

# Digitale Zwillinge für die Immissionsbewertung von 5G- und 6G-Mobilfunkanlagen mittels elektromagnetischer Simulationen

M.Sc. Lisa-Marie Schilling, Thüringer Innovationszentrum Mobilität, TU Ilmenau, Deutschland

Dr. Christian Bornkessel, Thüringer Innovationszentrum Mobilität, TU Ilmenau, Deutschland

M.Sc. Anna-Malin Schiffarth, RWTH Aachen, Deutschland

M.Sc. Thanh Tam Julian Ta, RWTH Aachen, Deutschland

Prof. Dr. Dirk Heberling, RWTH Aachen/FHR Wachtberg, Deutschland

Prof. Dr. Matthias Hein, Thüringer Innovationszentrum Mobilität, TU Ilmenau, Deutschland

## 1 Einleitung

Für die 6. Generation des Mobilfunks (6G) wird die Nutzung von Frequenzen im Millimeterwellenbereich bis 300 GHz erforscht, um den Bedarfen zukünftiger drahtloser Übertragungssysteme gerecht werden zu können [1]. Um dazu beizutragen, dass Deutschland als Technologieanbieter eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung des nächsten Mobilfunkstandards 6G einnimmt, fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) „Spitzenforschung für die Kommunikationssysteme von morgen“ [2] derzeit im Rahmen von vier universitären 6G-Forschungs-Hubs. Ziel des von der RWTH Aachen koordinierten 6G-Hubs „6GEM“ [3] ist die Entwicklung ganzheitlicher Systeme für Anwendungen in der Logistik, Produktion und Gesundheitsvorsorge, die die Bedürfnisse nach Selbstbestimmung, Privatsphäre und Sicherheit vorausschauend und nachhaltig berücksichtigen. Die den 6G Hubs zugrunde liegende Förderrichtlinie [2] adressiert explizit die Aspekte einer möglichst geringen Strahlenexposition sowie einer gesellschaftlichen Akzeptanz von 6G. Die Bewertung der elektromagnetischen Immissionen in der Umgebung von Mobilfunkanlagen ist zur Erreichung dieser Zielstellungen unerlässlich. Aufgrund der spezifischen physikalischen Ausbreitungs- und Wechselwirkungsmechanismen der elektromagnetischen Wellen im sub-THz-Bereich mit Materie, wie z.B. Mehrwegeausbreitung, Nahfeldeffekten, Streuung oder Absorption, ist die Entwicklung neuer Simulations- und Messverfahren sowie Kombinationen daraus zur Immissionsbestimmung erforderlich [4].

Speziell für Szenarien, bei denen die räumlichen Dimensionen zusammenhängender Feldobjekte die Freiraumwellenlänge um ein Vielfaches überschreiten, sind strahlenoptische Algorithmen [5], sogenannte *Raytracing*-Verfahren, gegenüber elektromagnetischen Vollwellensimulationen einige der wenigen verbleibenden Lösungsansätze, um die elektromagnetische Wellenausbreitung deterministisch zu berechnen. Dabei werden die einzelnen Übertragungswege zwischen einem Sende- und einem Empfangspunkt unabhängig voneinander als Strahlen im gesamten Raum unter Berücksichtigung der exakten Geometrie des Szenarios und seiner elektromagnetischen Materialeigenschaften berechnet [5]. Es wird zwischen direkten Strahlen und Strahlengängen, deren Verlauf durch Interaktion an Grenzflächen in Form von Reflexion, Transmission, Beugung und Streuung unterschieden. Die direkten Wege werden über die Übertragungsgleichung für Freiraum (*"Friis equation"*) berechnet. Der Strahlengang reflektierter bzw. transmittierter Wege kann durch die Spiegelungsmethode basierend auf dem Snellius'schen Gesetz berechnet werden. Die zugehörigen Feldkomponenten werden mittels der Fresnel'schen Koeffizienten für Reflexion bzw. Transmission unter Berücksichtigung von Einfallswinkeln, Polarisation und Materialeigenschaften bestimmt. Beugungseffekte werden durch die geometrische Beugungstheorie (*geometrical theory of diffraction*, GTD) und die Erweiterungen (*uniform theory of diffraction*, UTD) berücksichtigt. Streuung an rauen Oberflächen kann ebenfalls in die Berechnungen einfließen, z.B. durch effektive Rauigkeitswerte von Gebäudewänden oder durch die Beschreibung der bistatischen Radarquerschnitte (*radar cross section*, RCS) von Objekten [6]. Die Genauigkeit und Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse auf die reale Welt hängen daher insbesondere von der Genauigkeit der zu-

grundlegenden modellhaften Nachbildung ab, einem sog. *digitalen Zwilling* des realen Szenarios. Die Anforderungen an einen solchen digitalen Zwilling und dessen Erstellung mittels hochgenauer 3D-Kartendaten werden in diesem Beitrag beschrieben und diskutiert.

In Kapitel 2 wird die Datenerfassung am Beispielszenario des Campus der Technischen Universität Ilmenau (TUIL) erläutert, welche die Grundlage der Modellierung des digitalen Zwillings in Kapitel 3 legt. In Kapitel 4 wird exemplarisch der Einsatz hochgenauer 3D-Kartendaten demonstriert und um die Fähigkeit eines digitalen Zwillings erweitert, indem nicht nur die Geometrie, sondern auch die komplexwertigen und frequenzabhängigen elektromagnetischen Materialeigenschaften der verschiedenen Objekte abgebildet werden. Kapitel 5 schließt den Beitrag mit einem Ausblick auf weitere geplante Forschungsarbeiten in diesem Bereich.

## 2 Datenerfassung

Die strahlenoptische Berechnung der von drahtlosen Übertragungssystemen ausgehenden elektromagnetischen Wellen erfordert eine digitale Nachbildung des zu untersuchenden Umgebungsszenarios. Ein Umgebungsszenario bezieht sich in diesem Fall auf eine Mobilfunkbasisstation einschließlich ihrer baulichen und landschaftlichen Umgebung in einem Umkreis, aus dem die Immision zu ermitteln ist. Die Herausforderung bei der Modellierung liegt vor allem in der Abbildung aller für die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen relevanten Objekte.

Der derzeit für 5G-Mobilfunk in Deutschland genutzte Frequenzbereich umfasst 700 bis 3800 MHz und kann für 6G auf bis zu 300 GHz erweitert werden. Dies umfasst Freiraumwellenlängen  $\lambda$  im Dezimeter- bis Millimeterbereich. Für eine realitätsnahe Berechnung der elektromagnetischen Felder sollte die geometrische Auflösung des Modells mindestens vergleichbar zu  $\lambda$  sein [6], was im Falle der derzeitig verwendeten 5G-Frequenzen ca. 430 bis 80 mm entspricht. Das hier angestrebte Modell soll zunächst eine Auflösung von 100 mm enthalten, um die verwendeten Mobilfunkfrequenzen weitestgehend abzudecken und den Datenumfang für aktuelle Rechentechnik realisierbar zu halten. Frei verfügbare Kartendaten, z.B. *OpenStreetMap* [7], enthalten oft das Terrain und Gebäude mit einer Auflösung im Meterbereich und sind für die o.g. Anforderung nicht ausreichend.

Um ein ausreichend genaues Modell zu erstellen, wurde eine zweistufige Datenerfassung durchgeführt: Zunächst wurden Geländemodelle aus frei zugänglichen Geodaten des Landes Thüringen extrahiert [8]. Insbesondere das digitale Geländemodell (DGM) mit einer Mindestgenauigkeit der georeferenzierten Lage von  $\pm 300$  mm und Höhe von  $\pm 150$  mm dient als Basis zur Erstellung des Terrain-Modells. Anschließend wurde eine mobile Erfassung des Projektgebiets durch ein Messfahrzeug mittels Laserscannern, einem Kamera- sowie einem Positionierungssystem durch einen Dienstleister [9] durchgeführt. Das Positionierungssystem bestand aus einem Kreiselssystem mit integrierten axialen Beschleunigungssensoren, welches eine hohe absolute Positionsgenauigkeit der erfassten Daten kleiner 100 mm in Lage und Höhe erreicht, auch wenn der Empfang von Satellitensignalen, z.B. GPS, durch Abschattungen gestört ist. Das Kamerasystem deckt acht Blickwinkel horizontal um das Messfahrzeug ab und dient zur photogrammetrischen Auswertung der Objekte. Ein 3D-Umfeldlaserscanner erfasst Punktwolken des Straßenraums bis zu einem Radius von 30 m mit einer relativen Genauigkeit kleiner 7 mm [9]. Die Daten aus der mobilen Erfassung dienen als Grundlage für die Modellierung von Gebäuden, Objekten, Vegetation und Straßen.

Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Punktwolken des Laserscanners entlang eines Abschnitts auf dem TUIL-Campus und ausgewählte zugehörige Befahrungsbilder. Die Bilder werden vom Aufnahmesystem datenschutzkonform gespeichert, indem personenbezogene Daten durch Unschärfe anonymisiert werden.

## 3 Geometrische Modellbildung

Die Umgebungsdaten aus Kapitel 2 bilden die Grundlage für die Modellierung. Das Modell soll für kommerziell verfügbare Raytracing-Programme, hier *XGtd* von *Remcom* [10], verwendbar sein und folgende Objektgruppen enthalten: das unterliegende Terrain, Straßen sowie Fuß-/Radwege,

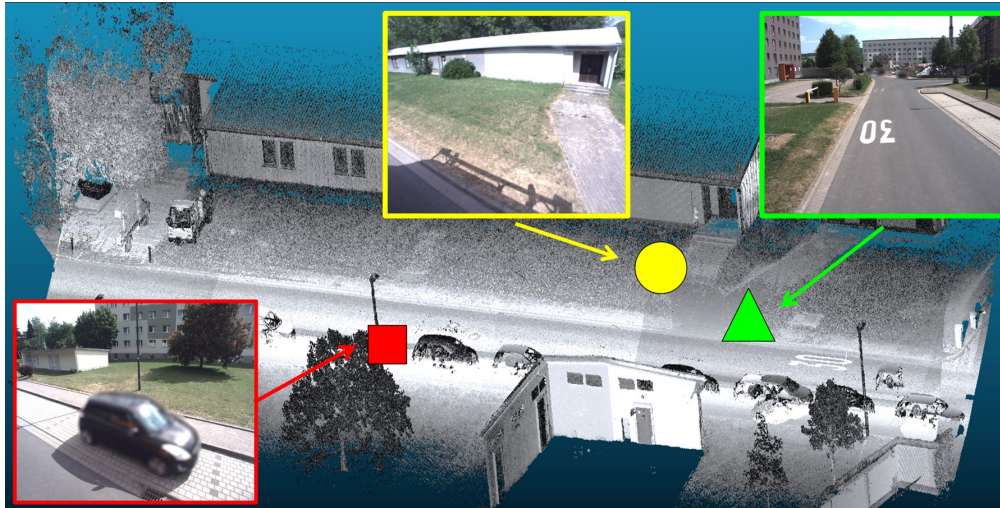


Abbildung 1: Punktwolken des Laserscanners und die zugehörigen Befahrungsbilder drei ausgewählter Positionen (links: rotes Viereck, Mitte: gelber Kreis, rechts: grünes Dreieck) entlang eines Fahrabschnitts auf dem TUIL-Campus

Gebäude und Vegetation. Die Daten müssen dazu in ein für die Simulationsprogramme importierbares *computer-aided design* (CAD)-Format konvertiert werden. Ein gängiges Format ist die STL-Schnittstelle, die 3D-Geometrien durch Dreiecksflächen beschreibt. Je höher die räumliche Auflösung der Objektgeometrien ist, desto größer ist die Anzahl der Oberflächenelemente, wodurch Rechenkapazität und -dauer ansteigen. Es muss somit ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand des Modells getroffen werden.

### 3.1 Terrain und Straßen

Das Terrain wurde aus den DGM-Daten extrahiert und über die frei verfügbare Geoinformationssoftware *QGIS* mit der Erweiterung *DEMto3D* in das STL-Format exportiert [11]. Eine DGM-Datei enthält einen 1 km x 1 km großen Kartenausschnitt. Die daraus exportierte STL-Datei enthält typischerweise ca. 4 Mio. Oberflächenelemente und übersteigt damit die Kapazität der Simulationssoftware, die nur Objekte mit einer maximalen Anzahl von 33.000 Oberflächenelementen zum Import empfiehlt. Die Terrain-Daten müssen somit in ihrer Oberflächenanzahl reduziert werden, ohne dass wesentliche Eigenschaften der Topografie verloren gehen. Zu diesem Zweck wurde die Software *Meshlab* [12] zur Nachbearbeitung von 3D-Geometrien eingesetzt: Der implementierte Algorithmus *Quadric Edge Collapse Decimation* zur Vereinfachung von Strukturen [13] erlaubt es, die Anzahl der Oberflächen eines Geländemodells unter vorgegebenen Bedingungen zur Erhaltung der Topografie zu reduzieren. Abbildung 2 zeigt das Terrain in zwei Auflösungsstufen, wobei die mittlere Stufe für das Simulationsprogramm gerade noch und die niedrige Stufe sehr gut importierbar ist. Im mittleren Detaillierungsgrad sind die topografischen Gegebenheiten des Original-DEM noch sehr gut erkennbar, die Oberflächenelemente wurden jedoch auf 3% der ursprünglichen Anzahl reduziert. Der niedrige Detaillierungsgrad enthält die Basistopografie, jedoch mit einer deutlich größeren Auflösung im Bereich einiger Meter.

Die Straßen, Fuß- und Radwege können aus den Punktwolken der mobilen Datenerfassung extrahiert und klassifiziert werden. Anschließend werden sie in ihrer Höhenlage so angepasst, dass sie lückenlos auf dem Terrain-Modell aufliegen. Eine Trennung der Oberflächengruppen in Terrain und Straßen ist vorteilhaft, da so für die Berechnung der elektromagnetischen Wellenausbreitung jeweils eigene Materialeigenschaften, z.B. für Boden und Asphalt, zugewiesen werden können. Abbildung 2 zeigt die Terrain-Modelle mit überlagertem Straßenmodell.

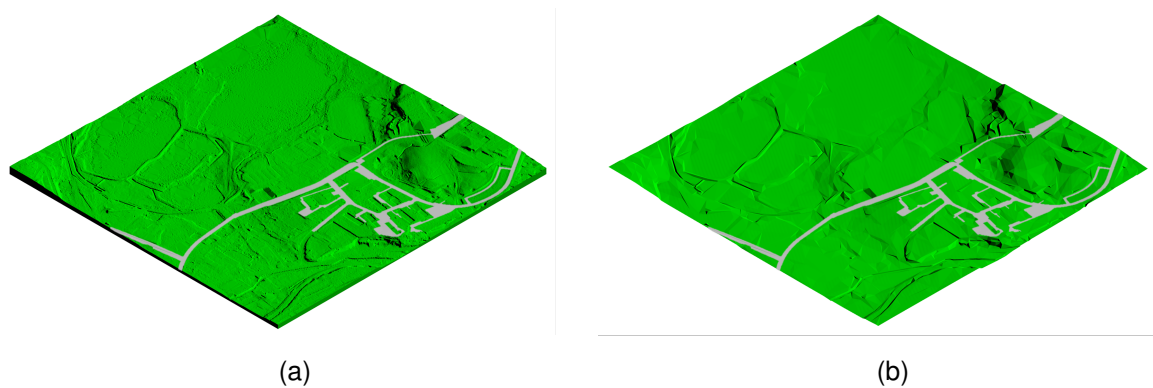


Abbildung 2: Terrainmodell des TUIL-Campus (grün) mit aufgelegtem Straßenmodell (grau) in zwei Auflösungsstufen: a) mittel (125.250 Oberflächenelemente) und b) niedrig (3.065 Oberflächenelemente)

### 3.2 Gebäude

Da eine detaillierte Modellierung aller Objekte im Projektgebiet den möglichen Rechenumfang übersteigt, wurde eine Kategorisierung des Detaillierungsgrades für Gebäude eingeführt: Gebäude innerhalb eines Radius von 500 m um eine Mobilfunkbasisstation, die zusätzlich einen erhöhten Einfluss auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen haben, werden mit einem hohen Detaillierungsgrad modelliert, d.h. die Dach- und Fassadenstrukturen werden explizit modelliert. Gebäude in unmittelbarer Nähe von Basisstationen oder möglichen Messorten mit hohen oder potenziell stark reflektierenden Fassaden fallen somit in diese Kategorie. Der Radius von 500 m wurde gewählt, da der expositionsrelevante Bereich aufgrund der Funkfelddämpfung in der Nähe der Anlagen liegt. Alle anderen Gebäude werden durch generische Gebäudemodelle repräsentiert, d.h. ebene Fassaden und Auswahl eines generischen Dachtyps wie z.B. flach, schräg oder spitz. Die Umrisse und Höhen der Gebäude werden jedoch entsprechend der realen Gegebenheiten korrekt modelliert.

Um unterschiedliche Materialien berücksichtigen zu können, wurden die Gebäude getrennt nach Fassaden und Dächern in jeweils unterschiedliche Materialgruppen eingeteilt. Die Gruppierung erfolgt auf Basis der Daten der mobilen Erfassung. Pro Materialgruppe wird eine Objektdatei erstellt, damit die Zuordnung der Materialeigenschaften einmal pro Gruppe erfolgen kann.

Folgende Einteilung der Gruppen in typisch genutzte Baumaterialien wird vorgenommen:

- Fassaden: Beton, Fachwerk, Glas/Metall, Holz, Klinker, Rauputz, Schiefer, Waschbeton
- Dächer: Beton, Dachpappe, Holz, Photovoltaik, Schiefer, Schindeln

Abbildung 3 a) zeigt exemplarisch einen Detailausschnitt des um die Gebäude erweiterten Modells aus Abbildung 2, welches den Fahrabschnitt aus Abbildung 1 enthält. Die hohen Gebäude in der Nähe der Mobilfunkbasisstation wurden mit einem hohen Detaillierungsgrad modelliert und verschiedenen Materialgruppen zugeordnet, die farblich voneinander getrennt sind. Die weniger relevanten niedrigen Gebäude wurden generisch modelliert und enthalten daher keine expliziten Fassaden- und Dachstrukturen.

### 3.3 Vegetation

Da Vegetation, insbesondere Bäume, einen erheblichen Einfluss auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen haben kann, sollte sie im Modell angemessen berücksichtigt werden. Eine exakte 3D-Modellierung der Vegetation ist sehr anspruchsvoll, sodass Lösungen zur Vereinfachung gefunden werden müssen. Um die Komplexität von zusammenhängenden Baumgruppen zu reduzieren, können diese als ein einzelnes Objekt modelliert werden. Die Transmissionsdämpfung



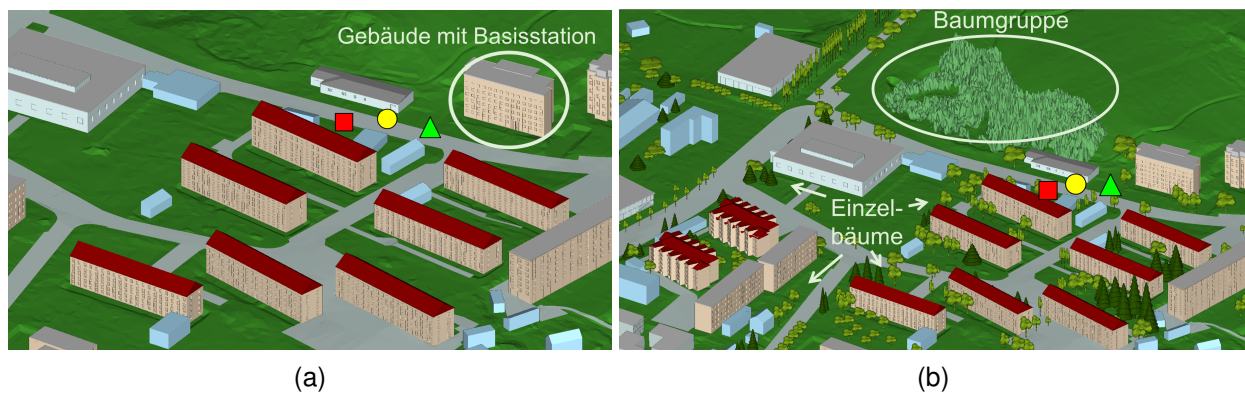


Abbildung 3: Erweiterung des Modells aus Abbildung 2: a) um Gebäude (hellblau: generische Modelle, weitere Farben: detaillierte Modelle verschiedener Materialgruppen) und b) um Vegetation. Im Ausschnitt befinden sich ein Gebäude mit einer Mobilfunkbasisstation auf dem Dach, sowie die drei ausgewählten Positionen (Viereck, Kreis, Dreieck) aus Abbildung 1.

ist die wichtigste Eigenschaft größerer Vegetationsgruppen und hängt von der Art, der Dichte und dem Wassergehalt der Vegetation ab [14]. Einzelbäume können individuell geometrisch modelliert werden, wobei im Allgemeinen eine Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelbäumen aufgrund der Belaubung vorgeschlagen wird. Diese Überlegungen passen zu den Empfehlungen der internationalen Fernmeldeunion (ITU-R), die ebenfalls eine Unterscheidung der Vegetation in zwei Kategorien vorschlägt: zusammenhängende Baumgruppen/Wälder und Einzelbäume [6], [14].

Die Transmissionsdämpfung ist frequenz- und polarisationsabhängig. Typische Werte innerhalb von Baumgruppen für Frequenzen zwischen 0,03 GHz und 30 GHz sind in der Empfehlung der ITU-R P.833-10 [14] angegeben. Im hier entwickelten Modell werden Baumgruppen als jeweils geschlossenes Objekt dargestellt, dem ein Materialwert zugeordnet wird. Die Geometrie des Objekts wird aus digitalen Geländemodellen [8] gebildet, die die Vegetation in der Oberfläche enthalten. Dadurch erhalten die Baumgruppen eine unregelmäßige Struktur mit realer Höhenverteilung zur Berücksichtigung von Streueffekten und werden nicht als einfacher kubischer Block dargestellt.

Für Einzelbäume gibt es verschiedene geometrische Modellierungsansätze, z. B. als Darstellung durch Quader oder Zylinder oder empirische Formeln zur Berücksichtigung von Dämpfungs- und Streuparametern. Im vorliegenden Beitrag werden die Einzelbäume in Nadel- und Laubbäume unterteilt und jeweils mit einem generischen Modell für den entsprechenden Baumtyp modelliert. Dadurch können unterschiedliche Materialwerte für Nadel- und Laubbäume berücksichtigt werden. Die generischen Modelle sind unregelmäßige Strukturen und werden in Breite und Höhe so skaliert, dass sie den tatsächlichen Umfang des Baumes abdecken. Dazu werden die Dimensionen der einzelnen Bäume aus den Laserscanner- und Kameradaten der mobilen Erfassung ausgelesen und im Modell berücksichtigt. Abbildung 3 b) zeigt exemplarisch einen Detailabschnitt des Modells mit den verschiedenen Vegetationsmodellen.

#### 4 Anwendung zur numerischen Simulation der Immission

Das geometrische Modell aus Kapitel 3 wurde vollständig in das strahlenoptische Simulationsprogramm *XGtd* importiert und muss zur Funktionalität eines digitalen Zwillings um die Modellierung der Funkquellen und der hochfrequenten Materialeigenschaften erweitert werden. Als Funkquelle auf dem Anlagengebäude dient in diesem Beispiel ein Sektor einer 5G-Basisstation im E-UTRA-Frequenzband n1 (Downlink: 2110 ... 2170 MHz) [15] mit einer Mittenfrequenz der Signalisierungssignale bei 2155 MHz. Dieses Frequenzband wird derzeit in Deutschland vom 5G- und 4G-Netz der Deutschen Telekom über eine dynamische Ressourcenzuweisung (sog. *dynamic spectrum sharing*) gemeinsam genutzt [16]. Das in das Simulationsprogramm importierte Antennendiagramm entspricht dem einer realen Mobilfunk-Basisstationsantenne in diesem Frequenzbereich und ist in



Abbildung 4: Vollständiges Modell aus Kapitel 3 mit einem Sektor einer 5G-Mobilfunkbasisstation auf einem Gebäude (s. Detailausschnitt).

Abbildung 4 auf dem Anlagengebäude platziert. Die beiden weiteren Sektoren dieser Anlage sind räumlich getrennt auf dem Anlagengebäude verteilt und werden in diesem Beispiel nicht betrachtet. Als Sendeleistung wurde beispielhaft 50 dBm eingestellt. Um realitätsnahe Simulationsergebnisse erzielen zu können, müssen die expositionsrelevanten Daten der Funkanlage wie Antennendiagramm, Sendefrequenz und Sendeleistung sowie Montagehöhe und Downtilt-Einstellungen bekannt sein. Das Simulationsprogramm berechnet dann für eine eingestellte Frequenz die Übertragung der Funksignale von der konfigurierten Funkquelle zu Empfangspunkten und wertet die Parameter des elektromagnetischen Feldes wie z.B. die elektrische Feldstärke aus, die zur Immissionsbewertung herangezogen werden können [4].

Zur Berücksichtigung der elektrodynamischen Materialeigenschaften müssen jeder Objektgruppe im Modell die frequenz-, polarisations- und winkelabhängigen Materialparameter zugeordnet werden. Die ITU-R hat Empfehlungen zur Verwendung des Realteils der relativen Permittivität  $\epsilon_r'$  und der Konduktivität  $\sigma$  für Gebäude [17], Erdoberfläche [18] und Vegetation [14] veröffentlicht, die hier beispielhaft als Berechnungsgrundlage verwendet wurden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die verwendeten Materialparameter für eine Frequenz von 2155 MHz.

Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse einer exemplarischen Simulation in einem Ausschnitt des Modells auf einer Fläche mit 1.681 Empfangspunkten im Rasterabstand  $35\lambda$ , um die Rechenbarkeit des Modells zu demonstrieren. Der Ausschnitt hat eine Größe von 320 m x 220 m, und es wurden maximal drei Reflexionen, zwei Transmissionen und eine Brechung pro Pfad berechnet. Das geometrische Modell umfasst aufgrund des hohen Detaillierungsgrades ca. 1,5 Mio. Oberflächenelemente. Die Verarbeitung der 3D-Geometrie nahm ca. 3 Stunden und die Berechnung der Übertragungspfade ca. 2 Stunden, mit 32 GB RAM, Intel i7-11700F CPU @ 2.5 GHz und einer NVIDIA GeForce GT 1030 mit 16 GB GPU-Speicher in Anspruch. Generell weist die exemplarische Simulation im erzeugten 3D-Modell plausible Ergebnisse auf und kann zur Erzeugung

Materialgruppe	$\epsilon_r'$	$\sigma$ in S/m	Notiz
Baumgruppen, Laubbäume	31,7	0,4	Berechnung für Laub [14]
Nadelbäume	6,2	0,2	Berechnung für Geäst [14]
Terrain	25,0	0,4	Berechnung für Lehmboden, Wassergehalt 40%, Temperatur 20 °C [18]
Beton	5,2	0,8	[17]
Glas	6,3	0,01	[17]
Putz	2,7	0,02	[17]
Schiefer, Schindeln	3,9	0,03	Angaben für Stein [17]

Tabelle 1: Verwendete Materialparameter abgeleitet aus den ITU-R Empfehlungen für 2155 MHz

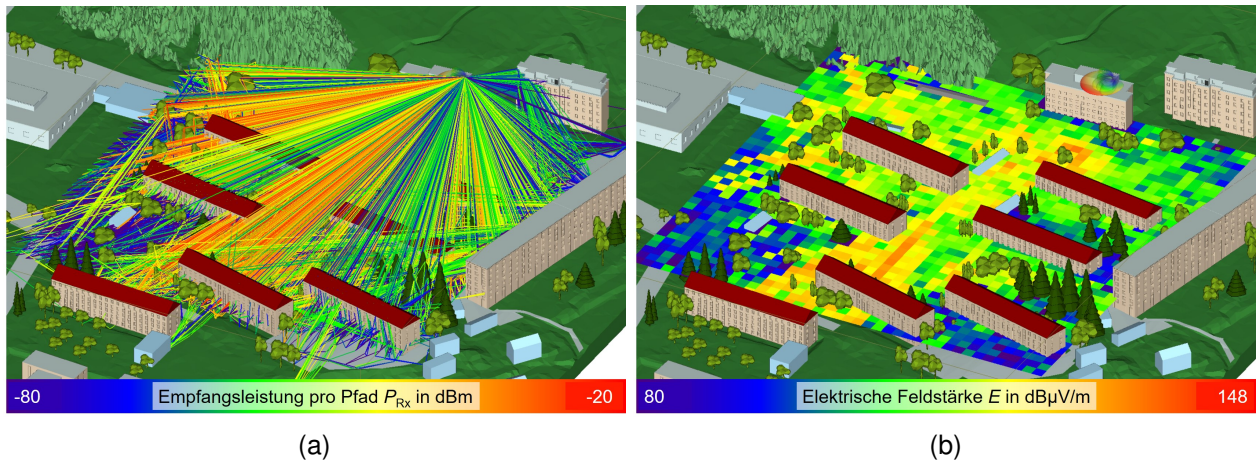


Abbildung 5: Simulationsergebnisse in einem Abschnitt des 3D-Modells: a) Übertragungspfade farbco-diert nach ihrer Empfangsleistung und b) elektrische Feldstärke an den Empfangspunkten

realitätsnaher Simulationsergebnisse weiter verfeinert werden. Bereits vorangegangene Arbeiten an 5G-Mobilfunkanlagen im Zentimeterwellenbereich zeigten, dass die Raytracing-Methode vielversprechende Ergebnisse im qualitativen Vergleich zu realen Messungen erzielen kann [19], [20]. Weitere Beiträge aus dem Bereich der Fahrzeugradartechnik zeigen ähnliche Ergebnisse im Millimeterwellenbereich [21], [22], sodass die Anwendung der Simulationemethode für höhere Frequenzen im 6G-Mobilfunk mit einem hochaufgelösten 3D-Modell erfolversprechend ist.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die in der zukünftigen 6G-Mobilfunktechnologie vorgesehenen Frequenzen bis 300 GHz erfordern neue Bewertungsmethoden für den Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern. Elektromagnetische Felder in elektrisch großen Szenarien können mit numerischen Simulationemethoden, z.B. aus der Strahlenoptik, berechnet werden. In diesem Beitrag werden die Herausforderungen bei der dafür notwendigen Erstellung eines digitalen Zwillings aus hochgenauen 3D-Kartendaten und dessen Anwendung für die Immissionsbewertung diskutiert. Es muss ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenkapazität des 3D-Modells gefunden werden, indem verschiedene Detaillierungsgrade in der Modellierung der Geometrien genutzt werden. Um das 3D-Modell zu einem digitalen Zwilling zu erweitern, müssen weitere Modellparameter zu den Funkquellen und den Materialien der Objekte eingegeben werden. Für Materialparameter im Mobilfunkfrequenzbereich liegen Modellierungsempfehlungen der ITU-R und Beispielwerte für typische Materialien vor. Das vorgestellte Konzept zur Erstellung eines digitalen Zwillings wird in zukünftigen Arbeiten quantitativ verifiziert. So bleibt beispielsweise derzeit noch fraglich, mit welcher Genauigkeit die frequenzabhängigen Materialparameter vorliegen müssen, um realitätsnahe Simulationsergebnisse erzielen zu können. Um die Genauigkeitsanforderungen an das Geometriemodell zu überprüfen, werden zukünftig Vergleiche der Simulationsergebnisse mit realen Messungen an bestehenden 5G-Mobilfunkanlagen und möglichen 6G-Testanlagen ausgewertet. Dies schließt Untersuchungen zur Genauigkeit der Simulationsergebnisse bis 300 GHz bei möglicherweise nur begrenzt detaillierten 3D-Modellen in diesem Wellenlängenbereich ein.

## 6 Förderhinweis

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16KISK040 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorin.

## Literatur

- [1] T. Eichler und R. Ziegler, „Fundamentals of THz Technology for 6G,“ *Rohde&Schwarz*, 2022.
- [2] BMBF, *Förderbekanntmachung*, <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-3528.html>, zuletzt besucht: 14.01.2024.
- [3] 6GEM, *Projektwebseite*, <https://www.6gem.de/>, zuletzt besucht: 14.01.2024.
- [4] C. Bornkessel et al., „Grenzwerte zum Schutz der Bevölkerung vor elektromagnetischen Feldern bei Frequenzen des 6G-Mobilfunks,“ in *EMV 2024*, Köln, 2024.
- [5] N. Geng und W. Wiesbeck, „Planungsmethoden für die Mobilkommunikation,“ *Springer*, 1998.
- [6] D. He et al., „The Design and Applications of High-Performance Ray-Tracing Simulation Platform for 5G and Beyond Wireless Communications: A Tutorial,“ *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Jg. 21, Nr. 1, S. 10–27, 2019. DOI: 10.1109/COMST.2018.2865724.
- [7] OpenStreetMap, <https://www.openstreetmap.org/copyright>, zuletzt besucht: 30.12.2023.
- [8] Geoportal Thüringen, <https://geoportal.thueringen.de/>, © GDI-Th, zuletzt besucht: 30.12.2023.
- [9] LEHMANN + PARTNER, <https://www.lehmann-partner.de/>, zuletzt besucht: 10.01.2024.
- [10] Remcom, *XGtd*, <https://www.remcom.com/high-frequency-em-analysis-software-xgtd>, zuletzt besucht: 30.12.2023.
- [11] QGIS, *Geo-Informationssystem*, <https://www.qgis.org/>, zuletzt besucht: 30.12.2023.
- [12] P. Cignoni et al., „MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool,“ in *Eurographics Italian Chapter Conference*, V. Scarano, R. D. Chiara und U. Erra, Hrsg., The Eurographics Association, 2008, ISBN: 978-3-905673-68-5. DOI: 10.2312/LocalChapterEvents/ItalChap/ItalianChapConf2008/129-136.
- [13] M. Garland und P. Heckbert, „Surface Simplification Using Quadric Error Metrics,“ *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Conference on Computer Graphics*, Jg. 1997, Juli 1997. DOI: 10.1145/258734.258849.
- [14] ITU-R, „Recommendation P.833-10, Attenuation in vegetation,“ Sep. 2021.
- [15] ETSI, „TS 138 104 - V17.5.0 - 5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 17.5.0 Release 17),“ Apr. 2022.
- [16] L.-M. Schilling, C. Bornkessel und M. A. Hein, „Analysis of Instantaneous and Maximal RF Exposure in 4G/5G Networks With Dynamic Spectrum Sharing,“ in *2022 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2022, S. 1–5. DOI: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769680.
- [17] ITU-R, „Recommendation P.2040-3, Effects of building materials and structures on radiowave propagation above about 100 MHz,“ Aug. 2023.
- [18] ITU-R, „Recommendation P.527-6, Electrical characteristics of the surface of the Earth,“ Sep. 2021.
- [19] L.-M. Schilling, C. Bornkessel, A.-M. Schiffarth, D. Heberling und M. A. Hein, „Optimized Assessment Procedure for Maximal RF Exposure to 5G Massive MIMO Base Stations in Non-Line-of-Sight Scenarios – Part 1: Theoretical and Numerical Investigations,“ in *2023 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2023, S. 1–5. DOI: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133658.
- [20] L.-M. Schilling, C. Bornkessel, A.-M. Schiffarth, D. Heberling und M. A. Hein, „Ray tracing-based analysis of extrapolation factors for RF exposure to 5G massive-MIMO base stations,“ in *BioEM 2023 Oxford, Abstract Collection*, 2023.
- [21] C. Schübler et al., „Achieving Efficient and Realistic Full-Radar Simulations and Automatic Data Annotation by Exploiting Ray Meta Data from a Radar Ray Tracing Simulator,“ in *2023 IEEE Radar Conference (RadarConf23)*, 2023, S. 1–6. DOI: 10.1109/RadarConf2351548.2023.10149641.
- [22] C. Schübler et al., „A Realistic Radar Ray Tracing Simulator for Large MIMO-Arrays in Automotive Environments,“ *IEEE Journal of Microwaves*, Jg. 1, Nr. 4, S. 962–974, 2021. DOI: 10.1109/JMW.2021.3104722.