

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“ [KÜR1], [KÜR6], „Fahrzeug-Kommunikation“ [THI/DRE/ECK/KÜR1], [HER/THI/KÜR1] und „THz-Kommunikation“ [PEN/KÜR2], [PEN/KÜR3], [KÜR8], [KÜR3], [KÜR9], [KÜR11]. Seit Jahren verschwimmen dabei die Grenzen zwischen den ursprünglich sehr disjunkten Anwendungsfeldern, insbesondere im Zusammenhang mit der Einführung der fünften Generation (5G) des Mobilfunks und noch viel mehr in der nun in Form von Forschungsprojekten beginnenden Entwicklung der sechsten Generation (6G). 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 Berichtszeitraum wurden die beiden von der EU geförderten Projekte aus dem Horizon2020(H2020)-Forschungsrahmenprogramm 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, und H2020-TERAPOD („Terahertz based Ultra High Bandwidth Wireless Access Networks“) fortgesetzt. 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 [PEN/ECK/KÜR1], [PEN/KÜR1]. Aus der Kooperation mit der Universität Tampere (Finnland) ist eine gemeinsame Publikation entstanden [ECK/KÜR1]. Prof. Kürner leitet das IEEE 802.15 Standing Committee (SC) THz und ist weiterhin als Advisory Member im NGMN(Next Generation Mobile Networks)-Konsortium aktiv. Er ist darüber hinaus Mitglied im Board of Directors der European Association on Antennas and Propagation (EurAAP).

2.2 Nationale Förderprojekte

Wir arbeiten weiterhin in der im Juli 2019 bewilligten DFG-Forschungsgruppe Meteracom (Metrologie für die THz-Kommunikation), deren Sprecher Prof. Kürner ist. Im Berichtszeitraum konnten wir zwei neue nationale Verbundprojekte beginnen: Seit Dezember 2019 bearbeiten wir das vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) geförderte Projekt 5GLabBraWo und seit Juni 2020 arbeiten wir in dem von der DFG geförderten Verbundprojekt Suresoft (Sustainable Research Software Development and Deployment) mit. Darüber hinaus arbeiten wir seit April 2020 im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts Tech4TU an neuen Konzepten für die englischsprachige Lehre. Wir sind Mitglied bei TUBS.digital.

2.3 Industrieprojekte

Das im vergangenen Jahr begonnene Projekt mit der Volkswagen AG zur Lokalisierung mit Millimeterwellen (gemeinsam mit dem Institut für Hochfrequenztechnik der TU Braunschweig) wurde abgeschlossen. Darüber hinaus bearbeiten wir ein Nachfolgeprojekt im Auftrag der Hytera Mobilfunk GmbH zur Frequenzplanung in TETRA(Terrestrial Trunked Radio)-Netzen. Die Projekte „Record and Replay“ mit der IAV GmbH in Gifhorn sowie ein neues Projekt zur Funknetzplanung in der Deutschen Bucht im Auftrag des BMVI wurden abgeschlossen.

3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung

Im Berichtszeitraum waren elf Wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung beschäftigt. Zum 30.11.2020 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 Friebel (seit 01.02.2020) bearbeitet. Das Gebiet der THz-Kommunikation bearbeiteten die Herren Eckhardt, Jung, Herold,

Doeker und Indrawijaya (bis 28.11.2020). Das Forschungsgebiet „Fahrzeug-X-Kommunikation“ wurde von den Herren Dreyer, Nan (bis 31.12.2019), Thielecke und Diestelhorst (seit 01.03.2020) bearbeitet. Tatkräftig unterstützt wird die Abteilung durch Frau Beyer sowie durch wissenschaftliche Hilfskräfte und Studierende, die im Rahmen ihrer Bachelor- und Masterarbeiten in der Abteilung mitarbeiten. Auch in diesem Jahr konnten wir einen Interim der IIT Bombay begrüßen – allerdings musste Herr Pranshu Negi aufgrund der Pandemielage sein Praktikum virtuell absolvieren. Im Berichtszeitraum wurden drei Bachelor- und eine Masterarbeit abgeschlossen. Roman Alieiev, Guillaume Jornod [KÜR2] (beide Volkswagen AG) und Paul Unterhuber [KÜR4] (Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt – DLR) wurden bzw. werden von Prof. Kürner als externe Doktoranden betreut. Herr Jornod hat am 29. Oktober 2020 seine Promotion mit der Dissertation mit dem Thema „Predictive Vehicle-to-Vehicle Communications for Fuel-Efficient Platooning“ erfolgreich abgeschlossen.

4. Simulationsplattform SiMoNe

Der Simulator für Mobilfunknetzwerke (SiMoNe) feierte am 07. Juni 2020 seinen achten Geburtstag. In den letzten 12 Monaten arbeiteten durchschnittlich 10 Wissenschaftler und vier Studierende [Ma 20/022], [Ba 20/015], [Ba 20/016] und [Ba 20/017] an der Weiterentwicklung der Plattform, die in der Abteilung Mobilfunksysteme inzwischen die Grundlage für alle Industrie-, EU- und DFG-Projekte darstellt.

4.1 Neueste Entwicklungen

Einen enormen Entwicklungsschub brachten die Anschaffung neuester Simulationsserver sowie die Umstellung auf eine Git-basierte Quellcodeverwaltung. Die Einführung vorgeschriebener Programmier-Konventionen in Zusammenhang mit Schulungen innerhalb der Gruppe hat dabei zu einer deutlichen Professionalisierung in der Entwicklung geführt, die durch vollautomatische Funktions- und Kompatibilitätstests eines so genannten Build-Servers überwacht wird.

Auch inhaltlich hat sich am Simulationsframework SiMoNe einiges getan. Ein Schwerpunkt der laufenden Arbeit ist die immer bessere Integration von 3D-Visualisierungen. So ermöglicht ein Objektkatalog eine effiziente Generierung neuer Indoorszenarien für Funkkanalprädiktionen. Immer häufiger kommen auch 3D-Live-Visualisierungen bei der Demonstration von Simulationsergebnissen zum Einsatz, die insbesondere bei fachfremden Personen durch eine intuitive Darstellung der Ergebnisse auf große Zustimmung stoßen.

Angetrieben durch den neuen Mobilfunkstandard 5G NR unterstützt SiMoNe mittlerweile Beamforming und MIMO-Simulationen. Während Funkkanalprä-

diktionen in der Vergangenheit aus Komplexitätsgründen offline durchgeführt und für den späteren Zugriff gespeichert wurden, finden diese nun zunehmend live, d.h. für V2V (Vehicle-to-Vehicle)-Szenarien mit wenigen Teilnehmern in Echtzeit statt. Der hierfür neu entwickelte und extrem schnelle Prädiktor „MobPred“ (Mobility Predictor) unterstützt inzwischen auch Streuung an rauen Oberflächen sowie Beugung an bewegten und statischen Hindernissen beliebiger Ordnungen.

Aus dem EU-Projekt TERAPOD heraus hat sich eine neue Arbeitsgruppe innerhalb des SiMoNe-Teams gegründet, die an der Entwicklung eines integrierten PHY-Layer Simulators arbeitet. Hiermit sollen zunächst einfache Link-Level-Simulationen für beliebige Modulations- und Kodierungsverfahren möglich werden. Später kann dasselbe Konzept auf komplexere Szenarien mit vielen Teilnehmern und unter Beachtung der tatsächlichen Interferenzsituation angewendet werden. Die Kopplung der bestehenden strahlenoptischen Pfadverlustprädiktoren zusammen mit dem neuen PHY-Layer Simulator innerhalb realistischer System-Level-Simulationsumgebungen macht SiMoNe zu einem einzigartigen Werkzeug zukünftiger Forschungsarbeiten.

4.2 DFG-Projekt Suresoft

Die Entwicklung von Software ist ein essentieller Bestandteil der Forschung am IfN. Eine nachhaltige Softwareentwicklung ermöglicht eine Weiterverwertung der Algorithmen und Forschungsergebnisse von der nachfolgenden Generation Wissenschaftlicher Mitarbeiter*innen. Zudem ist eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aus Simulationen die Basis guter wissenschaftlicher Arbeit. Um diesen Ansprüchen an die Softwareentwicklung gerecht zu werden, wurde das Projekt Suresoft ins Leben gerufen.

Suresoft ist ein fachübergreifendes DFG-Projekt mit mehreren Partnern innerhalb der TU Braunschweig. Die an dem Projekt beteiligten Institute stammen aus dem Bauingenieurwesen, der Chemie, dem Maschinenbau und der Elektrotechnik und haben jeweils eigene Simulatoren für ihre Fachdisziplinen entwickelt. Fachliche Unterstützung erhalten die Institute durch das Institut für Betriebssysteme und Rechnerverbund sowie das GITZ und die Universitätsbibliothek. Das Ziel des Projekts ist die Anwendung von bewährten Konzepten aus der Softwareentwicklung auf die Entwicklung der Simulatoren in der Forschung an der TU Braunschweig. Dazu gehören die vier Schwerpunkte Continuous Integration (CI), Deployment, Virtualization und Archivierung, siehe **Abbildung 8**. Die institutseigene Simulationsumgebung SiMoNe wird insbesondere hinsichtlich der Konzepte der CI und der Archivierung optimiert.

Wichtigster Bestandteil im Rahmen des Konzeptes von Continuous Integration ist ein Build- und Test-Server. Dieser überprüft als neutrale Instanz den produzierten Code und gibt dem Entwickler Rückmeldung. So wird eine funktionieren-

de Instanz der Simulationssoftware zu jeder Zeit gewährleistet. Die Werkzeuge für die Umsetzung des Konzeptes der Continuous Integration sind die Versionsverwaltung Git in Kombination mit der Webanwendung GitLab. Herr Friebel hat bereits innerhalb von GitLab einen Build-Server für die Entwicklung von SiMoNe implementiert.

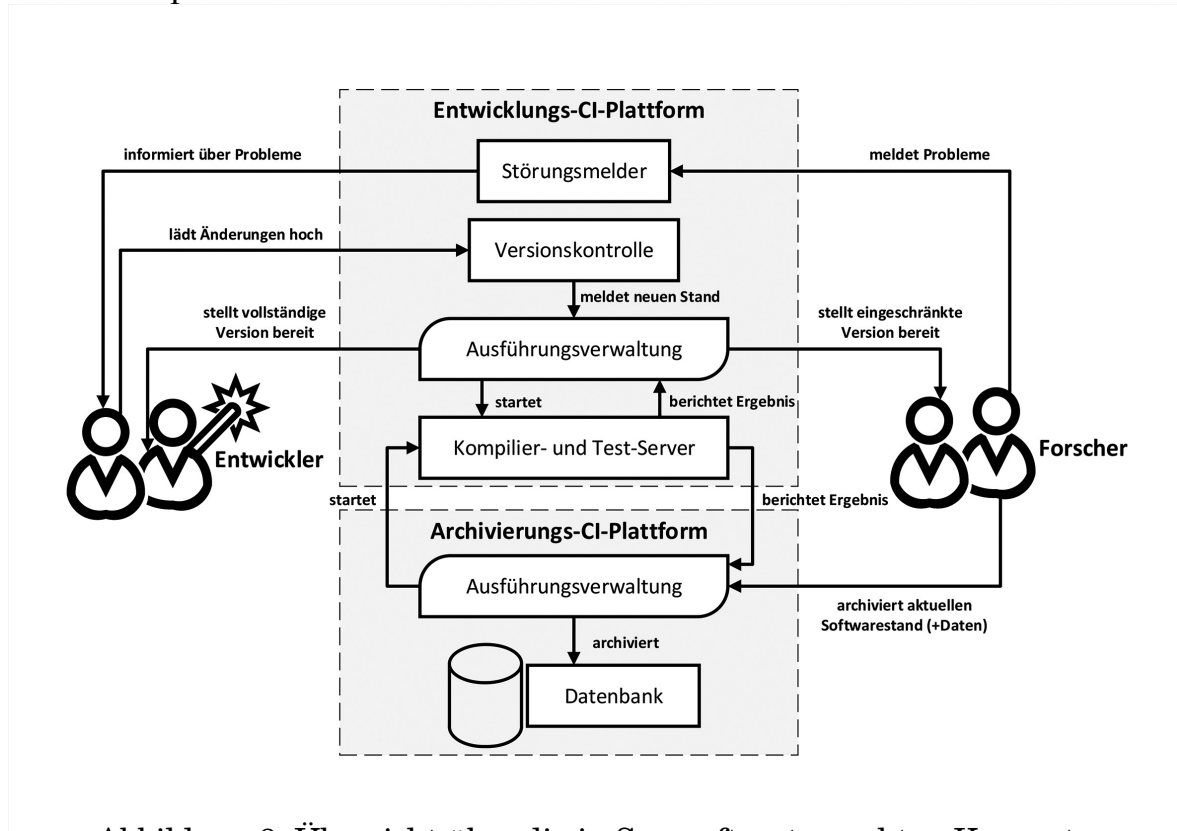


Abbildung 8: Übersicht über die in Suresoft untersuchten Konzepte

Dieser überprüft bei jedem Hochladen von Veränderungen an der Simulationssoftware, ob diese noch kompiliert werden kann. Fehlende Dateien oder Abhängigkeiten werden so detektiert und dem Entwickler zurückgemeldet. Als neutrale Instanz und unabhängiges System können zudem systemspezifische Fehler ausgeschlossen werden.

Archivierung ist ein weiterer Schwerpunkt, der insbesondere anhand von SiMoNe umgesetzt wird. Aufgrund der Anbindung an eine dynamische Datenbank ist die Reproduzierbarkeit einer Simulation nicht immer gewährleistet. Daher werden bei der Archivierung von Simulationen nicht nur die Algorithmen gespeichert, sondern die Datenbankelemente werden ebenfalls mitgesichert. Eine Momentaufnahme der Simulation mitsamt dem System und dem Datenbankausschnitt ermöglicht es zudem externen Forschern, die Simulationsergebnisse

zu reproduzieren. Die Themen Deployment und Virtualization stehen im Fokus der weiteren Simulatoren im Projektkonsortium.

5. Methoden und Algorithmen zur Simulation, Planung und Optimierung von Infrastrukturnetzen

5.1 5GLabBraWo

Der neue Mobilfunkstandard 5G gilt als Schlüsseltechnologie der Zukunft. Durch die Echtzeitfähigkeit, die Sicherstellung der Datenübertragung und die erhöhte Datenrate verspricht 5G, eine erfolgreiche Nachfolgetechnologie der bisherigen Mobilfunkgeneration LTE zu werden. Das vom BMVI geförderte Projekt 5GLabBraWo (5G Reallabor in der Mobilitätsregion Braunschweig Wolfsburg) zum Thema 5G ermöglicht die Kooperation der Forschungseinrichtungen DLR, PTB, Fraunhofer IIS, ifak und von vier Instituten der TU Braunschweig, um den neuen Mobilfunkstandard zu erforschen und den sinnvollen Ausbau sowie Anwendungsfälle im Sinne einer Modellregion reproduzierbar zu erarbeiten.

Das 5GLabBraWo ist derart konzipiert, dass die notwendige Infrastruktur in großem Maße bereitgestellt wird und diese Infrastruktur der Wissenschaft, Wirtschaft und Gründer-Szene sowie allen Bürgerinnen und Bürgern zur Verfügung steht. Das Reallabor ist offen für jegliche Themenbereiche wie Infrastruktur, Umwelt und Ressourcen, Verwaltung, Wirtschaft, Bürger und Gesellschaft sowie Mobilität. Mit der Leitung von zwei Teilprojekten engagiert sich das IfN intensiv bei den Aktivitäten im 5GLabBraWo. Beide Teilprojekte sind als Querschnittsthemen konzipiert, um Forschungsergebnisse und Erkenntnisse in die anwendungsorientierten Use-Case-Teilprojekte mit einfließen zu lassen.

In dem von Herrn Schweins geleiteten Teilprojekt „Digitaler Zwilling“ wird das Reallabor SiMoNe nachgebildet. Versorgungsprädiktionen der Regionen Braunschweig und Wolfsburg sollen den Use-Cases helfen, ihre territoriale Integrität einschätzen zu können. Geplante Messungen sollen die Prädiktionen zur Mobilfunkversorgung validieren. Dazu wurde ein USRP (Universal Software Radio Peripheral) der aktuellen Generation inklusive eines leistungsstarken Messcomputers angeschafft, mit denen die 90 MHz breiten Frequenzbänder, auf denen unter anderem in Deutschland 5G ausgestrahlt wird, im Ganzen vermessen werden können. Perspektivisch sollen mithilfe von SiMoNe und anhand der validierten Modelle Klassifizierungs- und Optimierungsalgorithmen implementiert und getestet werden.

Das zweite Teilprojekt beschäftigt sich mit der multikriteriellen Netzbewertung. Bei der Einführung neuer Funktechnologien, wie in diesem Fall 5G, besteht die Anforderung, den Koexistenzbetrieb mit bereits vorhandenen Funknetzen zu ge-

währleisten. Im Rahmen des 5G-Reallabors führt Herr Diestelhorst Forschungen zur Koexistenz von 5G-V2X zu WLANp durch (siehe Abschnitt 6).

Zudem wird innerhalb dieses Teilprojektes die effiziente Verbreitung von Informationen mittels 5G-Broadcast durch die Arbeitsgruppe für Elektronische Medien in der Abteilung Informationstheorie und Kommunikationssysteme untersucht. In einem ersten Schritt wurde hierfür die 5G-Spezifikation erweitert, um einen Broadcast von Diensten über High Tower High Power(HTHP)-Infrastruktur zu ermöglichen. Entsprechende HTHP-Sender und -Messempfänger werden im institutseigenen, echtzeitfähigen Software Defined Radio (SDR) Toolkit implementiert (siehe auch den Bericht der Arbeitsgruppe für Elektronische Medien auf Seite 96ff). Ein entsprechender Sender soll im Großraum Braunschweig in Betrieb genommen werden. In Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut IIS ist ein Broadcast-Unicast-Hybridempfänger geplant, um im praktischen Einsatz die Effizienz des Broadcastsystems zu untersuchen.

5.2 Record and Replay

Die Verfügbarkeit von Mobilfunknetzen nimmt in der heutigen Zeit eine wichtige Rolle ein. Zum Beispiel können in modernen Fahrzeugen Internet-basierte Komfortanwendungen, wie z.B. Musikstreaming, über diese Netze abgerufen werden. Auch sicherheitskritische Applikationen, wie das seit 2018 verpflichtende eCall-System, welches bei einem Verkehrsunfall einen automatischen Notruf aussendet, nutzen die Mobilfunknetze. Bei der Entwicklung neuer Applikationen wird deswegen stets evaluiert, in welcher Form sich äußere Einflüsse auf die sogenannte „Qualität des Dienstes beim Kunden“ auswirken können. Im vergangenen Jahr hat Herr Thielecke im Rahmen der Kooperation mit der IAV GmbH in Gifhorn die Funktionalitäten des „Record und Replay“-Demonstrators erweitert, um für ein gegebenes Straßennetz simulativ die Verfügbarkeit eines vorgegebenen Dienstes zu präzisieren. Dabei werden für den Dienst innerhalb der Simulationsumgebung kritische Randparameter, wie z.B. die minimal notwendige Datenrate, vorgegeben. Mittels makroskopischer Prädiktionen können auf Basis von frei verfügbaren Umgebungsdaten realitätsgetreue Simulationen durchgeführt werden. Die Ergebnisse bzw. die schlussendliche Verfügbarkeit des Dienstes werden auf einer interaktiven Karte mit Hilfe eines einfachen Ampelsystems visualisiert. Mit der entwickelten Simulationsumgebung können bereits in der Entwicklungsphase die Anforderungen aus der Designphase des Dienstes überprüft werden. Weiterhin lassen sich erste Sensibilitätsanalysen durchführen. Zur Überprüfung der hinterlegten Modelle in der Simulationsumgebung wurden mittels eigens entwickelter Messtechnik erste prototypische Messungen durchgeführt. Diese Fähigkeiten sollen in Zukunft weiter ausgebaut werden.

6. Fahrzeug-zu-X-Kommunikation

Einen wichtigen Schwerpunkt in der Abteilung Mobilfunksysteme bildet nach wie vor die Fahrzeug-zu-Fahrzeug(V2V)- bzw. die Fahrzeug-zu-X(V2X)-Kommunikation. Ziel der Arbeit ist es, ein Simulations-Framework zu erschaffen, mit dem realistische Simulationen beliebig komplexer Szenarien möglich sind. Die in der Wissenschaft üblichen Forschungsarbeiten stützen sich aus Komplexitätsgründen oft nur auf einen Teilaspekt des Gesamtsystems. Ein Beispiel sind z.B. Untersuchungen zur Paketfehlerrate in Abhängigkeit der Kommunikationsdistanz und Anzahl weiterer Teilnehmer in der Umgebung.

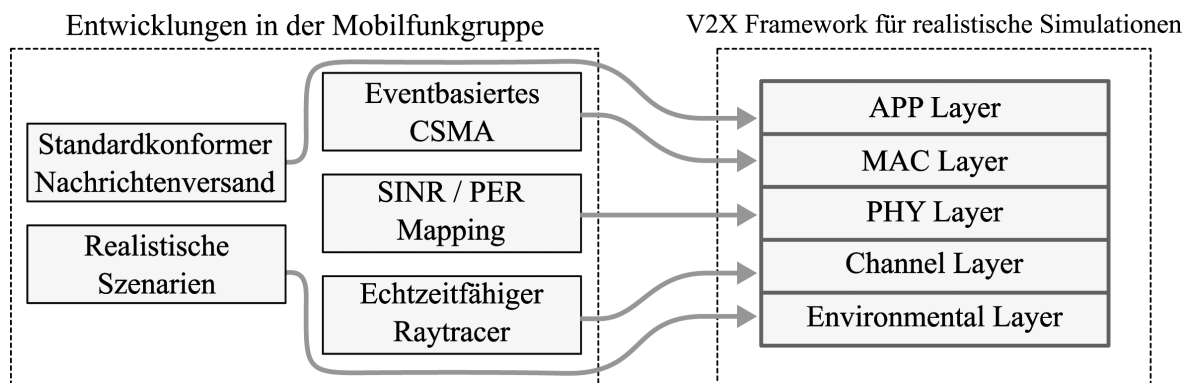


Abbildung 9: Ein Framework für realistische V2X-Simulationen

Mit solchen Untersuchungen lassen sich jedoch nicht ohne weiteres Aussagen über die Funktionsfähigkeit und Zuverlässigkeit einer spezifischen Anwendung in realistischen Umgebungen ableiten. Die Simulation der V2X-Kommunikation in realistischen Szenarien besteht aus der Modellierung von fünf wesentlichen Ebenen (Layern), die sich gegenseitig bedingen und nicht unabhängig betrachtet werden können. Diese sind in **Abbildung 9** (rechte Seite) gezeigt. Für den V2X-Funkstandard 802.11p können seit diesem Jahr alle Layer in einer geschlossenen Simulationsumgebung als Teil des SiMoNe-Frameworks simuliert werden.

Der Environmental Layer muss das Szenario so genau wie möglich abbilden. Dazu gehört das Bereitstellen von Gebäude- und Straßendaten sowie realistischen Fahrzeugbewegungen, die entweder gemessen oder mit einem Mobilitätsprädiktor simuliert werden. SiMoNe besitzt hierfür eine Anbindung an den Simulator SUMO (Simulation of Urban MObility) des DLR und ist ebenso in der Lage, echte, durch Kameradaten erfasste, Verkehrsflüsse abzuspielen. Der Channel Layer stellt zu jedem Zeitpunkt Empfangsleistungen aller relevanten Funkverbindungen bereit. Hier kommt ein hoch-optimierter Raytracer zum Einsatz, der auch für hunderte Kommunikationspaare strahlenoptische Prädiktionen ermöglicht [DRE/KÜR1]. Der PHY-Layer bildet das aktuelle SINR

(Signal-to-Interference-and-Noise-Ratio) eines Empfängers in Abhängigkeit der Paketgröße auf eine Paketfehlerwahrscheinlichkeit ab. Für dieses Mapping hat Herr Dreyer ein neues Paketfehlerratenmodell entwickelt, das auf umfangreichen Link-Level-Simulationen – unter Beachtung stochastischer Kanalmodelle – beruht [DRE/KÜR2]. Der MAC-Layer koordiniert den Kanalzugriff. Dieser geschieht bei 802.11p unkoordiniert über Carrier-Sense-Multiple-Access (CSMA) und ist zu jeder Zeit möglich. Da SiMoNe mit einem festgelegten Zeitraster arbeitet, wurde hierfür ein neuartiges Simulationskonzept entwickelt, das eine Event-basierte Simulation innerhalb eines System-Level-Simulators mit festem Zeitraster ermöglicht. Zuletzt folgt der APP-Layer. Hier wurde der bereits standardisierte Versand periodischer Nachrichten entsprechend des in Europa genutzten ITS(Intelligent Transport Systems)-G5 implementiert. Außerdem können auf Basis eines generischen Anwendungsmoduls neue Event-gesteuerte Anwendungen implementiert werden. Bereits implementiert wurde der Vollbremsungsassistent, der durch den Versand einer Nachricht im Falle einer Vollbremsung umliegende Fahrzeuge warnt. Das bestehende Framework ist mit all seinen Teilmodulen seit diesem Jahr in der Lage, komplexe, realistische Szenarien auf Basis des 802.11p-Standards zu simulieren. In diesem Jahr untersucht wurden bereits Autobahnsszenarien (basierend auf echten Verkehrsdaten, die durch Drohnenaufnahmen erfasst wurden) sowie die stark befahrene Kreuzung Rebenring/Hagenring/Hans-Sommer-Straße in Braunschweig unter Beachtung der echten Ampelphasen.

Aber auch auf dem Gebiet der Simulation zellulärer V2X-Kommunikation gab es in diesem Jahr Fortschritte. Im Jahr 2017 wurde der Standardisierungsprozess des sogenannten C-V2X(Cellular-V2X)-Funkstandards auf Grundlage von LTE durch 3GPP abgeschlossen. Dieser Funkstandard stellt in der Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation eine Alternative zum dezentral organisierten und für die Fahrzeugkommunikation ursprünglich vorgesehenen Standard 802.11p dar. In Industrie und Forschung stellt man sich schon seit einigen Jahren die Frage, welcher Funkstandard (in welcher Situation) besser für die V2X-Kommunikation geeignet ist.

Für die Beantwortung dieser Frage kooperiert das IfN mit verschiedenen Forschungsinstituten aus der Region im Rahmen von 5GLabBraWo (vgl. Abschnitt 5.1). Hier sollen in Zukunft beide Übertragungsstandards getestet, verglichen und auch hinsichtlich einer potenziellen Koexistenz untersucht werden. Einen wichtigen Baustein bilden das Forschungsfeld AIM sowie das Testfeld Niedersachsen des DLR. Beide Plattformen stellen eine V2X-Infrastruktur mit angebotenen Verkehrsmessungen zur Verfügung. Damit sollen in Zukunft Messszenarien genauestens definiert, durchgeführt und analysiert werden. Die Messkampagne befindet sich momentan noch in der Planungsphase. Wichtige Fragen hierbei betreffen die Auswirkung verschiedenster Störquellen, wie andere Fahrzeuge aus dem umgebenden Fahrzeugverkehr, Tunnel und Brücken auf die Kom-

munikation. Mit den erfassten Verkehrsdaten sollen solche Szenarien hochpräzise nachgestellt und in der Simulationsumgebung SiMoNe untersucht werden. Funkkanalmessungen werden außerdem dazu dienen, die eingesetzten Prädiktionsmodelle zu optimieren und zu validieren. Neben den geplanten Messungen soll auch der C-V2X-Funkstandard sowie später der 5G-V2X-Funkstandard in SiMoNe implementiert werden. Das langfristige Ziel ist es, eine valide Aussage über die Leistungsfähigkeit bzw. die Koexistenz zellularer und dezentraler V2X-Standards in unterschiedlichen, realistischen Szenarien treffen zu können, um die anstehende Markteinführung der V2X-Kommunikation mit wissenschaftlichen Erkenntnissen zu begleiten.

7. THz-Kommunikation

7.1 EU-Projekt H2020-TERAPOD

In dem EU-Projekt TERAPOD haben Herr Eckhardt und Herr Doeker die Messauswertung und die Kanalmodellierung für das Rechenzentrum von DELL/EMC in Cork auf Grundlage der Messkampagne im Berichtsjahr mit dem finalen Deliverable abgeschlossen [ECK/JUN/DOE/KÜR1]. Dieser Abschlussbericht zeigt die Auswertung der umfassenden Messreihen und der entsprechenden Simulationen mittels Ray-Tracing im nachgebauten 3D-Modell des Rechenzentrums [ECK/KÜR2]. Es konnte eine hohe Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation für die Sende- und Empfangswinkel sowie für die Verzögerung der einzelnen Mehrwegekomponenten festgestellt werden. Die Amplitudenmodellierung bedarf jedoch weiterer Untersuchungen, da die Einflüsse der verschiedenen Objekte aufgrund der komplexen Ausbreitungsumgebung im aktuellen Modell nur unzureichend abgebildet werden konnten.

Der zweite große Baustein des Projekts ist der Link-Level-Simulator in SiMoNe, der sich im Berichtsjahr deutlich weiterentwickelt hat. Er berücksichtigt nun unter anderem alle Codier- und Modulationsschemata aus dem IEEE Standard 802.15.3d-2017 und kann so Übertragungen über einen zeitinvarianten Mehrwegekanal simulieren [ECK/HER/JUN/KÜR1]. Ein besonderes Augenmerk wurde auf die effiziente Berechnung der Simulationen gelegt. In diesem Bereich wurden, u.a. durch Parallelisierung der Algorithmen, Verbesserungen der Simulationsstrukturen und Einbindung der in C++ geschriebenen Aff3ct-Bibliothek (<https://aff3ct.github.io/>) in die C#-Welt von SiMoNe große Fortschritte erzielt. Die Beschleunigungen erlauben es uns, Simulationen mit einer hohen Anzahl von übertragenen Bits und damit einer hohen statistischen Signifikanz durchzuführen – selbst bei rechenintensiven Codierverfahren wie dem LDPC (Low Density Parity Check)-Code. Durch die Zusammenarbeit mit den Partnern innerhalb des TERAPOD-Projektes konnten wir den Simulator zudem durch die Modellierung und Simulation von Hardwarekomponenten und parasitären Bauteilef-

fekten, wie Phasenrauschen und frequenzabhängigen Übertragungsfunktionen, ergänzen. Die Ergebnisse dieser Weiterentwicklungen wurden in dem finalen Deliverable des Simulations-Arbeitspaketes vorgestellt.

Leider war auch das Projekt TERAPOD in diesem Jahr von der COVID-19-Pandemie betroffen; viele Labore der europäischen Partner wurden über mehrere Monate geschlossen. Die Projekttreffen fanden daher seit Beginn der Pandemie ausschließlich online statt. Um die Projektziele weiterhin erreichen zu können, wurde TERAPOD deshalb um neun Monate verlängert. In unserer Arbeitsgruppe wird in der verbleibenden Zeit vorrangig der Demonstrator mithilfe von neuen Simulationsergebnissen überarbeitet und erweitert.

7.2 EU-Projekt H2020-ThoR

Das im Jahr 2018 begonnene Horizon 2020 EU-Japan-Projekt ThoR („TeraHertz end-to-end wireless systems supporting ultra high data Rate applications“) wurde fortgeführt [KÜR7]. Im Rahmen des ThoR-Projektes haben wir uns im zweiten Projektjahr mit der Erweiterung des vorliegenden Algorithmus zur automatisierten Planung von THz-Backhaul-Funkstrecken (Stern-Topologie) sowie dem Wettereinfluss auf THz-Strecken befasst. Der auf Ring-Topologie basierende und von Herrn Jung neu entwickelte Algorithmus zur automatisierten Planung von THz-Backhaul-Funkstrecken, siehe **Abbildung 10**, hat mehrere Vorteile im Vergleich zu dem bereits existierenden Algorithmus zur Planung der Stern-Topologie. Dazu zählen die Redundanz der drahtlosen THz-Strecken und die flexible Zuordnung zu den über Glasfaser angebotenen Zellenstandorten.

Darüber hinaus wurden Modelle, die den Einfluss des Wetters auf die drahtlosen THz-Strecken berücksichtigen, implementiert. Da THz-Backhaul-Funkstrecken einem Outdoor-Szenario entsprechen, unterliegt die Qualität der THz-Strecken dem von der atmosphärischen Zirkulation verursachten Wetterwechsel. Das Wellenausbreitungsmodell einschließlich der troposphärischen Dämpfung und dem vom Wind verursachten Antennenschwingungsmodell ist in SiMoNe umgesetzt worden, um einen realistischen Einfluss des Wetters zu simulieren [KÜR/JUN1]. Die Studie über die Antennenschwingungen hat gezeigt, wie stark der Inklinationwinkel der Antennen von der Antennenhöhe, der Dicke des Antennenmasts und der Windgeschwindigkeit abhängt.

Im Rahmen des ThoR-Projekts haben wir auch die Auswirkungen der Ergebnisse der Weltfunkkonferenz 2019 untersucht, die im Frequenzbereich 275 bis 450 GHz 137 GHz an zusätzlichem Spektrum für die THz-Kommunikation identifiziert hat [KÜR5], [KÜR12], [KÜR10], [DOE/KÜR1]. Das Thema zukünftige Spektrumsverfügbarkeit sowie die Koexistenz mit passiven Diensten haben wir auch in die Standardisierung bei IEEE 802.15 SC THz eingebracht [KÜR13], [DOE1].

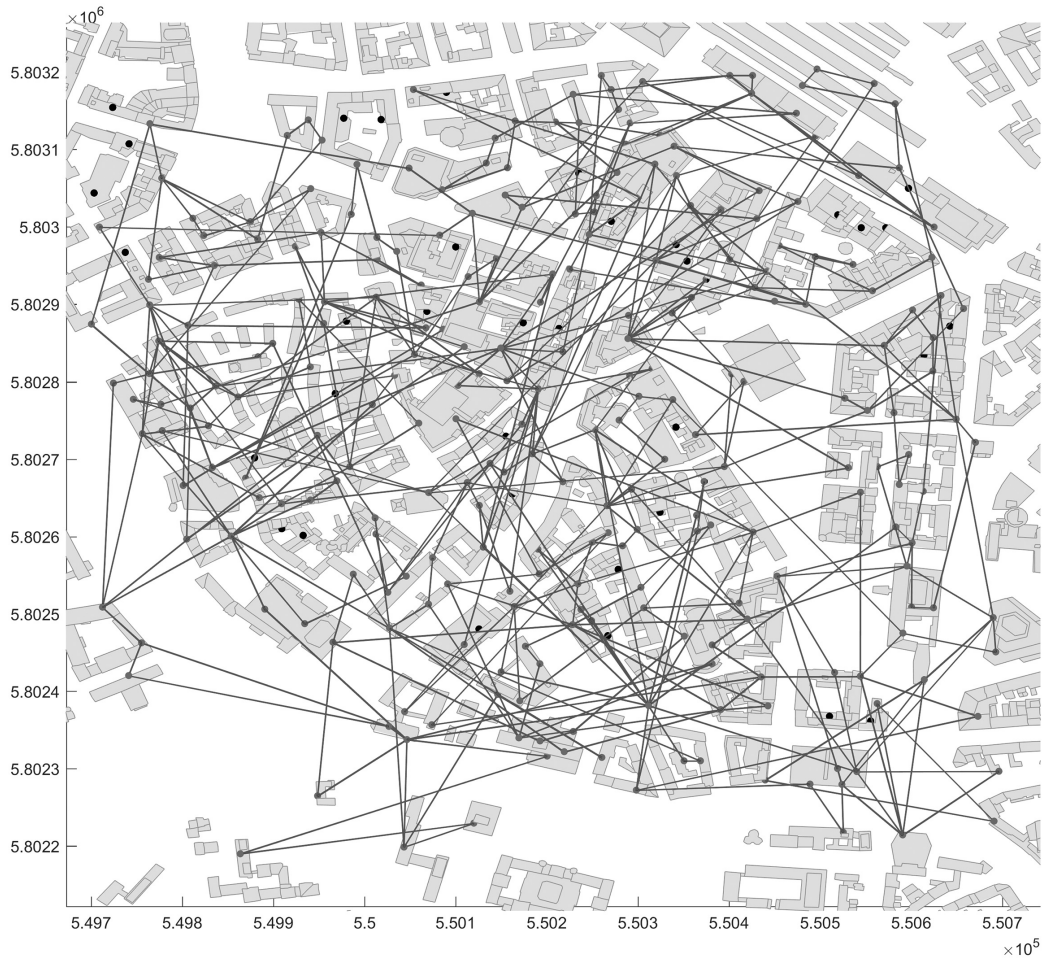


Abbildung 10: Automatisch geplante THz-Funkstrecken in einer Ring-Topologie im Szenario Hannover

7.3 DFG-Meteracom

Damit auch in zukünftigen THz-Kommunikationsnetzen eine zuverlässige Verbindung sichergestellt werden kann, haben wir uns im ersten Projektjahr der von der DFG geförderten Forschungsgruppe Meteracom (Metrologie für die THz-Kommunikation) zunächst sowohl auf die Findung und Ausrichtung (Device Discovery) von Sender und Empfänger als auch die Betrachtung paralleler THz-Kanäle fokussiert.

Hierbei konnte Herr Doeker im Rahmen der Entwicklung des Device Discovery auf bereits bestehende Vorarbeiten aus der Abteilung Mobilfunksysteme zurückgreifen. In Zusammenarbeit mit unserem Kooperationspartner an der IIT Bombay wird derzeit versucht, die bestehenden Ansätze und Algorithmen durch Compressed-Sensing-Verfahren zu optimieren. Dabei sollen der Aussende- und

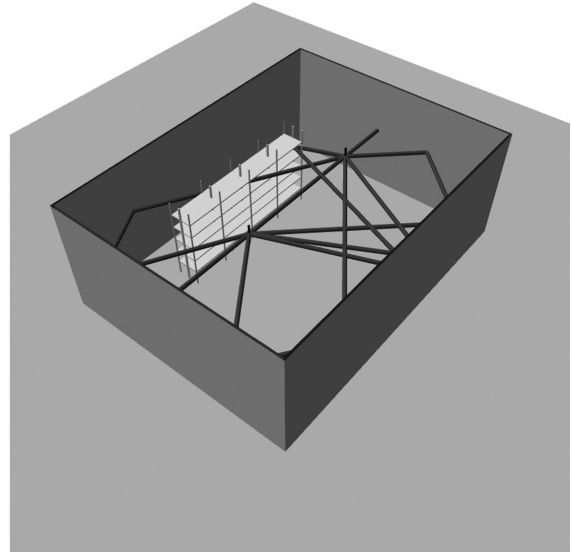


Abbildung 11: Messaufbau (links) und Ray-Tracing-Simulation (rechts) in der Institutsbibliothek

Empfangswinkel auf Grundlage grob richtungsaufgelöster Channel-Sounder-Messungen und den zugehörigen Antennendiagrammen präzisiert werden. Sender und Empfänger können so anschließend exakt aufeinander ausgerichtet werden. Da Sender und Empfänger jedoch nicht zwangsläufig statisch positioniert sein müssen, wird in den zukünftigen Arbeiten dann eine Nachführung der Ausrichtung betrachtet. Hierzu haben wir Messungen im Institut durchgeführt und das Szenario in SiMoNe modelliert, siehe **Abbildung 11**.

Parallel dazu fand auch ein Austausch mit Kollegen an der PTB statt, welche sich im Rahmen des Projektes unter anderem mit der Charakterisierung und Kalibrierung von Channel-Sounding-Verfahren beschäftigen. In Kooperation mit den Kollegen der PTB und der TU Ilmenau sind gemeinsame Messungen mit den unterschiedlichen Systemen und unserem Channel Sounder geplant.

Im Bereich der parallelen THz-Kanäle arbeitet Herr Herold eng mit Kollegen der Arbeitsgruppe von Professor Jukan am Institut für Datentechnik und Kommunikationssysteme zusammen. Mittels maschinellem Lernen sollen die Kanalschätzung so trainiert und die Codierverfahren für die THz-Kommunikation so ausgewählt werden, dass optimale Übertragungsbedingungen erreicht werden. Für die Generierung der Trainingsdaten und das Testen der vorgeschlagenen Verfahren greifen wir dabei auf die Fähigkeiten von SiMoNe zurück, um mittels strahlenoptischer Methoden und Simulationen auf der physikalischen Schicht Informationen über die Kanalqualität zu liefern. Herr Herold arbeitet zudem mit Kollegen der Universität Lübeck daran, rechenintensive Aufgaben durch Ein-

satz spezieller Hardware zu beschleunigen. Die Nutzung von FPGAs soll die Simulationen unterstützen, so dass selbst aufwändige Kodierverfahren wie LDPC in kürzerer Zeit, mit höherer Genauigkeit und einer größeren Anzahl von Simulationsdurchläufen als bisher verwendet werden können.

Des Weiteren wurde die Projektwebseite www.meteracom.de durch Herrn Doecker und Herrn Herold gestaltet und eingerichtet.

7.4 Nanokommunikation

Fortschritte in der Nanotechnologie werden die Möglichkeit eröffnen, neuartige medizinische Anwendungen zu entwickeln, die die Diagnose von Krankheiten und die Wirksamkeit der Behandlung verbessern können. Eine Technik basiert auf dem Einsatz von Geräten im Nano-Maßstab, die mit Nanosensoren und Nano-Kommunikationsmodulen im menschlichen Körper ausgestattet sind, wo größere Geräte ungeeignet oder übermäßig invasiv wären. Diese Nanogeräte liefern Echtzeitmessungen verschiedener im menschlichen Körper vorhandener Elemente und übermitteln die Ergebnisse dann über die Nanokommunikation an die Außenwelt.

Zwei Hauptfaktoren begrenzen das Nanokommunikations-Netzwerk. Erstens ist die Dämpfung der elektromagnetischen Signale im menschlichen Körper sehr hoch, da die Miniaturisierung der in jedem Nanogerät integrierten Strahlungsantenne die Verwendung von extrem hohen Frequenzen für die Kommunikation erfordert (etwa 1 THz). Dieser hohe Pfadverlust schränkt die Kommunikationsreichweite stark ein. Eine direkte drahtlose Kommunikation zwischen einem Nanogerät, das in einem nicht oberflächennahen Teil des menschlichen Körpers implantiert ist, und einem Gerät außerhalb des menschlichen Körpers scheint unpraktisch zu sein. Andererseits erfordert die extrem begrenzte Energiemenge, die in Nanogeräten gespeichert werden kann, einen Nanogenerator, der die Batterie periodisch auflädt. Daher muss die Energiebilanz in Nano-Netzwerken unter Berücksichtigung der verbrauchten Energie und der aus der Umwelt gewonnenen Energie untersucht werden.

Dieses drahtlose Netzwerk von Nanogeräten hat ganz andere Eigenschaften als die von herkömmlichen drahtlosen Geräten bekannten. Um ihr Verhalten und die theoretischen Grenzen ihrer Leistung richtig zu modellieren, ist ein theoretischer Rahmen erforderlich, der all die Besonderheiten der Nanokommunikation erfasst. In einem deutsch-indonesischen Forschungsprojekt untersucht Herr Indrawijaya ein Machbarkeitsszenario, in dem die Nanokommunikation auf der Grundlage dieser theoretischen Überlegungen eine grundlegende Rolle in medizinischen Anwendungen spielen kann, und baut die benötigten Simulationswerkzeuge auf.