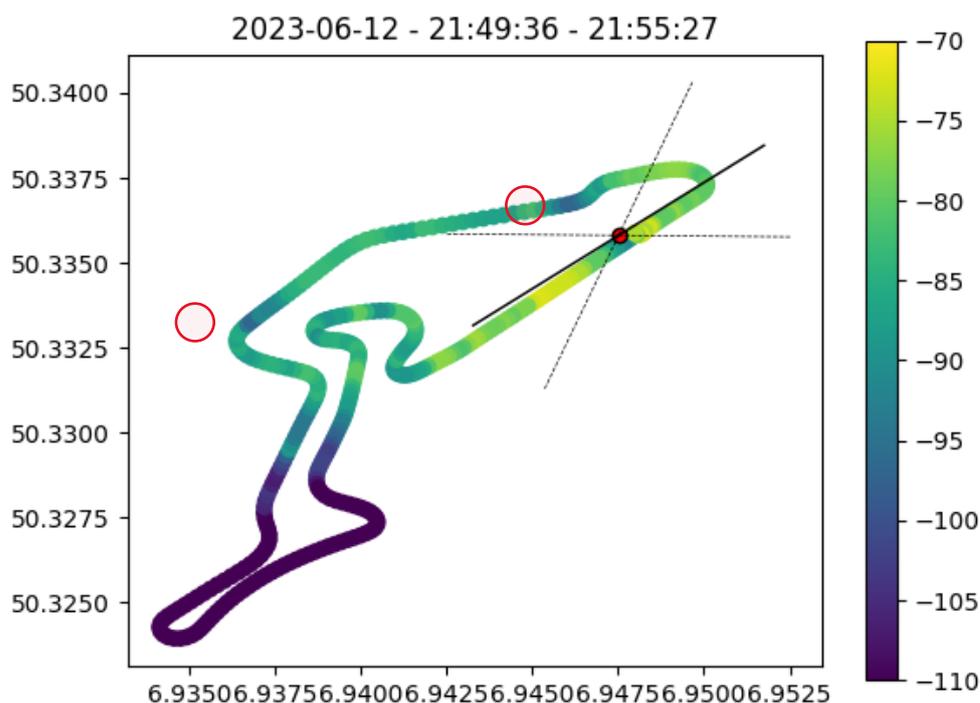


Abbildung 6: Relative Qualität des Empfangssignals (RSRP [dBm]) einer Testfahrt auf der gesamten Grand-Prix-Strecke bei einer laufenden Videoübertragung.

Die oben geschilderten Ergebnisse werden durch Uplink-Datendurchsatzmessungen erhärtet. Das Minimum auf der verkürzten Grand-Prix-Strecke beläuft sich hier auf

899kbps, welche folgeschlussrichtig auch bei Konfiguration des Videocodecs mit 2Mbps für eingeschränkte Qualität keine latenzarme Übertragung ermöglichen.

Folglich unterstreicht der geschilderte Testaufbau die Notwendigkeit einer detaillierten Funkfeldplanung insbesondere bei topographisch anspruchsvollen Szenarien. Für eine vollständige Abdeckung des Nürburgrings wären bspw. schätzungsweise drei Antennenstandorte erforderlich, welche durch den Bedarf an zusätzlicher Infrastruktur (hier: Glasfasernetzwerk) nur bedingt als ad-hoc zu bezeichnen ist. Demgegenüber legt der Testaufbau eine Nutzung mit geringerer Flächenausdehnung nahe.

3.2. Intralogistik

Zur Validierung des 5G Campusnetzplaner Pro im Indoor-Bereich wurden zudem zwei intralogistische Szenarien konzipiert. Hierbei wird einerseits eine Flotte fahrerloser Transportfahrzeuge mit der 5G-Technologie ausgestattet und andererseits eine Edge-Computing-Anwendung für die Inventarisierung in Pufferlagern entwickelt.

Die LoadRunner®-Technologie repräsentiert eine hochdynamische Flotte fahrerloser Transportfahrzeuge, die initial durch das Fraunhofer IML entwickelt und daraufhin in einer gemeinsamen Kooperation mit der KION Group weiterentwickelt wurde. Aufgrund der hohen Geschwindigkeiten der AGVs (Automated Guided Vehicles) und der Ausdehnung der Flotte, existieren umfangreiche Anforderungen an die erforderliche Funkkommunikation. Im Speziellen erfordert die LoadRunner®-Technologie eine niedrige, aber vor allem konstante Latenz sowie eine minimale Paketverlustrate, insbesondere bei hoher Teilnehmerdichte.

Für eine erstmalige Validierung des 5G Campusnetzplaner Pro wurde ein 5G Campusnetz unter Verwendung einer SDR-basierten Basisstation von Amarisoft⁷ aufgebaut. In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind zwei Szenarien visualisiert, die mithilfe mobiler Reflektorenwände konstruiert wurden. Zusätzlich dazu wurde eine Radio Environmental Map, kurz REM, mit den gemessenen RSRP-Werten innerhalb der Szenarios dargestellt. Parallel zu dieser Darstellung, erfolgte die Simulation der Szenarien durch das Netzplanungstool im 5G Campusnetzplaner Pro.

⁷ <https://www.amarisoft.com/products/test-measurements/amari-lte-callbox/>

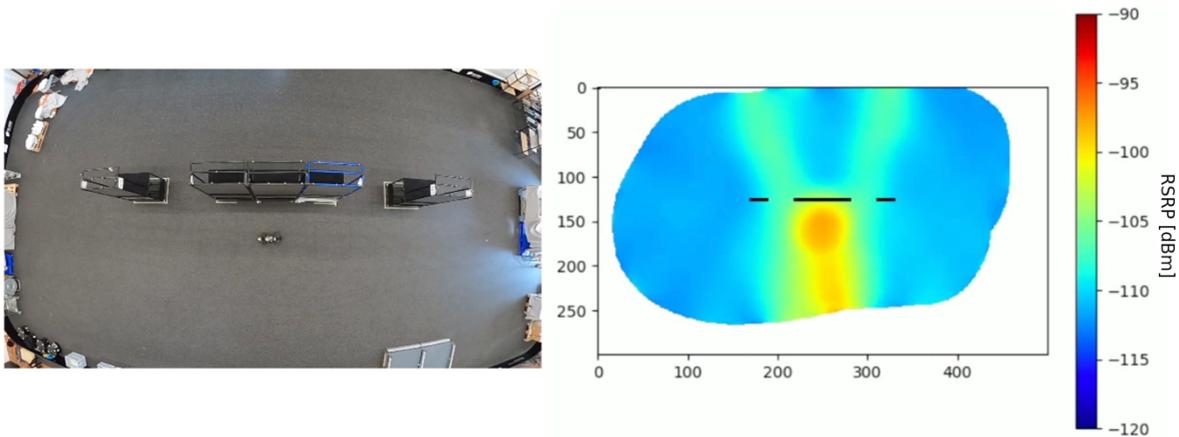


Abbildung 7: Aufbau Szenario 1 mit gemessener Radio Environmental Map (REM).

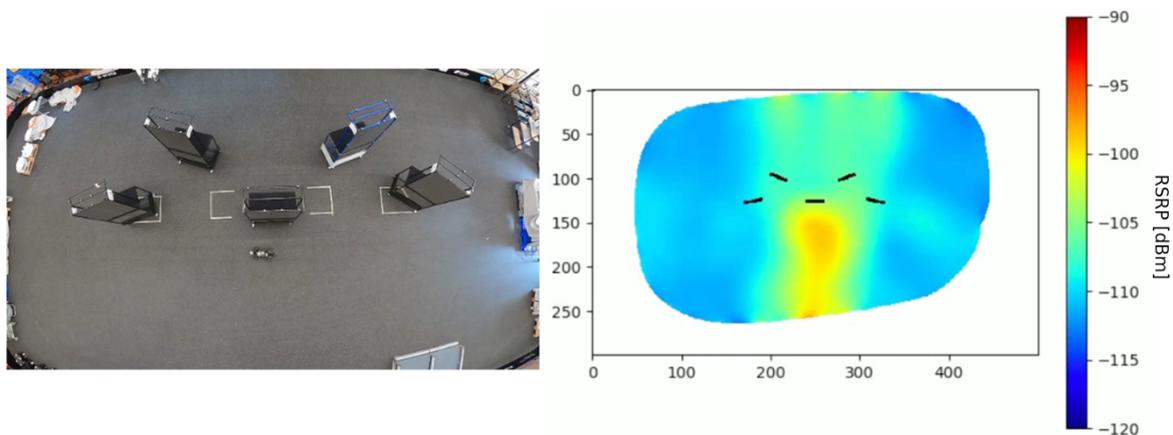


Abbildung 8: Aufbau Szenario 2 mit gemessener REM.

Die Resultate der Messungen offenbaren eine Dämpfung der Signalstärke um mehr als 10dBm bei Abschirmung durch die Reflektorenwände. In diesen Szenarien übersteigt die Signalstärke den betrachteten Bereich nicht und bleibt größer als -120 dBm. Begründet durch diese Ergebnisse, wird die Netzabdeckung für diese spezifischen Szenarien als ausreichend erachtet.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse führte der Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund eine Netzplanung für eine LoadRunner®-Flotte, bestehend aus 7 AGVs, durch. Diese Flotte wurde eigens dafür mit der 5G-Technologie in Form von 5G-Modems ausgestattet. Weiterführend wurde ein temporäres ad-hoc Campusnetz geplant und aufgebaut. Im Rahmen der 5G.NRWeek 2023 wurde dieser umfangreiche Demonstrator erfolgreich vor Fachpublikum und NRW-Wirtschaftsministerin Mona Neubaur präsentiert und eingehend diskutiert.

Dabei hat sich gezeigt, dass die zuvor definierten Anwendungsanforderungen, auf dessen Basis die Netzplanung erfolgte, in beiden Fällen eingehalten wurden.

4. Zusammenfassung und Fazit

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das Plan & Play Projekt mit dem 5G Campusnetzplaner Pro eine einfache und gebührenfreie Planungshilfe für Unternehmen bereitstellt, die ein 5G Campusnetz planen und aufbauen wollen und eine erste Aufwandsabschätzung vor der eigentlichen Planung benötigen. Insbesondere wird hier auch der Prozess der Antragsstellung bei der Bundesnetzagentur erleichtert. Durch die hier geschilderten Referenzeinsatzfälle wurden die eingesetzten Methoden in harschen Realumgebungen erprobt und stellen somit auch mögliche Anwendungsbeispiele und Best Practices im Aufbau von eigenen 5G Campusnetzen dar.

Kontakt

Stefan Böcker, stefan.boecker@tu-dortmund.de

Caner Bektas, caner.bektas@tu-dortmund.de