

MEHRWERT UND HERAUSFORDERUNGEN DER 5G-TECHNOLOGIE IM ANWENDUNGSBEREICH DER GEOINFORMATIK – ERGEBNISSE AUS DEN ZWEI FORSCHUNGSPROJEKTEN 5G-MOBIS UND 5G-EXPS

Florian Schöpflin, Caroline Atzl, Stefan Farthofer-Oster, Peter Dorfinger, José Carmona, David Hildenbrandt, Andreas Kuhn, Manfred Mittlböck

Zusammenfassung: Der 5G-Standard verspricht durch technische Neuerungen einige Vorteile, wie größere Übertragungsraten und geringere Latenzzeiten, weshalb die 5G-Technologie auch für viele Anwendungsbereiche in der Geoinformatik vielversprechend ist. Wie sich der Mehrwert in der Forschungspraxis bemerkbar macht, wird auch in den beiden Forschungsprojekten „5G-MOBiS“ und „5G-EXPS“ untersucht. Anhand von ausgewählten Anwendungsfällen werden in diesem Beitrag Methoden und Ergebnisse vorgestellt, um Mobilfunkdaten datenschutzkonform aufzubereiten, automatisierte Verkehrssteuerung zu optimieren, große Datenmengen in interaktive 5D-Webkartenanwendungen zu integrieren sowie 5G-Versuchsnetze und Messwerkzeuge zu entwickeln. Aufbauend auf den präsentierten Ergebnissen wird der Mehrwert von 5G für diese Anwendungen diskutiert.

Schlüsselwörter: 5G, Mobilfunkdaten, Geoinformatik, GIS, 5G-MOBiS, 5G-EXPS, 5D-Campus

ADDED VALUE AND CHALLENGES OF 5G TECHNOLOGY IN THE FIELD OF GEOINFORMATICS – PRESENTATION OF RESULTS FROM THE TWO RESEARCH PROJECTS 5G-MOBIS AND 5G-EXPS

Abstract: The 5G standard promises several advantages through technical innovations such as higher transmission rates and lower latency times, which is why 5G technology is also promising for many areas of application in geoinformatics. The two research projects “5G-MOBiS” and “5G-EXPS” are investigating how the added value is noticeable in research practice. Based on selected use cases, this article presents methods and results for processing mobile communications data in compliance with data protection regulations, optimizing automated traffic control, integrating large amounts of data into interactive 5D web map applications, developing 5G test networks and measurement tools. Based on the presented results, the added value of 5G for these applications is discussed.

Keywords: 5G, mobile phone data, geoinformatics, GIS, 5G-MOBiS, 5G-EXPS, 5D-Campus

Autoren

M. Sc. Florian Schöpflin
Dr. Caroline Atzl
Research Studios Austria
Forschungsgesellschaft mbH,
Studio iSPACE
Schillerstraße 25
A-5020 Salzburg
E: florian.schoepflin@
researchstudio.at
caroline.atzl@researchstudio.at

Dipl.-Ing. Dr. Stefan Farthofer-Oster
Dipl.-Ing. (FH) Dipl.-Ing. Peter Dorfinger
Salzburg Research Forschungs-
gesellschaft mbH
Jakob Haringer Straße 5/3
A-5020 Salzburg
E: stefan.farthofer@
salzburgresearch.at
peter.dorfinger@
salzburgresearch.at

Dr. José Carmona
M. Sc. David Hildenbrandt
Dr. Andreas Kuhn
ANDATA GmbH
Hallburgstraße 5
A-5400 Hallein
E: jose.carmona@andata.at
david.hildenbrandt@andata.at
andreas.kuhn@andata.at

Dr. Manfred Mittlböck
Universität Salzburg
Fachbereich Geoinformatik – Z_GIS
Schillerstraße 30
A-5020 Salzburg
E: manfred.mittlboeck@plus.ac.at

1 EINLEITUNG

Die Mobilfunktechnologie entwickelte sich in den vergangenen Jahren stetig weiter. Nicht nur der Ausbau des Mobilfunknetzes, sondern auch die Verbreitung von Mobilfunkgeräten und die Anwendungsmöglichkeiten nahmen dabei zu (Taylor & Silver 2019). Immer mehr wird das Smartphone im Alltag genutzt, was zu einer zunehmenden Generierung von wertvollen Daten und infolge auch zu einer vermehrten Nutzung der Daten in unterschiedlichen Domänen, wie beispielsweise im öffentlichen Nahverkehr oder der Stadtraumforschung, führt (Okmi et al. 2023). Aktuell wird die fünfte Generation (5G) flächendeckend ausgerollt und alte Generationen verschwinden im Laufe der Zeit, wobei insbesondere die 4G-Technologie noch über Jahre weiterbestehen wird (Shah 2020). Jede neue Generation der Mobilfunktechnologie übertrifft dabei ihren Vorgänger und bietet den Nutzern Vorteile – so auch 5G. Im Vergleich zu den vorherigen Generationen, insbesondere auf 4G bezogen, bietet 5G eine Reihe von Neuerungen und Optimierungen. Die neue Entwicklungsstufe der Mobilfunktechnologie ist dabei mehr als eine schnellere Version von 4G (Kania 2019).

Einige Vorteile der neuen Technologie, z. B. präzisere Lenkung der Funksignale, hängen mit der verbesserten Multi-User-Antenne MIMO (Multiple Input Multiple Output) zusammen (Waterlot 2019). Dabei bieten besonders die reduzierten Latenzzeiten sowie die optimierte raumzeitliche Auflösung ein vermeintlich großes Potenzial u. a. für die Raum- und Mobilitätsplanung. Dabei sollen die Daten helfen, das Verhalten von Nutzergruppen besser verständlich zu machen und nachfrageorientierte Angebote zu schaffen. Ein weiteres Feld ist die Nutzung von Daten in naher Echtzeit. Besonders automatisierte raumzeitliche Anwendungen, die sich auf Livedaten stützen – wie die Verkehrssteuerung oder autonome Fahrzeuge, Industrie sowie die Landwirtschaft – bieten ein großes Potenzial für die Anwendung und Forschung der 5G-Technologie (vgl. Kania 2019, Navarro-Ortiz et al. 2020).

Es gibt jedoch auch kritische Stimmen zur 5G-Mobilfunktechnologie. Eine starke Medienpräsenz nehmen dabei gesundheitliche Bedenken der Strahlung ein. Studien zufolge sind diese Bedenken jedoch unbegründet, wobei hier noch keine Langzeitwirkungen analysiert werden konnten (vgl. Bundesministerium für Finanzen o. J.).

Das Projekt 5G-MOBiS, welches von der ITG Salzburg und dem Land Salzburg im Zuge der WISS-2025-Strategie gefördert wird, untersucht den Mehrwert von raumzeitlich hochauflösenden Mobilfunkdaten in Kombination mit weiteren Datenquellen (wie z. B. Statistikdaten) und beschäftigt sich mit Anwendungsfällen im Bereich der Mobilitätsplanung und der automatisierten Verkehrssteuerung. Das ebenfalls im Rahmen der WISS-2025-Strategie geförderte Projekt 5G-EXPS zielt auf die Entwicklung innovativer 5G-Anwendungsfälle und der systematischen Überprüfung der versprochenen 5G-Eigenschaften. Diese basieren auf den Anforderungen der Anwendungsfälle, welche sich in den Bereichen 4D-/5D-Visualisierung, Robotersteuerung, partizipative Planung und Sport ansiedeln. Die im folgenden Beitrag präsentierten Ergebnisse aus diesen beiden Forschungsprojekten geben einen ersten Einblick darauf, wie unterschiedlich und vielfältig 5G-Anwendungsfälle sein können. Außerdem wird aufgezeigt, welche Herausforderungen aktuell durch den Einsatz von 5G-Technologie und 5G-Daten auftreten.

2 STAND DER FORSCHUNG

Der 5G-Standard ist die fünfte Generation des Mobilfunknetzes und wurde vom 3GPP-Gremium definiert und ist aktuell im Release 19 verfügbar (3GPP 2024). Etwa alle zehn Jahre findet ein Generationenwechsel statt und eine neue leistungsfähigere Version wird präsentiert (Shah 2020). Treiber dieser Weiterentwicklung sind zum einen das zunehmende Volumen an Daten, aber auch die sich wandelnde Nutzung der Mobilfunkdaten (Shah 2020). Die fünfte Generation zeichnet sich durch eine Reihe von Merkmalen aus, wie hohe Bandbreiten und Datenraten, hohe Geschwindigkeit, verbesserte Konnektivität, breite Abdeckung und geringe Latenzzeiten (Yang et al. 2022, Mishra 2023, Kania, 2019). Die gesteigerte mobile Breitbandgeschwindigkeit, die geringeren Latenzzeiten sowie die gesteigerte Möglichkeit der Kommunikation zwischen Maschinen sind dabei die Schlüsselkomponenten der 5G-Technologie (Shah 2020). Bei den Verbesserungen sind zum einen die Latenz (Übertragungszeit) zu nennen, die auf etwa ein Zehntel der bisherigen Zeit (von < 10 ms auf < 1 ms) reduziert werden konnte (Mishra 2023, Yang et al. 2022). Auch die Übertragungsraten konnten von einem Wert von 1 Gbit/s auf 20 Gbit/s erhöht werden (Mishra 2023).

Dabei ist 5G nicht nur die nächste Evolution der 4G-Technologie, sondern ein Paradigmenwechsel (Mishra 2023, Kania 2019). Während 4G für die mobile Breitbandkommunikation konzipiert wurde, wurde 5G mit dem Ziel entwickelt, eine Schlüsselrolle bei der Einführung digitaler Technologien in verschiedenen wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bereichen zu spielen (Navarro-Ortiz et al. 2020). Diese Bereiche umfassen u. a. Industrie 4.0, Mobilität und Verkehr, Stadtplanung, Gesundheitswesen, Energiewirtschaft, Landwirtschaft, Smart Home, Medien sowie Unterhaltung (Navarro-Ortiz et al. 2020, Kania 2019, Mishra 2023, Yang et al. 2022). 5G-Netze treiben den Aufbau intelligenter Fabriken und die Nutzung von Technologien, wie Automatisierung, Robotik, künstliche Intelligenz, Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR) sowie das Internet of Things (IoT), voran (ECLAC 2021). Infolgedessen wird 5G zu einem breiten Spektrum an sich entwickelnden und neuen Anwendungsfällen beitragen und die Art und Weise, wie Menschen leben, arbeiten und mit ihrer Umgebung interagieren, revolutionieren (Navarro-Ortiz et al. 2020, Mishra 2023). Derzeit werden die 5G-Netze parallel zu den bereits installierten Pre-5G-Netzen (einschließlich 4G) betrieben und obwohl die Technologie noch nicht ausgereift ist, entwickelt sich 5G schnell weiter, insbesondere in städtischen Gebieten (Chiaraviglio et al. 2022).

Die aufgezeigten Optimierungen der Mobilfunktechnologie im Vergleich zu den bisherigen Versionen versprechen zunächst einmal viele Vorteile und Möglichkeiten, die auch in der Forschung, sei es beispielsweise in der Verwertung und Analyse der Daten als auch bei der Anwendung im Bereich IoT, auf ein großes Interesse stoßen. Dabei fallen in der Literatur unterschiedliche Anwendungsbereiche auf. Folgende Beispiele aus der aktuellen Forschungslandschaft (z. B. FFG o. J., ÖAW o. J., FH Salzburg 2020) demonstrieren die Relevanz der 5G-Technologie: Einen großen Anwendungsbereich bietet die Mobilitäts- und Verkehrsplanung. Durch die genauere Erfassung von Verkehrsteilnehmern bietet sich die Möglichkeit, nachfrageorientierte Angebote zu schaffen. Als Beispiel lässt sich das Projekt 5G-Libra (FFG o. J.) nennen, in wel-

chem die Nachfrage sowie das Mobilitätsangebot des öffentlichen Verkehrs gegenübergestellt werden.

Zusätzlich wurde die Thematik 5G in Kombination mit der Auswirkung von Strahlungen, beispielsweise in der Studie „5G und Gesundheit“, von der Österreichischen Akademie der Wissenschaft (ÖAW) gemeinsam mit dem Austrian Institute of Technology (AIT) untersucht (ÖAW o. J.). Diese Studie beschäftigt sich mit den Folgen und Auswirkungen der elektromagnetischen Felder auf die Gesundheit. Wie auch bereits in der Einleitung angesprochen wurde, gehört dies zu einem der kritischen Themen im Zusammenhang mit der 5G-Mobilfunktechnologie.

Nicht weniger relevant ist die Anwendung der raumzeitlich hochauflösenden 5G-Daten in Industrieprozessen, insbesondere im Rahmen der Transformation hin zur Industrie 4.0. Ein durch die FFG gefördertes Forschungsprojekt ist „5GEARING“ welches unter der Leitung der Silicon Austria Labs GmbH durchgeführt wird (FFG o. J.). Dabei befasst sich das Projekt mit der Entwicklung von Leitlinien für die Einführung von 5G. Ein weiteres durch die FFG gefördertes und von der Fachhochschule Salzburg (FHS) koordiniertes Projekt ist „SmartFactoryCamp“. Im Zuge dieses Projekts geht es um hochaktuelle und zukünftige Produktionsumgebungen und dem Industrial IoT (Internet of Things) mit Themen wie Robotik, Sensorik, Datenaufnahme, Visualisierung, digitale Zwillinge, OT/IT-Sicherheit (Operational Technology/Information Technology) und Vernetzung (in diesem Kontext u. a. auch 5G) (FFG o. J.). Dabei zielt das Salzburg Smart Factory Bootcamp auf die Weiterqualifizierung von Mitarbeitern verschiedener Unternehmen mit modernsten Smart-Factory-Technologien ab (FH Salzburg 2020). Ein weiteres FFG-Projekt unter der Leitung von AIT ist „SMARTER“ (Slope Maintenance Automation using Real-Time Telecommunication and advanced Environment Recognition), welches sich mit automatisierten Nutzfahrzeugen und Arbeitsmaschinen im öffentlichen Raum (z. B. Mähen an Böschungen entlang von Verkehrsstraßen) sowie damit verbundenen Problemstellungen und Sicherheitsaspekten beschäftigt (FFG o. J.). Dabei ist in diesem Projekt auch der Einsatz von 5G-Technologie wesentlich und wird für zukünftige Nutzungen von mobilen und autonomen Systemen in diesem Kontext evaluiert, um die Entwicklung dahingehend voranzutreiben.

3 AKTUELLE ANWENDUNGEN VON 5G IN DER GEOINFORMATIK

Anhand der theoretischen Eigenschaften, welche die 5G-Technologie verspricht, lässt sich für viele Anwendungsfälle ein großer Mehrwert erwarten. Zum Zeitpunkt der Projekte standen reale 5G-Daten noch nicht zur Verfügung, weshalb auf simulierte und vorprozessierte Mobilfunkdaten zurückgegriffen wurde, welche die Eigenschaften von 5G-Daten repräsentieren sollen. Die im Vergleich zu 4G u. a. bessere raumzeitliche Auflösung und geringere Latenzzeit sollen in der Theorie einen besseren Einblick in das Mobilitätsgeschehen geben und die Übertragung größerer Datenmengen ermöglichen, was zu einer besseren Kommunikation zwischen zwei Geräten führen soll. Wie sich dies in der Praxis bewahrheitet, wurde in ausgewählten Anwendungsfällen überprüft. Dabei wurde zum einen die Frage geklärt, inwiefern raumzeitlich hochauflösende Mobilfunkdaten einen Mehrwert in der Verkehrsplanung und automatisierten Verkehrssteuerung leisten können.

Zum anderen ging es auch darum, Innovationen mittels 5G-Technologie voranzutreiben und zu evaluieren, ob die im 5G-Standard versprochenen Merkmale in der Praxis eingehalten werden können. Dazu wurde ein 5G-Versuchsnetz in verschiedenen Konfigurationen betrieben, um zu testen, mit welcher Konfiguration welche Leistungsmerkmale für ausgewählte Anwendungsfälle erzielt werden. Einer dieser Anwendungsfälle beschäftigte sich mit der Entwicklung einer 5D-Campus-Map, wo die Herausforderungen in der kombinierten Integration von verschiedenen raumzeitlich hochauflösenden 3D-Daten und Sensordaten, welche verschiedene Qualitäten und Datenformate aufweisen, liegen. Weitere Anwendungsfälle gibt es im Bereich der kollaborativen Gestaltung des urbanen Raums, der Fernsteuerung von Industrierobotern und dem Echtzeitfeedback im Sport.

3.1 AUFBEREITUNG EINER DATENSCHUTZKONFORMEN DATENBASIS

Im Zuge des 5G-MOBiS-Forschungsprojekts wurde gemeinsam mit den Projektpartnern ANDATA Entwicklungstechnologie GmbH aus Hallein, INVENIUM Data Insights GmbH aus Graz und dem Team von RSA FG Studio iSPACE aus Salzburg in verschiedenen Anwendungsfällen aus den Bereichen Mobilitätsplanung und der automatisierten Verkehrssteuerung der Mehrwert der 5G-Technologie untersucht. Bisherige Methoden zur Analyse des Verkehrs und zur Schaffung von nachfrageorientierten Mobilitätsangeboten stützen sich häufig auf statische Daten (z. B. Pendlermatrix), Umfragen, Verkehrszählungen oder raumzeitlich gröber aufgelöste Mobilfunkdaten. Von besonderer Bedeutung sind mögliche Einschränkungen der Mobilfunkdatenbasis aufgrund des Datenschutzes, welche bei der Aufbereitung und Verwendung berücksichtigt werden müssen und sich auf die Genauigkeiten der Daten auswirken können. Im Fall der im Projekt verwendeten Testdaten, rasterbasierte simulierte raumzeitlich hochauflösende Mobilfunkdaten, wird bei Unterschreitung der Werte von mindestens 20 Trips (aufgezeichnete Fahrten) aus Datenschutzgründen der Eintrag in der Datenbank als „<20“ angegeben. Spannend für die Datenaufbereitung ist somit, wie weit man die raumzeitliche Auflösung optimieren kann, bevor der Datenschutz greift. Mithilfe eines teilautomatisierten Python-Scripts wurde für das südlich von der Stadt Salzburg gelegene Untersuchungsgebiet Hallein die gemäß dem Datenschutz bestmögliche räumliche Auflösung der Mobilfunkdaten in 15-minütigen Intervallen auf Rasterbasis ausgewertet, die aufgrund des Datenschutzes keinen Wert <20 abbildet. Ausgehend von der 1-km-Rasterzelle im Zeitintervall von 12 h wurde versucht, zuerst die zeitliche (12 h, 6 h, 2 h, 1 h, 30 min, 15 min) und dann die räumliche (1 000 m, 500 m, 250 m) Auflösung schrittweise zu verbessern. Dafür wurde zuerst abgefragt, ob im vorliegenden Zeitintervall (beginnend bei 12 h) alle Werte im nächst höher aufgelösten Zeitintervall (beginnend bei 6 h) ≥ 20 sind. Ist dies der Fall, so wurde mit dem nächstkürzeren Zeitintervall fortgefahren. Ist das Script beim kleinsten Zeitintervall (15 min) angekommen oder eine weitere zeitliche Verfeinerung ist nicht mehr ohne Datenverlust (Werte <20) möglich, so wurde versucht, die räumliche Auflösung zu verfeinern. Dabei wurde wiederum geprüft, ob alle Zellen, ausgehend von 1 000 m, einen validen Wert ≥ 20 aufweisen. Im Fall dieser Auswertungen wurden beide Verfeinerungen so weit durchprobiert, zunächst die zeitliche

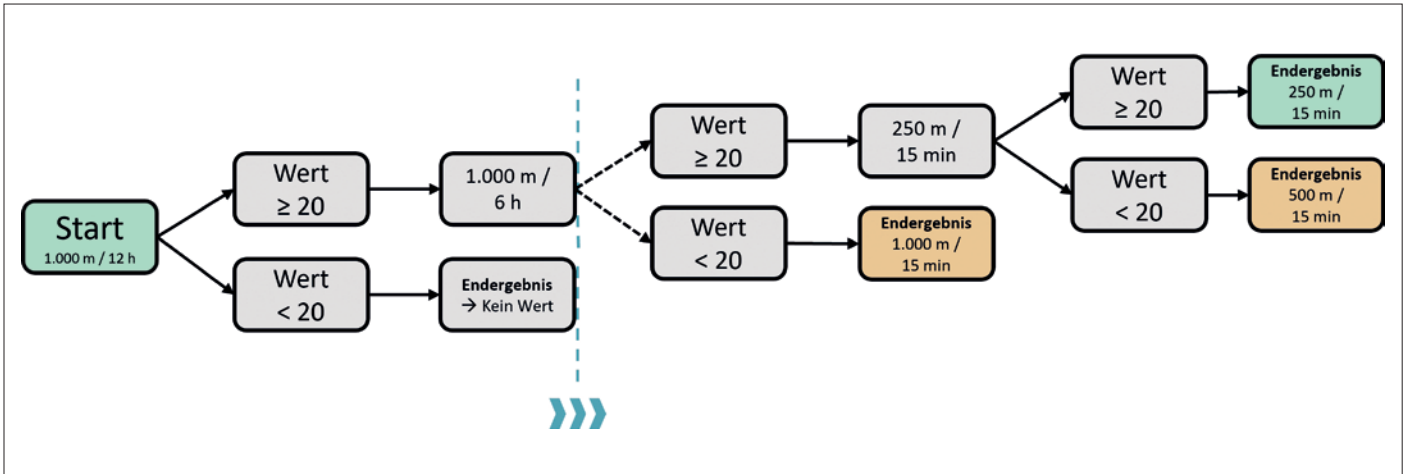


Abbildung 1: Schematischer Ablauf der Methode zur Ermittlung der bestmöglichen raumzeitlichen Auflösung unter Einhaltung des Datenschutzes mit dem Schwellenwert kleiner als 20 Trips (eigene Darstellung)

und darauf aufbauend die räumliche, bis maximal eine temporale Auflösung von 15 Minuten und eine räumliche Auflösung von 250 Meter erreicht werden konnte. Der schematische Ablauf dieser Methodik ist in Abbildung 1 dargestellt.

Als Ergebnis entstand ein Layer, der die dynamische Veränderung der Größe (250 m, 500 m, 1 000 m) von Rasterzellen, je nach Uhrzeit und Lage, inklusive der Anzahl der aufgezeichneten Mobilfunktrips, zeigt. Beispielhaft ist ein Auszug in Abbildung 2 dargestellt, der den Rasterdatensatz zu zwei unterschiedlichen Uhrzeiten gegenüberstellt und die erforderliche Variabilität bei der Arbeit mit raumzeitlich hochauflösenden Mobilfunkdaten verdeutlicht. Wie sich im Zuge der Auswertungen gezeigt hat, hängt die Antwort nach der optimalen Auflösung sowohl von der Lage der untersuchten Rasterzelle im Untersuchungsgebiet als auch der gewählten Uhrzeit ab. Besonders zur Hauptverkehrszeit in belebten Gebieten, wie Stadtzentren oder Kreuzungsbereichen, ergeben sich valide Daten mit einer sehr hohen raumzeitlichen Auflösung. Mobilfunktrips, die nachts oder in abgelegenen Gebieten verortet

wurden, haben unter Berücksichtigung des Datenschutzes eine weitaus ungenauere raumzeitliche Auflösung.

Die durch diese Methodik abgeleitete Datengrundlage bietet die gemäß dem Datenschutz bestmögliche räumliche Auflösung der Mobilfunkdaten für unterschiedliche Raumtypen sowie Uhrzeiten, ohne einen nicht genau definierten Wert (<20) abzubilden. Bei den im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden handelt es sich noch um Prototypen – sie geben jedoch schon einen Einblick in notwendige Verfahren, die je nach Anwendungsfall zu berücksichtigen sind.

3.2 VERKEHRSREGELUNG AN KREUZUNGEN

Ein weiterer Anwendungsfall für die 5G-Mobilfunktechnologie ist die verkehrliche Regelung von Kreuzungen. Kreuzungen sind oft von hohem Verkehrsaufkommen und unvorhersehbaren menschlichen Verhaltensweisen geprägt, was zu verkehrlichen Problemen führt, wie beispielsweise lange Verlustzeiten und Staus, aber auch hohen Emissionen und Sicherheitsprobleme. Traditionelle Ampeln

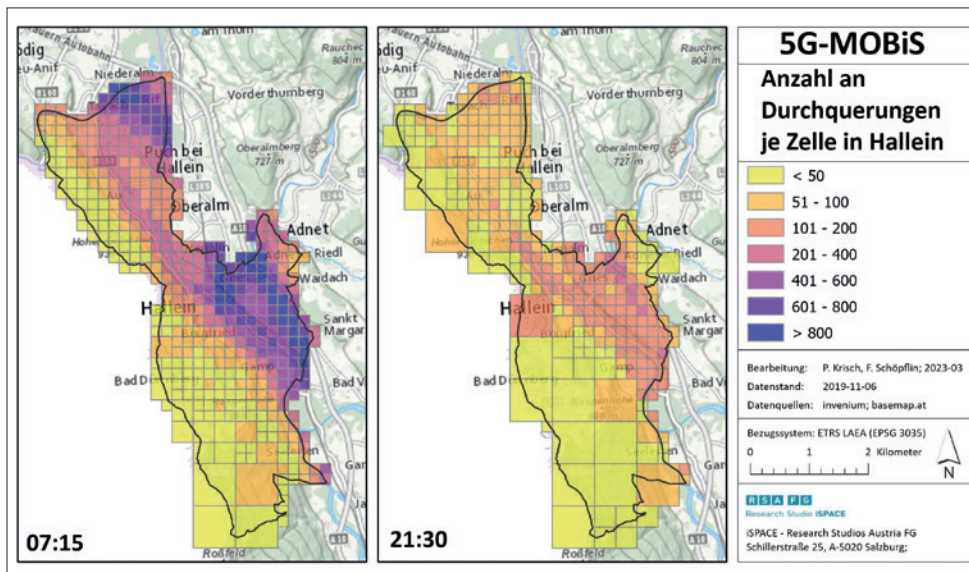


Abbildung 2: Vergleichende Darstellung der datenschutzkonformen Rasterdaten zu zwei verschiedenen Uhrzeiten (eigene Darstellung)

mit festen Signalplänen sind meistens nicht in der Lage, die komplizierte Dynamik an Kreuzungen ausreichend zu berücksichtigen. Daher besteht Bedarf an intelligenteren Lösungen, die durch den Einsatz fortschrittlicher Technologien (wie z. B. künstlicher Intelligenz) in der Lage sind, die Verkehrssituation richtig zu interpretieren und situationsadaptiv zu reagieren, indem man beispielsweise die Signalpläne situationsadaptiv dynamisch anpasst. Ein Beispiel für ein intelligentes Konzept für Verkehrsregelung ist VERONET, ein System von Algorithmen und Software-Funktionen für eine adaptive und situationsangepasste Verkehrsregelung (Kuhn et al. 2015).

Solche intelligenten Ansätze müssen in der Lage sein, die aktuelle Ver-

kehrssituation zu erkennen und zu prognostizieren. Im Gegensatz zu traditionellen Sensortypen, wie Induktionsschleifen, soll es durch 5G-Kommunikation möglich sein, Fahrzeuge zu lokalisieren und zu identifizieren. 5G ermöglicht eine schnelle Datenübertragung mit geringen Latenzzeiten. Darüber hinaus bieten 5G-Netze eine weitreichende Abdeckung, die über traditionelle Sensoren hinausgeht. Auch wenn die örtliche Genauigkeit der 5G-basierten Verortung allein nicht gut genug ist, um die Verkehrssituation genau abzubilden, kann die Kombination mit traditionellen Sensoren, zum Beispiel mit GPS-basierter Verortung, vorteilhaft sein, beispielsweise in Regionen mit schlechtem GPS-Empfang. Die Lokalisierung der einzelnen Verkehrsteilnehmer ermöglicht eine globale Erkennung der Verkehrslage und darauf basierend kann eine passende Regelungsstrategie bzw. Regelungsaktion ausgewählt werden.

Ein wichtiger Teil der intelligenten Kreuzungsregelung ist ein umfassendes Szenario-Management für eine relevante und repräsentative Datenbasis. Die erfasste mikroskopische Verkehrssituation kann dazu dienen, relevante und repräsentative Verkehrsszenarien kontinuierlich zu erfassen und zu erkennen bzw. abnormale Verkehrssituationen zu identifizieren. Die erkannten Szenarien stellen eine Basis für die datenbasierte Auslegung der Regelungsobjekte dar. Durch die Integration von 5G in die bestehende Sensorik, z. B. Induktionsschleifen oder Kameras, kann man die Erkennung der mikroskopischen Verkehrssituation verbessern. Dabei ist es nicht notwendig, dass jeder Verkehrsteilnehmer ein 5G-Gerät hat,

obwohl bei höheren Durchdringungen eine bessere Qualität zu erwarten ist. Basierend auf dem entwickelten Szenarien-Katalog ist es möglich, die Auswirkungen von unterschiedlichen Durchdringungen der 5G-Empfänger, zeitlichen Auflösungen und örtlichen Genauigkeiten simulativ zu quantifizieren.

3.3 5D-SMART-CAMPUS: ENTWICKLUNG EINER INTERAKTIVEN WEBKARTE UND EINES VIRTUELLEN GAMIFICATION-DEMONSTRATORS

Ein weiteres Forschungsprojekt, welches sich mit der 5G-Technologie befasst, ist 5G Exploration Space Salzburg (5G-EXPS). Dieses Projekt zielte auf die Entwicklung innovativer 5G-Anwendungsfälle sowie auf die systematische Überprüfung der versprochenen 5G-Eigenschaften ab. Das 5G-EXPS-Projekt beinhaltet vier Anwendungsfälle (kollaborative Gestaltung des urbanen Raums, 5D-Smart-Campus, Fernsteuerung von Industrierobotern und Echtzeit-feedback im Sport), in welchen die von 5G versprochenen Eigenschaften angewendet und evaluiert wurden. Ein übergeordnetes Ziel des 5G-EXPS-Projekts war es, für jeden dieser vier Anwendungsfälle das 5G-Netz so zu konfigurieren, dass die verschiedenen Anforderungen der Anwendungsfälle erfüllt sowie Wechselwirkungen ausgeschlossen werden und die Privatsphäre geschützt wird. Dazu wurden im Zuge dieses Projekts Messwerkzeuge zur Überprüfung der Einhaltung der geforderten Eigenschaften entwickelt, um den Nutzen von 5G für die vier Anwendungsfälle zu evaluieren.

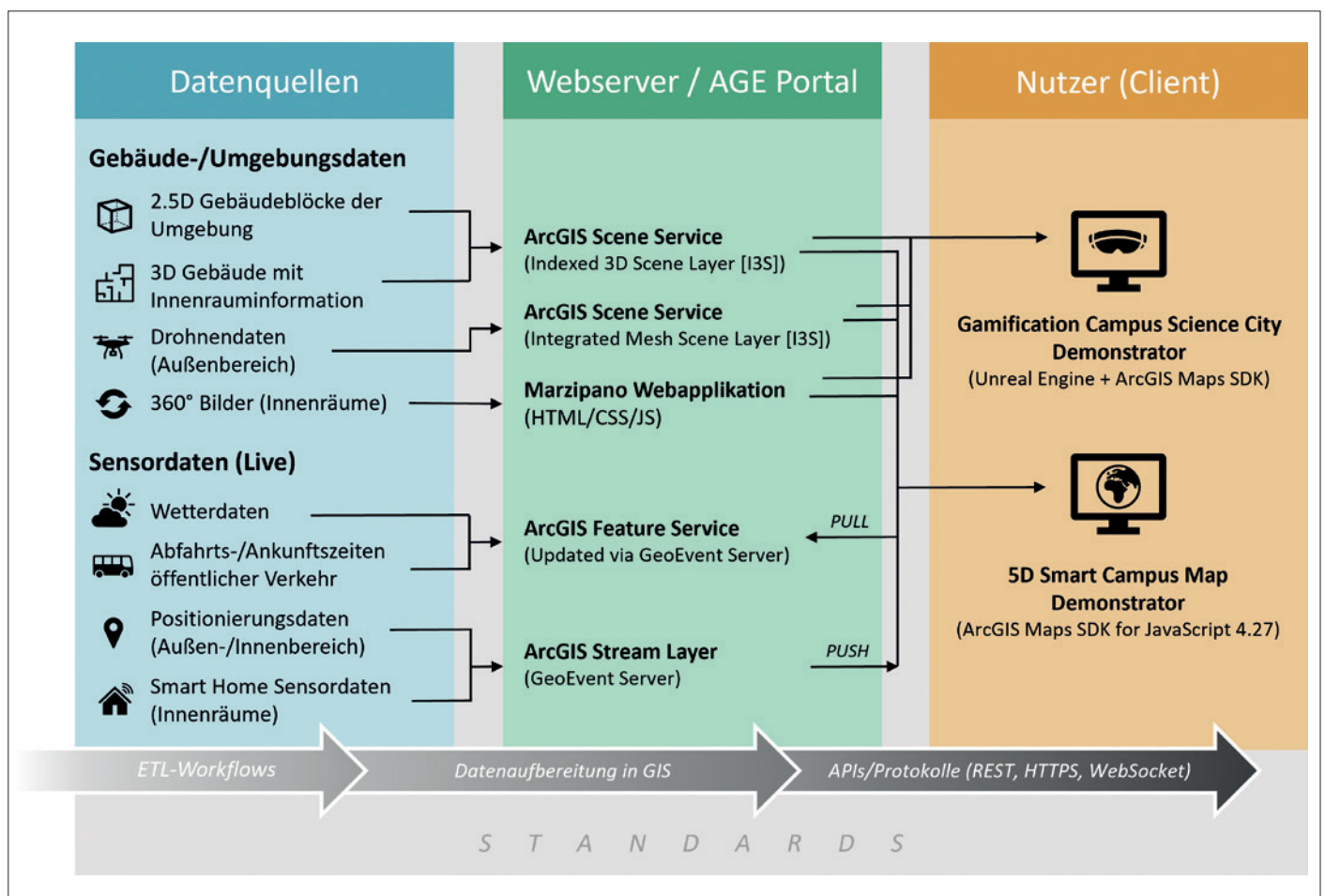


Abbildung 3: Systemarchitektur für die beiden 5D-Smart-Campus-Demonstratoren (eigene Darstellung)

Der im Zuge des 5D-Smart-Campus-Anwendungsfalls entwickelte interaktive Webkarten-Demonstrator mit Fokus auf die Science City in Salzburg ist ein „smartes“ 5D-System (3D-Raum, Zeit und Kontext), das verschiedene 3D-Datengrundlagen, Multimedia-inhalte (360°-Bilder, [Live-]Videos), fix positionierte Sensoren und mobile Endgeräte als „smarte Services“ kombiniert und basierend auf den Anforderungen verschiedener Zielnutzer visualisiert. Die 5D-Campus-Map basiert auf dem ArcGIS Maps SDK for JavaScript in der Version 4.27. In einem zweiten Demonstrator wurden die Daten (mit Ausnahme der Sensordaten) in eine Spielumgebung (Unreal Engine) integriert, um eine virtuelle Erkundung des Campus in der Egoperspektive zu ermöglichen. Mit dem 5D-Smart-Campus sollte an der Paris-Lodron-Universität Salzburg (PLUS) am Zentrum für Geoinformatik (Z_GIS) erstmals eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Informationsinfrastruktur aufgebaut werden, die zukünftig für die Lehre als Demonstrator und für Studierende, Besucher und Mitarbeiter (z. B. Facility Management) als Basis für die Orientierung und digitale Erkundung sowie das Management von Assets Verwendung finden soll.

Dabei wurden verschiedene, zum Teil raumzeitlich hochauflösende und große Mengen an Daten und Datenströmen basierend auf inhaltlich harmonisierten und technisch standardisierten Datenspezifikationen und entwickelter (semi-)automatisierter ETL-Workflows (Extract, Transform, Load) transformiert, bearbeitet und zusammengeführt. In die aufgebaute Geospatial Data Infrastructure (GDI) wurden einerseits behördliche („authoritative“) Daten integriert, aber auch hochauflösende Drohnen Datenaufnahmen des Science City Areal und eine Ableitung von hochauflösenden Luftbildern und 3D-Oberflächenmodellen für Außenbereiche (Meshes). Die detaillierten Campus-Gebäude des Techno_Z-Areal basieren auf CAD-Daten und werden mit Innenrauminformationen dargestellt (OGC CityGML 3.0, LoD3). Zusätzlich wurden die Umge-

bangsgebäude der Stadt Salzburg in einer einfacheren Darstellung (OGC CityGML 3.0, LoD1 und LoD2) integriert. Diese Datengrundlagen wurden in ArcGIS Pro aufbereitet, visualisiert und als standardisierte Webservices bereitgestellt. Dabei wurden in Abhängigkeit des Datentyps die entsprechenden Webservices verwendet und in die beiden Demonstratoren eingebunden (siehe Abbildung 3). Beispielsweise wurden die 2.5D- und 3D-Daten als *Indexed 3D Scene (I3S) Layer* und *Integrated Mesh Scene Layer* als ArcGIS Scene Service veröffentlicht und in die Demonstratoren über HTTPS-Abfragen (REST API) integriert.

Zusätzlich zu den 3D-Datengrundlagen wurden verschiedene IoT-Sensordaten für Live-Informationen zu Gebäude-, Energie-, Wetter- und Mobilitätsstatus am Campus in den Webkarten-Demonstrator integriert. Wie auch von Vögele et al. (2020) aufgezeigt wird, ist eine der Herausforderungen bei der Visualisierung von 3D-Geodaten und der Vernetzung von Sensordaten die Menge an verschiedenen Sensortypen und deren unterschiedlichen Datenformaten. Daher wurden mittels ETL-Workflows die verschiedenen Sensordaten, angelehnt an den SensorThings-API-Standard des Open Geospatial Consortium (OGC), im JSON-Format mit Metadaten angereichert und strukturiert, um alle Sensordaten in harmonisierter und einheitlicher Form bereitzustellen. Im konkreten Anwendungsfall wurden dafür u. a. Home-Automation-Sensoren verwendet, um Informationen zum Energiebedarf der Gebäude zu kommunizieren und in weiterer Folge dazu beizutragen, diesen zu reduzieren und die Gebäudesicherheitsanforderungen zu unterstützen. Live-Wetterdaten simulieren das aktuelle Wetter und die aktuelle Uhrzeit in der interaktiven Webkarte. Die Stationen von öffentlichen Verkehrsmitteln in der Umgebung mit den aktuellen Ankunfts- und Abfahrtszeiten werden ebenfalls einblendet. Um weitere spezifischere Dienste (z. B. Positionierung) nutzen zu können, wurde ein durchgängiges Indoor-/Outdoor-

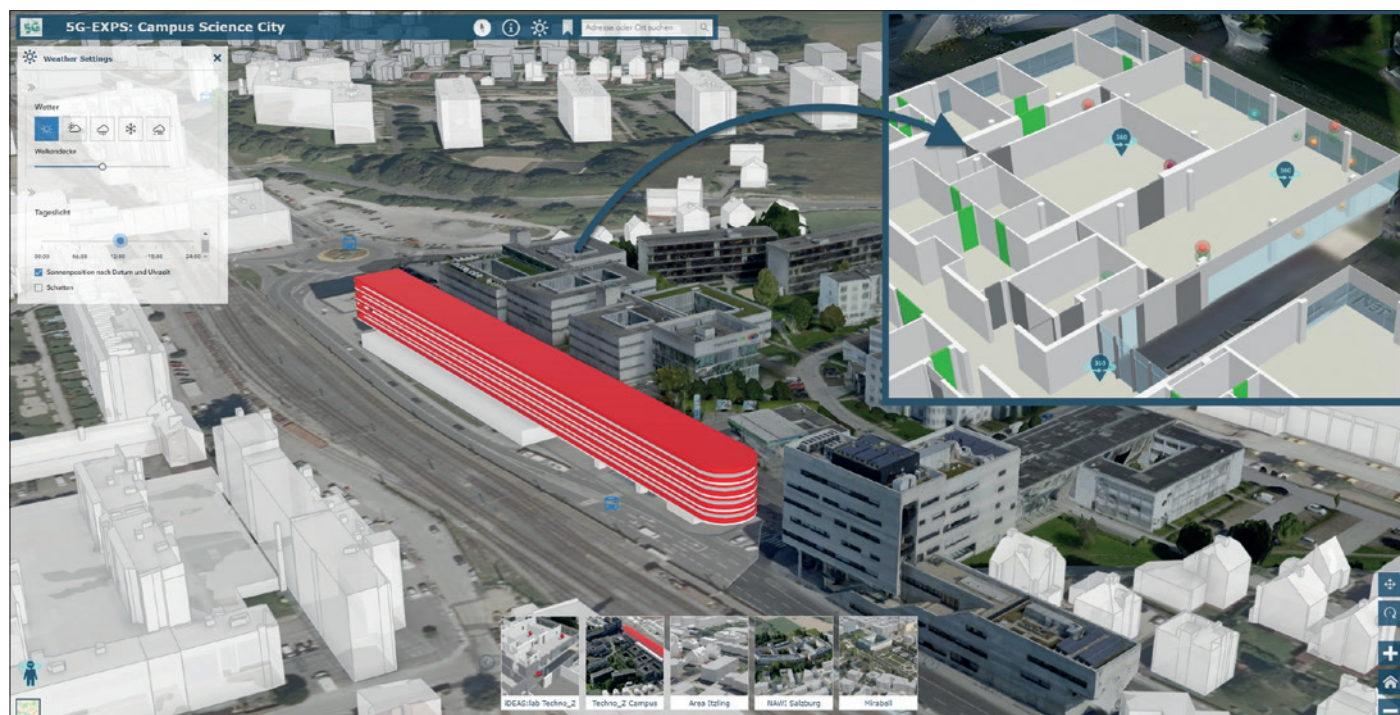


Abbildung 4: Interaktiver 5D-Smart-Campus-Map-Demonstrator – die Detailansicht zeigt einen Einblick in den Innenbereich des 3D-Techno_Z-Gebäudes sowie verschiedene verknüpfte Home-Automation-Sensordaten und virtuellen 360°-Touren (eigene Darstellung)

positionierungssystem am Fachbereich Z_GIS der PLUS prototypisch aufgebaut. Dabei wurden für die Sensordaten zwei Ansätze verwendet, welche die ArcGIS-GeoEvent-Erweiterung erfordern. Zum einen wurden Livedaten, wie die Wetterdaten und Verkehrsinformationen, über einen in regelmäßigen Abständen aktualisierten ArcGIS Feature Service bereitgestellt. In diesem Fall müssen die Daten in einem bestimmten Intervall clientseitig im Hintergrund abgefragt werden (Pull). Zum anderen wurden Livedaten, wie die Positionierungsdaten oder Smart-Home-Sensordaten, als ArcGIS Stream Services, welche auf WebSockets basieren, veröffentlicht und hier wird eine bidirektionale Verbindung („subscribe“) aufgebaut, über welche die Daten automatisch zum Client geschickt werden (Push).

Die 360°-Aufnahmen von allen Innenräumen des Fachbereichs Z_GIS wurden als virtuelle Tour in einer Marzipano-Webanwendung (basierend auf HTML, JavaScript und CSS) verlinkt und um interaktive Elemente, wie Tooltips, Informationsboxen, Videos und Livedaten, erweitert. Diese Webanwendung mit den verschiedenen 360°-Aufnahmen wurde mit den digitalen Räumen des 3D-Gebäudemodells in der interaktiven 5D-Campus-Map, als aktivierbare 360°-Markersymbole in den Räumen und unter Verwendung von iframes, verknüpft.

Hauptergebnis dieses Anwendungsfalls ist ein prototypischer 5D-Smart-Campus-Science-City-Demonstrator als digitale Replika, welcher mit der physischen Umwelt in Verbindung steht (siehe Abbildung 4). Mit diesem Demonstrator soll im Weiteren noch der praktische Nutzen von 5G hinsichtlich der Integration, Auswertung und Kommunikation von großen Mengen an hochauflösenden 3D-Geodaten für webbasierte Karten und weiterfolgend auch als virtuelle Spielwelt in VR (Virtual Reality) bewertet werden. Dazu wurde ein zweiter Demonstrator als virtuell erlebbarer „Gamification Campus Science City Itzling“ entwickelt, in welchem die verschiedenen Gebäude- und Umgebungsdaten basierend auf denselben Webservices in eine 3D-Spielwelt (Unreal Engine) integriert wurden (vgl. Atzl et al. 2023).

3.4 AUFBAU EINES 5G-VERSUCHSNETZES FÜR DIE EVALUIERUNG VERSCHIEDENER ANWENDUNGSFÄLLE

Zur Evaluierung des Nutzens von 5G für die vier Anwendungsfälle wurde im Projekt 5G-EXPS ein standortübergreifendes 5G-Versuchsnetz aus 5G-Outdoor- und Indoorzellen an den Standorten der Science City Itzling und der FH Salzburg eingerichtet. Dieses Netz wurde ausschließlich für Versuche freigehalten und war nicht im kommerziellen Einsatz. Durch diesen isolierten Aufbau konnten die Anwendungsfälle detailliert und unter kontrollierten Bedingungen untersucht werden. Es handelt sich um eines der ersten 5G-Stand-alone-Netze (5G-SA) in Österreich.

Als Technologiepartner fungierte die Salzburg AG, die 2019 bei der ersten 5G-Frequenzversteigerung ein regionales 80-MHz-Frequenzband für das Bundesland Salzburg erworben hat. Dabei handelt es sich um ein n78-Frequenzband mit 3,4 GHz bis 3,8 GHz. Regulatorisch wurde dieses Frequenzband auf einen Betrieb in Time Division Duplex (TDD) in Rahmenkonfiguration 2 festgelegt (Telekom-Control-Kommission 2019). Das bedeutet Downlink und Uplink wechseln sich zeitlich mit Zykluszeiten von 10 ms ab. Diese vom bisherigen 4G-Betrieb abgeleiteten Vorgaben haben zur Konsequenz, dass sich dieses erste verfügbare

5G-Frequenzband insbesondere zum Erreichen noch höherer Datenraten als bisher möglich eignet. In der Evaluierung konnten Datenraten von um 1 Gbit/s erreicht werden.

Durch diesen frühen Einsatz von 5G zeigte sich während der Projektlaufzeit eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Netzwerkperformanz. 5G wird schrittweise in sogenannten Releases weiterentwickelt und ausgerollt. Es wurden Updates, Upgrades und Umstellungen seitens Netzbetreiber als auch Netzwerkausrüster durchgeführt. Viele mediale 5G-Versprechungen sind aktuell noch Zukunftsvision, aktuell am Markt verfügbare Systeme sind noch nicht in der Lage, diese versprochenen Eigenschaften zu erfüllen. Generell wird es nur möglich sein, einem Endgerät beispielsweise entweder höchste Bandbreite oder höchste Zuverlässigkeit zur Verfügung zu stellen – nicht jedoch beides gleichzeitig, da die Ressourcen entweder für Bandbreite oder für Zuverlässigkeit benötigt werden. Es gibt also nicht das „allumfassende“ 5G-Netz, sondern je nach Anwendung wird die tatsächliche Ausprägung sehr unterschiedlich aussehen.

Zur Untersuchung der Anwendungsfälle wurde das Versuchsnetz, innerhalb der regulatorischen Rahmenbedingungen, jeweils unterschiedlich konfiguriert und vermessen. Insbesondere wurden verschiedene 5G-spezifische netzseitige QoS(Quality of Service)-Parametrisierungen getestet. Diese Parametrisierungen werden im 5G-Standard als 5QI (5G QoS Identifier) spezifiziert (3GPP o. J.) und definieren dabei u. a. Priorität, Packet Delay Budget, Paketfehleraten oder Bitratengarantien des Datenverkehrs. Die Parametrisierungen wurden dabei so gewählt, dass sie den Anforderungen der untersuchten Anwendungsfälle möglichst entsprechen. Zur Vermessung wurden auf die jeweiligen Anwendungsfälle zugeschnittene Mess- und Monitoringwerkzeuge entwickelt. Diese haben entweder passiv durch Monitoring des Nutzdatenverkehrs oder aktiv durch Erzeugung von nachgebildetem Datenverkehr die relevanten Netzparameter gemessen und gemeinsam mit einem Monitoring des 5G-Netzes eine detaillierte Bewertung ermöglicht.

Besonders die beiden Anwendungsfälle *Kollaborative Gestaltung des urbanen Raums* und *5D-Smart-Campus*, die stark von hohen Datenraten profitieren, demonstrierten die Möglichkeiten von 5G mit den in der Evaluierung erreichten Datenraten von um 1 Gbit/s. Es zeigte sich jedoch auch, dass die AR-Anwendungen zur *kollaborativen Gestaltung des urbanen Raums* von noch deutlich niedrigeren Latenzen profitieren würden. Diese sind jedoch erst in Zukunft mit anderen regulatorisch vorgegebenen Übertragungsverfahren (beispielsweise Frequency Division Duplex – FDD statt TDD) oder anderen Rahmenkonfigurationen möglich.

Im *5D-Smart-Campus* wurden die physikalisch bedingten Grenzen durch die Ausbreitungseigenschaften im 3,4-GHz-Frequenzbereich deutlich: Besonders die für das Facility Management notwendige tiefe Gebäudedurchdringung ist in diesem Frequenzbereich nur noch sehr bedingt möglich. Für eine vollständige Abdeckung muss hier eine Ergänzung mit tief eindringenden niedrigeren Frequenzbereichen erfolgen (beispielsweise durch das mittlerweile bereits verfügbare 700-MHz-Band).

Die *Fernsteuerung von Industrierobotern* erfordert zum einen eine sehr niedrige Latenz und zum anderen eine sehr hohe Zuverlässigkeit. Es wurde standortübergreifend eine Fernsteuerung, von der Science City Itzling in die FH Salzburg und umgekehrt, de-

monstriert. Hier zeigte sich, dass im Indoorbereich der regulatorische Rahmen wichtige Optimierungen hinsichtlich Rahmenkonfiguration zum Erreichen der niedrigen Latenzen zulässt. Die extrem hohe geforderte Zuverlässigkeit ist in aktuell verfügbaren 5G-Netzen allerdings noch nicht erreichbar. Dazu sind fortgeschrittene 5G-Features, wie Ultra Reliable and Low Latency Communications (uRLLC), notwendig, die derzeit noch nicht vollständig unterstützt werden.

Der Use Case *Echtzeitfeedback im Sport* erforderte nicht ganz so niedrige Latenzen und stellte keine hohen Anforderungen an die Zuverlässigkeit. In der Evaluierung konnte die erfolgreiche praktische Umsetzung in aktuellen 5G-SA-Netzen demonstriert werden. Herausfordernd sind hier besonders die erst begrenzte Verfügbarkeit von 5G-fähiger Sensorik.

4 DISKUSSION UND AUSBLICK

Aktuelle Forschungsprojekte zeigen das Potenzial, aber auch die derzeitigen Schwächen raumzeitlich hochauflösender Mobilfunkdaten. Die Erwartungshaltung zu Beginn der Projekte war aufgrund der Literatur und der Versprechen der 5G-Technologie hoch. Leider konnten die Erwartungen nicht vollends erfüllt werden. Dabei konnten bei den Anwendungsfällen unterschiedliche Erkenntnisse gewonnen werden. Während der Laufzeit des 5G-MOBiS-Forschungsprojekts waren „reale“ 5G-Mobilfunkdaten, mit den erklärten Vorteilen, noch nicht verfügbar. Die übertragbaren Methoden und Modelle wurden jedoch schon auf eine Implementierung von 5G-Daten durch den Einsatz von raumzeitlich hochauflösenden vorverarbeiteten synthetischen Daten, welche die Eigenschaften von 5G widerspiegeln, vorbereitet. Aussagen über die Latenzzeit in der realen Nutzung lassen sich jedoch noch nicht treffen.

Die Frage, inwiefern raumzeitlich hochauflösende Mobilfunkdaten einen Mehrwert in der Verkehrsplanung in automatisierten Verkehrssteuerungen liefern können, kann aufgrund der Forschungsergebnisse wie folgt beantwortet werden: In der Mobilitäts- und Verkehrsplanung können u. a. Mobilitätsdienstleister durch die genauere raumzeitliche Zuordnung des Verkehrs eine optimierte nachfrageorientierte Mobilitätsdienstleistung schaffen und somit vom Mehrwert der Datenbasis profitieren. Jedoch für sich allein betrachtet müssen die Daten, insbesondere im Umgang mit absoluten Zahlen, mit Vorsicht verwendet werden. Durch Harmonisierung und Verschneidung mit weiteren Datenstämmen, wie beispielsweise Statistikdaten, können raumzeitlich hochauflösende Mobilfunkdaten beispielsweise dabei helfen, Bewegungsströme und auch das Verkehrsaufkommen besser zu verstehen und eine nachfrageorientierte Planung zu unterstützen. Ungenauigkeiten, durch falsche räumliche Zuordnung oder durch den Datenschutz, müssen aber in Kauf genommen werden. Hier empfiehlt es sich, mit relativen Werten zu arbeiten. Der Umgang mit dem Datenschutz wird auch zukünftig ein essenzielles Thema bleiben. Wie sich in den 5G-MOBiS-Anwendungsfällen gezeigt hat, sind sowohl die räumliche Lage als auch der Betrachtungszeitraum der Mobilfunkdaten ausschlaggebend für die mögliche raumzeitliche Auflösung und damit auch für die Aussagekraft der Daten. Bei der Verarbeitung und Aufbereitung der Mobilfunkdaten muss dies laufend berücksichtigt werden und die zu verwendenden Tools und Methoden sind dementsprechend zu entwickeln, um auf verschie-

dene Uhrzeiten sowie Raumtypen flexibel reagieren zu können. Hierdurch wird eine optimale Inwertsetzung der Datenbasis im Rahmen des Datenschutzes ermöglicht.

Für den Anwendungsfall der situationsadaptiven Kreuzungsregelung stellte sich anhand dieser synthetischen 5G-Daten beispielsweise heraus, dass es gewisse Mindestanforderungen an die Lokalisierungsgenauigkeit, die zeitliche Latenz und die Durchdringungsrate (Prozentsatz 5G-fähiger Geräte) gibt, um zuverlässig Verkehrssituationen beurteilen zu können. Im 5G-MOBiS-Projekt wurden diese Mindestanforderungen anhand zweier realer Kreuzungsgeometrien ausgelotet. Dabei zeigte sich, dass insbesondere die Lokalisierungsgenauigkeit der sich aus den synthetisch erzeugten 5G-Daten ergebenden Trajektorien noch zu ungenau ist, um situationsadaptive Kreuzungsregelung sinnvoll zu ermöglichen. Die Anforderungen an Durchdringung und zeitliche Auflösung nehmen dagegen eine geringere Rolle ein. Die hierfür entwickelte Methodik zur Verkehrssituationserkennung lässt sich dabei auch auf „reale“ 5G-Mobilfunkdatensätze anwenden. Inwiefern die raumzeitlich hochauflösenden Daten sowie die Methoden und Modelle in Zukunft von den Zielgruppen genutzt werden, ist ungewiss. Potenziale sind, wie gezeigt wurde, besonders durch die Kombination mit weiteren Daten vorhanden. Hierbei kommt es besonders auf die Verarbeitung und Aufbereitung der Daten als einer der wichtigsten Qualitätsfaktoren der Daten an. Durch den Einsatz der kombinierten Daten kann in ausgewählten Anwendungsfällen dabei ein Mehrwert geschaffen werden.

Im Zuge des 5G-EXPS-Forschungsprojekts wurden vier Use Cases *Kollaborative Gestaltung des urbanen Raums*, *5D-Smart-Campus*, *Fernsteuerung von Industrierobotern* und *Echtzeitfeedback im Sport* entwickelt, anhand derer mittels verschiedener Konfigurationen des 5G-Netzes Messungen zur Evaluierung des Mehrwerts von 5G durchgeführt wurden. Um die verschiedenen von 5G versprochenen Merkmale erfüllen zu können, muss das verfügbare Frequenzspektrum sehr unterschiedlich verwendet werden. Es können einem Endgerät entweder die höchste Bandbreite oder die höchste Zuverlässigkeit zur Verfügung gestellt werden, d. h. der Betrieb und die tatsächliche Konfiguration eines 5G-Netzes müssen somit an die konkreten Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalles angepasst werden. Besonders herausfordernd sind der Betrieb und die Konfiguration, wenn mehrere Anwendungen mit sehr unterschiedlichen (teils konkurrierenden) Anforderungen bedient werden sollen. Hier gilt es zum einen die Anforderungen jeder einzelnen Anwendung zu erfüllen, zum anderen Wechselwirkungen zwischen den Anwendungen zu verhindern. Um die Einhaltung der geforderten Anforderungen zu überprüfen, werden neuartige Messwerkzeuge benötigt, wie jene, die im Zuge des 5G-EXPS-Forschungsprojekts entwickelt wurden. Anhand dieser wurden die notwendigen Überprüfungen basierend auf den am Standort Science City Itzling und der FH Salzburg aufgebauten 5G-Versuchsnetzen durchgeführt. Die Evaluierung zeigte, dass mit 5G-SA-Netzen bereits viele der versprochenen Eigenschaften implementierbar sind und sich somit auch innovative und neuartige Anwendungsfälle performanter umsetzen lassen. Derzeit besteht allerdings noch eine große Diskrepanz zwischen den in Releases schon grundsätzlich spezifizierten 5G-Features und tatsächlich von Netzwerkausrüstern implementierten und wei-

terhin von Netzbetreibern tatsächlich ausgerollten Funktionen. Die durchgeführten Messungen und Auswertungen haben deutlich gezeigt, dass 5G noch mitten in der Entwicklung steckt und von Release zu Release erst die versprochenen Eigenschaften erhält. Diese Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit eines fortlaufenden Tradeoffs zwischen Datenrate, Latenz und Zuverlässigkeit in der aktuellen 5G-Technologie. Praktisch muss dieser Kompromiss als anwendungsspezifische 5G-Parametrisierung, entsprechend den jeweiligen Anforderungen, umgesetzt werden.

Die verschiedenen präsentierten Anwendungsfälle aus dem Bereich der Geoinformatik haben gezeigt, dass das Interesse für die 5G-Technologie in der Forschung groß ist, die versprochenen

Eigenschaften jedoch noch nicht vollständig eingehalten werden. In vielen Bereichen ist noch Forschungsarbeit notwendig, um 5G-Netze z. B. auch für kritische Infrastrukturen und Systeme einsetzen zu können. Weiterhin konnte der tatsächliche Mehrwert von 5G für die hier präsentierten Anwendungsfälle nicht immer im Detail evaluiert werden und ist auch für viele weitere Anwendungsfälle noch unklar.

Danksagung

Die Projekte 5G-MOBiS und 5G-EXPS wurden im Zuge der Wissenschafts- und Innovationsstrategie Salzburg 2025 (WISS 2025) vom Land Salzburg gefördert.

Literatur

3GPP – 3rd Generation Partnership Project (2024): Release 19. [https://3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-19\(02/2024\)](https://3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-19(02/2024)).

3GPP – 3rd Generation Partnership Project (o. J.): Portal; Specification # 23.501. [https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144\(02/2024\)](https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3144(02/2024)).

Atzl, C.; Andorfer, M.; Mittlböck, M. (2023): Geodatenintegration in 3D-Spielewelten. In: AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik 9/2023, S. 2–11. <https://doi.org/10.14627/537742001>.

Bundesministerium für Finanzen (o. J.): 5G Faktencheck. [https://www.bmf.gv.at/themen/telekommunikation-post_2/funk-mobilfunk/mobilfunk-gesundheit/5g-faktencheck.html\(12/2023\)](https://www.bmf.gv.at/themen/telekommunikation-post_2/funk-mobilfunk/mobilfunk-gesundheit/5g-faktencheck.html(12/2023)).

Chiaraviglio, L.; Iodovisi, C.; Franci, D.; Pavoncello, S.; Aureli, T. (2022): Six Months in the life of a Cellular Tower: Is 5G Exposure Higher than pre-5G One? In: IEEE International Symposium on Measurements & Networking, Padua, Italien, S. 1–6. DOI: 10.1109/MN55117.2022.9887670.

ECLAC – Economic Commission for Latin America and the Caribbean (2021): Digital technologies for a new future (LC/TS.2021/43). United Nations publication, Santiago.

FFG (o. J.): Projektdatenbank. [https://projekte.ffg.at/projekt?go=1&q=5G\(12/2023\)](https://projekte.ffg.at/projekt?go=1&q=5G(12/2023)).

FH Salzburg (2020): Bootcamp Smart Factory Salzburg. [https://its.fh-salzburg.ac.at/forschung/forschungsprojekte/projektseite/bootcamp-smartfactory-salzburg\(12/2023\)](https://its.fh-salzburg.ac.at/forschung/forschungsprojekte/projektseite/bootcamp-smartfactory-salzburg(12/2023)).

Kania, E. B. (2019): Securing Our 5G Future: The Competitive Challenge and Considerations for U.S. Policy. Center for a New American Security, Washington, DC.

Kuhn, A.; Carmona, J.; Palau, T. (2015): A Hierarchical, Subsidiary System Architecture for Traffic Control with Connected Vehicles. In: Proceedings 22nd ITS World Congress, Bordeaux, France.

Mishra, R. (2023): An overview of backbone technology behind the latest advanced gadgets in use: 4G & 5G. In: Spatial Information Research 31, S. 15–26. DOI: 10.1007/s41324-022-00474-1.

Navarro-Ortiz, J.; Romero-Diaz, P.; Sendra, S.; Ameigeiras, P.; Ramos-Munoz, J. J.; Lopez-Soler, J. M. (2020): A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials 22 (2), S. 905–929. DOI: 10.1109/COMST.2020.2971781.

ÖAW – Österreichische Akademie der Wissenschaft (o. J.): 5G und Gesundheit. [https://www.oew.ac.at/ita/projekte/5g-und-gesundheit\(12/2023\)](https://www.oew.ac.at/ita/projekte/5g-und-gesundheit(12/2023)).

Okmi, M.; Por, L. Y.; Ang, T. F.; Ku, C. S. (2023): Mobile Phone Data: A Survey of Techniques, Features, and Applications. In: Sensors 23, S. 908. DOI: 10.3390/s23020908.

Shah, R. (2020): What is 5G? Ensuring a trusted 5G ecosystem of vendors and technology. Australian Strategic Policy Institute, S. 4–6. [http://www.jstor.org/stable/resrep261166\(12/2023\)](http://www.jstor.org/stable/resrep261166(12/2023)).

Taylor, K.; Silver, S. (2019): Smartphone Ownership Is Growing Rapidly Around the World, but Not Always Equally. Pew Research Center, Washington, DC.

Telekom-Control-Kommission (2019): Anlage zum Bescheid F 7/16-401 der Telekom-Control-Kommission vom 08.04.2019. [https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/entscheidungen/entscheidungen/F_7_16_Frequenzteilungsurkunde.pdf\(12/2023\)](https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/entscheidungen/entscheidungen/F_7_16_Frequenzteilungsurkunde.pdf(12/2023)).

Vögele, M.; Santhanavanich, T.; Würstle, P.; Graf, G.; Coors, V. (2020): Smart Villages – Vernetzung von 3D-Geoinformation und umweltrelevanten Sensordaten im ländlichen Raum. In: gis.Science 2/2020, S. 47–58.

Waterlot, F. (2019): 5G, indoor and AI location, 3 trends in MWC19. [https://elainnovation.com/en/5g-indoor-and-ai-location-3-trends-in-mwc19\(02/2024\)](https://elainnovation.com/en/5g-indoor-and-ai-location-3-trends-in-mwc19(02/2024)).

Yang, C.; Liang, P.; Fu, L.; Cui, G.; Huang, F.; Teng, F.; Bangash, Y. A. (2022): Using 5G in smart cities: A systematic mapping study. In: Intelligent Systems with Applications, 14. DOI: 10.1016/j.iswa.2022.200065.