

# **Abteilung Mobilfunksysteme (Kürner)**

## **1. Forschungsfelder der Abteilung**

Die Forschungsfelder der Abteilung Mobilfunksysteme umfassen verschiedene Aspekte der Mobilfunktechnik sowohl im UHF-Frequenzbereich unterhalb 6 GHz als auch im Millimeterwellen- und THz-Bereich. Die Aktivitäten im Berichtsjahr lassen sich in drei Anwendungsfelder abbilden, in denen die Abteilung Mobilfunksysteme seit Jahren tätig ist und die sich auch in der Struktur der Abschnitte fünf bis sieben wiederfinden. Sie umfassen „Methoden und Algorithmen für die Planung und Optimierung von Infrastrukturnetzen“, „Fahrzeug-Kommunikation“ und „THz-Kommunikation“ [KÜR15], [KÜR17], [KÜR18], [KÜR20], [KÜR22], [KÜR9], [KÜR13]. Der Trend, dass die Grenzen zwischen den ursprünglich sehr disjunkten Anwendungsfeldern insbesondere im Zusammenhang mit der Einführung der fünften Generation (5G) des Mobilfunks zunehmend verschwimmen, bei der alle diese Anwendungsfelder relevant sind und zum Teil gemeinsam betrachtet werden müssen, setzte sich weiter fort. Für die Abteilung ist das sehr vorteilhaft, da wir aus allen drei Anwendungsfeldern unsere Kompetenzen in die zu beantwortenden Forschungsfragestellungen einbringen können. Mittlerweile ist unsere eigenentwickelte Simulationsplattform SiMoNe (Simulator for Mobile Networks) das zentrale Werkzeug für nahezu alle unsere Forschungsaktivitäten. Den Weiterentwicklungen von SiMoNe im Berichtszeitraum ist daher das eigenständige Kapitel 4 gewidmet.

## **2. Projekte**

Alle Wissenschaftlichen Mitarbeiter sind in Projekte mit der Industrie, anderen Universitäten oder Instituten innerhalb der TU Braunschweig eingebunden. Auch in diesem Geschäftsjahr konnten neue Projekte akquiriert werden. Wir sind in folgenden nationalen und internationalen Projekten engagiert:

### **2.1 Internationale Projekte**

Im Jahr 2019 haben wir an insgesamt zwei von der EU geförderten Projekten aus dem Horizon2020(H2020)-Forschungsrahmenprogramm mitgewirkt. Das im Juli 2018 begonnene Projekt H2020-ThoR („Terahertz end-to-end wireless systems supporting ultra-high data Rate applications“), das je zur Hälfte von der EU und Japan gefördert wird und das wir auf europäischer Seite koordinieren, wurde ebenso fortgesetzt wie das seit September 2017 laufende Projekt H2020-TERAPOD („Terahertz based Ultra High Bandwidth Wireless Access Networks“). Ebenfalls fortgesetzt wurde ein Projekt zur Nanokommunikation im Rahmen des „Indonesian-German Center for Nano and Quantum Technologies

(IG-Nano)“. Mit dem State Key Laboratory for Rail Traffic Control and Safety der Beijing Jiaotong University gibt es eine Kooperation auf dem Gebiet der Ausbreitungsmodellierung für die Eisenbahn-Kommunikation [ECK/REY/KÜR1], [ECK/REY/KÜR2], [KÜR1], [KÜR2], [KÜR5], [KÜR7], [KÜR26]. Im Rahmen dieser Kooperation wurde das Projekt „Research and Application of Mobile Communication Network Theory and Technology for High-Speed Railway in Indonesia“ abgeschlossen. Im Rahmen eines „Seed-Funding“-Projekts der TU Braunschweig mit der Universität Tampere haben wir Themenstellungen zur Simulation von Drohnen, die mit mobilen Endgeräten ausgestattet sind und sich in Mobilfunknetzen bewegen, sowie der THz-Kommunikation für Fahrzeuganwendungen bearbeitet. Prof. Kürner leitet die IEEE 802.15 Technical Advisory Group (TAG) THz und ist weiterhin als Advisory Member im NGMN Konsortium (Next Generation Mobile Networks) aktiv. Er ist darüber hinaus Mitglied im Board of Directors der European Association on Antennas and Propagation (EurAAP).

## **2.2 Nationale Förderprojekte**

Seit Juni 2017 arbeiten wir als Unterauftragnehmer der Volkswagen AG am BMBF-Projekt 5G Netmobil mit. Der Höhepunkt des Berichtsjahres war im Juli die Bewilligung der DFG-Forschungsgruppe Meteracom (Metrologie für die THz-Kommunikation), deren Sprecher Prof. Kürner ist. Wir sind Mitglied bei TUBS.digital.

## **2.3 Industrieprojekte**

Ein Projekt mit der Elektronik-Entwicklung der Volkswagen AG zur Berücksichtigung des Einflusses der Fahrzeugantenne auf die Empfangsqualität konnte abgeschlossen werden [DRE/KÜR4], [DRE/KÜR1]. Das im Jahr 2018 begonnene Projekt mit der Volkswagen AG zur Vorbereitung der 5G-Modellregion Wolfsburg-Braunschweig wurde fortgesetzt. Darüber hinaus wurde ein neues Projekt mit der Volkswagen AG zur Lokalisierung mit Millimeterwellen gemeinsam mit dem Institut für Hochfrequenztechnik der TU Braunschweig eingeworben. Das 2017 gestartete Projekt mit der Hytera Mobilfunk GmbH zur Frequenzplanung in TETRA-Netzen wurde abgeschlossen. Das im vergangenen Jahr begonnene Projekt zur regulatorischen Behandlung des Einflusses von Drohnen, die mit Endgeräten ausgestattet sind, das wir für die Deutsche Telekom durchführten, wurde ebenso abgeschlossen wie das von der PreHCM GmbH beauftragte Projekt „Smart Coordination“, bei dem die Konsequenzen der Einführung von selbstorganisierenden Funktionen (Self-Organising Network – SON) sowie flexibel konfigurierbarer Antennen bei 5G auf die Grenzkordinierung und die Kordinierung mit Funkmessstationen untersucht wurden. Für die Deutsche Funkturm GmbH haben wir eine Studie zur Simulation der Funkversorgung in der

Eisenbahn durchgeführt. Neu begonnen wurde das Projekt „Record and Replay“ mit IAV GmbH in Gifhorn.

### **3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung**

Im Berichtszeitraum waren zehn Wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung beschäftigt. Zum 30.11.2019 besteht die Abteilung aus neun Wissenschaftlichen Mitarbeitern. Das Anwendungsfeld „Methoden und Algorithmen für die Planung und Optimierung von Infrastrukturnetzen“ wurde von den Herren Dreyer, Schweins, Thielecke und Herold (seit 01.07.2019) bearbeitet. Das Gebiet der THz-Kommunikation bearbeiteten die Herren Rey (bis 31.12.2018), Eckhardt, Jung (seit 01.04.2019), Herold und Doeker (seit 01.11.2019). Das Forschungsgebiet „Fahrzeug-X-Kommunikation“ wurde von den Herren Dreyer, Nan und Thielecke bearbeitet. Vom 25. bis 28. März 2019 konnten wir Herrn Dr. Enrico Vitucci [KÜR4] von der Universität Bologna als Gastwissenschaftler bei uns begrüßen, um die existierende Kooperation auf dem Gebiet der Funkkanalmessungen [KÜR4] weiter zu vertiefen. Im Rahmen des Projekts mit der Universität Tampere war Herr Vitaly Petrov vom 13. Mai bis 7. Juni 2019 als Gastwissenschaftler bei uns tätig. Tatkräftig unterstützt wird die Abteilung durch Frau Beyer sowie durch eine Vielzahl von wissenschaftlichen Hilfskräften und Studierenden, die im Rahmen ihrer Bachelor- und Masterarbeiten in der Abteilung mitarbeiten. Im Berichtszeitraum wurden jeweils sechs Bachelor- und Masterarbeiten abgeschlossen. Darüber hinaus durften wir vom 13. Mai bis 8. Juli Herrn Pranay Reddy als Interim unserer Partneruniversität IIT Bombay bei uns begrüßen. Roman Alieiev, Guillaume Jornod [KÜR3], [KÜR10], [KÜR11] (beide Volkswagen AG) und Paul Unterhuber [KÜR6] (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt – DLR) werden von Prof. Kürner derzeit als externe Doktoranden betreut.

### **4. Simulationsplattform SiMoNe**

Die Simulationsplattform „SiMoNe“ ist eine eigenständige Entwicklung der Abteilung für Mobilfunksysteme. Ursprünglich wurde die Plattform konzipiert, um die große Anzahl an unterschiedlichen und komplexen Simulationsszenarien und -modellen beherrschbar zu machen, die in verschiedenen Projekten und studentischen Arbeiten zum Einsatz kommen. Mittels einer webbasierten Schnittstelle sind das Zusammenarbeiten und die Kooperation sowohl innerhalb des Instituts als auch mit externen Partnern relativ einfach möglich. SiMoNe ermöglicht es, reale und realitätsnahe Mobilfunknetze auf Basis von geographischen Daten, Funknetztopologien, Pfadverlustprädiktionen [MA 19/002] und weiteren netzbezogenen Daten auf Link- und System-Ebene realistisch zu simulieren. Die SiMoNe zugrunde liegenden Modelle werden zum Teil aus Messdaten abgeleitet,

siehe z. B. [BA 19/712]. Im Berichtszeitraum ist im Rahmen einer Bachelorarbeit [BA 19/702] ein Produktvideo entstanden, das auf der SiMoNe-Projektseite verlinkt ist: <https://www.ifn.ing.tu-bs.de/research/projects/ms0/fg2/>

Neben der schon bekannten echtzeitfähigen 2D-Visualisierung können Simulationen nun auch zur Laufzeit dreidimensional visualisiert werden. Dies umfasst neben Gebäuden und Fahrzeugen auch die Darstellung von Strahlen des verwendeten Pfadverlust-Prädiktors. Für die Erstellung von komplexen dreidimensionalen Objekten wurde ein Plugin für das freie CAD-Tool SketchUp entwickelt [BA 19/705]. Hierin lassen sich beispielsweise Indoor-Szenarien mit Fenstern, Tischen und Schränken visuell gestalten und anschließend in SiMoNe importieren.

Für die Generierung von Outdoor-Simulationsszenarien hat Herr Thielecke eine neue Anwendung entwickelt, die eine grafische Möglichkeit für die Konfiguration grundlegender Parameter bietet. Dies umfasst sowohl die Standorte der Basisstationen als auch die physikalische Konfiguration der auf dem Sendemast befindlichen Antennen und den Import geographischer Daten (Straßen, Gebäude, Landnutzungsklassen und Höhendaten) aus öffentlichen Datenquellen, wie z.B. aus Open Street Map oder dem CORINE-Projekt, die unter Angabe eines geographischen Begrenzungspolygons extrahiert werden können. Zur initialen Bewertung des erstellten Szenarios können bereits vor dem Export einfache kartenbasierte Pfadverlust-Prädiktionen auf Basis des Okumura-Hata-Modells durchgeführt und visualisiert werden. Das erstellte Szenario kann anschließend in SiMoNe importiert und innerhalb weitergehender Simulationen verwendet werden. Der Fokus dieser Anwendung zur Erstellung und Verwaltung neuer Simulationsszenarien ist eine einfache, intuitive Bedienung.

Im Rahmen der H2020 EU-Projekte TERAPOD [ECK1] und ThoR [JUNG/ECK/DRE/KÜR1] wird für die detaillierte Analyse der Übertragungsstrecke zwischen einem Sender und einem Empfänger ein Link-Level-Simulator entwickelt, der vollständig in die Entwicklungsumgebung SiMoNe integriert ist. Hierbei wird für die Kanalmodellierung auf die Ergebnisse der bereits vorhandenen strahlenoptischen Pfadverlust-Prädiktion zurückgegriffen. Die modulare Struktur des Simulators ermöglicht die Integration und Untersuchung von Funkstrecken in Abhängigkeit der Modulationsverfahren, Kanalcodierung, Detektorstruktur [BA 19/704] und berücksichtigt den Einfluss von nicht idealen Hochfrequenz-Komponenten der Übertragungsstrecke (engl. RF-Impairments).

Im Rahmen einer Masterarbeit [MA 19/017] ist ein Modul entstanden, mit dem die Ortungsgenauigkeit von GPS-Empfängern in Abhängigkeit von Ort und Tageszeit simuliert werden kann. Dabei kommt erneut ein Ray Tracer zum Einsatz, der um Modelle zur Beachtung der atmosphärischen Brechung elektromagnetischer Wellen erweitert wurde. Mit der Berechnung der Ortungsgenauigkeit wird

es in Zukunft möglich sein, V2X-Applikationen noch realistischer zu simulieren und deren Leistungsfähigkeit unter dem Einfluss der Szenario-spezifischen Ortungsungenauigkeit zu evaluieren sowie Untersuchungen zur Lokalisierung beim Beamforming in 5G-Netzen durchzuführen, siehe auch Abschnitt 5.2.

## **5. Methoden und Algorithmen für die Simulation, Planung und Optimierung von Infrastrukturnetzen**

### **5.1 Smart Coordination**

Mit der Einführung intelligenter und dynamisch konfigurierbarer Netzkomponenten in den Mobilfunknetzen im Zuge des Aufbaus von 5G- und der Erweiterung von 4G-Netzen steht die Telekommunikationsregulierung vor neuen Herausforderungen. Gerade im Kontext 5G ist mit einer Durchdringung von „Self Organizing Networks“ (SON) [MA 19/008] zu rechnen, bei denen Algorithmen auf der Basis automatisierter Messungen ebenfalls automatisiert die Funknetzkonfiguration und -optimierung durchführen. Dies führt bis hin zu einer weitestgehend automatischen Inbetriebnahme neuer Funkzellen.

Im Zuge der Frequenzzuteilung nach §55 des Telekommunikationsgesetzes ist vor Inbetriebnahme von Funkzellen deren exakte Hochfrequenz (HF)-Konfiguration in einem durch die Bundesnetzagentur vorgegebenen Verfahren (Parameterfestsetzung) anzumelden. Grundlage der heutigen Parameterfestsetzung ist eine präventive, wirknetzorientierte und statische Beschreibung der Funkzelle bzw. deren HF-Parameter, mit denen deren Verträglichkeit zu bestehenden Mobilfunksystemen und weiteren Funkdiensten überprüft wird.

In Kooperation mit PreHCM GmbH erarbeitete Herr Schweins die Studie „SmartCoordination“, die sich mit der Thematik auseinandersetzt, inwiefern aktuell praktizierte Verwaltungsverfahren der Parameterfestsetzung konform mit der Flexibilität kommender Mobilfunksysteme sind bzw. diese sogar einschränken. Als plakatives und gut visualisierbares Beispiel wird Massive MIMO in der Studie herausgestellt. Die individuell einstellbaren aktiven Antennensysteme ermöglichen mithilfe von Beamforming die Abstrahlleistung gezielt auf Nutzer auszurichten [BA 19/701]. Die Fokussierung der Abstrahlleistung führt dabei einerseits zu einer deutlichen Verbesserung der Linkbilanz zwischen Basisstation und Mobilfunknutzer und reduziert andererseits die Störungen in andere Abstrahlrichtungen, siehe **Abbildung 13**.

Damit ergeben sich dynamisch verändernde HF-Parameter, die durch das jetzige statische Parameterfestsetzungsverfahren nicht abgebildet werden können.



Abbildung 13: Abstrahlcharakteristiken der auf die jeweiligen Mobilfunknutzer mittels Strahlformung ausgerichteten Antennenkeulen

Im Rahmen der Studie wurden erste Lösungsansätze für ein neues Verfahren beschrieben.

## 5.2 Lokalisierung von Drohnen

Das Einsatzgebiet von Drohnen wird in Zukunft zahlreiche unterschiedliche Aufgaben wie zum Beispiel die Paketzustellung, Einsätze in der Land- und Forstwirtschaft oder auch Such- und Beobachtungseinsätze umfassen. Viele dieser Aufgaben benötigen eine Datenübertragung, wozu 4G- oder 5G-Mobilfunknetze genutzt werden können. Durch ihre exponierte Position weisen Drohnen ein verändertes Verhalten im Vergleich zu Mobilfunknutzern in Bodennähe auf. Sowohl zu ihrer verbundenen Mobilfunkzelle als auch zu den benachbarten Zellen besteht in vielen Fällen direkte Sichtverbindung (engl. line of sight, LOS) was zu einer steigenden Interferenzleistung bei den Nachbarzellen führt. Auf der an-

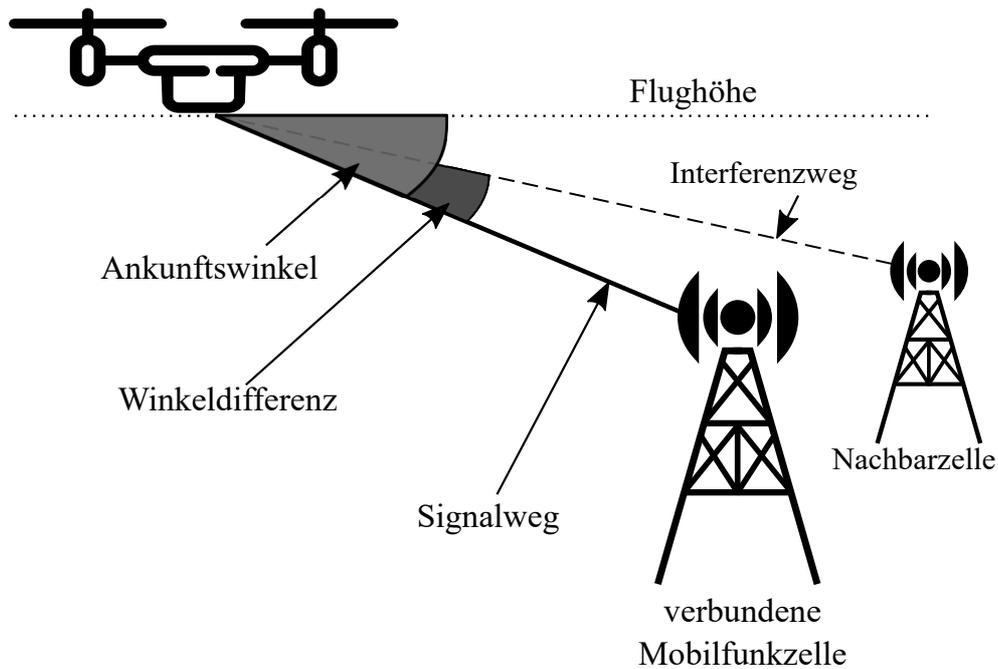


Abbildung 14: Sende-Empfangs-Konfiguration bei einer mit einem Mobilfunkgerät ausgestatteten Drohne

deren Seite ermöglichen die vielen LOS-Verbindungen eine gute Lokalisierung innerhalb des Mobilfunknetzes. Diese kann einerseits dazu verwendet werden, um aus Sicht des Mobilfunkbetreibers die Drohnenposition zu ermitteln, was zum Beispiel zur Kontrolle von Flugzonen verwendet werden könnte, andererseits kann eine Drohne, die mit einem aktiven Antennensystem ausgestattet ist, den Ankwurtswinkel des Signals der verbundenen Mobilfunkzelle wie auch die Winkel zu den Nachbarzellen bestimmen, siehe **Abbildung 14**. Aufgrund der Reziprozität des Funkkanals kann diese Information genutzt werden, um mittels Beamforming die Interferenzleistung bei den Nachbarzellen zu verringern und die Linkbilanz zur Mobilfunkzelle zu verbessern.

Im Rahmen eines vierwöchigen Forschungsaufenthalts an der Universität Tampere im April und Mai 2019 hat Herr Schweins Lokalisierungsverfahren für das Beamforming untersucht und in SiMoNe implementiert [SCHW/KÜR1].

### 5.3 Record and Replay

Das Abrufen von Internetdiensten, wie z. B. eines Musikstreams oder Navigationskarten während der Fahrt mit einem Auto wird immer wichtiger. Die wahrgenommene Verbindungsqualität ist für Nutzer relevant und wird mit dem Auto in Verbindung gebracht. So wird z. B. das Herunterstufen der Qualität, das kurzzeitige Aussetzen oder sogar der Abbruch eines Audio- oder Videostreams als

äußert negative Erfahrung wahrgenommen. Dadurch muss bereits während der Entwicklung der Entertainment-Systeme die Reaktion und Toleranz der Steuergeräte gegenüber diversen Ereignissen im Mobilfunknetz getestet werden. Zusammen mit IAV GmbH in Gifhorn wird im Projekt „Record and Replay“ eine Laborumgebung geschaffen, um Mobilfunk-Endgeräte unter beliebig vorgebbaren Bedingungen testen zu können [MA 19/007]. Dabei wird die Auswirkung von verschiedenen Ausbreitungsszenarien und Lastsituationen im Mobilfunknetz untersucht. Um die notwendigen Eingangsdaten realer Mobilfunknetze zu erlangen, werden zwei Ansätze verfolgt. Einerseits können im „Record“-Ansatz grundlegende Mobilfunkparameter, wie z.B. die für das Endgerät aktuell sichtbaren Zell-IDs oder die ermittelte Empfangsleistung, durch Messfahrten aufgenommen werden. Da nicht alle in der Realität vorstellbaren Szenarien mit Hilfe von Messfahrten aufgenommen werden können, sei es z.B. durch nur seltenes Auftreten, werden andererseits die Ausbreitungsbedingungen makroskopisch entlang von vorher definierten Strecken prädictiert. Auf dieser Basis werden dann grundlegende Mobilfunkparameter und -ereignisse, wie z. B. Handover, simuliert. Die Ergebnisse können anschließend im „Replay“-Labor wiedergegeben und die Reaktionen des zu testenden Steuergerätes beobachtet werden. Damit konnte Herr Thielecke bereits in einigen Szenarien Gründe für gemessene Qualitätseinbußen in der Region um Braunschweig und Gifhorn simulativ aufzeigen und korrekt in der Laborumgebung nachbilden.

#### **5.4 Simulation der Bahnversorgung**

Die Versorgung von Mobilfunknutzern in Zügen ist aus vielschichtigen Gründen schwierig. Hohe Geschwindigkeiten, heterogene Umgebungen mit Brücken, Tunneln und Lärmschutzwänden sowie die korrelierte Bewegung von Nutzergruppen sind nur einige der Herausforderungen. Unzulänglichkeiten bei der Versorgung fallen schnell auf, wenn die Teilnehmer ihre Mobiltelefone während der Fahrt außerhalb von Bahnhöfen nutzen. Ein besonderes Augenmerk bekommt die Versorgung von Bahnstrecken auch durch die Auflagen bei der Versteigerung der 5G-Frequenzen im Jahr 2019, da mit dem Erwerb der Frequenzen u.a. Auflagen für die Versorgung von Hauptverkehrswegen erteilt wurden. Die realistischen Mobilitätsmodelle in unserer Simulationsumgebung SiMoNe erlauben die detaillierte Betrachtung von solch speziellen Szenarien in der Mobilfunkversorgung. Im vergangenen Berichtsjahr konnten wir die Erstellung von Szenarien vereinfachen, die Visualisierung der berechneten Ergebnisse weiterentwickeln und die Prädiktion von Empfangsleistungen entlang vorgegebener Pfade, wie z.B. Bahnstrecken oder Autobahnen, deutlich beschleunigen. Im Rahmen zweier Projekte im Auftrag der Beijing Jiaotong Universität bzw. der Deutsche Funkturm GmbH haben Herr Thielecke und Herr Herold die Versorgungs- und Interferenzsituation entlang verschiedener Bahnstrecken in Deutschland, China und

Indonesien für verschiedene Abstände zwischen Basisstationen und Empfangsort auf der Bahnstrecke untersucht.

## **6. Fahrzeug-X-Kommunikation**

### **6.1 Echtzeitfähiges Ray Tracing**

Ein zentrales Problem bei der Simulation von realistischen V2X (Vehicle-to-X)-Szenarien ist die Modellierung des Funkkanals. Auf Grund der Menge an Verkehrsteilnehmern in einem Autobahn- oder innerstädtischen Kreuzungsszenario kam eine strahlenoptische Pfadverlust-Prädiktion hierfür bisher nicht in Frage. Stattdessen werden in wissenschaftlichen Arbeiten oft stochastische Kanalmodelle verwendet [DRE/KÜR2]. Im vergangenen Jahr hat Herr Dreyer große Fortschritte im Bereich der hoch-performanten strahlenoptischen Funkkanalprädiktion für die Fahrzeugkommunikation erzielt [DRE/KÜR3]. Die Arbeiten zielen maßgeblich darauf ab, auch Szenarien mit vielen Kommunikationspartnern simulieren zu können und liefern für kleine Szenarien mit wenigen Teilnehmern Ergebnisse in Echtzeit. Dieser „echtzeitfähige“ Ray Tracer basiert auf einer Vorab-Analyse des Szenarios, bei der die Sichtbarkeits-Beziehung zwischen allen Oberflächen analytisch beschrieben und in einem Suchbaum gespeichert wird. Die Komplexität der Überprüfung, ob zwischen Teilen von Wänden eine direkte Verbindung möglich ist, reduziert sich hierbei auf sehr effiziente Punkt-in-Polygon-Überprüfungen. Ein ähnlicher Suchbaum kann ebenso für Beugungskanten erstellt werden. Mit diesem neuartigen Ansatz kann ein Funkkanal zwischen zwei Teilnehmern in einem innerstädtischen Kreuzungsszenario bei einer Zeitauflösung von einer Millisekunde unter Beachtung von Reflexionen bis zur 2. Ordnung und Beugung bis zur 3. Ordnung auf einem einfachen Laptop in Echtzeit prädiziert werden. Dieser Ansatz soll im nächsten Schritt um ein neues, in [BA 19/017] entstandenes Modell für die Streuung an inhomogenen Häuserwänden erweitert und mit Messdaten validiert werden.

### **6.2 Simulation der Kommunikation beim LKW-Platooning**

Im Rahmen des BMBF-Projekts 5G-Netmobil wird eine allumfassende Kommunikationsinfrastruktur für das vernetzte Fahren mit kurzen Latenzen entwickelt. Im Rahmen eines Unterauftrags der Volkswagen AG hat Herr Nan ein Simulationsmodell für einen LKW-Platoon in SiMoNe implementiert und Untersuchungen anhand eines Notbremsszenarios auf einer Autobahn durchgeführt. Schwerpunkt der Aktivitäten im Berichtszeitraum war die Erweiterung der Simulationsmodelle auf 5G einschließlich der Numerologie und erster Ansätze zum Network Slicing sowie ein Vergleich der Leistungsfähigkeit von IEEE 802.11p mit den verschiedenen C-V2X-Moden (C-V2X: Cellular Vehicle-to-X) von 4G und 5G. Darüber hinaus wurde ein Vergleich des Einflusses des Kanalmodells auf

die Simulation angestellt. Hierfür wurden ein Ray Tracing Modell sowie das stochastische „Winner+“-Modell untersucht [NAN/SCHW/KÜR1]. Hierbei hat sich herausgestellt, dass für größere Entfernungen zwischen Sender und Empfänger die Simulationsergebnisse hinsichtlich Latenz und Paketfehlerrate bei beiden Modellen vergleichbar sind. Dies legt eine Kombination beider Modelle nahe, bei der für größere Entfernungen auf das stochastische Kanalmodell zurückgegriffen wird.

## **7. THz-Kommunikation**

### **7.1 EU-Projekt TERAPOD**

Im EU-Projekt TERAPOD beschäftigen wir uns mit der Kanalmodellierung [ECK/DOE/REY/KÜR1], [ECK/DOE/KÜR1], [ECK/DOE/REY/KÜR2] und der Simulation von THz-Funkstrecken in Rechenzentren [ECK/KÜR1]. Im zweiten Projektjahr stand zunächst die Auswertung der Ausbreitungsmessungen, einschließlich der Entwicklung von geeigneten Kalibrierverfahren [MA 19/016], im Vordergrund. Weiterhin stand die Implementierung eines initialen Softwaredemonstrators [ECK1], der die Ergebnisse der verschiedenen Softwaresimulatoren SiMoNe, ns-3 und mininet zusammenführt und visualisiert, im Fokus. Dank der Einbindung des „Helix Toolkit 3D for .NET“ können Umgebungen dreidimensional dargestellt werden, siehe **Abbildung 15**. Der Demonstrator nutzt diese Funktionalität zur Visualisierung eines Rechenzentrums mit 16 Racks, die jeweils mit vier Top-of-Rack-Antennen und einer Glasfaseranbindung ausgestattet sind. Als Funktion der Zeit zeigt der Demonstrator die verschiedenen drahtlosen Inter-Rack-Verbindungen und stellt unterschiedliche Leistungsparameter der Verbindungen grafisch dar. Die finale Version des Demonstrators soll auf das reale Forschungsrechenzentrum von Dell EMC in Cork übertragen werden.

### **7.2 EU-Projekt ThoR**

Im Rahmen des EU-Japan-Projekts ThoR [KÜR14], [KÜR19], [KÜR21] haben wir uns im ersten Projektjahr mit Interferenzuntersuchungen als Vorbereitung zur Weltfunkkonferenz 2019 sowie dem Aufbau der Simulationsumgebung für die Simulation von THz-Backhaul/Fronthaul-Funkstrecken befasst. Herr Rey hat die Interferenz zwischen Festnetz-Diensten und dem passiven Satelliten-Erderkundungsfunkdienst untersucht [REY1]. Die Studie hat gezeigt, dass insgesamt 138 GHz im Frequenzbereich zwischen 275 und 450 GHz für eine störungsfreie Koexistenz zwischen beiden Funkdiensten geeignet sind. Basierend auf den Anforderungen an die in ThoR geplante 300-GHz-Backhaul-Funkstrecke [KÜR23] hat Herr Jung federführend an der Definition der Simulationsszenarien (in Hannover, Berlin, Tokio-Shinjuku) [JUNG/KÜR1] mitgewirkt und das Simulationskonzept erstellt [JUNG/ECK/DRE/KÜR1]. Be-

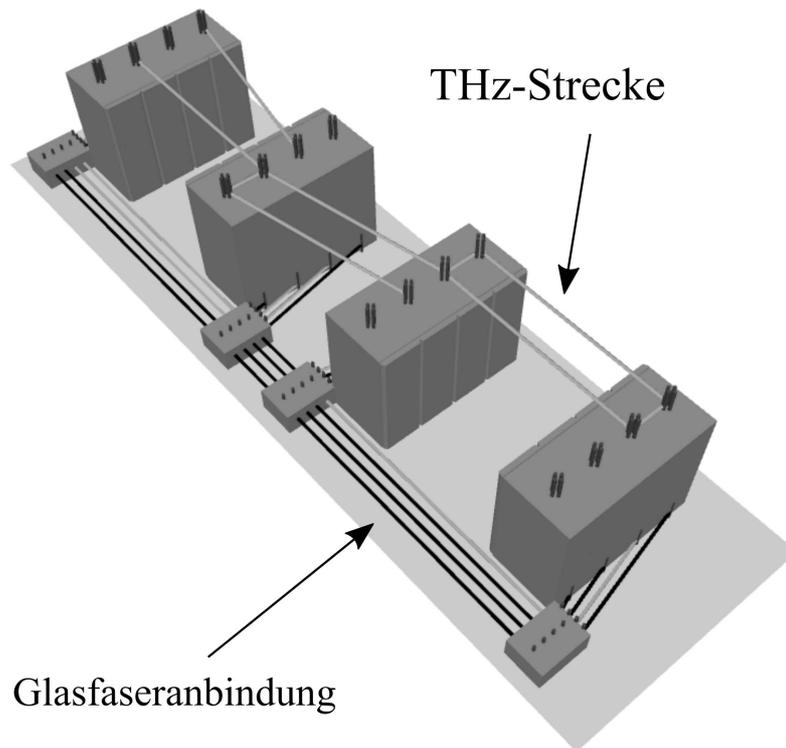


Abbildung 15: Visualisierung der THz-Datenverbindungen in einem Rechenzentrum

reits im Rahmen seiner Masterarbeit [MA 19/004] hat Herr Jung einen Algorithmus zur automatisierten Planung von THz-Backhaul-Funkstrecken entwickelt, mit dem es möglich ist, neue Basisstationen in einem ultra-dichten Netz so anzubinden, dass möglichst wenige Basisstationen eine Glasfaseranbindung benötigen. Der Algorithmus berücksichtigt sowohl die für die Funkausbreitung bei 300 GHz relevanten Wetterbedingungen als auch mögliche Interferenzen zwischen den 300-GHz-Funkstrecken [JUNG/ECK/DRE/KÜR2], [JUNG1], [JUNG/DRE/ECK/KÜR1]. Im Simulationsszenario Hannover, siehe **Abbildung 16**, mit der Annahme einer ultradichten Netzstruktur, wie sie z. B. mit Zugangspunkten im Millimeterwellenbereich zukünftig aussehen könnte, benötigen nur ungefähr 12 % der neu anzubindenden Basisstationen eine Glasfaseranbindung.

### 7.3 Metrologie für die THz-Kommunikation (DFG FOR 283 Meteracom)

Im Juli 2019 hat der DFG-Senatsausschuss die Forschungsgruppe Meteracom bewilligt, siehe auch der Sonderbericht auf S. 115. Meteracom befasst sich mit Messverfahren für die THz-Kommunikation, mit der zukünftig ultrahohe Daten-



Abbildung 16: Automatisch ermittelte THz-Funkstrecken im Simulationsszenario Hannover für eine angenommene ultradichte Netzstruktur

raten mit bis 1 Tbit/s im Frequenzbereich oberhalb von 300 GHz erreicht werden können. Zusammen mit insgesamt 10 Kolleginnen und Kollegen aus sechs Universitäten in Deutschland sowie den nationalen Metrologieinstituten in Deutschland (Physikalisch-Technische Bundesanstalt – PTB) und Großbritannien (National Physics Laboratory – NPL) werden Herausforderungen der Metrologie für die THz-Kommunikation systematisch auf den folgenden vier Gebieten untersucht [KÜR12]: (i) Rückführbarkeit auf das Internationale SI-Einheitensystem, (ii) Charakterisierung des Messsystems selbst, (iii) metrologische Charakterisierung der Hochfrequenzkomponenten und des Ausbreitungskanals und (iv) Messungen, die für die Gewährleistung der Funktionalität des eigentlichen THz-Kommunikationssystems benötigt werden. Das Projekt ist in neun fachliche Teilprojekte sowie ein Koordinationsprojekt gegliedert. Die Abteilung Mobilfunksysteme ist an vier der neun fachlichen Teilprojekte beteiligt, die von Herrn Herold

und Herrn Doeker bearbeitet werden. Prof. Kürner ist Sprecher der Forschungsgruppe und leitet das Koordinationsprojekt. Einer der Schwerpunkte im ersten Projektjahr wird das Thema „Device Discovery“ sein, bei dem wir auf einschlägige Vorarbeiten aus einem früheren Projekt zurückgreifen können [REY/KÜR1].

#### **7.4 THz-Kommunikation für V2X**

Im Rahmen der Seed-Funding-Initiative zwischen der Universität Tampere und der Technischen Universität Braunschweig fand ein Austausch von zwei wissenschaftlichen Mitarbeitern für jeweils einen Monat statt (s. auch Abschnitt 5.2). Gemeinsam mit Vitaly Petrov von der Universität Tampere wurde dabei in Kooperation mit dem Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) eine einwöchige Messkampagne durchgeführt, deren Ziel es war, den Einsatz von THz-Kommunikation in zukünftigen Anwendungen der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation zu erforschen. Dabei wurden unterschiedliche Szenarien im Straßenverkehr nachgestellt und der Einfluss und die Eigenschaften in Bezug auf Reflexion, Transmission, Streuung und Beugung an einem Testfahrzeug mit dem institutseigenen Channel Sounder bei 300 GHz gemessen. Das Fahrzeug hatte dabei großen Einfluss auf den Mobilfunkkanal, da es zum einen eine geringe Transmission zulässt und zum anderen in gewissen Bereichen stark reflektiert. In **Abbildung 17** sind die Veränderung der Winkel der reflektierten Signale sowie das Auftreten weiterer Reflektionen mit zunehmender Entfernung  $d$  der beiden kommunizierenden Fahrzeuge zu sehen. Erste Ergebnisse wurden bei der IEEE 802 Plenary in Wien im Juli 2019 vorgestellt [ECK/KÜR2].

#### **7.5 Nanokommunikation**

Fortschritte auf dem Gebiet der Nanotechnologie eröffnen zukünftig die Möglichkeit, mit kleinsten Kommunikationsknoten in biologischen Systemen Messungen durchzuführen und die Ergebnisse mittels Nanokommunikation nach außen zu kommunizieren. Die Nanoknoten haben dabei die Größe zwischen mehreren hundert Nanometer und einem Mikrometer. Durch die kleine Größe der Komponenten und der Antennen bietet sich der THz-Frequenzbereich für die drahtlose Übertragung an. Durch die hohe Funkausbreitungsdämpfung in diesem Frequenzbereich speziell in biologischen Systemen einerseits und die starke Miniaturisierung andererseits ergeben sich große Herausforderungen für die Realisierung des Kommunikationssystems. Hierzu gehören auch die Verfahren für die Bereitstellung der notwendigen Energie für die Übertragungsknoten. Herr Indrawijaya untersucht im Rahmen eines deutsch-indonesischen Forschungsprojekts die Machbarkeit von derartigen Nanokommunikationssystemen auf der Basis theoretischer Überlegungen und eigener Simulationen.

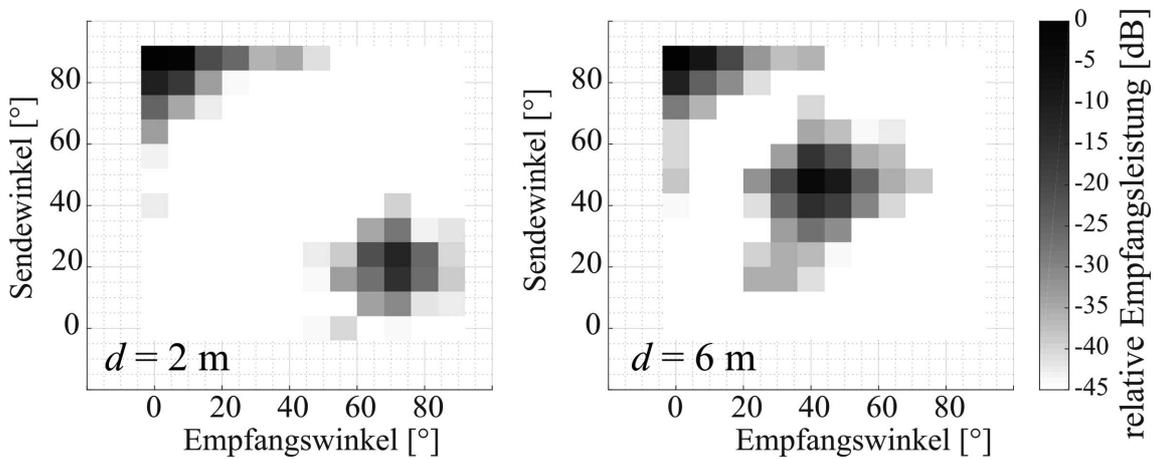
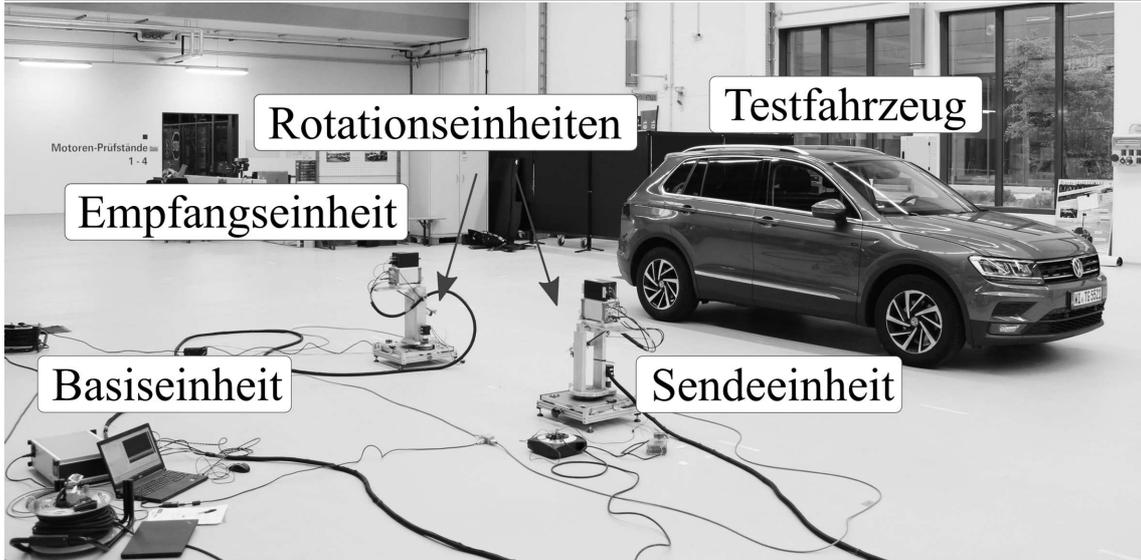
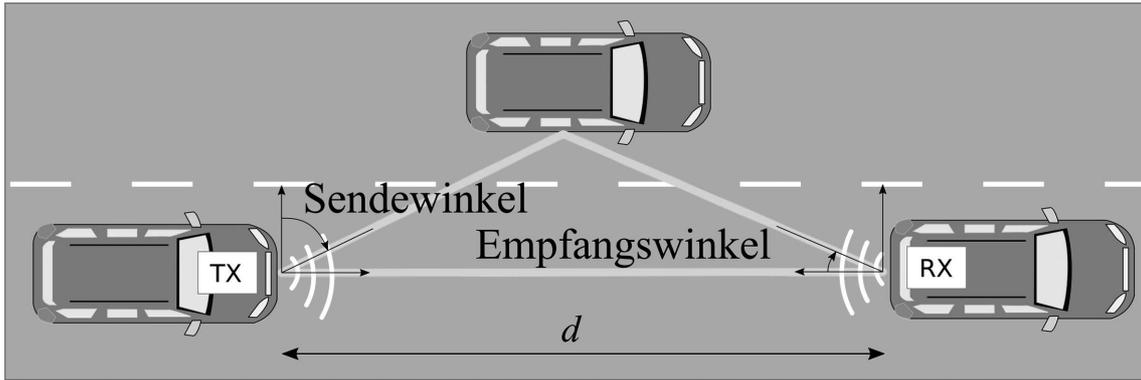


Abbildung 17: Schematische Darstellung des vermessenen Szenarios für die THz Fahrzeug-Fahrzeug-Kommunikation (oben); Messaufbau mit Fahrzeug und Channel Sounder (Mitte); gemessene Dämpfung als Funktion der Abstrahlwinkel am Sender und des Ankunfts winkels am Empfänger für verschiedene Fahrzeugabstände  $d$  (unten)

## **7.6 Regulierung und Standardisierung**

Auch in diesem Jahr haben wir uns aktiv in die Regulierung und Standardisierung von THz-Kommunikationssystemen eingebracht [KÜR16], [KÜR8]. Im Vordergrund standen dabei Verträglichkeitsuntersuchungen mit den passiven Systemen der Erdbeobachtungssatelliten, die Herr Rey im Rahmen des EU-Projekts ThoR durchgeführt hat (siehe auch Abschnitt 7.2). Die Ergebnisse wurden sowohl in die nationale Vorbereitungsgruppe für die WRC 2019 [REY2] als auch in die Standardisierung bei IEEE 802 eingebracht [REY/KÜR2]. Weitere Ergebnisse aus den EU-Projekten ThoR und TERAPOD wurden in verschiedenen Standardisierungsgremien [KÜR25], [KÜR24] zur Verfügung gestellt.