

Abschlussbericht

Tel-CON

Projekttitle: Tel-CON – Machbarkeitsstudie zur optimalen Standortplanung von 5G-Funkmasten durch innovative Algorithmen

Datum: 13.05.2024

Projektdauer: 01.01.2023 – 30.11.2023

Projektteam: Prof. Dr.-Ing. Frank Mantwill, Dr. Fawad Zazai, M. Qais Zazai

Kontaktinformationen: Maschinenelemente Rechnergestützte Produktentwicklung
Helmut-Schmidt-Universität
Holstenhofweg 85
22043 Hamburg

Inhaltsverzeichnis

I. Kurze Darstellung	3
1. Aufgabenstellung	3
2. Voraussetzungen	3
3. Planung und Ablauf.....	3
4. Wissenschaftlicher und technischer Stand	4
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	4
II. Eingehende Darstellung	5
1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele	5
2. Zahlenmäßiger Nachweis	13
3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	13
4. Voraussichtlicher Nutzen	14
5. Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	14
6. Veröffentlichungen des Ergebnisses.....	17

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Optimale Platzierung eines 5G-Funkmastes mit 45%iger Signalabdeckung	6
Abbildung 2: Optimale Platzierung von zwei 5G-Funkmasten mit 40%iger Signalabdeckung	6
Abbildung 3: Optimale Platzierung von drei 5G-Funkmasten mit 60%iger Signalabdeckung	7
Abbildung 4: Optimale Platzierung von vier 5G-Funkmasten mit 75%iger Signalabdeckung	7
Abbildung 5: Optimale Platzierung von fünf 5G-Funkmasten mit 85%iger Signalabdeckung	8
Abbildung 6: Optimale Platzierung von sechs 5G-Funkmasten mit 90%iger Signalabdeckung	8
Abbildung 7: Optimale Platzierung von sieben 5G-Funkmasten mit 95%iger Signalabdeckung	9
Abbildung 8: Optimale Platzierung von acht 5G-Funkmasten mit 98%iger Signalabdeckung	9
Abbildung 9: Vergleich bestehender Funkmasten (grüne Punkte) mit der optimalen Platzierung von fünf 5G-Funkmasten (rote Punkte).....	10
Abbildung 10: Vergleich bestehender Funkmasten (grüne Punkte) mit der optimalen Platzierung von sechs 5G-Funkmasten (rote Punkte)	10
Abbildung 11: Szenariendarstellung – Minimale Signalabdeckung der Fläche in Abhängigkeit von der Anzahl an 5G-Funkmasten.....	11
Abbildung 12: 5G Mobilfunknetz von Pfullendorf	12
Abbildung 13: Visualisierung des 5G Mobilfunknetzes mit Tel-CON.....	12

I. Kurze Darstellung

1. Aufgabenstellung

Das Projekt hatte zum Ziel, innovative Algorithmen zur optimalen Standortplanung von 5G-Funkmasten in Pfullendorf zu erproben. Dabei sollten geografische Gegebenheiten und GIS-Daten von Pfullendorf genutzt werden, um eine präzise und effiziente Standortplanung in dem Gebiet zu ermöglichen.

2. Voraussetzungen

Das Vorhaben wurde unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Technik im Bereich der Standortplanung von Funkmasten durchgeführt. Es wurde ein Computermathematiker und ein Betriebswirt hinzugezogen, um eine ganzheitliche Lösung zu entwickeln.

3. Planung und Ablauf

Das Projekt wurde in drei Arbeitspakete unterteilt:

- Datenerhebung und -aufbereitung (6 PM),
- Durchführung der Studie (11 PM) und
- Zusammenfassung der Ergebnisse (5 PM).

Ein detaillierter Zeitplan wurde erstellt, um die Schritte und Meilensteine des Projekts zu definieren und einzuhalten.

Das Ergebnis des ersten Arbeitspakets war die digitale Modellierung von Pfullendorf durch die Datenbeschaffung, -erhebung und -aufbereitung.

Unter Einsatz der Algorithmen von Tel-CON wurde am Ende des Arbeitspakets 2 das Gebiet vollständig analysiert, die Daten ausgewertet und ein Ergebnis mit der optimalen Standortplanung von 5G-Funkmasten abgeleitet.

Innerhalb des dritten Arbeitspakets wurde die Qualität der Resultate überprüft und ein Vergleich zwischen den vorhandenen Ergebnissen und den Ergebnissen durch TELCON abgeleitet.

Die ursprüngliche Projektlaufzeit von acht Monaten zur Durchführung der Machbarkeitsstudie wurde um drei Monate verlängert, sodass das Projekt nach elf Monaten erfolgreich beendet werden konnte.

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand

Das Projekt baute auf vorhandene Konstruktionen, Verfahren und Fachliteratur im Bereich der Funkmastenplanung auf. Verfahren wie das *Maximum Coverage Location Problem*¹ und das *Ray-Tracing-Verfahren*² wurden in den Algorithmen eingebettet, um die optimale Standortplanung der 5G-Funkmaste zu ermitteln. Die derzeitige Vorgehensweise zur Bestimmung der Standorte von Funkmasten werden anhand von Ray-Tracing-Verfahren und Abschätzungsmethoden durchgeführt. Nur in Anwendungen mit besonders hohen Anforderungen an die Genauigkeiten kommen aufwändige Simulationsverfahren zum Einsatz. Mit unserer Vorgehensweise haben wir zusätzlich zu der gängigen Vorgehensweise unsere neuartigen Algorithmen genutzt, die eine höhere Genauigkeit gegenüber den Schätzverfahren bei gleichzeitiger Aufwandsreduzierung gegenüber den Simulationsverfahren ergeben soll und entsprechend die Methode erweitert.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es erfolgte keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen im Rahmen der Datenerhebung und der Projektrealisierung.

¹ Huang, CF., Tseng, YC. The Coverage Problem in a Wireless Sensor Network. *Mobile Netw. Appl.* 10, 519–528 (2005).

² Rauber, T. (1993). Ray-Tracing-Verfahren. In: *Algorithmen in der Computergraphik. Leitfäden und Monographien der Informatik.* Vieweg+Teubner Verlag.

II. Eingehende Darstellung

1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Anhand der Förderung konnte die Umsetzung der Durchführbarkeitsstudie ermöglicht werden. Ohne eine finanzielle Unterstützung des Bundes wäre eine Umsetzung des Projekts nicht realisierbar.

Die finanzielle Unterstützung wurde hauptsächlich für Personalkosten, Reisekosten und Softwarelizenzen verwendet. Als Ergebnis des Projekts wurden Algorithmen erprobt, die eine präzise Standortplanung von 5G-Funkmasten ermöglichen.

Bei der Ergebnisdarstellung wurde mit einem Richtwert der Signaltransmission und der Signalreflexion gearbeitet. Dabei wurde ein Best Fit abgeleitet, dass 35% der Signale transmittiert und 65% der Signale reflektiert werden. Weitere Prämissen betrafen den Bau auf Häusern und die Höhe der Antennen: Funkmasten werden nicht auf Häusern gebaut und die Höhe der Antennen werden bei der Signalabdeckung vernachlässigt. Die prozentuale Toleranz der Signalabdeckung ist bei unseren Ergebnissen abhängig von der Anzahl der 5G-Funkmasten. Je geringer die prozentuale Toleranz der Signalabdeckung, desto mehr Funkmasten werden benötigt. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie konnten wir unterschiedliche optimale Szenarien erstellen und haben diese visualisiert:

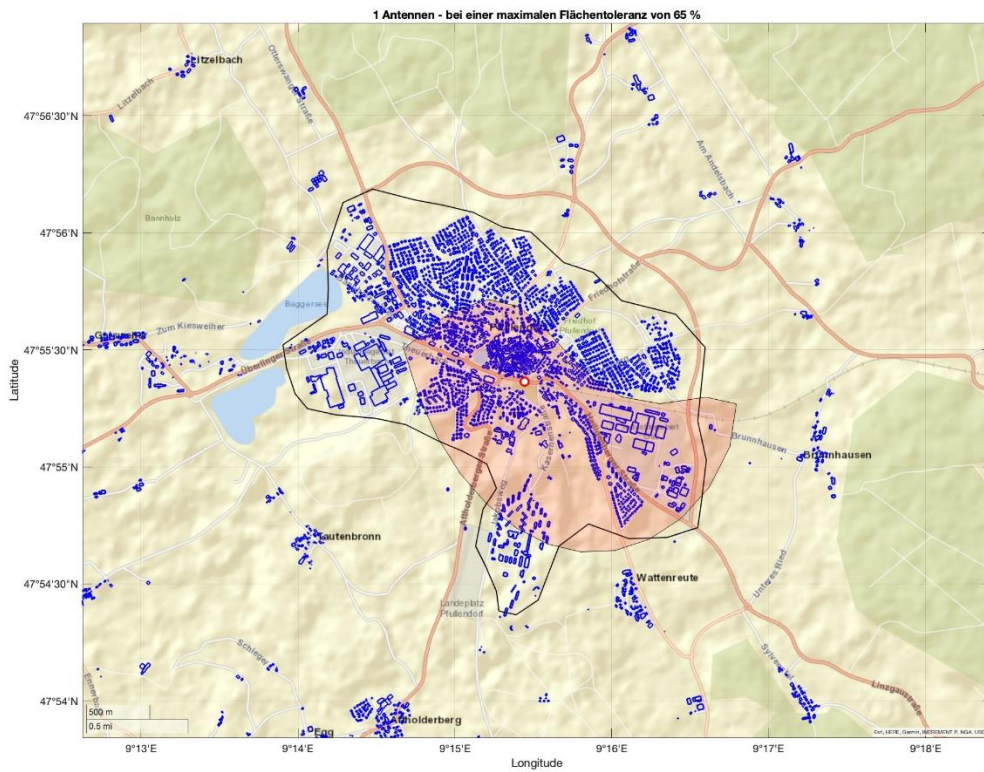


Abbildung 1: Optimale Platzierung eines 5G-Funkmastes mit 35%iger Signalabdeckung

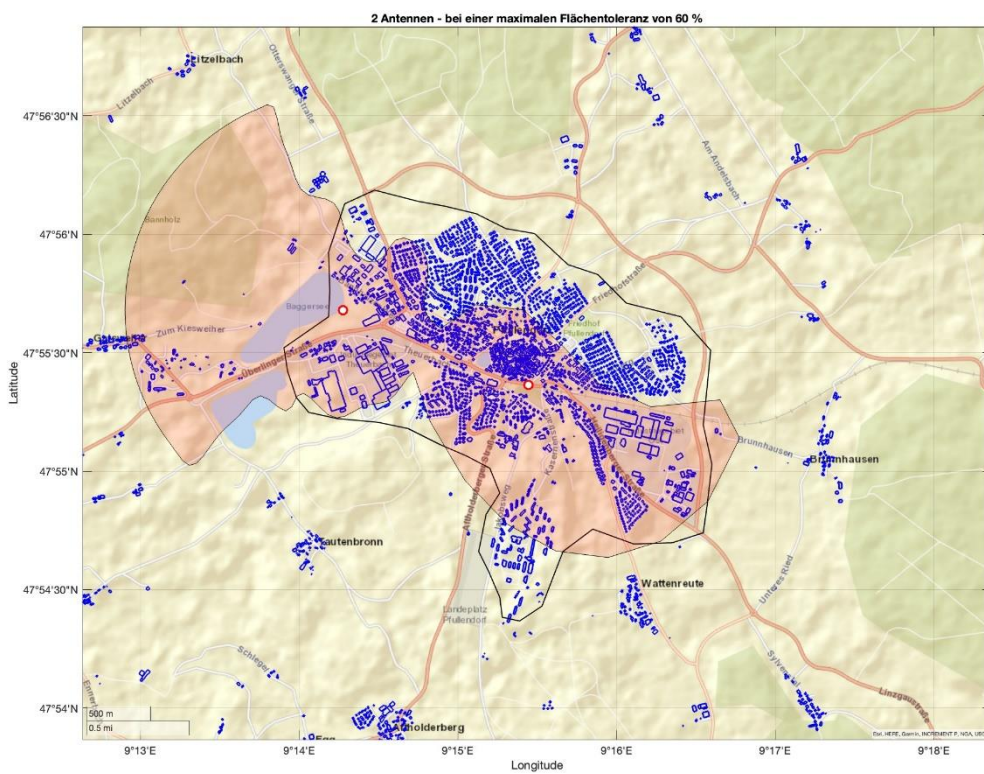


Abbildung 2: Optimale Platzierung von zwei 5G-Funkmasten mit 40%iger Signalabdeckung

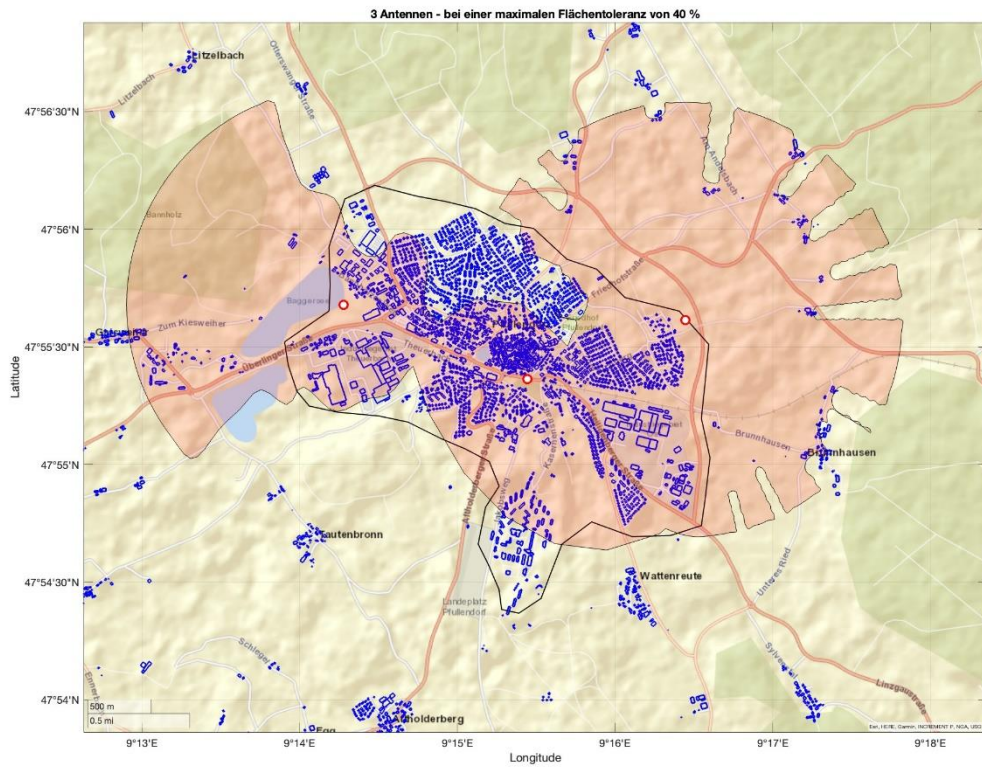


Abbildung 3: Optimale Platzierung von drei 5G-Funkmasten mit 60%iger Signalabdeckung

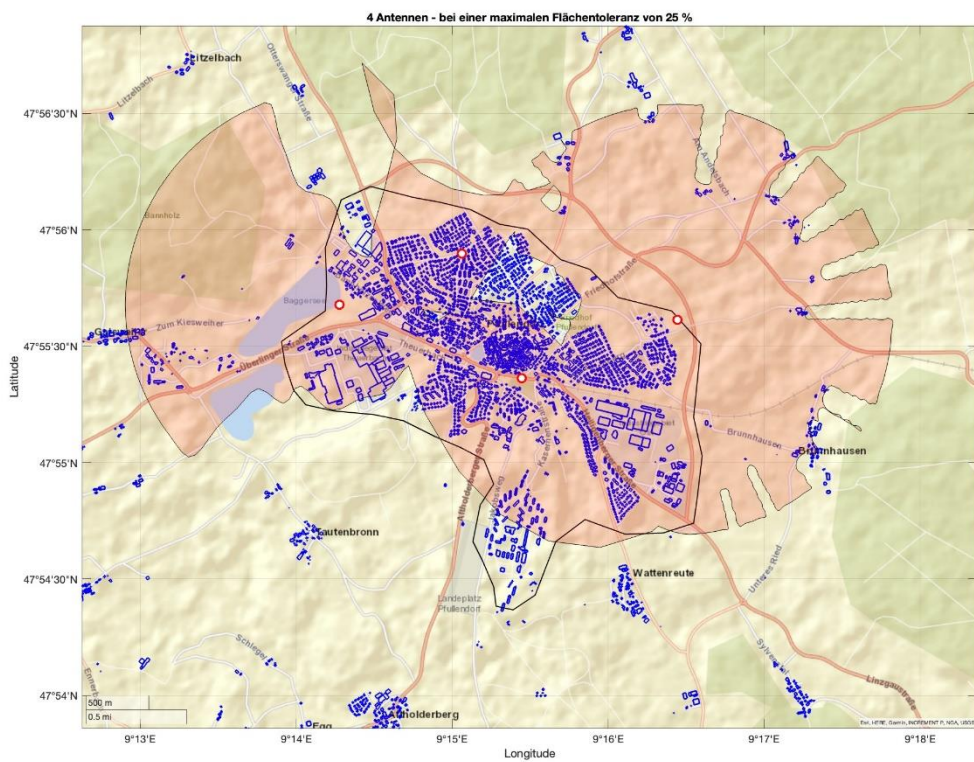


Abbildung 4: Optimale Platzierung von vier 5G-Funkmasten mit 75%iger Signalabdeckung

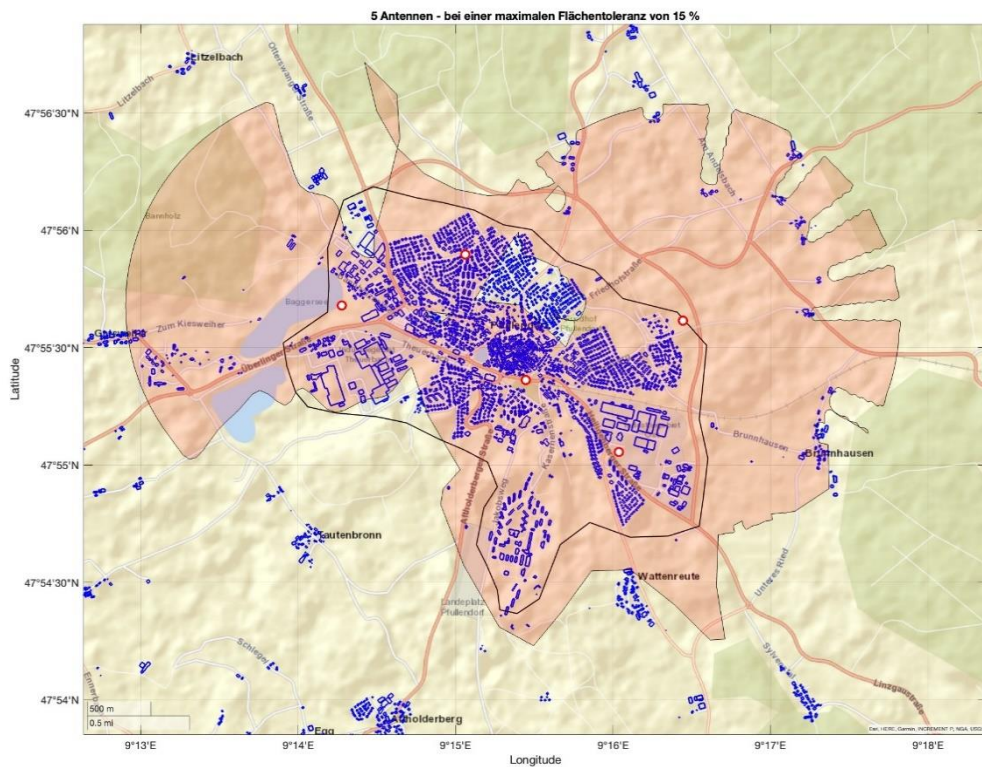


Abbildung 5: Optimale Platzierung von fünf 5G-Funkmasten mit 85%iger Signalabdeckung

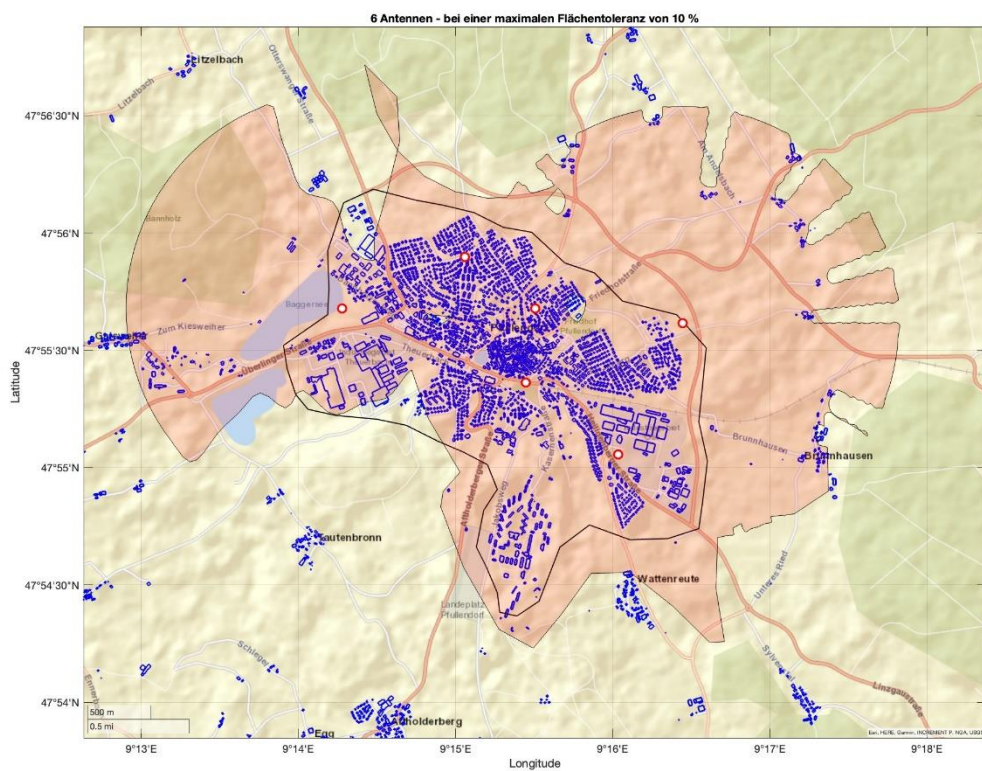


Abbildung 6: Optimale Platzierung von sechs 5G-Funkmasten mit 90%iger Signalabdeckung

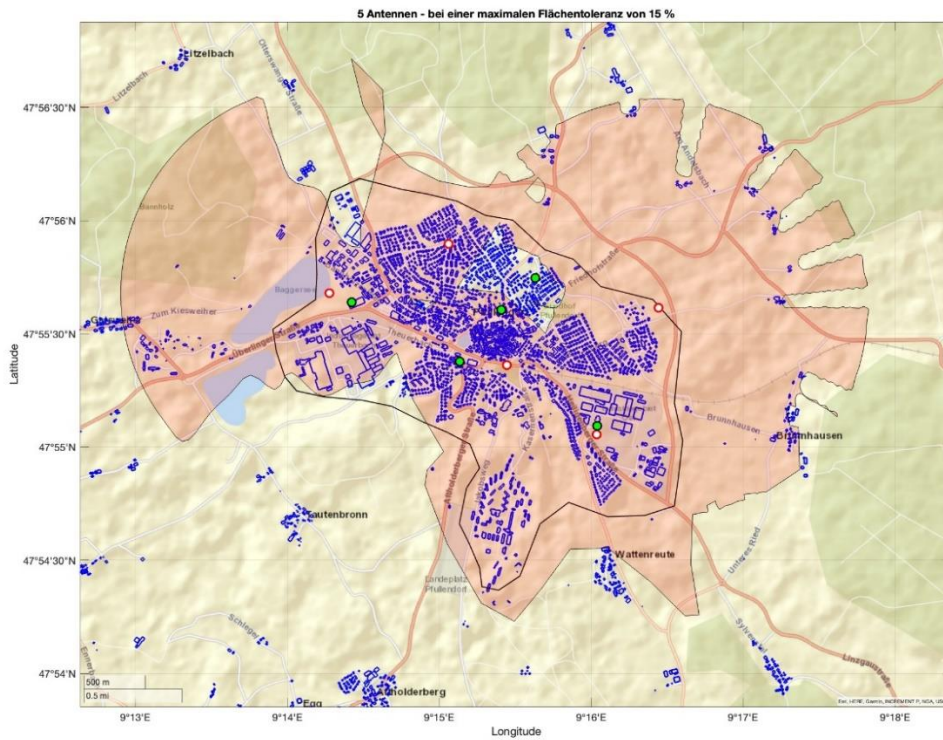


Abbildung 9: Vergleich bestehender Funkmasten (grüne Punkte) mit der optimalen Platzierung von fünf 5G-Funkmasten (rote Punkte)

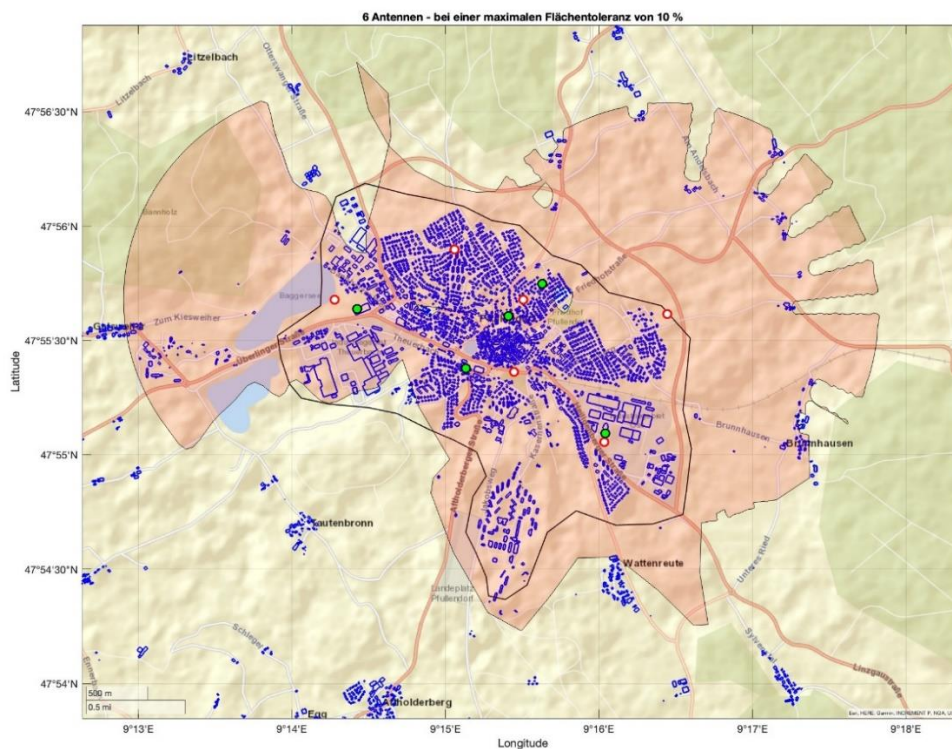


Abbildung 10: Vergleich bestehender Funkmasten (grüne Punkte) mit der optimalen Platzierung von sechs 5G-Funkmasten (rote Punkte)

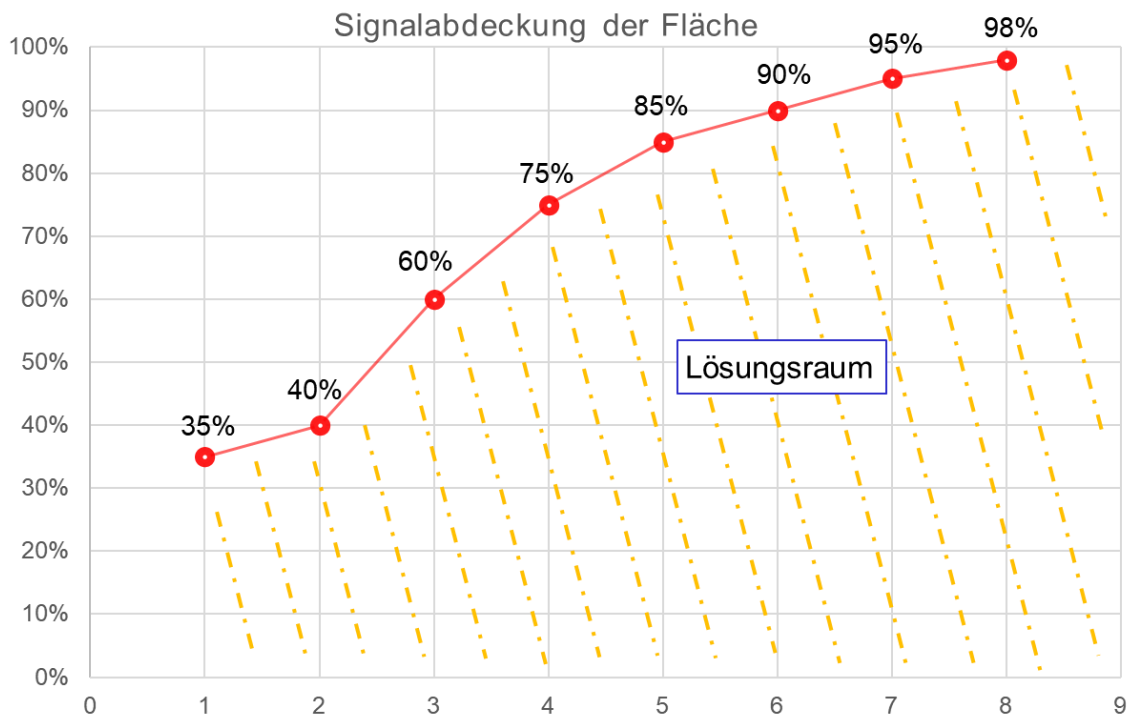


Abbildung 11: Szenariendarstellung – Minimale Signalabdeckung der Fläche in Abhängigkeit von der Anzahl an 5G-Funkmasten

In Pfullendorf sind derzeit fünf Funkmaste positioniert. Diese decken zwar einen Großteil des Gebiets ab, wobei es sich bei ihnen jedoch nicht um 5G-Funkmaste handelt, sondern 4G und 4G+. Die Mobilfunkanbieter, im Fall von Pfullendorf die Telekom, Vodafone und O₂, decken 86% des Gebiets mit LTE/4G ab und nur 4% mit 5G³. Durch die Nutzung von Tel-CON können mit einer optimalen Platzierung von 5G-Funkmasten mindestens 85% von Pfullendorf, sowie weitreichend die Umgebung um Pfullendorf von der Signalabdeckung profitieren.

Laut der Telekom selbst sei das Gebiet von Pfullendorf mit 5G teilweise ausgestattet. Aus deren Quelle⁴ geht nicht hervor, ob die vorhandenen Funkmaste für die 5G-Signalüberdeckung verantwortlich sind oder die Überdeckung durch andere Funkmaste verursacht werden.

Die Telekom hat auf deren Seite eine Karte des 5G Mobilfunknetzes von Pfullendorf publiziert. Aus der Karte geht nicht die prozentuale Signalabdeckung hervor und auch nicht die Positionierung der 5G-Funkmaste. Wir haben das Bild des 5G

³ <https://5g-verfuegbarkeit.info/baden-wuerttemberg/88630-pfullendorf/>

⁴ <https://www.telekom.de/netz/mobilfunk-netzausbau>

Mobilfunknetzes von Pfullendorf der Telekom durch unsere Algorithmen nachsimuliert und sind zu folgendem Ergebnis gekommen:

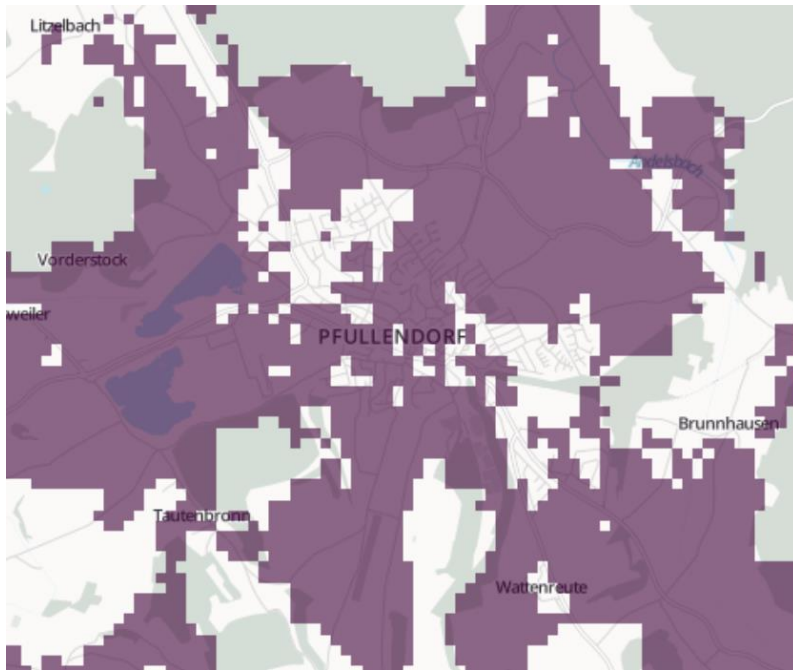


Abbildung 12: 5G Mobilfunknetz von Pfullendorf

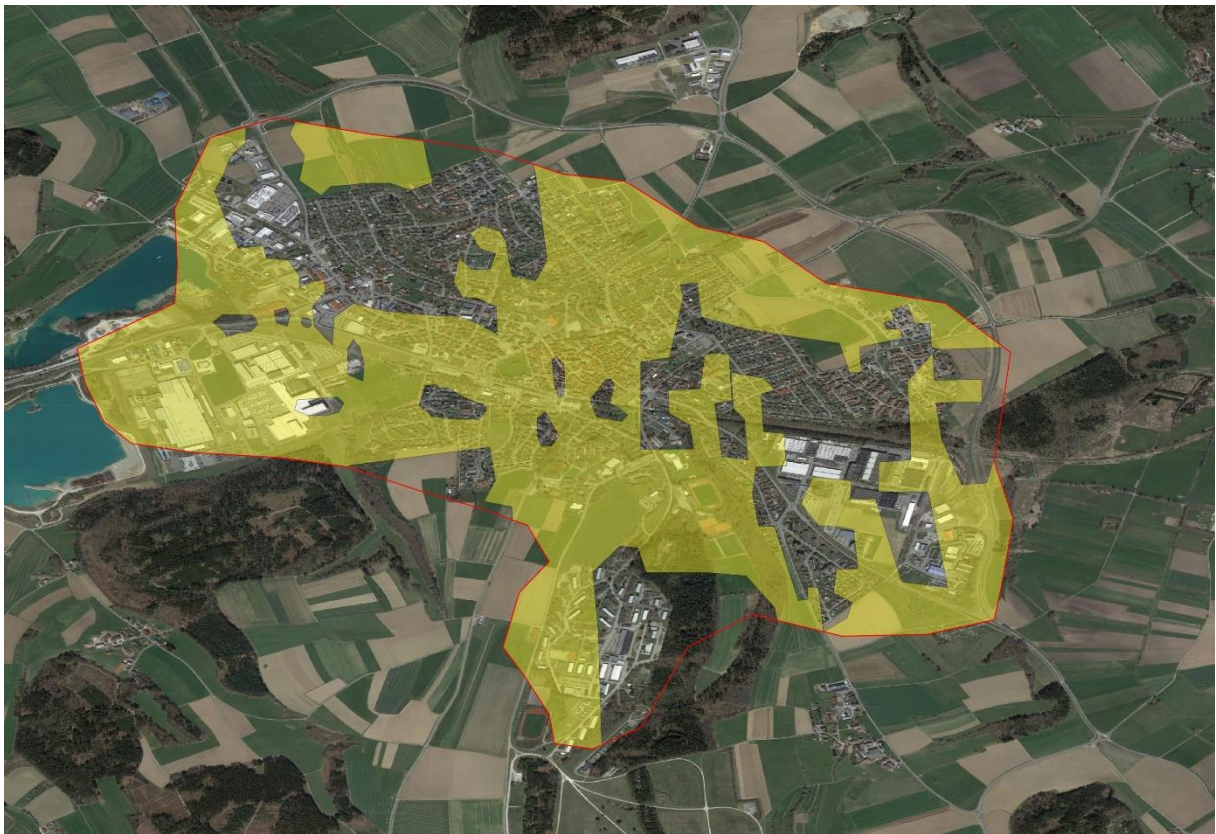


Abbildung 13: Visualisierung des 5G Mobilfunknetzes mit Tel-CON

Durch die Visualisierung der 5G Mobilfunknetzabdeckung seitens der Telekom haben wir mit den Algorithmen von Tel-CON eine Signalabdeckung von rund 64 % bestimmen können. Somit liegt die Signalabdeckung des Gebiets mit fünf Funkmasten unter den Ergebnissen, die wir mit Tel-CON erzielen konnten (85 %).

Unser Ziel der Erprobung der Algorithmen von Tel-CON anhand der Durchführung einer Machbarkeitsstudie in Pfullendorf konnten wir erfolgreich realisieren und konnten feststellen, dass nicht nur die Algorithmen funktionieren, sondern auch bessere Ergebnisse geliefert haben als ursprünglich angenommen. Neben Pfullendorf können mit der optimalen Standortplanung von 5G-Funkmasten auch die Gebiete um Pfullendorf von der Signalabdeckung profitieren, sodass die Lukrativität von Pfullendorf und des Umlands gesteigert werden und damit potenzielle Investoren anlocken kann.

Unsere generierten Ergebnisse werden dem BMDV zur Verfügung gestellt, sodass diese für etwaige Evaluationen und für die Begleitforschung verwendet werden können.

2. Zahlenmäßiger Nachweis

Eine detaillierte Aufstellung der finanziellen Mittel wurde bereits eingereicht.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeit war notwendig, um den Anforderungen an eine effiziente und präzise Standortplanung von 5G-Funkmasten gerecht zu werden. Die angewandten Methoden und Technologien waren angemessen für die gestellte Aufgabe.

4. Voraussichtlicher Nutzen

Die entwickelten Algorithmen sind verwertbar für Unternehmen, Kommunen und Forschungseinrichtungen, die an der Planung und Implementierung von 5G-Netzen beteiligt sind. Sie ermöglichen eine verbesserte Signalabdeckung und Effizienz bei der Standortplanung.

Eine Umsetzung der Ergebnisse von Tel-CON kann viele positive Wirkungen mit sich ziehen: Sobald die Signalabdeckung von Pfullendorf ausgebaut wird, wird der Standort lukrativer für Unternehmen, um in neue Märkte einzudringen. Gleichzeitig können vorhandene regionale Unternehmen, insbesondere KMUs, ihre Produktivität und ihren Umsatz steigern. Vor allem Startups und kleinere Unternehmen, die auf ein stabiles Funknetz angewiesen sind, können Hindernisse somit einfacher umgehen und in den Markt eintreten.

Hinzu kommt die schnellere Umsetzung, die aus einer digitalen Planung und Vorgehensweise resultieren. Dadurch werden neue Geschäftsmodelle in der Planung und im Betrieb der 5G erschlossen.

Die ökonomischen Vorteile kommen auch anderweitigen Unternehmen, die ihre Standorte aus Kostengründen umverlegen wollen, zugute.

Die Projektergebnisse werden voraussichtlich als Case Study für das Modul *Virtuelle Produktentwicklung* im Masterstudiengang an der HSU verwendet. Sie werden als Beispiel ausgearbeitet und als Lehr- und Anschauungsmaterial zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse sollen ebenfalls als Use-Case als Open-Source und über Research Gate veröffentlicht werden.

5. Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Anhand der Ergebnisse von Tel-CON können zwei Schlussfolgerungen abgeleitet werden: Zum einen haben die Algorithmen bewiesen, dass die getätigte Standortplanung der vorhandenen 5G-Funkmasten während der Vorplanungsphase nicht optimal verlief und zum anderen können die generierten Ergebnisse dafür genutzt werden, weitere Standorte für die Platzierung von 5G-Funkmasten zu bestimmen, um eine flächendeckende Signalausbreitung zu gewährleisten.

Mit der Durchführbarkeitsstudie und dem Vergleich des Ist- und des Soll-Zustandes können wir belegen, dass die Algorithmen von Tel-CON verglichen zu der gängigen Vorgehensweise eine bessere Planungsmethode darstellen.

In der derzeitigen Planung von 5G-Netzwerken werden fortgeschrittene Methoden wie das Ray-Tracing-Verfahren angewendet, um die Ausbreitung von Funkwellen in komplexen Umgebungen zu simulieren. Dieses Verfahren berücksichtigt Effekte wie Reflexion, Brechung und Beugung an Hindernissen, was für die Vorhersage der Netzabdeckung in urbanen Gebieten wichtig ist.

Weitere Methoden umfassen:

- **FDTD (Finite-Difference Time-Domain)**⁵, Eine numerische Analysetechnik, die verwendet wird, um die Interaktion von elektromagnetischen Feldern mit verschiedenen Materialien zu modellieren. FDTD löst die Maxwell-Gleichungen in Raum und Zeit auf und ist nützlich für die Untersuchung der Wellenausbreitung in unterschiedlich gestalteten und zusammengesetzten Medien,
- **Mehrweganalyse**⁶, die die verschiedenen Ausbreitungspfade von Wellen analysiert,
- **Empirische Modelle** wie das Okumura-Hata-Modell⁷, die für schnelle Schätzungen der Signalabdeckung über große Distanzen eingesetzt werden,
- **Optimierungsalgorithmen** wie genetische Algorithmen, die zur Optimierung der Standorte und Konfigurationen der Sendeanlagen genutzt werden, um Netzwerkziele effizient zu erreichen.

Zusätzlich ist das **Maximum Coverage Location Problem** relevant, eine Optimierungsaufgabe, die darauf abzielt, die Standorte von Sendemasten so zu wählen, dass eine maximale Abdeckung innerhalb eines gegebenen Gebiets erreicht wird. Dieses Problem ist besonders wichtig in der Netzwerkplanung, um sicherzustellen, dass die meisten oder alle Nutzer innerhalb des Gebiets effektiv versorgt werden können.

⁵ Bretones, A. & Garcia, Salvador & Olmedo, Garcia & Martín, Rafael. (2003). Finite Difference Time Domain Methods.

⁶ Zayets, A., & Steinbach, E. (2017). Robust WiFi-based indoor localization using multipath component analysis.

⁷ Adeyemo, Z. K., Ogunremi, O. K., & Ojedokun, I. A. (2016). Optimization of Okumura-Hata model for long term evolution network deployment in Lagos, Nigeria.

Für die Standortplanung von 5G-Funkmasten kommen verschiedene spezialisierte Softwarelösungen zum Einsatz, die unterschiedliche Planungsaspekte abdecken. Zentrale Tools sind GIS-Softwarelösungen wie ArcGIS oder QGIS, die umfassende Analysen und visuelle Darstellungen geografischer Daten ermöglichen. Diese Systeme unterstützen Planer bei der Ermittlung optimaler Standorte durch die Analyse von Bevölkerungsdichte, Geländemerkmale, bestehender Infrastruktur und rechtlichen Beschränkungen. Zusätzlich werden RF-Planungstools wie beispielsweise iBwave verwendet, um die Funkwellenausbreitung zu simulieren und Netzwerkabdeckung, Kapazität sowie Leistung unter verschiedenen Bedingungen zu analysieren, was für die effektive Gestaltung der Funknetzinfrastruktur unerlässlich ist. Und genau an diesem Punkt setzen wir an: um beide Ansätze - Ray-Tracing-Verfahren und Maximum Coverage Problem - zu kombinieren, haben wir Algorithmen und Optimierungsverfahren entwickelt, die das Covering-Problem mit der realistischen Ausbreitung der Signale löst. Diese Vorgehensweise wurde bisher nicht vorgenommen, da an jedem Standort die Funkanlagen durch die Signalreflexion andere Überdeckungsmuster haben (können).

Darüber hinaus belegen die Ergebnisse von Tel-CON die Fähigkeit der Algorithmen, eine optimale Standortbestimmung von 5G-Funkmasten zu berechnen. Entsprechend können die Ergebnisse dazu genutzt werden, Projekte in weitere ländliche Gebiete durchzuführen, indem die Gebiete analysiert und entsprechende Vorplanungen durchgeführt werden können.

Langfristig gesehen, soll aus den Algorithmen eine fertige Software entstehen und weitere Infrastrukturlücken decken. Somit wird in Zukunft daran gearbeitet, den Ausbau von Glasfaserleitungen zu fördern und zu optimieren, um für schnellere Breitbandverbindungen und bessere Kommunikation zu sorgen.

Die Ergebnisse werden der Öffentlichkeit bzw. den Ministerien und Unternehmen zur Verfügung gestellt.

Somit können die entwickelten Algorithmen als Grundlage für weitere Forschungsprojekte dienen.

6. Veröffentlichungen des Ergebnisses

Die Ergebnisse des Projekts werden als Open Source veröffentlicht und sind für die Allgemeinheit zugänglich. Wir unterstützen eine möglichst weite Verbreitung der Ergebnisse, streben Vernetzungen an und werden für Transparenz sorgen. Einzelheiten, die aus Gründen des Schutzes von Interessen vertraulich behandelt werden müssen, wurden entsprechend gekennzeichnet.

Abschließend lässt sich festhalten, dass das Projekt erfolgreich die gesteckten Ziele erreicht und einen signifikanten Beitrag zur Entwicklung von 5G-Netzen geleistet hat. Die entwickelten Algorithmen bieten eine innovative Lösung für die Standortplanung von 5G-Funkmasten und tragen zur Verbesserung der Telekommunikationsinfrastruktur bei.