



Neue Technologie, alles beim Alten?

Muster des 5G-Ausbaus in Deutschland

Masterthesis

Zur Erlangung des Mastergrades
„Master of Science“, abgekürzt „MSc“

im Rahmen des
Universitätslehrganges „Geographical Information Science & Systems“
(UNIGIS MSc) am Fachbereich Geoinformatik (Z_GIS),
Fakultät für Digitale und Analytische Wissenschaften,
Universität Salzburg

eingereicht von

Jan Lennard Kunst

GutachterIn:
Dr. Christop Traun

Nörvenich, Juni 2026

Eidesstattliche Erklärung

"Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen, die wörtlich oder inhaltlich den angegebenen Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Ich bestätige, dass ich keine Abbildungen aus Lehrbüchern oder anderen Quellen übernommen habe, außer diese unterliegen einer Lizenz zur freien Nutzung.

Ich bestätige zudem, dass ich Künstliche Intelligenz (KI)-basierte Anwendungen ausschließlich zu jenen Zwecken verwendet habe, die [im Leitfaden zum Umgang mit generativer KI im UNIGIS Studium](#) in der aktuellen Fassung ausdrücklich zugelassen sind. Abweichungen davon müssen explizit von dem/der Betreuer/In schriftlich genehmigt werden. Die Verantwortung für alle Inhalte dieser Arbeit liegt bei mir.

Die vorliegende Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht als Bachelor-/Master-/Diplomarbeit/Dissertation/Master Thesis eingereicht."

Jan Lennard Kunst

Abstract

5G is regarded as a key technology for emerging use cases enabled by the technological innovations of this new generation of mobile communications. In Germany, funding programs, regulatory measures and political pressure have been driving the deployment of 5G since 2020. To meet the demand arising from these new use cases, mobile network operators may adopt new deployment strategies.

This thesis investigates whether the deployment of 5G in Germany exhibits corresponding patterns or whether it continues to follow the established deployment pathways of previous generations of mobile communications. The study explores the relationship between deployment duration for different network architecture types and land-use structure, as well as population density and road network density. Based on mobile network data provided by the regulatory authority Bundesnetzagentur, aggregated deployment areas are constructed as a basis for statistical analyses. These areas are combined with information from CORINE Land Cover and OpenStreetMap, as well as population data from the European Commission. In addition to a rank correlation analysis, a generalized additive model is developed to characterize the identified relationships. Furthermore, the influence of aggregation parameters on the results is examined.

The results reveal a clear distinction between standalone and non-Standalone network architectures. The 4G-based non-standalone architecture exhibits relationships with most of the spatial features considered, whereas full 5G deployment through standalone architecture shows more diffuse patterns. Beyond the spatial predictors examined, the data suggests the existence of additional large- and small-scale spatial factors influencing the complex process of mobile network deployment. This thesis provides important insights into deployment-specific characteristics of 5G and the actual deployment strategies pursued by mobile network operators. The findings regarding similarities and differences compared with previous generations of mobile communications support decision-making in mobile communications regulation. Future research could further investigate these issues using alternative datasets or by focusing on spatial features that may contribute to deployment delays.

Zusammenfassung

5G wird als Schlüsseltechnologie für neue Anwendungsfelder gesehen, die durch technologische Innovationen dieser neuen Mobilfunkgeneration ermöglicht werden. Hierfür treiben Förderprogramme, Regulierung und politischer Druck den Ausbau in Deutschland seit 2020 voran. Um die Nachfrage dieser Anwendungsfelder zu bedienen, könnten die Mobilfunknetzbetreiber neue Ausbaustrategien verfolgen.

Diese Arbeit untersucht, ob der bisherige Ausbau von 5G in Deutschland entsprechende Muster aufweist oder die bekannten Ausbaupfade bisheriger Mobilfunkgenerationen beibehalten werden. Es werden die Zusammenhänge der Ausbaudauer je netzarchitektonischer Ausprägung mit der Landnutzungsstruktur sowie mit der Bevölkerungs- und Straßennetzdichte erkundet. Basierend auf Mobilfunkdaten der Bundesnetzagentur werden hierfür aggregierte Ausbaugebiete als Grundlage für statistische Verfahren gebildet, die mit Information von CORINE Land Cover und OpenStreetMap sowie Bevölkerungsdaten der Europäischen Kommission überlagert werden. Neben einer Rangkorrelationsanalyse wird ein generalisiertes additives Modell gebildet, um gefundene Zusammenhänge zu charakterisieren. Außerdem wird der Einfluss von Aggregationsparametern auf die Ergebnisse beleuchtet.

Die Ergebnisse zeigen eine klare Differenzierung zwischen den Netzarchitekturen Standalone und Non-Standalone. Das 4G-basierte Non-Standalone zeigt Zusammenhänge mit einem Großteil der betrachteten räumlichen Merkmale, während das vollwertige 5G mittels Standalone diffuse Strukturen aufweist. Neben den betrachteten räumlichen Prädiktoren legen die Daten die Existenz weiterer groß- und kleinräumiger Einflussfaktoren nahe, die den komplexen Mobilfunkausbau beeinflussen. Die Arbeit liefert wichtige Hinweise zu ausbaurelevanten Besonderheiten von 5G und den tatsächlich stattfindenden Ausbaustrategien der Mobilfunknetzbetreiber. Die Informationen zu den Gemeinsamkeiten und Unterschieden mit bisherigen Mobilfunkgenerationen stützen die Entscheidungsfindung in der Regulierung. Weitere diesbezügliche Forschung könnte sich dem Thema auf Grundlage anderer Daten oder mit Fokus auf potenziell verzögernd wirkende, räumliche Merkmale nähern.

Inhaltsverzeichnis

Abstract.....	I
Zusammenfassung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.3 Forschungsfrage.....	5
2 Daten und Methodik	6
2.1 Eingangsdaten	6
2.1.1 Mobilfunknetzabdeckung	6
2.1.2 Landnutzung	6
2.1.3 Straßennetz und Bevölkerung	8
2.2 Methodik	9
2.2.1 Identifikation von Ausbaugebieten	9
2.2.2 Explorative Rangkorrelationsanalyse	12
2.2.3 Generalisiertes additives Modell.....	13
3 Ergebnisse	15
3.1 Ausbaugebiete nach räumlichen Ebenen.....	15
3.2 Landnutzungsstruktur, Straßennetz- und Bevölkerungsdichte.....	21
3.3 Explorative Rangkorrelationsanalyse	25
3.4 Generalisiertes additives Modell	30
4 Diskussion.....	35
5 Fazit	38
Literaturverzeichnis	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schema der Ermittlung eines Ausbaubereiches	9
Abbildung 2: Ausbauzeitpunkte nach Gitterweite bei 50 % Versorgungsschwelle (SA)	16
Abbildung 3: Ausbauzeitpunkte nach Gitterweite bei 50 % Versorgungsschwelle (NSA)	16
Abbildung 4: 5 km-Gitterzellen nach Ausbauzeitpunkt und Versorgungsschwelle (SA)	17
Abbildung 5: 5 km-Gitterzellen nach Ausbauzeitpunkt und Versorgungsschwelle (NSA)	18
Abbildung 6: Karte der Ausbauzeitpunkte nach Gitterweite und Versorgungsschwelle (SA)	19
Abbildung 7: Karte der Ausbauzeitpunkte nach Gitterweite und Versorgungsschwelle (NSA)	20
Abbildung 8: Histogramm Anteil der Siedlungsfläche	21
Abbildung 9: Histogramm Anteil der Industrie- und Gewerbefläche	22
Abbildung 10: Histogramm Anteil der landwirtschaftlichen Fläche	22
Abbildung 11: Histogramm Anteil der Verkehrsfläche	23
Abbildung 12: Histogramm Straßennetzdichte	24
Abbildung 13: Rangkorrelationskoeffizienten (SA)	26
Abbildung 14: Rangkorrelationskoeffizienten (NSA)	28
Abbildung 15: Teilfunktionen des initialen GAM	31
Abbildung 16: Teilfunktionen des korrigierten GAM	32
Abbildung 17: Visualisierter Effekt des Raumterms	33
Abbildung 18: Residuen mit und ohne Raumterm	34

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der CLC-Klassen in Flächenkategorien.....	7
Tabelle 2: Betrachtete Gitterweiten	11
Tabelle 3: Rangkorrelationskoeffizienten bei gewählter Variante	29

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Mobilfunk ist eine zentrale Technologie für wirtschaftliches Wachstum und digitale Teilhabe. Bessere Mobilfunkversorgung und höhere Datenraten sind mit einem stärkeren Wirtschaftswachstum, erhöhter Produktivität (Bahia et al., 2019; Edquist, 2022; Edquist et al., 2018; Endres & Steula, 2024) sowie einem positivem Einfluss auf den Human Development Index (HDI) assoziiert (Bala, 2024). In Deutschland spricht die Bundesregierung beim Mobilfunk von einer „Schlüsseltechnologie der digitalen Transformation in Wirtschaft und Gesellschaft“ (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2019).

Mobilfunksysteme ermöglichen durch eine zellulare Netzstruktur eine drahtlose Sprach- und Datenübertragung für mobile Nutzer. Die Kommunikation erfolgt nicht direkt zwischen den Endgeräten, sondern durch die Übertragung mittels hochfrequenter elektromagnetischer Funkwellen an lokal zuständige Basisstationen im sogenannten Zugangsnetz (Sauter, 2022). Über welche Entfernung dies möglich ist, hängt maßgeblich von den Frequenzen ab, auf denen gefunkt wird. Niedrige Frequenzbereiche ermöglichen höhere Reichweiten, während hohe Frequenzbereiche durch größere Bandbreiten mehr Datenverkehr erlauben (Tse & Viswanath, 2005). Das Zugangsnetz ist mittels Glasfaser- oder Richtfunkanbindung an das sogenannte Kernnetz angeschlossen, in dem das Signal an die Basisstation des Empfängers geroutet wird (Sauter, 2022).

Der Mobilfunk erlebte eine rasante Entwicklung in den vergangenen rund 30 Jahren. Nach den ersten Mobilfunkgeräten markierte die zweite Mobilfunkgeneration (2G) den Umstieg auf eine digitale Technologie, die Mobilfunk in den 1990er Jahren massentauglich machte. Der Fokus lag gerade zu Beginn auf der Sprachkommunikation, doch auch erste einfache Datendienste wie SMS erhielten Einzug (Kheddar, 2022). 2G wurden v.a. unter Einsatz von flächenwirksamen Frequenzen unterhalb von 1 GHz zum weltweiten Mobilfunkstandard (Selian, 2001). Zu Beginn der 2000er Jahre brachte die Einführung der dritten Mobilfunkgeneration (3G) wesentlich höhere Datenraten, die kombiniert mit den ersten Smartphones multimedialen, mobiles Internet (Kheddar, 2022) ermöglichten. Dennoch konnte 3G die hohen Erwartungen, die sich in politischer Förderung und enormen Lizenzkosten niederschlugen, nicht von Beginn an erfüllen. Postulierte Dienste wurden kaum nachgefragt und der Netzausbau stockte (OECD, 2004). Die erreichbaren Datenraten stiegen mit der vierten Mobilfunkgeneration (4G) zu Beginn der 2010er Jahre nochmals deutlich. Eine All-IP-Architektur mit diversen technologischen Neuerungen brachte mobiles Breitbandinternet (Akyildiz et al., 2010; Khan, 2009). Der Datenkonsum stieg durch hochqualitatives Videostreaming, Social Media und datenintensive App-Dienste enorm (Cave & Webb, 2015).

Der Trend datenorientierter Mobilfunknutzung setzte sich in der jüngeren Vergangenheit fort. Das über Mobilfunk abgewinkelte Datenvolumen steigt weltweit, allerdings mit einer sinkenden jährlichen Wachstumsrate (Ericsson, 2025). In Deutschland hat sich das Gesamtdatenvolumen zwischen 2016 und 2024 mehr als verzehnfacht, während die Anzahl von SMS sowie abgehenden Gesprächsminuten stagnierte und seit 2021 rückläufig ist (Bundesnetzagentur, 2025). Gleichzeitig gewinnen weltweit Internet-of-Things-Anwendungen (IoT) an Bedeutung. Die dabei eingesetzten Machine-to-Machine-Geräte (M2M) sind die am schnellsten wachsenden Endgeräteklasse mit Breitbandzugang (Cisco Systems, Inc., 2020). Insgesamt zeigt sich eine funktionale Differenzierung zwischen privatem und gewerblichem Nachfrage- bzw. Nutzungsverhalten: Die Gesamtheit des abgewinkeltem Datenvolumens wird weiterhin durch datenintensive private Nutzer dominiert, insbesondere mittels Videostreaming (Ericsson, 2025). Das Geschäft mit gewerblichen Kunden spielt derzeit noch eine untergeordnete Rolle am Mobilfunkmarkt, wächst aber wesentlich schneller als das

Segment der Privatkunden (GSMA Intelligence, 2024). Die diesbezügliche Mobilfunknutzung charakterisiert sich anwendungsspezifisch besonders durch hochfrequente Konnektivität bei geringen Datenmengen, die eine niedrige Latenz und hohe Ausfallsicherheit erfordert (Ericsson, 2024; Finley et al., 2020).

Diesem Nachfragegefüge steht auf Angebotsseite die fünfte Generation der Mobilfunks (5G) gegenüber. Diese Technologie soll drei Anwendungsmerkmale ermöglichen (Popovski et al., 2018):

- sehr hohen Datenrate als enhanced Mobile Broadband (eMBB),
- die Unterstützung einer Vielzahl von IoT-Endgeräten als massive Machine Type Communication (mMTC) sowie
- zuverlässige, reaktionsschnelle Verbindungen als ultra-reliable and low-latency communication (URLLC)

Dabei stehen die einzelnen Eigenschaften in gegenseitiger Konkurrenz, so dass neue technologische Lösungen nötig sind, um diese nutzerspezifischen Anforderungen in einem Mobilfunknetz erfüllen zu können (Panwar et al., 2016; Popovski et al., 2018). Technologien wie die virtuelle Segmentierung des Mobilfunknetzes (Network Slicing), dynamische Ressourcenzuteilung (Scheduling) und dezentrale Datenverarbeitung am Netzwerkrand (Edge Computing) sind hierfür essentielle Beispiele, die in einer vollständigen 5G-Infrastruktur eingesetzt werden können (Popovski et al., 2018; Siddiqi et al., 2019). Eine derartige Netzarchitektur wird als 5G Standalone (SA) bezeichnet, während 5G Non-Standalone (NSA) auf einem 4G-Kernnetz aufbaut und die genannten Technologien nicht unterstützt (Liu et al., 2020).

Angesichts der innovativen Entwicklungen, die der neueste Mobilfunkstandard verspricht, sind die Erwartungen groß. So sprach die Europäische Kommission vor Abschluss der Standardisierung von einem „game changer“, der in verschiedenen Sektoren - durch Beschleunigung der industriellen Transformation und dem Ermöglichen neuer Anwendungen – zu einem Standortfaktor und einer Einkommensquelle werden sollte (European Commission, 2016). In Deutschland benennt die Bundesregierung vor Beginn des kommerziellen Rollouts sechs Anwendungsfelder, die „durch 5G ermöglicht oder zentral unterstützt werden“: Intelligente Mobilität, Industrie 4.0, Smart Farming, Intelligente Versorgungsnetze, E-Health und Medien der Zukunft (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), 2017). Hierfür wurde den Mobilfunknetzbetreibern in Deutschland 2019 u.a. Frequenzspektrum im 3,5 GHz-Bereich zugeteilt und mit Auflagen zur Errichtung von 1.000 5G-Basisstationen verknüpft - neben allgemeinen Ausbauauflagen, die auf Haushalte und Verkehrswege abzielen (Bundesnetzagentur, 2019). Gleichzeitig sollen verschiedene Förderprogramme des Bundes den Ausbau, die Nutzung und die Fortentwicklung dieser Technologie stützen (BMDV, 2024). Das millionenschwere „5G-Innovationsprogramm“ förderte bis 2024 Projekte zur praxisnahen Erprobung von Anwendungsfällen durch Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Gebietskörperschaften (5G-Umsetzungsförderung im Rahmen des 5G-Innovationsprogramms, 2020; BMDV, 2024). Hinzu kommen diverse Projekte, die Testfelder für 5G-Anwendungen ermöglichen (Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt, 2019a, 2019b; Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat, 2025) und die Sicherheit der neuesten Mobilfunktechnologie stärken (Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, 2025). Ähnliche Programme finden sich in Deutschland auch vermehrt auf Landesebene. Beispiele hierfür sind der millionenschwere Förderwettbewerb „5G.NRW“ in Nordrhein-Westfalen (Projektträger Jülich, 2024) und die Förderung von Projekten mit „wesentlichen Innovationen auf dem Gebiet 5G“ in Bayern (Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie, 2020).

1.2 Stand der Forschung

In Deutschland war der politische Wille, 5G voranzutreiben, demnach zur Einführung des neuen Mobilfunkstandards groß. Der Fokus auf Investitionen zur Förderung konkreter Anwendungsfelder belegt, wie die Erschließung neuer Geschäftsfelder, die sich abseits der klassischen Nutzungsbereiche von Mobilfunk abspielen, als Schlüsselement von 5G gesehen wird. Dieser Ansatz folgt der Empfehlung, dass zu Einführung einer Mobilfunktechnologie die Stärkung der Nachfrage mehr Erfolg verspricht, als eine Ausbauförderung (Teklemariam & Kwon, 2020). Angesichts der neuen Anwendungsbereiche, die 5G bedienen soll, und den Rahmenbedingungen für ein schnelles und zielgerichtetes Wachstum, stellt sich die Frage, ob die bisherigen Entwicklungen im 5G-Ausbau einen entsprechenden Kurs aufweisen.

Wenngleich sich die Arbeit mit 5G in Deutschland beschäftigt, lohnt zunächst ein Blick auf die globale diesbezügliche Entwicklung. Weltweit steigt die Verbreitung von 5G derzeit rapide, doch auch in wirtschaftsstarken Ländern bleibt der Ausbau von 5G-Standalone ebenso wie die gewerbliche Nachfrage trotz der theoretischen Vielzahl innovativer Anwendungsfelder hinter den Erwartungen zurück (GSMA, 2024). Bereits zu Beginn des weltweiten 5G-Rollouts wurde das Fehlen von geeigneten Geschäftsmodellen in der EU als Risiko identifiziert (Blackman & Forge, 2019). Die fortlaufenden 5G Observatory Reports der EU-Kommission belegen mit Blick auf postulierte Ziele Verzögerungen beim allgemeinen Ausbau und der Umsetzung von Modellprojekten, insbesondere im Kontext von 5G mit Standalone-Architektur und hochfrequentem Spektrum (European Court of Auditors, 2022; EY, PolicyTracker, LS telcom, 2024; VVA, Policytracker, LS, 2022, 2023).

In Deutschland hat 5G in den vergangenen sechs Jahren ein immenses Wachstum erlebt: Während im ersten Jahr des Rollouts 5G nur 139 der über 190.000 Mobilfunkbasisstationen stellte (Bundesnetzagentur, 2022), machten diese 2024 bereits ein Viertel der Gesamtzahl aus (Bundesnetzagentur, 2025). Entsprechend deutlich stieg die 5G-Netzabdeckung in der Fläche auf 93 % im Jahr 2024. Hervorzuheben ist die ebenso hohe Abdeckungsquote mit 5G Standalone (SA), das 2021 noch keine Rolle spielte (Bundesnetzagentur, 2022, 2025). 5G Non-Standalone, insbesondere mittels bedarfsgerechter Teilung des vorhandenen Frequenzspektrums (Dynamic Spectrum Sharing (DSS)), erreichte bereits zu diesem Zeitpunkt mehr als die Hälfte der Bundesrepublik Deutschland (Bundesnetzagentur, 2023).

Abgesehen von der Erfassung von Abdeckungsindikatoren, liegen Studien zur Bewertung der Leistungsfähigkeit von 5G vor, insbesondere im Vergleich mit 4G. Die Ergebnisse zeigen überwiegend mit 4G vergleichbare Leistungen, der in Abhängigkeit von der Rollout-Strategie aus dem Fokus auf Non-Standalone bei geringem Einsatz von hochfrequentem Spektrum resultiert (Fezeu et al., 2023; Lasierra et al., 2023; Rochman et al., 2023; Tsoulos, Athanasiadou, Nikitopoulos, et al., 2024; Tsoulos, Athanasiadou, Zarbouti, et al., 2024). Zu Beginn des 5G-Rollouts wurden Untersuchungen angestellt, um die 5G-Entwicklung und die darauf wirkenden Einflussfaktoren zu modellieren. In diesen Studien wurde ein prioritärer Einfluss der Präsenz von Geschäftsmöglichkeiten sowie der leistungsmäßigen Abgrenzung von 5G zu bisherigen Technologien prognostiziert (Neokosmidis et al., 2017). Die erwarteten Ausbaustrategien kombinieren einen flächendeckenden Ausbau anhand bekannter Frequenzbereiche mit einer nachgelagerten und bedarfsgesteuerten Ergänzung in Ballungsräumen (E. Oughton et al., 2018; E. J. Oughton et al., 2019). Aus Sicht der Mobilfunknetzbetreiber ist eine Ausbaustrategie, die den vorherigen Mobilfunktechnologien folgt, zumindest für 5G Non-Standalone attraktiv. Hierbei wird auf dem Kernnetz von 4G aufgebaut wird, während der Aufbau von 5G Standalone keine entsprechende Bindung aufweist (Liu et al., 2020).

Der klassischerweise beobachtete Ausbaupfad des Mobilfunks folgt zunächst den dicht besiedelten Gebieten, die durch eine Vielzahl potenzieller Kunden und geringe Ausbaukosten eine schnelle Amortisation der Investitionen ermöglichen und damit im Gegensatz zu ländlichen Räumen stehen (Chiha et al., 2020; Harahap et al., 2024; Jha & Saha, 2015). Eine Studie der britischen Regulierungsbehörde Ofcom bestätigt die Bevölkerungsdichte als zentralen Prädiktor für eine gute Mobilfunknetzabdeckung, der sich allerdings in eine Vielzahl von Nachfrage- und Kosten-Faktoren einreicht (Ofcom, 2019). Eine aktuelle spanische Studie sieht die Besiedlungsstruktur insbesondere in ländlichen Regionen als nicht ausreichenden Indikator für die Mobilfunknachfrage und fordert ein diesbezügliches Umdenken in der Netzwerkplanung und Regulierung (Herrero-Zamorano et al., 2026). Einen weiteren wichtigen Einflussfaktor bilden Versorgungsaufgaben, die das Versorgungsniveau durch Verpflichtung der Mobilfunknetzbetreiber zu bestimmten Ausbauzielen anheben (Sörries et al., 2020). In diesem Diskussionsbeitrag konnte hingegen kein signifikanter Zusammenhang zwischen Bevölkerungsdichte und Mobilfunknetzabdeckung auf nationaler Ebene festgestellt werden.

1.3 Forschungsfrage

Diese Arbeit untersucht die raum-zeitlichen Ausbaumuster der aktuellen Mobilfunkgeneration 5G in Deutschland. Ziel ist es, mögliche Abweichungen von den klassischen Mustern des Mobilfunkausbaus anhand von Landnutzungsstruktur, Bevölkerungs- und Straßennetzdichte zu identifizieren. Der Fokus wird auf die Erschließung neuer Nachfrageszenarien gelegt, die durch Regulierungsentscheidungen und Förderprogramme vorangetrieben wurden. Damit soll ein Beitrag zur Beantwortung der Frage geleistet werden, ob der Ausbau von 5G-Netzen von der Nachfrage gelenkt wird, die durch 5G-basierte Anwendungsfälle abseits klassischer Mobilfunknutzung entstehen. Hierbei werden die technologischen Ausprägungen Standalone und Non-Standalone getrennt betrachtet. Eine Non-Standalone-Architektur beruht auf 4G und kann deshalb mit „enhanced Mobile Broadband“ nur ein 5G-Merkmal leisten. Da dieses im Wesentlichen nur die von 3G und 4G bekannte Datenübertragungsfähigkeit verbessert und 5G Non-Standalone auf ein 4G-Kernnetz angewiesen ist, besteht wenig Grund zur Abweichung von bisherigen Mustern. 5G mittels Standalone-Architektur hat hingegen die Möglichkeit, alle drei Anwendungsmerkmale der fünften Mobilfunkgeneration zu erfüllen und damit neue Anwendungsfälle zu bedienen. Entsprechend ist denkbar, dass der diesbezügliche Ausbau den Flächenmerkmalen folgt, die mit diesen Anwendungen assoziiert sind. Hierzu werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Forschungshypothesen untersucht:

Der 5G-Mobilfunkausbau in Deutschland von 2021 bis 2025 korreliert mit der Struktur der Landnutzung sowie mit der Straßennetz- und Bevölkerungsdichte.

Bei 5G NSA geht ein hoher Anteil städtisch geprägter Flächen und eine Bevölkerungsdichte mit einer kurzen Ausbaudauer einher.

Bei 5G SA geht ein hoher Anteil von Industrie-, Gewerbe-, Verkehrs- und Landwirtschaftsflächen sowie eine hohe Straßennetzdichte mit einer kurzen Ausbaudauer einher.

Die Überprüfung dieser Thesen erfolgt anhand folgender operativer Teilschritte:

1. Identifikation von quartalsweisen Ausbaugebieten aus der 5G-Netzabdeckung je NSA und SA zwischen Oktober 2021 und Juli 2025
2. Bestimmung der Landnutzungsstruktur sowie Straßennetz- und Bevölkerungsdichte als erklärende Variablen der ermittelten Gebiete
3. Explorative Rangkorrelationsanalyse von Ausbaudauer und Landnutzung bzw. Straßennetz- und Bevölkerungsdichte
4. Generalisiertes additives Modell (GAM) ausgewählten erklärender Variablen

2 Daten und Methodik

2.1 Eingangsdaten

2.1.1 Mobilfunknetzabdeckung

Als Grundlage der Mobilfunknetzabdeckung werden kostenfrei verfügbare Daten der Bundesnetzagentur verwendet. Es handelt sich um Daten, die in dieser Form seit 2020 im Mobilfunk-Monitoring, einer interaktiven Kartenanwendungen zur Verbraucherinformation, veröffentlicht werden. Seit Oktober 2021 beinhalten die Veröffentlichungen Informationen zu 5G. Die Daten zur Mobilfunknetzabdeckung beruhen auf den Netzplanungstools der Mobilfunknetzbetreiber, welche anhand von Parametervorgaben möglichst vergleichbar kalibriert wurden. Die Realitätsnähe wird anhand von Messungen durch Verbraucher und den internen Prüf- und Messdienst fortlaufend überprüft (Bundesnetzagentur, 2026).

Die Mobilfunknetzabdeckung wird technologiespezifisch und flächendeckend für die Bundesrepublik Deutschland anhand eines geographischen Gitters mit einer Gitterweite von 100 Metern dargestellt und quartalsweise aktualisiert. Eine vereinfachte Version der aktuell dargestellten Daten, die keine netzbetreiberspezifischen Angaben enthält, wird zum Download angeboten. Nicht alle historischen Datenstände sind in diesem Format auf der Webseite verfügbar. Für diese Arbeit werden 5G-Daten von Oktober 2021 bis Juli 2025 verwendet, die auf Anfrage von der Bundesnetzagentur im benötigten Format bereitgestellt wurden. Da alle in diesem Zeitraum verfügbaren Datenstände berücksichtigt werden, liegen für 16 quartalsweise abgestufte Zeitpunkte Netzabdeckungsdaten vor. Zum jeweiligen Zeitpunkt ist gitterzellenscharf angegeben, wie viele Mobilfunknetzbetreiber eine Mobilfunkversorgung der fünften Generation mittels Standalone und Non-Standalone anbieten.

2.1.2 Landnutzung

Die verwendeten Landnutzungsdaten werden im Rahmen der Analysen als Proxy für spezifische Typen der Mobilfunknachfrage, insbesondere differenziert nach 5G-Anwendungsmerkmalen, genutzt. Mit einem Datensatz kann ein breites Spektrum dieser Typen durch verschiedene Nutzungskategorien abgebildet werden. Als Grundlage der Landnutzung werden die *CORINE Land Cover 2018*-Daten (CLC) im Vektorformat aus dem *Copernicus Land Monitoring Service* verwendet. Es handelt sich Landnutzungskategorien, die auf Basis von Satellitendaten alle 6 Jahre in dieser Form veröffentlicht werden (European Commission, 2020). Die Daten sind für die Bundesrepublik Deutschland flächendeckend verfügbar. Die Landnutzung ist in 44 Landnutzungskategorien gegliedert, die Flächen mit einer Mindestgröße von 25 ha und linienhafte Objekte von einer Mindestbreite von 100 m erfassen (European Environment Agency, 2021).

Im Rahmen dieser Arbeit werden die CLC-Klassen in Flächenkategorien zusammengefasst, die jeweils ein typisches Anwendungsfeld für Mobilfunk räumlich abbilden. Die Übersetzung von in den ursprünglichen Daten enthaltenen Codes in die im weiteren Verlauf verwendeten Flächenkategorien ist in Tabelle 1 festgehalten.

Tabelle 1: Zusammenfassung der CLC-Klassen in Flächenkategorien

CLC_Code	Label	Flächenkategorie
111	Continuous urban fabric	Siedlungsfläche
112	Discontinuous urban fabric	
141	Green urban areas	
142	Sport and leisure facilities	
122	Road and rail networks and associated land	Verkehrsfläche
123	Port areas	
124	Airports	
121	Industrial or commercial units	Industrie-/Gewerbefläche
131	Mineral extraction sites	
132	Dump sites	
133	Construction sites	
211	Non-irrigated arable land	Landwirtschaftliche Fläche
212	Permanently irrigated land	
213	Rice fields	
221	Vineyards	
222	Fruit trees and berry plantations	
223	Olive groves	
231	Pastures	
241	Annual crops associated with permanent crops	
242	Complex cultivation patterns	
243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	
244	Agro-forestry areas	

2.1.3 Straßennetz und Bevölkerung

In Ergänzung werden Daten zu Straßen und Bevölkerung herangezogen. Diese Merkmale sind nicht nur ein gängiges Ziel von Versorgungsaufgaben, sondern werden in der skizzierten Literatur auch als Prädiktor für einen schnellen Mobilfunkausbau gesehen.

In dieser Arbeit werden ausschließlich überörtliche Straßen betrachtet. Zur Abbildung von überörtlichen Straßen wird *Open Street Map* (OSM) als Quelle genutzt. Diese frei verfügbaren Daten werden gemeinschaftlich erstellt und fortlaufend aktualisiert. Im Kontext der Straßen stellt OSM eine vollständige Alternative zu proprietären Quellen dar, insbesondere bei Beschränkung auf überörtliche Strecken (Neis et al., 2011). Die verwendeten Daten entstammen dem Auszug für Deutschland vom 30.11.2025, welcher über *Geofabrik downloads* bezogen wurde (Geofabrik, 2025),

Es werden die Map Features genutzt, die den Autobahnen, Bundesstraßen, Landesstraßen und Kreisstraßen entsprechen. Dies umfasst die Features mit folgenden Tags sowie die dazugehörigen Verbindungsstrecken („links“) (OpenStreetMap Wiki contributors, 2025):

- Motorway
- Primary
- Secondary
- Tertiary
- Trunk

Zur optimierten Verarbeitung werden die Geometrien an gemeinsamen Verbindungspunkten zusammengefasst, um die Anzahl der zu betrachtende Objekte deutlich zu reduzieren.

Zur Abbildung der Bevölkerung werden Daten aus dem *Joint Research Centre* der Europäischen Kommission verwendet. Diese Rasterdaten mit einer Auflösung von 100 m enthalten Bevölkerungszahlen von 2021, u.a. flächendeckend für die Bundesrepublik Deutschland. Die Angaben wurden abgeleitet aus dem 1 km-Raster des Zensus 2021, unter Einbindung von Gebäudegrundrissen und -höhen sowie Angaben zur Landnutzung (Pigaiani et al., 2025).

2.2 Methodik

2.2.1 Identifikation von Ausbaubereichen

Aus den einzelnen Datenständen der Mobilfunknetzabdeckung wird der Ausbaufortschritt je Quartal abgeleitet. Dabei werden die technologischen Ausprägungen NSA und SA separat betrachtet. Eine Gitterzelle wird als abgedeckt betrachtet, wenn diese mindestens durch einen Mobilfunknetzbetreiber mit der entsprechenden technologischen Ausprägung versorgt ist. Der Ausbaufortschritt wird daraufhin in einem größeren Gitter aggregiert, für dessen Zellen jeweils Ausbaupunkte ermittelt werden. Diese bilden die statistischen Einheiten für spätere Analysen, die mit den Daten zu Landnutzung, Straßen und Bevölkerung angereichert werden.

Im ersten Schritt werden zusammenhängende Flächen der Mobilfunkversorgung mit der jeweiligen technologischen Ausprägung gebildet, um den Datenumfang erheblich zu reduzieren. Dies geschieht iterativ für jeden einzelnen Ausbaustand durch Auflösen der Randlinien aneinander angrenzender, versorgter Gitterzellen („Dissolve“). Das daraus entstehende Zwischenprodukt wird mit dem vorherigen Ausbaustand verschmolzen und als Ausbaustand zum betrachteten Zeitpunkt exportiert. In diesem Zug wird die räumliche Differenz dieses und des letzten Ausbaustandes als Ausbaubereich gebildet („Clip“). Das Vorgehen ist schematisch in Abbildung 1 abgebildet.

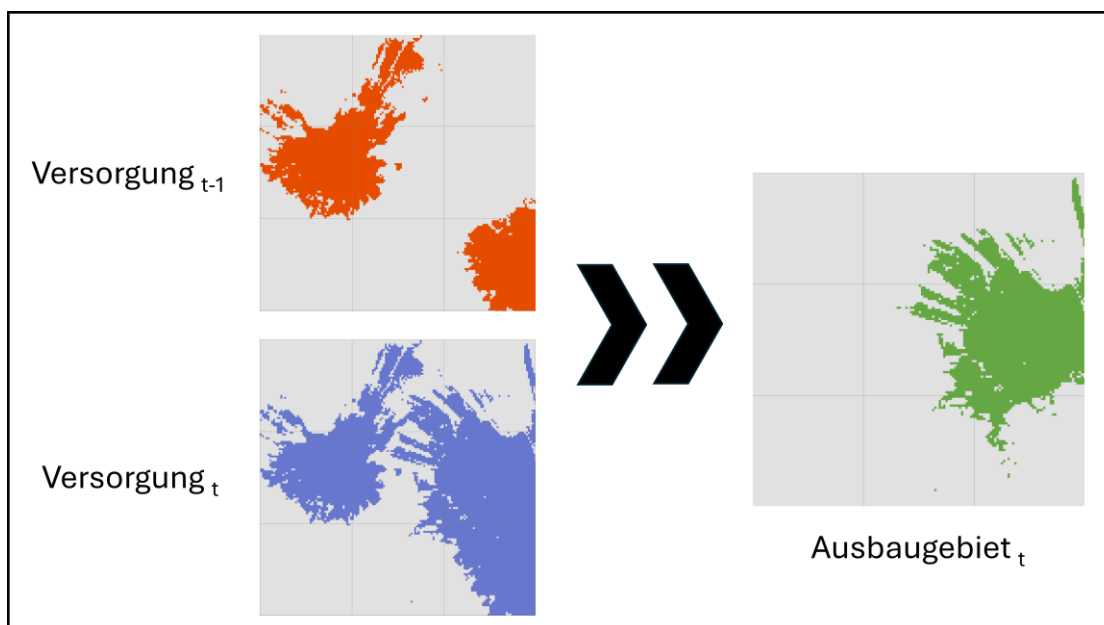


Abbildung 1: Schema der Ermittlung eines Ausbaubereiches

Die erhaltenen Ausbaubereiche sollten in der ursprünglich geplanten Methodik als statistische Einheit dienen, da sie organisch den zusammenhängenden Ausbau durch einen bzw. mehrere Standorte abbilden. Allerdings werden bei den genutzten Daten im beobachteten Zeitraum Ausbaubereiche mit einer enormen Größenspanne erzeugt. Mit Blick auf die Überlagerung mit den Bevölkerungs- und Straßendaten ergibt sich hieraus eine aus dem Kontext des Modifiable Area Unit Problem (MAUP) bekannte Herausforderung: Die Größe und Form einer Aggregationseinheit beeinflusst die Ergebnisse statistischer Analysen hinsichtlich der aggregierten Variablen (Arbia, 1989; Openshaw, 1984). Die drastische variierende Größe der einzelnen Ausbaubereiche bedeutet eine Vielzahl unterschiedlicher Aggregationseinheiten innerhalb derselben Grundgesamtheit. Die zu ermittelnde

Dichte von Bevölkerung und Streckenlänge würde allein durch die Größe des jeweiligen Gebietes variieren und könnte damit nachfolgende Analysen verzerren.

Gleichzeitig gibt es nur begrenzte Möglichkeiten, die Größe der Ausbaugebiete zu vereinheitlichen und der Effekt dieser Problematik lässt sich nicht quantifizieren. Die kleinsten Gebiete ließen sich durch Anwendung einer Mindestgröße herausfiltern, ohne die Ausbaufäche wesentlich zu verändern. Weiterhin bestünden aber die wenigen großen Ausbaugebiete, die den Großteil des Ausbaus einiger Datenstände auf sich vereinen und keine formgegebenen Zerlegungsmöglichkeiten aufweisen.

Ein weiteres fragliches Kriterium bildet das Zusammenfassen von naheliegenden Gebieten in Gruppen. Die zugrundeliegenden Mobilfunkdaten erlauben zersplitterte Versorgungsflächen, die von einem Standorte ausgehen und in der Logik der Ausbaugebiete gruppiert betrachtet werden sollten. Die Standortzuordnung ist aber nicht Bestand der bereitgestellten Informationen, weshalb ein Clusterverfahren sowie dessen Parameter festgelegt werden müssten. Schließlich zeigten sich in den ersten explorativen Analyseschritten instabile Ergebnisse, sobald Stichproben aus den ermittelten Ausbaugebieten gezogen wurden. Infolgedessen wird die direkte Verwendung der Ausbaugebiete als statistische Einheit verworfen.

Stattdessen wird das gewonnene Zwischenprodukt der Ausbaugebiete auf ein gröberes Gitter aggregiert. Dabei wird durch Überlagerung für jede Gitterzelle ermittelt, welchen Flächenanteil die Ausbaugebiete jedes individuellen Datenstandes stellen. Analog zu den eingangs erzeugten Ausbaugebieten wird für jede Gitterzelle ein Ausbaupunkt ermittelt, was eine binäre Versorgungsaussage je Gitterzelle voraussetzt. Hierfür werden die Zellen des Aggregationsgitters mit den Ausbaugebieten überlagert, so dass im Aggregationsgitter die Ausbaufäche je Datenstand ermittelt wird. Darauf aufbauend wird für jede Gitterzelle überprüft, zu welchem Datenstand die Summe der Flächenanteile eine Versorgungsschwelle übersteigt. Da die Versorgungsschwelle ein variables Kriterium darstellt, das potenziell das Ergebnis der nachfolgenden Analysen beeinflussen könnte, werden hierfür verschiedenen Werte betrachtet. Es werden Varianten für Versorgungsschwellen von 25 bis 100 % berücksichtigt, welche in 5 %-Schritten abgestuft sind.

Die Wahl der Versorgungsschwelle beeinflusst nicht nur die Gesamtzahl der betrachteten statistischen Einheiten, sondern auch die Verteilung dieser auf die Ausbaupunkte. Dies könnte außerdem Wechselwirkungen mit der Gitterweite des Aggregationsrasters aufweisen. Hieraus ergibt sich erneut ein MAUP, da die Größe der Gitterweite festzulegen ist. Im Gegensatz zum ursprünglichen Ansatz kann in diesem Fall allerdings der Effekt der unterschiedlichen Gitterweiten im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse quantifiziert und darauf reagiert werden. Außerdem wird durch eine feste Gitterweite die Herausforderung unterschiedlicher Bezugsgrößen bei Berechnung der Straßennetz- und Bevölkerungsdichte eliminiert.

Aus den verwendeten Daten lässt sich ein Rahmen der geeigneten Gitterweiten ableiten. Die minimale Gitterweite ergibt sich aus der Auflösung der Mobilfunkdaten (100 m) und den gewählten Versorgungsschwellen. Um alle betrachteten Versorgungsschwellen exakt mit ganzzahligen Gitterweiten abzubilden ist eine Gitterweite von 1 km nötig, mit 100 Gitterzellen der Ausgangsdaten einer Aggregationszelle zugeordnet werden. Zu Kontrollzwecken wird darüber hinaus noch 500 m als Gitterweite betrachtet, welche eine Vielzahl der betrachteten Versorgungsschwellen exakt abbildet. Die maximale Gitterweite lässt sich auf Basis der Ausbreitungseigenschaften der verwendeten Mobilfunkfrequenzen ermitteln. In den Analysen soll ein einzelner neu aufgebauter Standort, der optimal innerhalb einer zuvor unversorgten Gitterzelle platziert ist, ausreichen, um allein die Versorgung dieser Gitterzelle über die Versorgungsschwelle zu heben. In Deutschland werden im Mobilfunk Frequenzen aus den Bereichen von 700 MHz bis 3,6 GHz genutzt (Bundesnetzagentur,

2021). Die Frequenzen sind technologieneutral zugeteilt, so dass grundsätzlich alle Frequenzbereiche für 5G verwendet werden können (Bundesnetzagentur, 2015, 2019). Die geringste theoretische Reichweite im niedrigen einstelligen Kilometerbereich weisen 3,6 GHz-Standorte auf (Schumacher et al., 2019). Hiermit sind marginal die geringsten betrachteten Versorgungsschwellen bei einer Gitterzelle mit 5 km Gitterweite zu erreichen. Analog zur minimalen Gitterweite wird eine Gitterweite von 10 km zu Kontrollzwecken betrachtet. Entsprechend der beschriebenen Vorüberlegungen werden im weiteren Verlauf die in Tabelle 2 festgehaltenen Gitterweiten betrachtet.

Tabelle 2: Betrachtete Gitterweiten

Gitterweite	Anzahl Gitterzellen
500 m	1.531.311
1 km	384.166
2 km	96.665
5 km	15.744
10 km	4.045

Die Datengrundlage hierfür bilden die Geographischen Gitter für Deutschland in UTM-Projektion (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2021). Eine Ausnahme bildet die Gitterweite von 2 km, welche aus dem 1 km-Gitter durch Verschmelzen von jeweils 4 Gitterzellen zu einer Einigen erzeugt wird. Die Gitterzellen werden anschließend mit den Daten der Landnutzung, den Strecken der überörtlichen Straßen sowie dem Bevölkerungsraster überlagert.

Für die Landnutzung wird je zusammengefasster Flächenkategorie die Fläche innerhalb jeder Gitterzelle bestimmt und daraus der Flächenanteil berechnet. Bei unvollständigen Gitterzellen am Rande des Betrachtungsgebietes wird hierfür die tatsächliche Fläche zugrunde gelegt. Die Polygone werden an Gitterzellengrenzen getrennt, so dass die exakte überlagernde Fläche bestimmt wird.

Analog wird die Dichte der überörtlichen Straßen je Gitterzelle bestimmt. Es wird zunächst die Strecke innerhalb jeder Gitterzelle bestimmt, bevor diese in Relation zu der tatsächlichen Gitterzellfläche gesetzt wird. Die Liniengeometrien der Straßen werden an Gitterzellengrenzen getrennt, sollten diese nicht vollständig innerhalb einer Gitterzelle liegen.

Abschließend wird die Einwohnerzahl je Gitterzelle berechnet. Die vorliegenden Rasterdaten wurden hierfür innerhalb der Gitterzellen zusammengefasst. Da alle Gitterweiten der Aggregationsraster ein ganzzahliges Vielfaches der Rasterauflösung bilden, sind nach der Reprojektion keine Maßnahmen zur Behandlung von Werten auf Zellgrenzen nötig.

2.2.2 Explorative Rangkorrelationsanalyse

Zur Prüfung, ob ein Zusammenhang zwischen dem Ausbaupunkt und der Landnutzung bzw. Einwohner- sowie Verkehrsdichte vorliegt, wird zunächst eine Rangkorrelationsanalyse durchgeführt. Hieraus wird auch der Fokus der im weiteren Verlauf durchgeführten Analysen ermittelt. Im Rahmen des explorativen ersten Schrittes werden Kendall's τ_b und Spearman's ρ berechnet. Beide Maße dienen der Überprüfung nichtparametrischer Rangkorrelation, ohne die Voraussetzung normalverteilter Daten zu fordern. Da diese Koeffizienten durch ihre unterschiedlichen Ansätze zwar ähnliche, aber je nach zugrundeliegenden Variablen nicht gleiche Ergebnisse liefern (Puth et al., 2015), werden beide berechnet und fortlaufend verglichen. Kendall's τ_b ist gegenüber Kendall's τ und insbesondere Spearman's ρ explizit für Daten mit gebunden Rängen entwickelt, was in Form der 16 möglichen Ausbaupunkte bei Tausenden von betrachteten Gitterzellen in dieser Arbeit gegeben ist. Spearmans's ρ wird v.a. als Referenzwert genutzt, der etwa das 1,5-fache von Kendall's τ_b annehmen sollte, falls die Wahl des Koeffizienten keinen gravierenden Einfluss auf die Ergebnisse ausübt (Fredricks & Nelsen, 2007).

Die aufsteigend indizierte Ausbaudauer der Gitterzellen für NSA und SA bilden jeweils die abhängigen Variablen. Als unabhängige Variablen werden

- der Anteil städtischer Flächen,
- der Anteil von Industrie- und Gewerbeflächen,
- der Anteil der landwirtschaftlichen Flächen,
- die Straßennetzdichte,
- und die Bevölkerungsdichte

betrachtet. Für die Rangkorrelationsanalyse werden alle Variablen in aufsteigender Reihenfolge indiziert. Die beschriebenen Maße werden für alle Kombinationen von Gitterweite und Versorgungsschwellen berechnet. Aufgrund der zwischen diesen Varianten stark schwankenden Anzahl der statistischen Einheiten, werden die einzelnen Ergebnisse gegenübergestellt. Im Zuge dessen wird der Einfluss der beiden variablen Kriterien geprüft und eine geeignete Kombination für die weiteren Schritte gewählt.

Zur Realisierung des skizzierten Vorgehens wird das Modul *Statistical Functions* der Python-Bibliothek *SciPy* genutzt.

2.2.3 Generalisiertes additives Modell

Zur weiteren Charakterisierung des Zusammenhangs von Ausbaudauer und erklärenden Variablen wird ein generalisiertes additives Modell gebildet. Das allgemeine Modell lässt sich wie folgt beschreiben:

$$g(E(Y)) = \beta_0 + \sum_{j=1}^p f_j(X_j)$$

Dabei gilt:

Y : Ausbaudauer (Zielvariable)

$E(Y)$: Erwartungswert der Ausbaudauer

$g(\cdot)$: Link-Funktion

β_0 : Achsenabschnitt (Intercept)

X_j : Prädiktorvariable j

$f_j(\cdot)$: glatte Funktion des jeweiligen Prädiktors

p : Anzahl der im Modell berücksichtigten Variablen

Die betrachtete Zielvariable Ausbaudauer kann ausschließlich positive Werte annehmen. Aus den einleitend beschriebenen Fortschrittsberichten und initialen Datensichtungen ist eine rechtschiefe Verteilung anzunehmen. Zudem ist bei Infrastruktur-bezogenen Betrachtungen von Heteroskedastizität mit stärkerer Streuung bei langer Ausbaudauer auszugehen. Basierend auf diesen Eigenschaften und Annahmen der zugrundeliegenden Daten wird eine Gamma-Verteilung mit Log-Link-Funktion zur Modellierung des Erwartungswertes der Zielvariable gewählt. Im Modell werden nur die Prädiktorvariablen berücksichtigt, die eine signifikante Rangkorrelation mit der Ausbaudauer aufweisen. Alle Prädiktorvariablen werden zur Eingabe in das Modell mittels z-Transformation standardisiert. Es wird nur die Kombination von Gitterweite und Versorgungsschwelle modelliert, die anhand der vorangehenden Ergebnisse als geeignet identifiziert wurde. Die Funktionen der Prädiktorvariablen werden als penalisierte Regressions-Splines gebildet, die aus einer begrenzten Anzahl von Basisfunktionen aufgebaut sind. Die Zusammenstellung der Splines erfolgt automatisch anhand der Daten unter Berücksichtigung eines Glättungsparameters λ , der die Bestrafung der Krümmung bzw. Rauheit der verwendeten Basisfunktionen steuert. Das initiale Modell wird mit maximal 20 Basisfunktion je Funktion der Prädiktorvariablen und $\lambda = 0,6$ gebildet. Dies entspricht den Standardparametern der verwendeten Python-Bibliothek *pyGAM*. In Abhängigkeit der Ergebnisse dieses initialen Modells wird eine selektive Anpassung dieser Modellparameter vorgenommen.

Abschließend wird eine Modellerweiterung mit einer räumlichen Komponente vorgenommen. Mittels Tensor-Produkt-Splines werden komplexe räumliche Einflüsse modelliert, die sich nicht in den betrachteten Prädiktorvariablen äußern. Dafür wird eine Oberfläche aus Rechts- und Hochwert der Gitterzellen gebildet, welche zuvor mittels z-Transformation standardisiert wurden. Die Glättung der Oberfläche erfolgt mit $\lambda = 4$. Der Effekt des hinzugefügten Raumterms wird neben der Betrachtung der Gütemaße durch eine Analyse der Residuen evaluiert. Hierbei wird anhand von Moran's I die globale räumliche Autokorrelation der Residuen überprüft. Dies wird mit einer festen Anzahl von 8

Nachbarzellen realisiert, was für den Großteil der Gitterzellen der Moore-Nachbarschaft entspricht. Auf eine Standardisierung der Gewichtung kann aufgrund der zugrundeliegenden Daten und dem Nachbarschaftskonzept verzichtet werden.

3 Ergebnisse

3.1 Ausbauggebiete nach räumlichen Ebenen

Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit war die Bestimmung einer geeigneten Aggregationsebene für die nachfolgenden Analysen. Diese wird anhand der in Kapitel 2.2.1 skizzierten Variablen Gitterweite und Versorgungsschwelle gebildet. Im Folgenden wird ausgehend von mittleren Annahmen für diese, der Einfluss der Variablen bei Verschiebung in minimale und maximale Wertebereiche beleuchtet. Als erster Einblick wird die Verteilung der bestimmten Ausbaupunkte der Ausbauggebiete bei einer Gitterweite von 2 km und einer Versorgungsschwelle von 50 % betrachtet. In diesem Szenario werden für NSA und SA ca. 90 % der vorhandenen Gitterzellen zu einem beliebigen Zeitpunkt als ausgebaut betrachtet, mit geringfügig höheren Werten bei NSA. Allgemein ist bei NSA früher ein höherer Ausbaustand erreicht als bei SA. Der Großteil des NSA-Ausbaus läuft bis Anfang 2023 ab, während bei SA der Ausbau im Jahr 2023 dominiert. Mehr als die Hälfte des Ausbaufortschritts von SA entfällt auf Januar und Oktober 2023. Eine untergeordnete Rolle spielt hier der Fortschritt ab dem Jahr 2024, der weniger als ein Zehntel des Gesamtausbaus ausmacht. Zu Beginn des Betrachtungszeitraums liegt nahezu keine Netzabdeckung vor. Für NSA sind dagegen etwa die Hälfte der Gitterzellen dem frühestmöglichen Ausbaupunkt untergeordnet. Die darauffolgenden Zeitpunkte bis Ende 2023 liefern jeweils ähnliche Fortschritte. Der Ausbau ab 2024 macht in diesem Fall nur etwa 5 % des Gesamtfortschritts aus.

Dieses grundlegende Gefüge bleibt auch bei der Betrachtung der übrigen Gittergrößen bei gleichbleibender Versorgungsschwelle erhalten. Der Anteil der Ausbaupunkte nach Gitterweite für SA ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Bedeutung des Ausbaus vor Oktober 2022 nimmt bei höheren Gitterweiten ab, während der Ausbau danach an Bedeutung gewinnt. Der Ausbaupunkt Oktober 2022 variiert dagegen kaum. Der ohnehin geringe Ausbaustand zu Beginn des Betrachtungszeitraums verschwindet bei großen Gitterweiten fast vollständig. Der Anteil der Ausbaupunkte nach Gitterweite für NSA ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Tendenz zum Bedeutungsgewinn des späten Ausbaus bei höheren Gitterweiten ist auch bei NSA zu beobachten. Das Gewicht des ersten Ausbaupunktes verringert sich bei hohen Gitterweiten deutlich, während alle anderen Ausbaupunkte Zuwächse verzeichnen. Die Anteile der Ausbaupunkte ab Ende 2024 verändert sich hingegen kaum mit der Gitterweite.

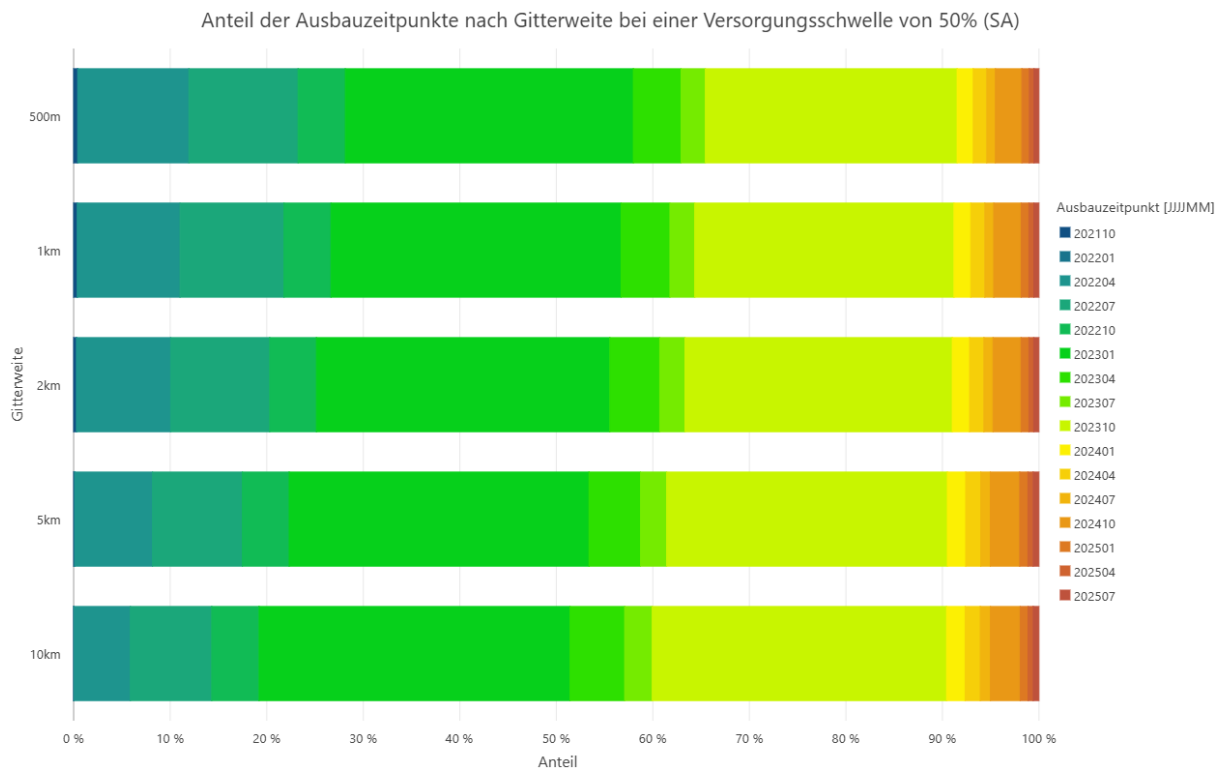


Abbildung 2: Ausbaupunkte nach Gitterweite bei 50 % Versorgungsschwelle (SA)

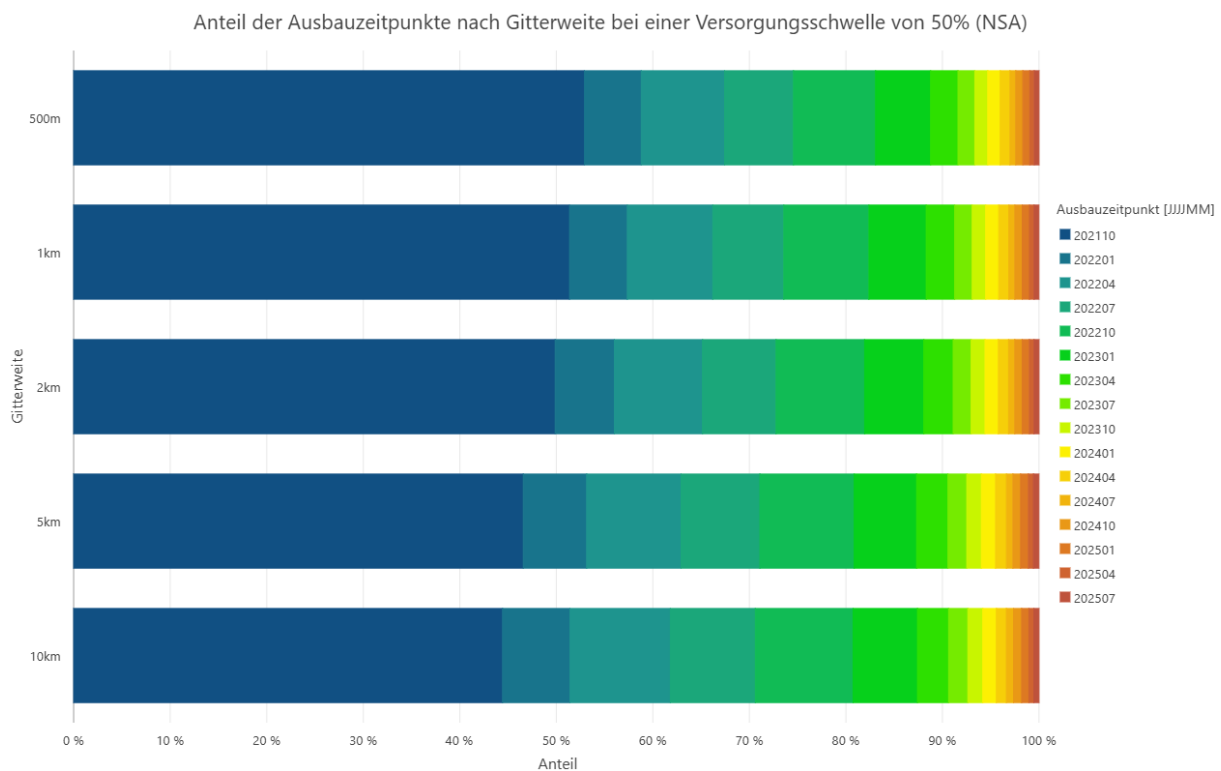


Abbildung 3: Ausbaupunkte nach Gitterweite bei 50 % Versorgungsschwelle (NSA)

Als weitere Variable in der Festlegung der Aggregationseinheiten wird die Versorgungsschwelle betrachtet. Mit höheren Versorgungsschwellen reduziert sich die Anzahl der Gitterzellen, die als ausgebaut betrachtet werden. Die Abnahme der Gesamtzahl gestaltet sich für SA und NSA ähnlich. Die Anzahl der als ausgebaut betrachteten Gitterzellen mit einer Gitterweite von 5 km reduziert sich zwischen Versorgungsschwellen von 25 bis 50 % nur geringfügig. Danach steigert sich die Reduktionsrate deutlich, weshalb bei einer Versorgungsschwelle von 90 % nur noch etwa drei Viertel der bei 25 % als ausgebaut betrachteten Gitterzellen verbleiben. Ein regelrechter Sprung ist bei der Umstellung auf eine Versorgungsschwelle von 100 % zu beobachten, mit der nur etwa ein Zehntel aller Gitterzellen verbleibt. Mit der Reduktion der Gesamtzahl der Gitterzellen geht auch eine Verschiebung der Anteile der Ausbaupunkte einher. Grundsätzlich gewinnen bei höheren Versorgungsschwellen spätere Ausbaupunkte an Bedeutung. Im Fall von SA bleiben die Ausbaupunkte Januar und Oktober 2023 über das fast gesamte Spektrum dominierend, tauschen aber ihr Verhältnis von einem 2 zu 1-Verhältnis von Januar zu Oktober bei niedrigsten Versorgungsschwellen zu einem 1 zu 2,5-Verhältnis bei höchsten Versorgungsschwellen. Bei NSA ist der Bedeutungsverlust des ersten Ausbaupunktes, der bei niedrigen und mittleren Versorgungsschwellen klar dominiert, im Bereich hoher Versorgungsschwellen hervorzuheben. Die Anzahl der Gitterzellen nach Ausbaupunkt und Versorgungsschwelle sind beispielhaft anhand der Gitterweite von 5 km für SA in Abbildung 4 und für NSA in Abbildung 5 dargestellt.

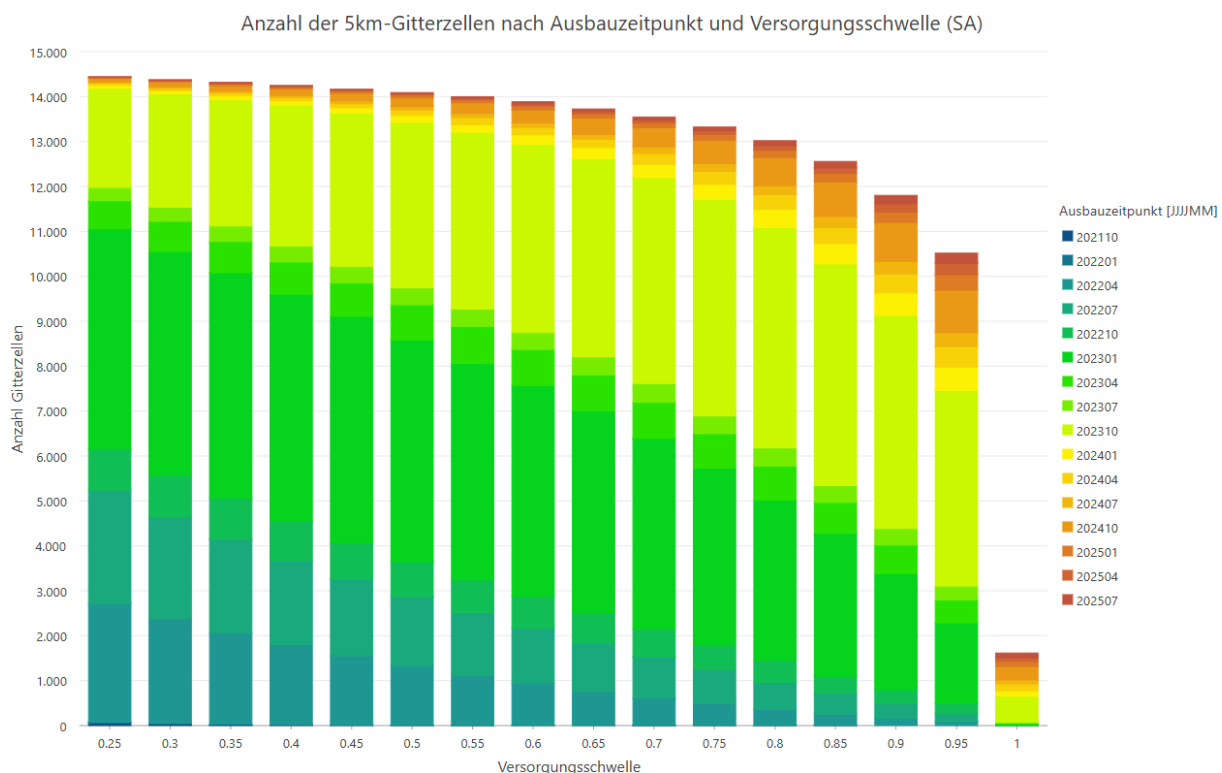


Abbildung 4: 5 km-Gitterzellen nach Ausbaupunkt und Versorgungsschwelle (SA)

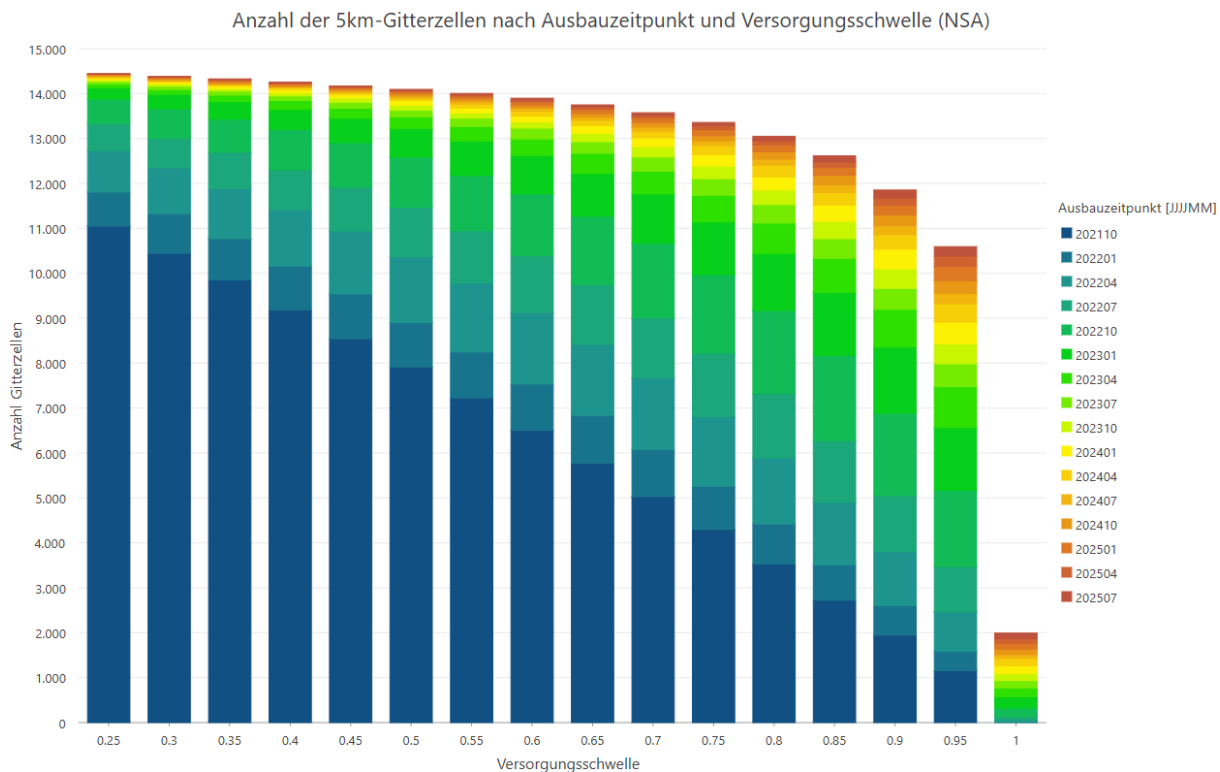


Abbildung 5: 5 km-Gitterzellen nach Ausbaupunkt und Versorgungsschwelle (NSA)

Bei der Verknüpfung von verschiedenen Gitterweiten und Versorgungsschwellen bestätigt sich das Bild der einzelnen Betrachtungen. Die Gesamtzahl der Gitterzellen reduziert sich bei größeren Gitterweiten anteilig stärker, mit Ausnahme der maximalen Gitterweite von 10 km. Sowohl die Vergrößerung der Gitterweite als auch die Erhöhung der Versorgungsschwelle bewirken eine Verschiebung zu späteren Ausbaupunkten, wobei letztere einen stärkeren Effekt im betrachteten Bereich aufweist. Die Veränderungen folgen dem gleichen Schema für NSA und SA, allerdings mit einer geringeren Reduktion des ersten Ausbaupunkts bei SA als bei NSA. Die Gesamtzahl der Gitterzellen und die Verteilung der Ausbaupunkte ist im mittleren Bereich der Versorgungsschwellen, insbesondere von 40 bis 60 %, in Kombination mit Gitterweiten im einstelligen Kilometerbereich stabil. An den Extremen der betrachteten Bereiche von Versorgungsschwelle und Gitterweite wird die Gesamtzahl der Gitterzellen und die Verteilung der Ausbaupunkte zunehmend volatil, v.a. bei Versorgungsschwellen über 90 % und einer Gitterweite von 10 km. Abgesehen davon, sind keine Kombinationseffekte zwischen Gitterweite und Versorgungsschwelle, unabhängig von der betrachteten Technologie, zu beobachten.

Weitere Erkenntnisse über die Implikationen modifizierter Aggregationseinheiten liefert die kartographische Aufbereitung. Eine Gegenüberstellung von Karten ausgewählter Versorgungsschwellen-Gitterweite-Kombinationen ist für SA in Abbildung 6 gegeben, für NSA in Abbildung 7. Große Gitterweiten zeigen eine klarere Differenzierung zwischen früh und spät ausgebauten Gebieten. Niedrige Gitterweiten erhalten hingegen den fragmentierten Charakter des Ausbaus, der insbesondere bei SA zu beobachten ist. Im Nordosten wird dadurch bei gleichzeitiger Wahl einer niedrigen Versorgungsschwelle ein punktueller SA-Ausbau sichtbar, der bei den meisten Kombinationsmöglichkeiten der Aggregationsvariablen verschwindet. Für Gitterweiten im Kilometerbereich bewirken die nicht in den Karten abgebildeten, sehr niedrigen Versorgungsschwellen eine Homogenisierung der Ausbaupunkte, besonders für NSA. Mit Blick auf die Variationen der Versorgungsschwelle lässt sich der SA-Ausbau als isoliert beschreiben, während NSA stärker zoniert mit Kernbereichen in Ballungsgebieten ausgeprägt ist. In der

Kombination von niedrigen Gitterweiten mit hohen Versorgungsschwellen wird bei NSA darüber hinaus eine linienhafte Ausprägung früher Ausbaupunkte deutlich. Die Reduktion der berücksichtigten Gitterzellen bei hohen Versorgungsschwellen ist regionalspezifisch ausgeprägt und betrifft v.a. den Südwesten und das Zentrum Deutschlands. Zwischen NSA und SA sind auf dieser Betrachtungsebene kaum Unterschiede auszumachen. Kombiniert man hohe Versorgungsschwellen mit Gitterweiten ab 5 km, fallen zudem zahlreiche Gitterzellen an der südlichen Landesgrenze aus der Betrachtung.

Ausbaupunkte bei Versorgungsschwellen von 50 und 90% nach
ausgewählten Gitterweiten (SA)

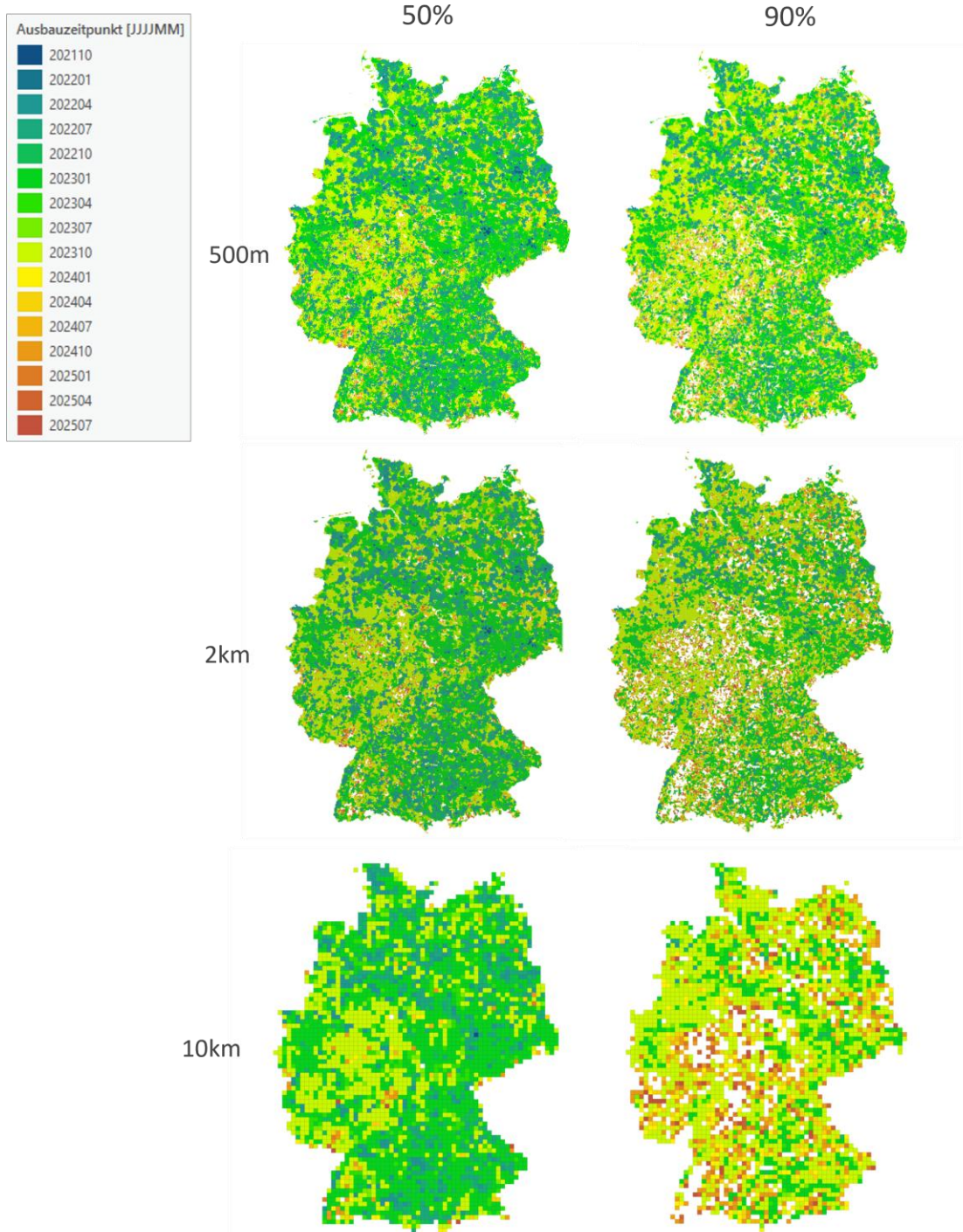


Abbildung 6: Karte der Ausbaupunkte nach Gitterweite und Versorgungsschwelle (SA)

Ausbauzeitpunkte bei Versorgungsschwellen von 50 und 90% nach
ausgewählten Gitterweiten (NSA)

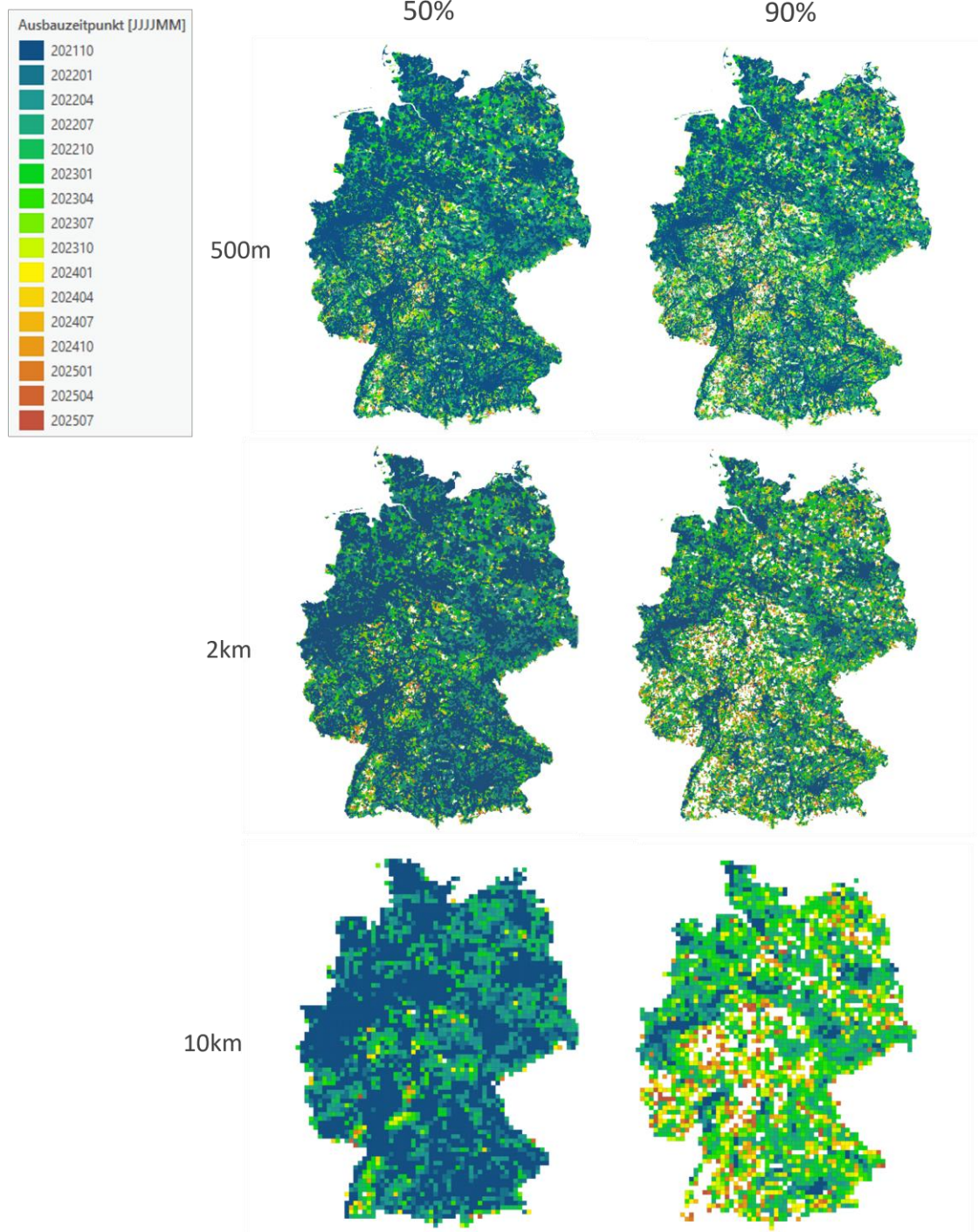


Abbildung 7: Karte der Ausbauzeitpunkte nach Gitterweite und Versorgungsschwelle (NSA)

3.2 Landnutzungsstruktur, Straßennetz- und Bevölkerungsdichte

Zur Übersicht der Landnutzungsdaten, mit denen die Gitterzellen angereichert werden, erfolgt zunächst eine Beschreibung anhand der mittleren Gitterweite von 2 km. Für drei der vier betrachteten Kategorien wurde einem großen Teil der Gitterzellen keine entsprechende Fläche zugeordnet. Für die zwei Kategorien Siedlungsfläche sowie Industrie- und Gewerbefläche enthalten mehr als die Hälfte der betrachteten 2 km-Gitterzellen keine entsprechenden Flächen. Die Ausnahme bilden die landwirtschaftlichen Flächen, welche in über 80 % der Gitterzellen enthalten sind. Die Anteile dieser Landnutzungskategorie sind leicht linksschief verteilt, mit fast vollständigem Flächenanteil bei mehr als einem Zehntel der Gitterzellen. Die Anteile der übrigen Landnutzungskategorien sind dagegen klar rechtsschief verteilt, mit einer extremen Konzentration niedrigster Flächenanteile bei den Verkehrsflächen. Die Verteilung der Anteil der einzelnen Landnutzungskategorien ist in den Abbildungen 8 bis 11 zusammengefasst. Bei Reduktion der Gitterweite nimmt die Konzentration auf Extremwerte zu, die für Siedlungs-, Industrie- und Gewerbe- sowie Verkehrsflächen mit sehr hohen Werten für Schiefe und Kurtosis einhergehen. Bei Gitterweiten von 500 m steigt der Anteil der Gitterzellen, die keine diesbezügliche Landnutzung aufweisen, auf 81 bis 99 % je nach Kategorie. Die Steigerung der Gitterweite bewirkt hingegen das häufigere Auftreten mittlerer Flächenanteile, wobei die Schiefe der letztgenannten Nutzungskategorien erhalten bleibt. Die Ausnahme bilden die landwirtschaftlichen Flächen, deren Anteil bei 10 km-Gitterzellen annähernd normalverteilt ausfällt.

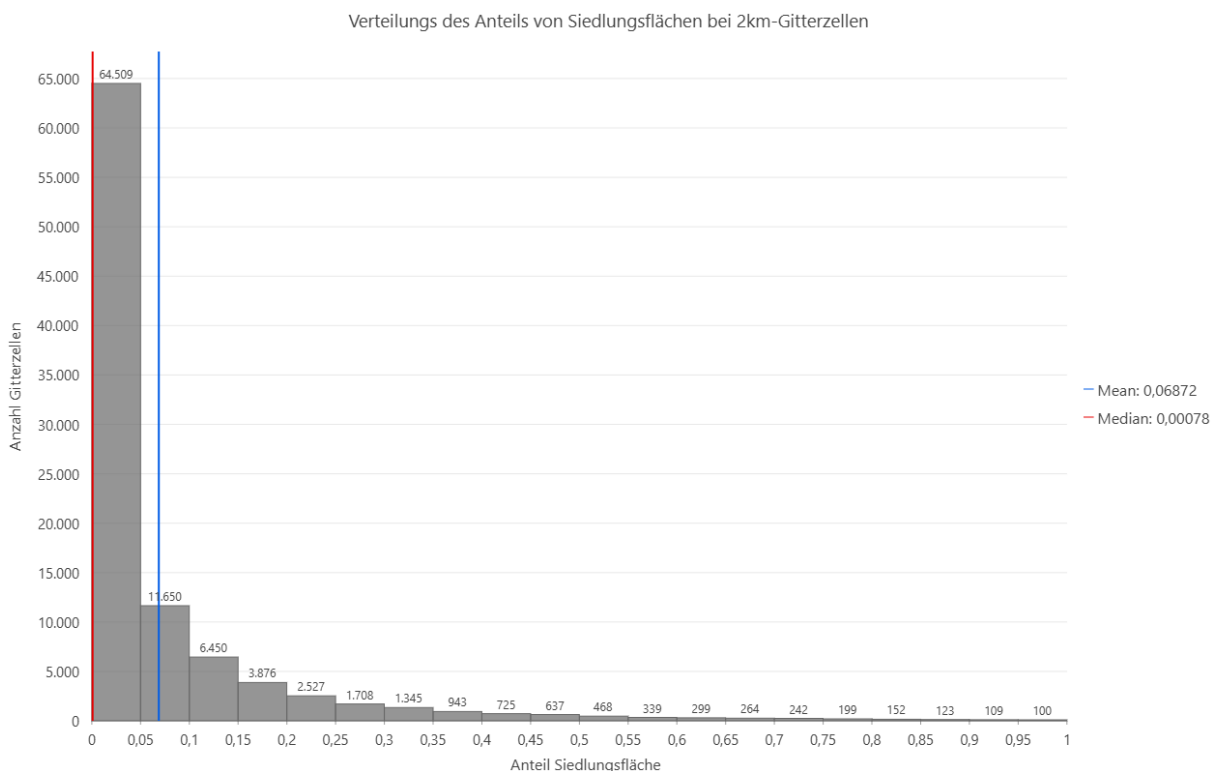


Abbildung 8: Histogramm Anteil der Siedlungsfläche

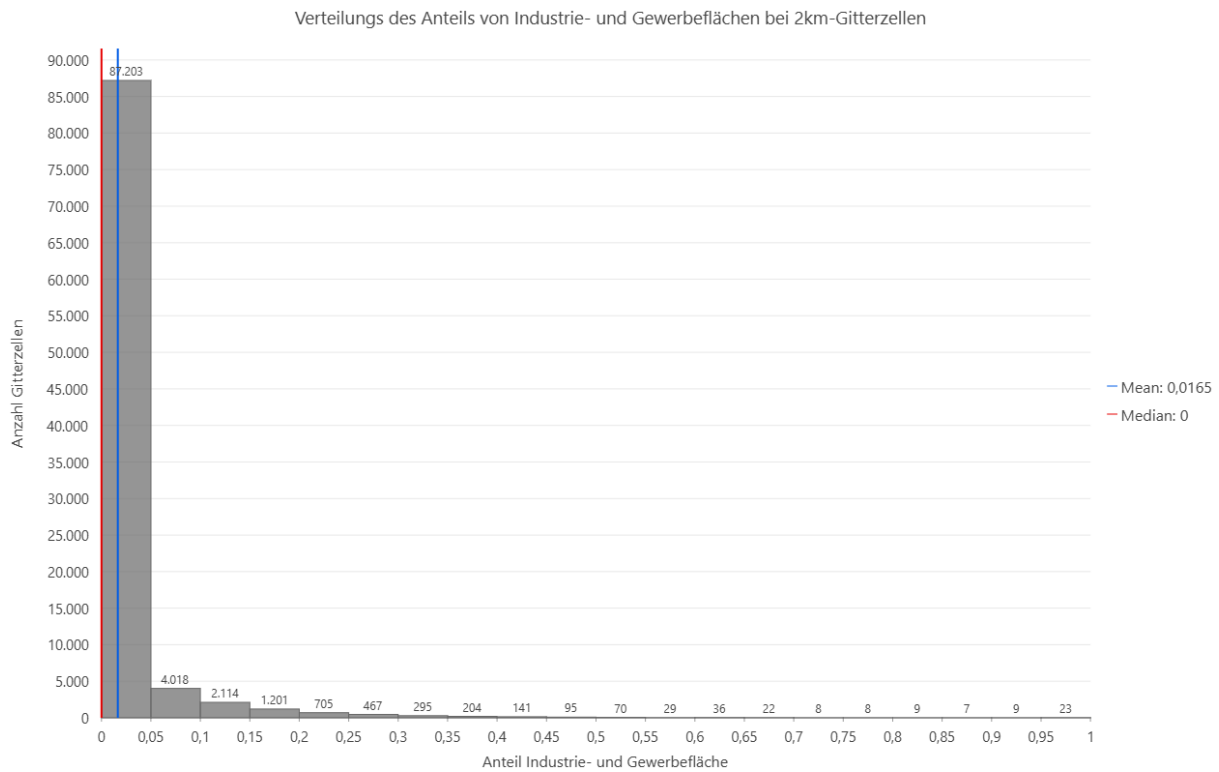


Abbildung 9: Histogramm Anteil der Industrie- und Gewerbefläche

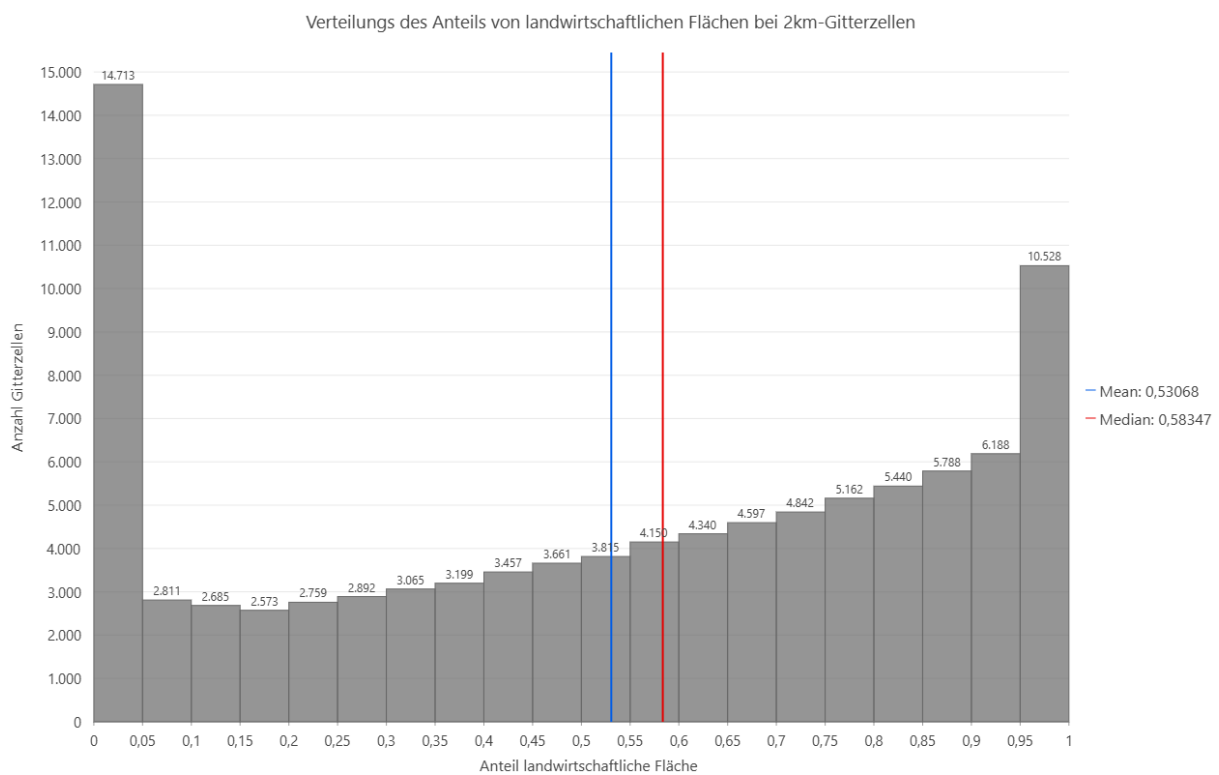


Abbildung 10: Histogramm Anteil der landwirtschaftlichen Fläche

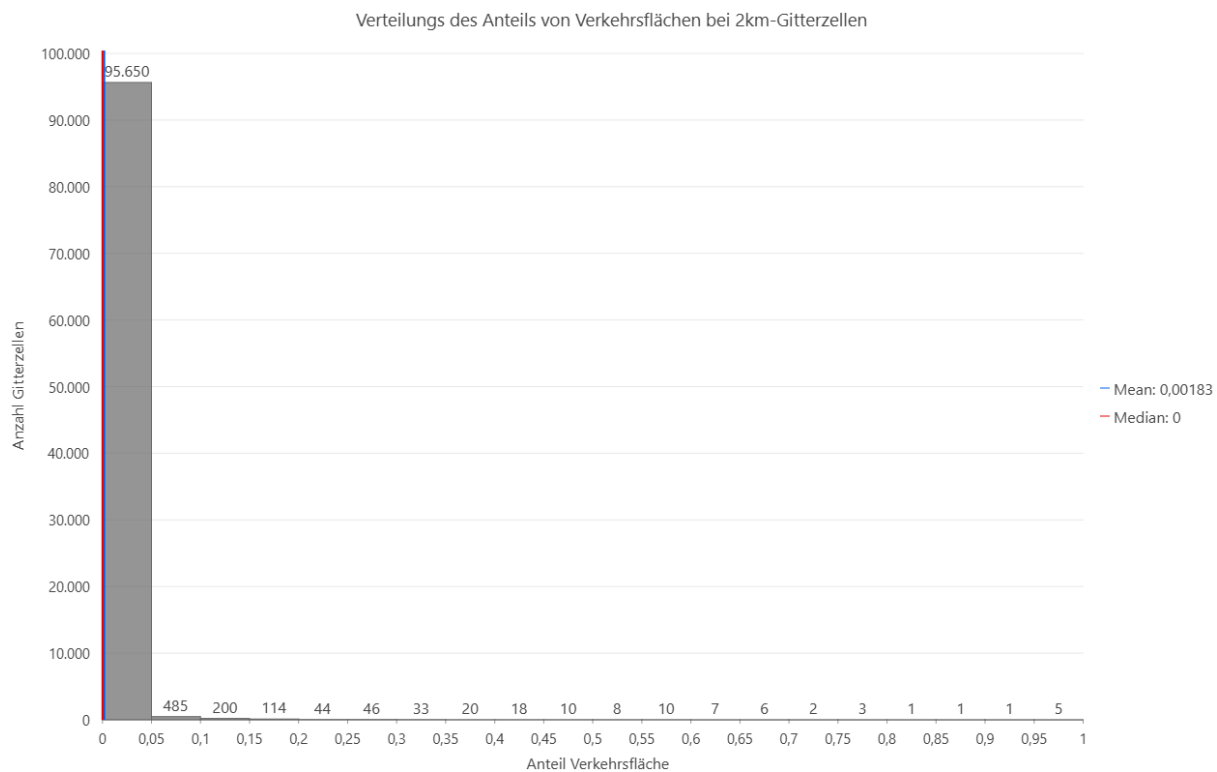


Abbildung 11: Histogramm Anteil der Verkehrsfläche

Analog zu den Flächenanteilen der Landnutzungskategorien werden im Folgenden die Dichtewerte zunächst für 2 km-Gitterzellen statistisch charakterisiert, bevor die Effekte der variablen Gitterweite eingeordnet werden. Die Bevölkerungsdichte ist rechtsschief verteilt mit einem Median von 39 Einwohner pro km². Das arithmetische Mittel liegt mit 224,7 Einwohner pro km² aufgrund einiger Ausreißer von mehr als 3.000 Einwohner pro km² wesentlich höher. Etwa 12 % der 2km-Gitterzellen wurden keine Bevölkerung zugeordnet. Dieser Anteil steigt bei kleineren Gitterweiten bis rund 58 %, während bei 10 km-Gitterzellen nur rund 1 % betroffen ist. Die Verteilungskurve flacht von niedrigen zu hohen Gitterweiten etwas ab, während sich die Wertespanne um den Faktor 4 reduziert. Die Verteilung bleibt aber selbst bei größten Gitterzellen stark gewölbt und weicht bedeutsam von einer Normalverteilung ab.

Die mittlere Straßennetzdichte bei 2 km-Gitterzellen beträgt 0,93 km pro km² bei einer klar rechtsschiefen Verteilung. Gitterzellen ohne jegliche Straßen existieren äußerst selten. Die maximale Straßennetzdichte beträgt etwa 9,2 km pro km², wobei Werte ab dem mittleren einstelligen Bereich nur einzeln auftreten. Bei Reduktion der Gitterweite stellt sich eine deutliche Häufung bei einem schmalen Bereich von Dichtewerten ein: um 2 km pro km² bei einer Gitterweite von 500 m und um 1 km pro km² bei einer Gitterweite von 1 km. Auch bei sehr geringer Gitterweite existieren kaum Gitterzellen die keinerlei Streckenkilometer aufweisen. Bei einer Erhöhung der Gitterweite verschwinden diese gänzlich. Es verbleiben viele Werte unterhalb von 1 km pro km², allerdings weniger konzentriert auf einen schmalen Wertebereich. Die Verteilung verbleibt klar rechtsschief und spitz. Die Häufigkeit von hohen Extremwerten sinkt bei einem niedrigeren Maximum von etwa 5,4 km pro km² bei einer Gitterweite von 10 km. Die Verteilung der Straßennetzdichte ist in Abbildung 12 dargestellt.

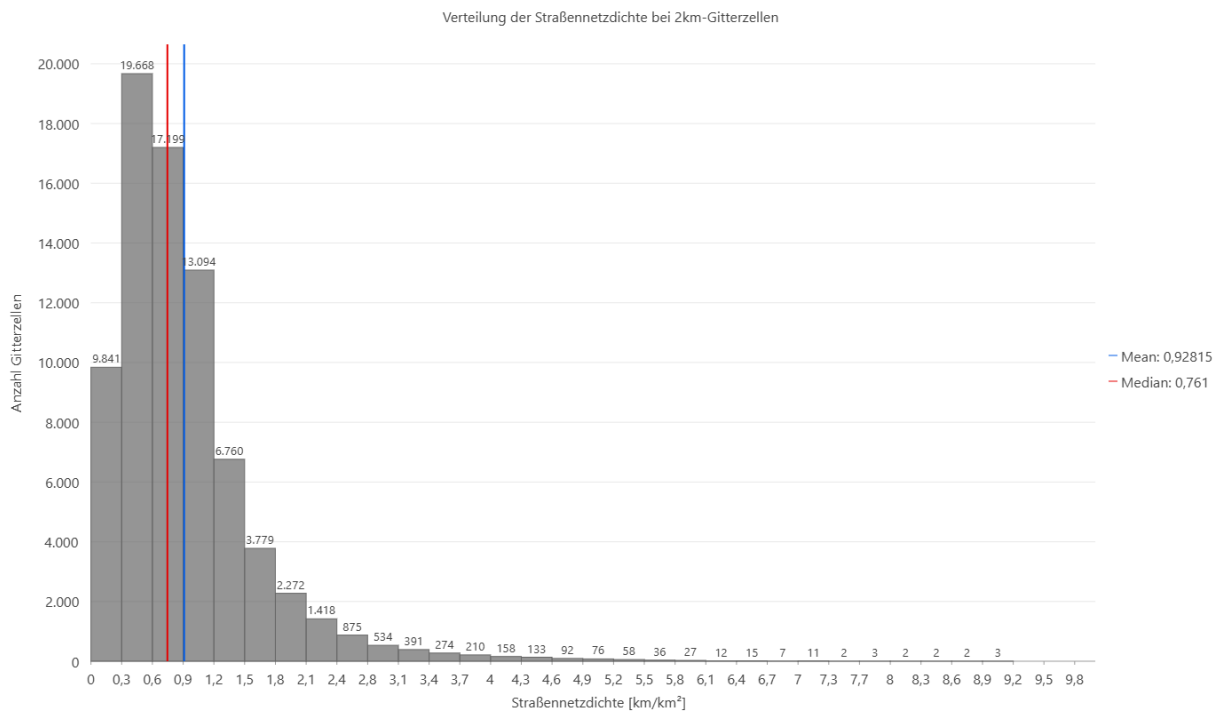


Abbildung 12: Histogramm Straßennetzdichte

3.3 Explorative Rangkorrelationsanalyse

Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Rangkorrelationsanalyse für den SA-Ausbau und anschließend für den NSA-Ausbau bei Berücksichtigung der gesamten Zeitreihe beschrieben. Anschließend werden Teilbereiche des behandelten Zeitrahmens betrachtet.

Für SA werden bei allen erklärenden Variablen negative Werte für Kendall's τ_b und Spearmans' ρ zwischen 0 und -0,35 berechnet, unabhängig von Versorgungsschwelle und Gitterweite. D.h. mit einem hohen Anteil der betrachteten Landnutzungskategorien bzw. einer höheren Bevölkerungs- und Straßennetzdichte geht tendenziell ein früherer Ausbaupunkt einher. Aufgrund der hohen Anzahl berücksichtigter Gitterzellen liegen die p-Werte stets unter 0,0001, meist um ein Vielfaches niedriger.

Mit Ausnahme des Anteils der landwirtschaftlichen Flächen, sind für alle erklärenden Variablen in den Gitterweiten unterhalb von 2 km äußerst schwache Effektstärken zwischen 0 und -0,1 zu beobachten. Bei Erhöhung der Gitterweite steigt die Effektstärke bei allen Variablen um einen ähnlichen Faktor an, allerdings auf einem weiterhin niedrigen Niveau. Ausgenommen des Anteils der landwirtschaftlichen Flächen bleiben die Effektstärken aller Variablen gruppiert, ohne eine klare Reihung innerhalb. Die Korrelation mit dem Anteil der landwirtschaftlichen Flächen fällt durchweg stärker aus, bleibt allerdings für die meisten Varianten im schwachen Bereich zwischen 0 und -0,2. Hierbei spielt auch die gewählte Versorgungsschwelle eine Rolle: Besonders hohe oder niedrige Versorgungsschwellen ergeben geringere Effektstärken. Die größten Effektstärken sind bei mittleren Versorgungsschwellen zu beobachten, wobei sich dieser Bereich bei höheren Gitterweiten nach oben verschiebt. Damit bilden die landwirtschaftlichen Flächen erneut die Ausnahme. Für alle anderen Variablen sind kaum Änderungen durch Variation der Versorgungsschwelle bei niedrigen Gitterweiten zu erkennen, abgesehen von einer minimalen Tendenz zu geringerer Effektstärke bei Versorgungsschwellen über 90 %. Bei einer Gitterweite von 10 km kehrt sich dies um. Die minimalen Effektstärken nehmen bis zu einer Versorgungsschwelle im Bereich von 40 bis 50 % ab, bevor diese bis zur maximalen Versorgungsschwelle in Relation zur gesamten Effektstärke wieder deutlich gewinnen.

Kendall's τ_b liefert durchweg konservativere Ergebnisse als Spearmans' ρ . Die Werte von Spearmans' ρ fallen meist um etwa 20 bis 40 % größer aus, unabhängig der gewählten Versorgungsschwelle. Bei niedrigeren Gitterweite ist der proportionale Abstand der beiden Maße geringer als bei hohen Gitterweiten. Abbildung 13 liefert eine Übersicht der Rangkorrelationskoeffizienten nach Gitterweite und Versorgungsschwelle für SA.

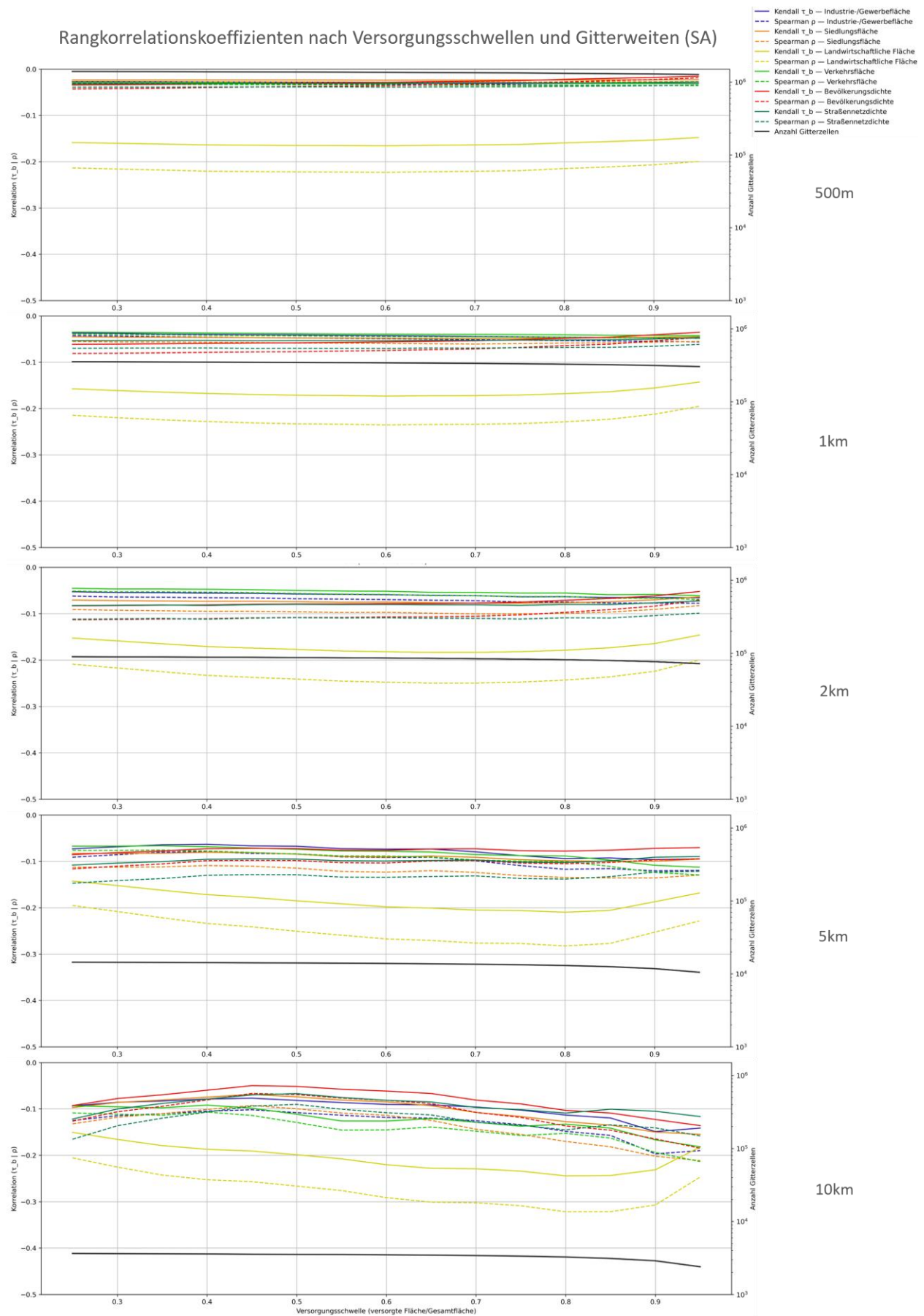


Abbildung 13: Rangkorrelationskoeffizienten (SA)

Auch für NSA werden bei allen erklärenden Variablen negative Werte für Kendall's τ_b und Spearmans's ρ berechnet, unabhängig von Versorgungsschwelle und Gitterweite. Bei Werten zwischen -0,05 und -0,5 geht mit einem hohen Anteil der betrachteten Landnutzungskategorien bzw. einer höheren Bevölkerungs- und Straßennetzdichte tendenziell ein früherer Ausbauzeitpunkt einher. Die Anzahl berücksichtigter Gitterzellen ist bei NSA ebenfalls hoch, weshalb die p-Werte stets unter 0,0001 liegen, meist um ein Vielfaches niedriger.

Die Effektstärken liegen meist auf einem höheren Niveau als bei SA. Bei niedrigen Gitterweiten liegen diese für fast alle Variablen und Korrelationskoeffizienten zwischen -0,1 und -0,3, ausgenommen des Anteils der Verkehrsflächen, welcher nahe 0 ausfällt. Dabei ist eine Differenzierung zwischen den einzelnen Variablen auszumachen: Bevölkerungsdichte und Anteil der Siedlungsflächen verzeichnen meist die stärksten Effekte, gefolgt von der Straßennetzdichte und Anteil der Industrie- und Gewerbeflächen. Die Werte beider Korrelationskoeffizienten entfernen sich bei Erhöhung der Gitterweite zunehmend von 0. Die Ausnahme bildet erneut der Anteil der landwirtschaftlichen Flächen, bei dem die Werte kontinuierlich um -0,2 für Kendall's τ_b bzw. -0,25 für Spearmans's ρ pendeln. Die Reihung der Variablen bleibt grundsätzlich über alle Gitterweiten hinweg erhalten mit größeren Abständen bei hoher Gitterweite. Mit Blick auf die verschiedenen Versorgungsschwellen werden die Ergebnisse bei hoher Gitterweite zudem instabil. Hier nehmen die Effektstärken oberhalb von einer Versorgungsschwelle von 70 % deutlich ab, ebenso wie bei sehr niedrigen Versorgungsschwellen. Gleichzeitig nähern sich die Werte der unterschiedlichen Variablen an und die sonst beobachtete Reihung wird durchmischt. Ähnlich zu den Ergebnissen von SA verbleibt nur zwischen Versorgungsschwellen von 40 und 60 % ein Plateau ähnlicher Effektstärken, in diesem Fall aber in Form von Maxima statt Minima. Bei niedrigen Gitterweiten ist das Verhalten zwischen NSA und SA dagegen vergleichbar mit einer geringen Abnahme der Effektstärke bei hohen Versorgungsschwellen, wenngleich dieser proportional kräftiger ausfällt.

Auch im Verhältnis der beiden Korrelationskoeffizienten lassen sich Parallelen zwischen NSA und SA ausmachen: Kendall's τ_b liefert erneut durchweg konservativere Ergebnisse als Spearmans's ρ . Die Werte von Spearmans's ρ fallen um etwa 25 bis 45 % größer aus mit größerer Häufigkeit hoher Faktoren. Bei niedrigeren Gitterweite ist der proportionale Abstand der beiden Maße geringer als bei hohen Gitterweiten. Bei NSA reagiert Spearmans's ρ allerdings sensibler auf die Änderung der Versorgungsschwelle. Bei hohen Versorgungsschwellen sinkt das Verhältnis von Spearmans's ρ zu Kendall's τ_b , da sich erstgenannter insbesondere bei hohen Gitterweiten schneller 0 annähert. Abbildung 14 liefert eine Übersicht der Rangkorrelationskoeffizienten nach Gitterweite und Versorgungsschwelle für NSA.

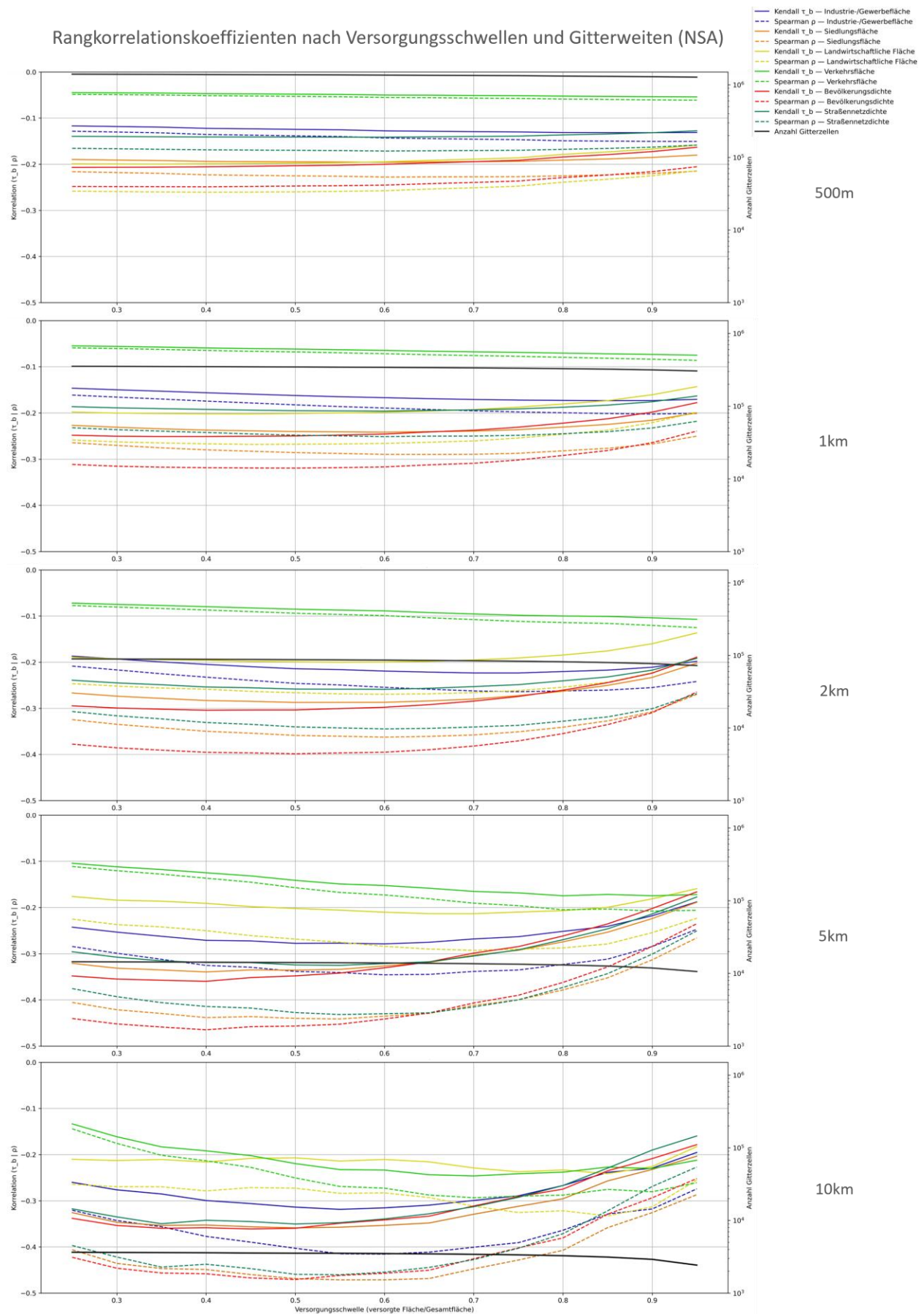


Abbildung 14: Rangkorrelationskoeffizienten (NSA)

Anhand der beschriebenen Ergebnisse wird für die folgenden Analysen eine Auswahl einer geeigneten Kombination aus Gitterweite und Versorgungsschwelle getroffen. Da höhere Gitterweiten aussagekräftige Ergebnisse liefern, die bei niedrigen Gitterweiten verborgen bleiben, wird 5 km als geeignete Gitterweite gewählt. Diese zeigt im Gegensatz zu 10 km weniger volatile Ergebnisse und im Falle von SA keine Umkehr des Musters bei Variation der Versorgungsschwelle. Für diese wird mit 50 % eine konservative Auswahl getroffen. Diese liegt für NSA und SA innerhalb des Plateaus beider Korrelationskoeffizienten. Die Ergebnisse der berechneten Rangkorrelationskoeffizienten für alle Variablen bei einer Gitterweite von 5 km und einer Versorgungsschwelle von 50 % sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Rangkorrelationskoeffizienten bei gewählter Variante

		SA		NSA	
Anzahl Gitterzellen		14.089		14.093	
Variable	Kennzahl	Kendall's τ_b	Spearman's ρ	Kendall's τ_b	Spearman's ρ
Siedlungsfläche	Korrelation	-0.0844	-0.1145	-0.3356	-0.4400
	Signifikanzwert (p)	1.177×10^{-42}	2.331×10^{-42}	0	0
Industrie- und Gewerbefläche	Korrelation	-0.0673	-0.0838	-0.2776	-0.3384
	Signifikanzwert (p)	1.241×10^{-23}	2.201×10^{-23}	0	0
Landwirtschaftliche Fläche	Korrelation	-0.1851	-0.2507	-0.2021	-0.2684
	Signifikanzwert (p)	8.479×10^{-199}	7.003×10^{-201}	1.892×10^{-226}	4.468×10^{-231}
Verkehrsfläche	Korrelation	-0.0739	-0.0840	-0.1413	-0.1572
	Signifikanzwert (p)	1.936×10^{-23}	1.658×10^{-23}	1.151×10^{-77}	1.153×10^{-78}
Bevölkerungsdichte	Korrelation	-0.0725	-0.0981	-0.3480	-0.4566
	Signifikanzwert (p)	5.142×10^{-32}	1.752×10^{-31}	0	0
Straßennetzdichte	Korrelation	-0.0950	-0.1289	-0.3243	-0.4274
	Signifikanzwert (p)	8.468×10^{-54}	2.752×10^{-53}	0	0

Auch bei der Betrachtung einzelner zeitlicher Teilbereiche bleiben die Korrelation Kendall's τ_b und Spearman's ρ meist im schwachen bis maximal mittelstarken Bereich. Hierbei reagieren die Ergebnisse für NSA und SA jedoch unterschiedlich. Betrachtet man das erste zeitliche Drittel des SA-Ausbaus, das etwa zwei Drittel des räumlichen Ausbaufortschrittes entspricht, verschwinden die über den gesamten Zeitraum ermittelten, geringen Zusammenhänge fast gänzlich. Im Fall von NSA wird beim gleichen zeitlichen Zuschnitt bereits der dominierende Teil der Ausbaufäche erfasst und die Ergebnisse der Korrelationskoeffizienten ändern sich kaum. Im letzten zeitlichen Drittel des SA-Ausbaus werden mit Ausnahme der Verkehrsflächen die Effektstärken deutlich vergrößert. Berechnet man die Rangkorrelation für NSA mit einem zeitlichen Ausschnitt, der das letzte Drittel des räumlichen Ausbaufortschrittes abdeckt, werden die Effektstärken hingegen deutlich gemindert. Die Ausnahme bildet der Anteil der landwirtschaftlichen Flächen, der in diesem Szenario klar die höchsten Effektstärke einnimmt.

3.4 Generalisiertes additives Modell

Basierend auf den Ergebnissen der Rangkorrelationsanalyse wird ein generalisiertes additives Modell für die Ausbaudauer mit den Prädiktorvariablen Bevölkerungsdichte, Straßennetzdichte, Anteil landwirtschaftlicher Fläche und Anteil der Industrie und Gewerbefläche auf Basis der 5 km-Gitterzellen mit einer Versorgungsschwelle von 50 % gebildet. Das Modell wird nur auf die Ausbaudauer von NSA angewandt, da bei SA in der Rangkorrelationsanalyse zu wenige Variablen mit aussagekräftigen Ergebnissen ermittelt werden konnten.

Das initiale Modell mit Standardparametern für Spline-Limits und Glättung liefert ein Pseudo- R^2 von 0,3856. Der Skalenfaktor indiziert mit 1,0276 ein tatsächliches Streuverhalten nahe dem erwartetem. Bei insgesamt ca. 52 effektiven Freiheitsgraden erreichen die Teilfunktionen jeweils zwischen 10 und 17. Die Teilfunktionen stoßen dabei nicht an die gesetzten Grenzen, bilden aber nicht-lineare Kurven von hoher Komplexität ab.

Die Teilfunktion für die Bevölkerungsdichte ähnelt einer Exponentialkurve, welche bei unterdurchschnittlichen Bevölkerungsdichten rapide abnehmend bis etwa 0,5 Standardabweichungen (500 Einwohner pro km^2) verzögernd auf das Modell einzahlt. Eine Verkürzung der Ausbaudauer ist in diesem Modell erst mit Dichtewerten oberhalb von etwa 1.300 Einwohner pro km^2 assoziiert, was etwa 10 % aller betrachteten Gitterzellen entspricht. Ab diesem Punkt bleibt der partielle Effektfaktor nahezu unverändert. Auch für die Straßennetzdichte sind niedrige Werte in einem abgrenzbaren Bereich mit hoher Ausbaudauer assoziiert, bevor der Effektfaktor nahezu konstant bleibt. In diesem Fall sinkt der Effekt jedoch annähernd linear von einem weitaus geringeren Wert, bis bei etwa 0,8 Standardabweichungen (1,2 km Strecke pro km^2) die Umkehrschwelle des Effekts passiert wird. Höhere Straßennetzdichten haben im betrachteten Modell einen minimal beschleunigenden bis nahezu keinen Effekt. Die Teilfunktion für den Anteil der landwirtschaftlichen Flächen kann als überwiegend linear, aber gewellt beschrieben werden. Mit einem überwiegend kontinuierlichen Übergang von Verzögerung zu Beschleunigung des Ausbaus wird die Schwelle des Effektfaktors 1 bei 45 bis 50 % Anteil landwirtschaftlicher Fläche unterschritten. Die Kurve für den Einfluss der Industrie- und Gewerbeflächen kann als U-förmig mit komplexen Elementen bei hohen Standardabweichungen beschrieben werden. Bei Merkmalsausprägungen nahe dem Mittelwert gleicht die Teilfunktion einer Exponentialfunktion, bei der niedrige Flächenanteile mit höherer Ausbaudauer einhergehen. Nach einem konstanten Bereich ohne Effekt auf die Ausbaudauer sinkt der Effektfaktor unter 1 und verläuft bis etwa 10 Standardabweichungen linear. Bei noch höheren Flächenanteilen, die nur einzelne Gitterzellen aufweisen, schwankt der Effektfaktor um 1. Die Kurven der einzelnen Teilfunktionen des initialen Modells sind anhand der standardisierten Merkmalsausprägung und dem exponenzierten Effektfaktor in Abbildung 15 dargestellt.

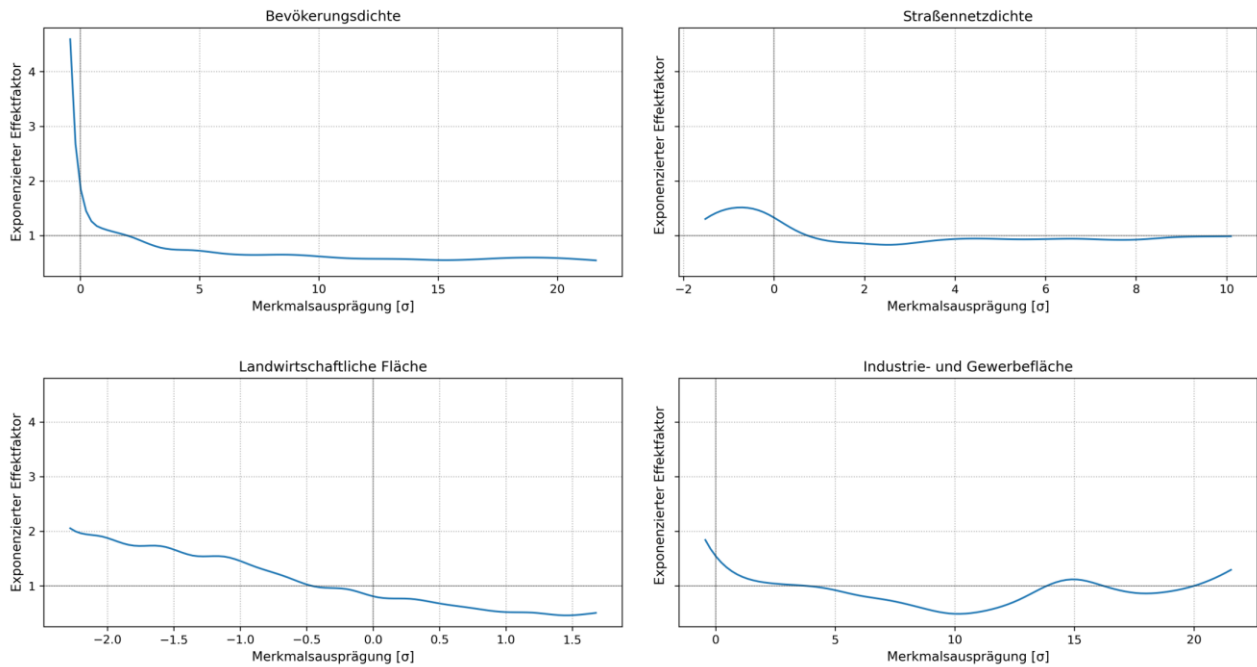


Abbildung 15: Teilfunktionen des initialen GAM

Zur Verfeinerung des Modells werden die Strafen für wellige Kurven für alle Teilfunktionen angehoben. Die Teilfunktionen werden für Bevölkerungs- und Straßen erhalten ein leicht erhöhtes λ von 1, während für die Flächenanteile von landwirtschaftlicher Fläche sowie Industrie- und Gewerbefläche eine deutliche Erhöhung mit $\lambda = 3$ bzw. $\lambda = 6$ vorgenommen wird. Durch die Anpassungen sinken die effektiven Freiheitsgrade der individuellen Funktion um bis zu 3,4, so dass die effektiven Freiheitsgrade des gesamten Modells um etwa 7 auf 45 sinken. Mit dem vereinfachten Modell geht leicht gesenktes Pseudo- R^2 von 0,3851 und ein ebenfalls gesenkter Scale-Faktor von 1,0262 einher. Die AIC sinkt um 9 Punkte, während die GCV minimal um 0,0005 Punkte auf 0,919 zurückgeht. Bei Betrachtungen der einzelnen Teilfunktionen bleiben die wesentlichen Zusammenhänge und Grenzwerte erhalten. In den Kurven der Teilfunktionen für Bevölkerungs- und Straßennetzdichte sind nach dem Anheben von λ minimale Glättungen zu beobachten. Bei den landwirtschaftlichen Flächen fallen die zuvor beobachteten Wellen wesentlich geringer aus. In der Kurve für die Industrie- und Gewerbeflächen verschwindet das lokale Maximum bei hohen Standardabweichungen, wodurch eine nahezu symmetrische U-Form entsteht. Die Kurven der einzelnen Teilfunktionen des angepassten Modells sind anhand der standardisierten Merkmalsausprägung in Abbildung 16 dargestellt.

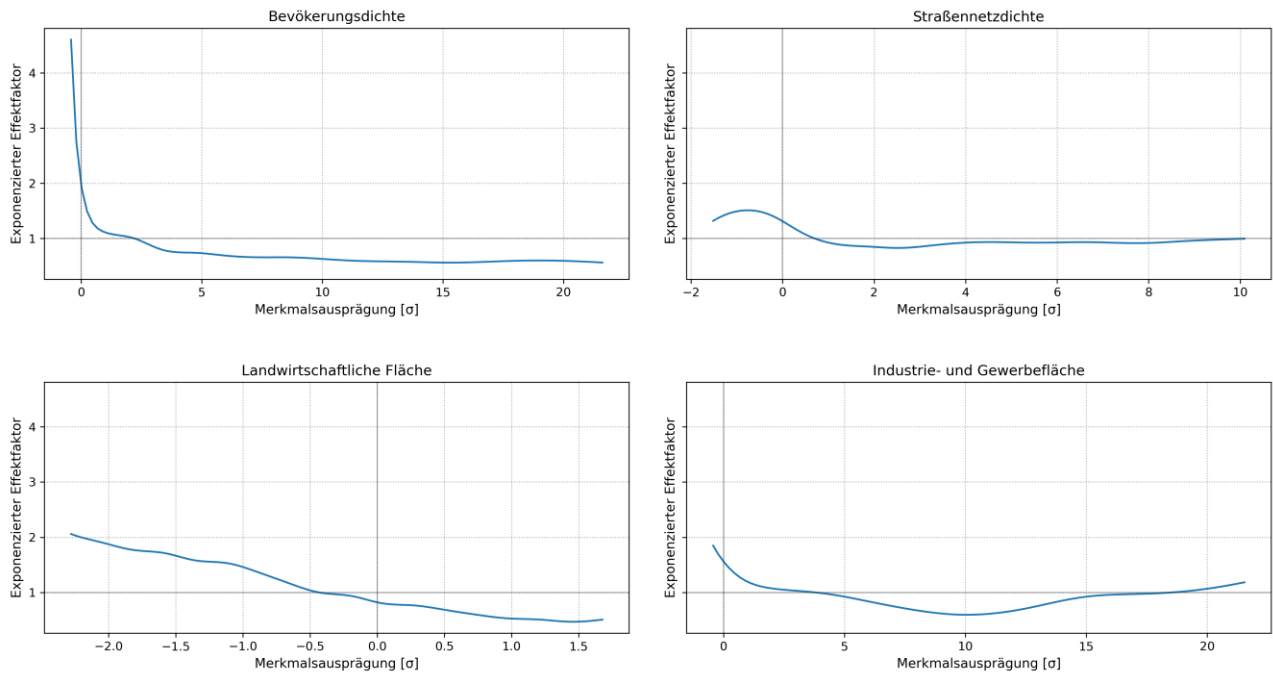


Abbildung 16: Teilfunktionen des korrigierten GAM

Durch Hinzunahme des Raumterms erhöht sich Pseudo- R^2 auf 0,422. Die Teilfunktion weist 24 effektive Freiheitsgrade auf, während die übrigen Teilfunktionen nahezu keine Änderungen erfahren, so dass das gesamte Modell etwa 69 effektive Freiheitsgrade erreicht. Die AIC fällt drastisch um über 860 Punkte, während die GCV um 0,051 Punkte sinkt. Der Scale-Faktor verändert sich ebenfalls deutlich, so dass mit 0,9879 die unerklärte Reststreuung nun unterhalb der Erwartungen anhand der gewählten Verteilung liegt.

Bei isolierter Betrachtung des durch den Raumterm modellierten Einflusses auf die Ausbaudauer fällt ein deutliches Südwest- zu Nordost-Gefälle auf. An ein breites Band moderater Verkürzung der Ausbaudauer schließt im Süden ein Bereich zunehmend steigender Ausbaudauer an. Dieser findet sich bei östlichen wie westlichen Extremwerten. Der auf der anderen Seite des neutralen Bandes liegende Bereich, welcher die Ausbaudauer weiter verkürzt, ist hingegen klar nach Osten orientiert. Der durch den Raumterm modellierten Effekts ist anhand des standardisierten Rechts- und Hochwertes sowie dem exponentierten Effektfaktors in Abbildung 17 dargestellt.

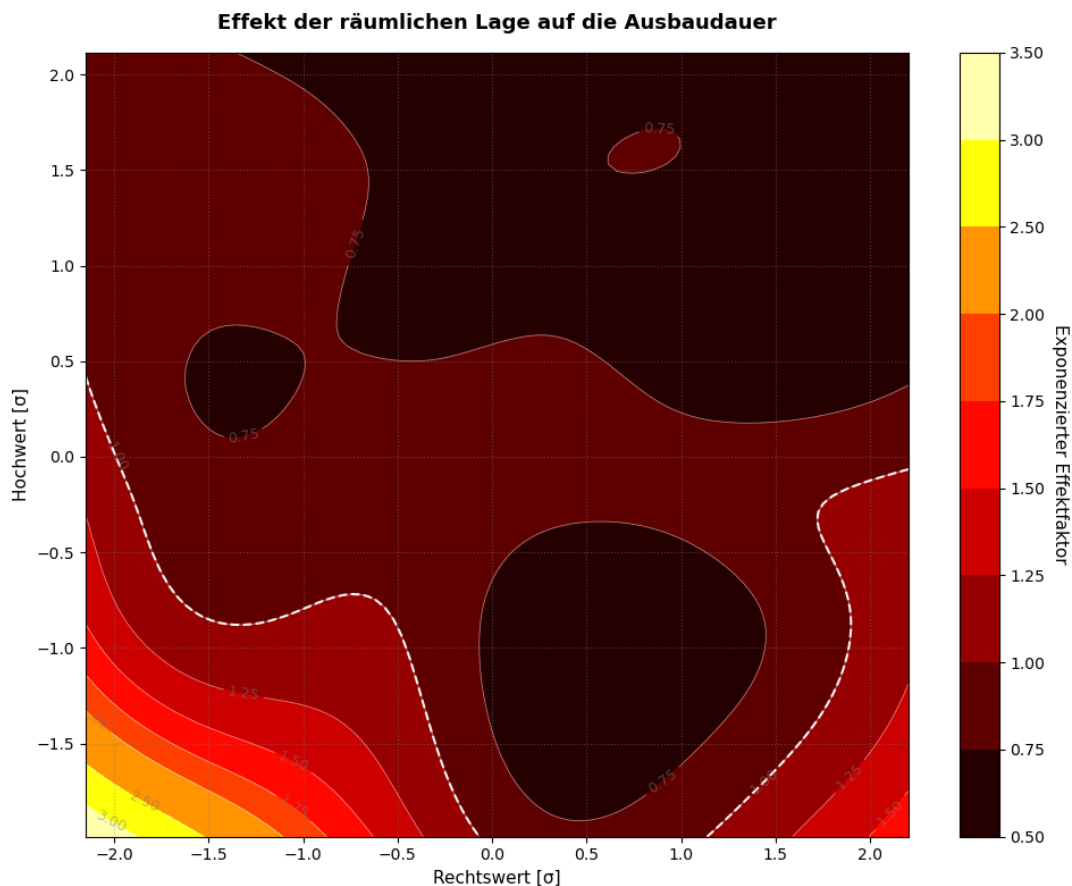


Abbildung 17: Visualisierter Effekt des Raumterms

Die Residuen des Modells weisen vor Hinzufügen des Raumterms mit einem globalen Moran's I von 0,26 eine räumliche Gruppierung auf. Nach der Hinzunahme des Raumterms verringert sich das Maß der räumlichen Autokorrelation auf 0,2, indiziert aber weiterhin eine räumliche Gruppierung. Die berechneten Indizes sind aufgrund der großen Anzahl statistischer Einheiten klar signifikant, wobei der z-Wert parallel zum Index von etwa 62 auf 48 fällt. Bei räumlicher Betrachtung der Residuen vor und nach Hinzunahme des Raumterms, fallen mehrere regionale Besonderheiten auf. Während das Modell ohne Raumterm die Ausbaudauer im Südwesten überwiegend unterschätzt, fallen die Residuen hier nach der Anpassung durchmischt aus. In Bayern überschätzte das Modell zunächst großräumig die Ausbaudauer, was durch die Anpassung wesentlich gemindert wird. Im Nordosten Deutschlands, insbesondere im Umland Berlins, wird die deutliche Überschätzung der Ausbaudauer durch den Raumterm reduziert. Abbildung 18 zeigt eine kartographische Gegenüberstellung der Residuen des generalisierten additiven Modells vor und nach Hinzunahme des Raumterms.

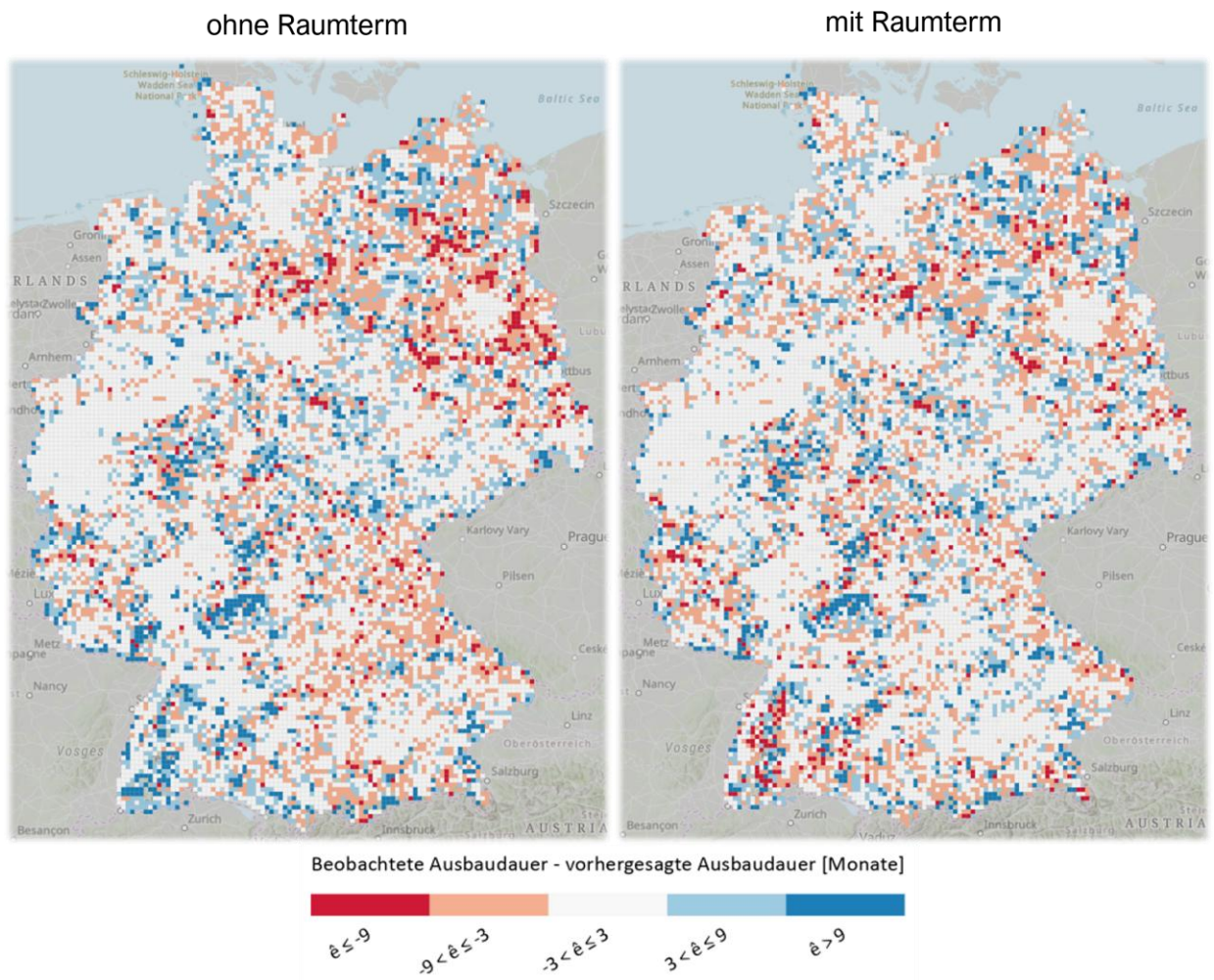


Abbildung 18: Residuen mit und ohne Raumterm

4 Diskussion

Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede im Ausbau der 5G-Ausprägungen NSA und SA in Deutschland im Beobachtungszeitraum. Während mit NSA in den wenigen Monaten vor Beobachtungsbeginn bereits ein hoher Versorgungsgrad - vor allem in Ballungsgebieten - erreicht wurde, fällt nahezu der gesamte bisherige SA-Ausbau in den Beobachtungszeitraum. Aufgrund des raschen Ausbaus von NSA und der Bindung an 4G-Infrastruktur, ist hier von selektiver Aufrüstung bestehender Standorte und dem überwiegenden Einsatz von Frequenzen unterhalb von 3GHz auszugehen. Dies deckt sich mit Berichten der Bundesnetzagentur, dass die 5G-Netzabdeckung der ersten Monate mittels Dynamic Spectrum Sharing realisiert wurde, also dem parallelen, dynamisch geregelten Einsatz von 4G und 5G im selben Frequenzband (Bundesnetzagentur, 2022). Der ausgesprochen punktuellen und kleinräumigen Ausbau von SA zu Beobachtungsbeginn deutet hingegen auf den Einsatz der sogenannten 5G-Pionierbänder im Bereich von 3,5 GHz hin, mit denen hohe Datenraten, aber nur geringe Reichweiten realisiert werden können. Bemerkenswert ist außerdem, dass die ersten Standorte nicht zwangsweise in den mit NSA zunächst ausgebauten Gebieten realisiert wurden. Hier scheinen Nachfragemuster abzuweichen, Fördermaßnahmen zu greifen oder die Ansprüche an die Standorte zu divergieren. Die SA-Abdeckung erreicht dennoch bis zum Ende des Beobachtungszeitraums nahezu das Niveau von NSA, insbesondere durch sprunghafte Fortschritte im Jahr 2023. Der dafür nötige Aufbau eines 5G-Kernnetzes ist in der Betrachtung der Netzabdeckung nicht kontinuierlich zu beobachten und wird erst beim Anschluss des Zugangsnetzes ersichtlich.

Die Unterscheidung von NSA und SA setzt sich in den Ergebnissen der Rangkorrelationsanalyse fort. Für SA liefert keiner der betrachteten Korrelationskoeffizienten relevante Effektstärken. Der diesbezügliche Ausbau scheint nicht anhand der betrachteten räumlichen Merkmale abzulaufen. Möglicherweise bilden die gewählten Kategorien die SA-spezifische Nachfrage nicht akkurat ab oder die Einführung von 5G-SA ist durch andere Zwänge gesteuert. Denkbar ist gerade für den frühen Ausbau eine Orientierung an günstigen Rahmenbedingungen, wie die Nähe zum benötigten Glasfasernetz oder die Einbettung in Förderregime. Dafür spricht auch die spätere Angleichung an die NSA-Netzabdeckung, welche einen Ausbaupfad entlang bestehender Infrastruktur indiziert. NSA zeigt hingegen eine deutlichere Orientierung an räumlichen Merkmalen, insbesondere dem klassischen Mobilfunkprädiktor Bevölkerungsdichte. Ähnliches gilt für den Ausbau entlang von Straßen, der durch frühe, linienförmige Ausbauggebiete bereits in der kartographischen Betrachtung ebenso wie in der Rangkorrelationsanalyse ersichtlich ist. Die Möglichkeit, auf bestehender 4G-Infrastruktur aufzusetzen, räumt den Mobilfunknetzbetreibern die Freiheit ein, in Gebieten potenzieller Nachfrage auszubauen. Wenig überraschend ähnelt diese scheinbar den Legacy-Technologien, da mit NSA lediglich klassische Mobilfunkanwendungsfälle realisiert werden können.

Die Bevölkerungsdichte und der Anteil der Siedlungsflächen zeigen – wie erwartet - durchweg ähnliche Korrelationen, während die Ergebnisse für Straßennetzdichte und Anteil der Verkehrsflächen deutlich variieren. Die hohe Anzahl von Gitterzellen ohne Verkehrsflächen und die grundsätzlichen niedrigen, aber dennoch stark schwankenden Effektstärken legen eine kritische Betrachtung der Verwendung dieser Kategorie nahe. Methodisch bemerkenswert ist außerdem der Einfluss von Gitterweite und Versorgungsschwelle. Diese können die Ergebnisse maßgeblich verzerren, insbesondere bei der Wahl von Extremwerten beider Parameter. So wird bei einer Kombination von hoher Versorgungsschwelle und Gitterweite die Gewichtung zugunsten später Ausbaupunkte so verschoben, dass die ansonsten beobachteten Zusammenhänge drastisch gemindert werden. Dies könnte auch ein Hinweis darauf sein, dass spät realisierte Ausbauggebiete stärker durch individuelle Zwänge charakterisiert sind als durch allgemeine Prädiktoren.

Ein weiterer systematischer Einfluss durch die Gitterweite ist im Verhältnis der Rangkorrelationskoeffizienten zu beobachten. Das Verhältnis von Spearmans's ρ zu Kendall's τ_b fällt bei geringen Gitterweiten, hohen Versorgungsschwellen und Variablen mit vielen Nullwerten niedriger aus als üblich. Eine mögliche Erklärung könnte im hohen Anteil von Rangbindungen dieser Konstellationen liegen, welche die Ergebnisse von Spearman's ρ verzerren, in Kendall's τ_b aber explizit abgefangen werden. Die grundsätzlich ähnlichen Ergebnisse der beiden Koeffizienten zeigen dennoch, dass die beobachteten Zusammenhänge robust und weitestgehend unabhängig vom statistischen Maß sind.

Die Bewertung der Aggregationsparameter ist auch im Kontext des Robinson-Effektes zu sehen. Es stellt sich die Frage, ob die beobachteten Zusammenhänge der Aggregationsebene geschuldet sind oder tatsächlich auf den individuellen Mobilfunkausbau schließen lassen. Hierzu lässt sich festhalten, dass die Effektstärken bei höheren Gitterweiten in Abhängigkeit von 5G-Technologie, erklärender Variable und Versorgungsschwelle tendenziell steigen, die relevanten Zusammenhänge aber grundsätzlich zu beobachten sind. Für die Evaluation, ob ein ökologischer Fehlschluss vorliegt, muss zunächst erörtert werden, welche Ebene im Mobilfunkausbau der Individualebene von beispielsweise Einzelpersonen entspricht, da einzelne Objekte oder kleinste Flächeneinheiten in der mobilfunkplanerischen Realität selten eine Zielgröße darstellen. Eine Möglichkeit bietet die Übersetzung eines einzelnen Standortes in die Fläche, die von diesem abgedeckt wird. Diese Betrachtungsebene sollte der ursprüngliche Ansatz der Ausbaugebiete statt Gitterzellen abbilden, der aber aufgrund der vorhandenen zeitlichen Aggregation scheiterte. Eine Aggregationseinheit, die sich diesen natürlichen Standortflächen möglichst annähert, könnte als Substitut tatsächlicher Individuen angesehen werden. Hierbei sind allerdings die drastisch variierenden Standortflächen je nach eingesetztem Frequenzbereich, Topographie und weiteren Faktoren zu beachten, welche die Annäherung an die Individualebene erschweren. Schließlich erscheinen Gitterweiten im mittleren einstelligen Kilometerbereich als praktikable Annäherung, die für einen Großteil des Betrachtungsgebietes weder eine Vielzahl individueller Standortflächen in eine Einheit aggregiert noch diese in kleinere Teilflächen zerlegt. Eine zusätzliche Komplikation niedriger Gitterweiten zeigte sich im Laufe des zweiten operativen Schrittes bei der Bestimmung von Flächenanteilen und Dichten: Neben der Erhöhung des Anteils von Leerzellen für alle betrachteten Variablen, offenbarte sich bei der Straßennetzdicke nahezu eine Dichotomie von Gitterzellen, die entweder durch genau eine Straße gekreuzt werden oder keinerlei Strecke aufweisen.

Mit den Ergebnissen der Rangkorrelationsanalyse lassen sich die formulierten Forschungshypothesen evaluieren. Die Arbeit zeigt, dass der Mobilfunkausbau in Deutschland von 2021 bis 2025 mit der Struktur der Landnutzung sowie mit der Straßennetz- und Bevölkerungsdichte korreliert. Damit wird die Hauptthese bestätigt, ebenso wie Nebenthese, dass ein hoher Anteil der Siedlungsflächen sowie eine hohe Bevölkerungsdichte mit einer kürzeren Ausbaudauer von 5G-NSA einhergeht. Die zweite Nebenthese ist basierend auf den vorliegenden Ergebnissen dagegen zu verwerfen. Es konnte nicht beobachtet werden, dass ein hoher Anteil von Industrie-, Gewerbe-, Verkehrs- und Landwirtschaftsflächen sowie eine hohe Straßennetzdicke mit einer kurzen Ausbaudauer von 5G-SA assoziiert ist.

Die Zusammenhänge im NSA-Ausbau lassen sich mit den Ergebnissen des generalisierten additiven Modells weiter charakterisieren. Die Zusammenhänge sind überwiegend nicht-linear mit abgrenzbaren Sättigungsbereichen. Der wichtigste Prädiktor, die Bevölkerungsdichte, zeigt mit dem exponentiellen Verlauf das massive Verzögerungspotenzial in sehr dünn besiedelten Regionen. Der hohe NSA-Versorgungsgrad zu Beginn des Beobachtungszeitraums könnte die Effektstärke noch gemindert haben, da die bereits zu Beobachtungsbeginn ausgebauten Metropolregionen höchstwahrscheinlich schon einige Monate vor dem berücksichtigten Zeitpunkt erschlossen wurden.

Der lineare Verlauf der Teilfunktion für die landwirtschaftlichen Flächen und die diesbezüglich ähnlichen Ergebnisse in der Rangkorrelationsanalyse zwischen NSA und SA deuten darauf hin, dass diese Variable mehr als Proxy für ein nicht sichtbares Merkmal fungiert, statt tatsächlich eine Mobilfunknachfrage für beispielsweise autonome Landwirtschaftsmethoden anzuzeigen. Die teilweise komplexen Verläufe bei hohen Standardabweichungen werden im Modell durch wenige Ausreißer gebildet und sind deshalb wenig aussagekräftig.

Dass die betrachteten räumlichen Merkmale keine vollumfängliche Modellierung des Mobilfunkausbaus zulässt, zeigt die abschließende Betrachtung der Residuen. Hierbei sind klare regionale Muster auszumachen, welche die Ausbaudauer maßgeblich beeinflussen. In der kartographischen Aufarbeitung lassen sich systematische Unterschiede zwischen Bayern und Baden-Württemberg ausmachen, mit flächiger Unterschätzung der Ausbaudauer auf der einen Seite und Überschätzung auf der anderen. Ähnliches gilt für das Berliner Umland, das basierend auf den betrachteten Merkmalen unerwartet früh erschlossen wurde. Einen wesentlichen Störfaktor bildet die Topographie, durch die ansonsten attraktive Regionen aufgrund niedriger Reichweiten der Mobilfunkanlagen und schwieriger Baubedingungen erst spät oder nur fragmentiert erschlossen werden. So stellt sich in den Residuen ein Nordost zu Südwest-Gefälle ein. Diese großräumigen Einflüsse können mit der Abbildung des Raums als Oberfläche im Modell aufgefangen, aber nicht gänzlich ausgeräumt werden. Auch nach Hinzunahme des Raumterms sind Gruppierungen zu beobachten, die auf eine Reihe lokal wirksamer Nachbarschaftseffekte zurückzuführen sein könnten. Besondere topographische Herausforderungen bilden beispielsweise schmale, gewundene Täler, die aufwendig mit mehreren Standorten versorgt werden müssen. Darüber hinaus liegen die Verfügbarkeit von Flächen und die Genehmigung von Baumaßnahmen in kommunaler Zuständigkeit. Hinzu kommt der bei 5G besonders relevante gesellschaftliche Widerstand, der lokal Ausbauprojekte erheblich blockieren kann. Letztlich sind die lokal verfügbaren Anschlussmodalitäten ein wesentlicher Faktor für den zügigen Ausbau, wie die britische Regulierungsbehörde Ofcom bereits in ihrer Studie von 2019 zeigen konnten.

Die Ergebnisse bestätigen damit die von Liu et al. beschriebene Attraktivität für die Mobilfunknetzbetreiber, 5G Non-Standalone entlang bestehender Infrastruktur auszurollen (Liu et al., 2020). Der rasche Ausbau von Non-Standalone und das sprunghafte Aufschließen von Standalone stützen die von Oughton et al. formulierte These, dass 5G zunächst entlang etablierter Frequenzen verbreitet wird, bevor eine bedarfsgerechte Nachsteuerung stattfindet (E. Oughton et al., 2018; E. J. Oughton et al., 2019). Die von Neokosmidis et al. prognostizierte Bindung an technologiespezifische Geschäftsmöglichkeiten (Neokosmidis et al., 2017) kann basierend auf dieser Arbeit dagegen nicht bestätigt werden. Aus Sicht von Fördergebern und Regulieren kann anhand der Ergebnisse die Frage gestellt werden, ob entsprechende Programme und Auflagen gewirkt haben. Die formulierte Bestrebung, mit 5G prioritär neue Anwendungsfelder zu erschließen und damit das technologische Potenzial schnellstmöglich auszuschöpfen, scheint zumindest in der Gesamtschau dieser Arbeit nicht erreicht worden zu sein.

5 Fazit

Der 5G-Ausbau in Deutschland von 2021 bis 2025 ist technologiespezifische Muster geprägt. Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten auf eine Differenzierung der Ausbaustrategien zwischen den Netzarchitekturen SA und NSA hin. Der zügige Ausbau von NSA erfolgt entlang der Ausbaupfade der vorherigen Mobilfunktechnologien, was sich in der Korrelation mit der Bevölkerungsdichte und weiteren anthropogenen Flächenindikatoren niederschlägt. Die Zusammenhänge sind überwiegend nicht-linear mit ausgeprägten Sättigungsbereichen, in denen beispielsweise eine extrem hohe Bevölkerungsdichte keine weitere Verkürzung der Ausbaudauer bedeutet. Die Erweiterung des statistischen Modells um eine abstrakte räumliche Komponente deutet auf weitere großräumige Einflussfaktoren hin, während zusätzlich kleinräumige Nachbarschaftseffekte anhand der verbleibenden Residuen sichtbar werden. Für SA konnte hingegen kein nennenswerter Zusammenhang festgestellt werden. Dies indiziert diffuse Ausbaumuster, die nicht anhand der betrachteten Prädiktoren ablaufen. Bemerkenswert ist außerdem das sprunghafte Aufschließen der SA-Netzabdeckung zu der von Beginn an hohen Abdeckungsquote von NSA, welches in dem nachträglichen Anschluss bestehender Infrastruktur an das 5G-Kernnetz begründet sein könnte. Anhand der vorliegenden Ergebnisse ist nicht zu erkennen, dass die Nachfrage potenzieller 5G-Anwendungsfelder ein wesentlicher Prädiktor für den Ausbau vollwertiger 5G-Infrastruktur ist.

Möglicherweise lassen sich die 5G-Anwendungsfelder nicht wie angenommen in diskrete Flächennutzungskategorien übersetzen, wodurch entsprechende Ausbaustrategien in der angewendeten Methodik verborgen bleiben. Eine Einschränkung dieser Arbeit besteht in der zeitlichen Verfügbarkeit und Auflösung der verwendeten Daten. Die Mobilfunkdaten beinhalten nicht die initialen Ausbaumonate, die insbesondere bei NSA einen wesentlichen Anteil der Netzabdeckung ausmachen und im Abgleich mit SA besonders interessant sein könnten. Durch die vierteljährliche Auflösung sind bedeutsame Sprünge im Ausbaufortschritt zu erkennen, die möglicherweise relevante Differenzierungen verschlucken. Eine relevante Beeinflussung der Ergebnisse durch die damit verbundenen Rangbindungen in der Rangkorrelationsanalyse konnte durch den Abgleich von Kendall's τ_b und Spearman's ρ weitestgehend ausgeschlossen werden. Einen definitiven Einfluss zeigte hingegen die Wahl der Aggregationsparameter der Gitterweite und Versorgungsschwelle. Eine sorgfältige Kombination dieser Parameter ist unabkömmlich, um stabile und aussagekräftige Ergebnisse in der angewendeten Methodik zu erhalten. Ob die Zusammenhänge das Ergebnis des Robinson-Effektes sind oder tatsächlich Prädiktoren für den 5G-Ausbau ausweisen, lässt sich in diesem Kontext nicht abschließend klären. Gleichwohl indizieren das Auftreten der Zusammenhänge über weite Wertebereiche der Aggregationsparameter sowie die Annäherung an die Individualebene im Mobilfunkkontext, dass es sich nicht um Scheinkorrelationen handelt.

Ein alternativer Indikator für den Mobilfunkausbau bei ansonsten ähnlicher Methodik könnte die Betrachtung von Mobilfunkstandorten statt der Netzabdeckung darstellen. Diese könnten in Zusammenhang mit der Nähe zu bestimmten Flächen und Objekten gesetzt werden, anstatt Dichte und Flächenanteil innerhalb einer ausgebauten Gitterzellen zu betrachten. Dies würde die Notwendigkeit der Aggregation eliminieren und den Einfluss eingesetzter Frequenzbereiche mindern. Denkbar wäre auch eine Differenzierung nach Frequenzbereichen, da diese anwendungsspezifische Vor- und Nachteile mit sich bringen. Ein wesentlicher Faktor könnte auch die Trennung der Analyse nach einzelnen Netzbetreibern sein, um eine gegenseitige Überlagerung der Muster zu verhindern. Differenzierte Ausbaustrategien sind allein mit Blick auf die variierende Frequenzausstattung, ungleiche vorhandene Infrastruktur, unterschiedliche Mobilfunktechnik-Partner und verschiedene Zielgruppen plausibel. Entsprechende Analysen könnten allerdings an der Beschaffung geeigneter Daten scheitern, da es sich schützenswerte und mitunter sicherheitsrelevante Informationen

mehrerer Unternehmen handelt, die diese womöglich als Betriebs- und Geschäftsgeheimnis einstufen.

Weitere Forschung zu den Mustern des 5G-Ausbaus könnte sich auf noch nicht betrachtete räumliche Merkmale fokussieren. Die Residuenanalyse dieser Arbeit deutet daraufhin, dass insbesondere mit Blick auf die Verzögerung des Mobilfunkausbaus weitere Eigenschaften auszubauender Flächen einen systematischen Einfluss haben könnten. Interessant wäre auch, die Steuerungswirkung konkreter Förderprogramme und Versorgungsauflagen zu untersuchen.

Abschließend sich festhalten, dass basierend auf den Ergebnissen dieser Arbeit beim Ausbau von 5G nicht „alles beim Alten“ ist. Die „neue Technologie“ lässt sich allerdings nicht pauschalisieren. Ob 5G den Ausbaupfaden seiner Vorgängertechnologien folgt, hängt wesentlich von der betrachteten Netzarchitektur ab.

Literaturverzeichnis

- 5G-Umsetzungsförderung im Rahmen des 5G-Innovationsprogramms (2020).
https://www.bav.bund.de/DE/4_Foerderprogramme/4_5G/5G_node.html
- Akyildiz, I. F., Gutierrez-Estevez, D. M., & Reyes, E. C. (2010). The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced. *Physical Communication*, 3(4), 217–244. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.08.001>
- Arbia, G. (1989). *Spatial Data Configuration in Statistical Analysis of Regional Economic and Related Problems*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-2395-9>
- Bahia, K., Castells, P., & Pedrós, X. (2019). *The impact of mobile technology on economic growth: Global insights from 2000-2017 developments*.
- Bala, P. (2024). The Impact of Mobile Broadband and Internet Bandwidth on Human Development—A Comparative Analysis of Developing and Developed Countries. *Journal of the Knowledge Economy*, 15(4), 16419–16453. <https://doi.org/10.1007/s13132-023-01711-0>
- Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. (2020). *Bekanntmachung – 5G – Aufruf zur Einreichung von Projektvorschlägen*. Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie. <https://www.iuk-bayern.de/termine/bekanntmachung-5g-im-rahmen-der-strategie-bayern-digital-und-der-hightech-agenda-bayern-der-bayerischen-staatsregierung>
- Blackman, C., & Forge, S. (2019). *5G Deployment: State of Play in Europe, USA and Asia* (PE 631.060). European Parliament, Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies. <https://doi.org/10.2861/265585>
- BMDV. (2024). *Förderprogramme für 5G | Deutschland spricht über 5G*. Deutschland spricht über 5G. <https://www.deutschland-spricht-ueber-5G.de/informieren/netzausbau/mit-diesen-programmen-foerdert-der-bund-5g-innovationen/>
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. (2021). *Geographische Gitter für Deutschland in UTM-Projektion* [Datensatz]. <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/nicht-administrative-gebietseinheiten/geographische-gitter-fur-deutschland-in-utm-projektion-geogitter-national.html>
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. (2025). *Cybersicherheit und digitale Souveränität in den Kommunikationstechnologien 5G/6G*. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. <https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/5-G/KoPa45/Cyber-Sicherheit-digitale-Souveraenitaet-5G-6G.html?nn=1057332>
- Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt. (2019a). *Health5G — Kommunikationstechnologien und Cybersicherheit*. <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/health5g/>
- Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt. (2019b). *OTB-5G+— Kommunikationstechnologien und Cybersicherheit*. <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/otb-5g/>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). (2017). *5G-Strategie für Deutschland*. BMVI. https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/098-dobrindt-5g-strategie.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). (2019). *Mobilfunkstrategie der Bundesregierung*. BMVI. https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/Mobilfunkstrategie.pdf?__blob=publicationFile
- Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat. (2025). *Land.Funk*. Bundesprogramm Ländliche Entwicklung und Regionale Wertschöpfung. <https://land-zukunft.de/foerdermassnahmen/landfunk/>

- Bundesnetzagentur. (2015). *Präsidentenkammerentscheidung*.
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/DrahtloserNetzzugang/Projekt2016/Pr%C3%A4sidentenkammerentscheidungProjekt2016_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Bundesnetzagentur. (2019). *5G Auktion—Präsidentenkammerentscheidungen III und IV*.
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/DrahtloserNetzzugang/Projekt2018/20181126_Auktion2019Entscheidungen_III_IV.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Bundesnetzagentur. (2021). *Drahtloser Netzzugang in den Bereichen von 700 MHz bis 3,8 GHz*.
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OffentlicheNetze/Mobilfunk/DrahtloserNetzzugang/Projekt2018/Frequenzen700bis3600_pdf.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Bundesnetzagentur. (2022). *Jahresbericht Telekommunikation 2021*.
<https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/jb2021.pdf>
- Bundesnetzagentur. (2023). *Jahresbericht Telekommunikation 2022*.
https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB_TK_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1
- Bundesnetzagentur. (2025). *Jahresbericht Telekommunikation 2024*.
<https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2024TK1.pdf>
- Bundesnetzagentur. (2026). *Mobilfunk-Monitoring*.
<https://gigabitgrundbuch.bund.de/GIGA/DE/MobilfunkMonitoring/start.html>
- Cave, M., & Webb, W. (2015). *Spectrum Management: Using the Airwaves for Maximum Social and Economic Benefit*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781316145708>
- Chiha, A., Van der Wee, M., Colle, D., & Verbrugge, S. (2020). Techno-economic viability of integrating satellite communication in 4G networks to bridge the broadband digital divide. *Telecommunications Policy*, 44(3), 101874. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.101874>
- Cisco Systems, Inc. (2020). *Cisco Annual Internet Report (2018–2023)*. Cisco.
<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-738429.html>
- Edquist, H. (2022). The economic impact of mobile broadband speed. *Telecommunications Policy*, 46(5), 102351. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2022.102351>
- Edquist, H., Goodridge, P., Haskel, J., Li, X., & Lindquist, E. (2018). How important are mobile broadband networks for the global economic development? *Information Economics and Policy*, 45, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.infoecopol.2018.10.001>
- Endres, J., & Steula, M. (2024). The Impact of Fixed and Mobile Broadband Adoption on Economic Growth: A Panel Data Analysis. *Journal of Telecommunications and the Digital Economy*, 12(4), 20–44. <https://doi.org/10.18080/jtde.v12n4.1128>
- Ericsson. (2024). *5G for Enterprise Networking*. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/5g-for-enterprise-networking>
- Ericsson. (2025). *Ericsson Mobility Report, June 2025*. Ericsson AB. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/reports>
- European Commission. (2020). *CORINE Land Cover 2018 (vector), Europe, 6-yearly—Version 2020_20u1, May 2020*. EEA geospatial data catalogue.
<https://sdi.eea.europa.eu/catalogue/copernicus/api/records/71c95a07-e296-44fc-b22b-415f42acfd0>

- European Commission. (2016). *5G for Europe: An Action Plan*. European Commission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52016DC0588>
- European Court of Auditors. (2022). *5G-Einführung in der EU: Verzögerungen beim Auf- und Ausbau der Netze und ungelöste Sicherheitsprobleme*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2865/502016>
- European Environment Agency. (2021). *CORINE Land Cover Product User Manual: Version 1.0*. Copernicus Land Monitoring Service. <https://land.copernicus.eu/>
- EY, PolicyTracker, LS telcom. (2024). *Digital Decade 2024: 5G Observatory Report*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/digital-decade-2024-5g-observatory-report>
- Fezeu, R. A. K., Carpenter, J., Fiandrino, C., Ramadan, E., Ye, W., Widmer, J., Qian, F., & Zhang, Z.-L. (2023). *Mid-Band 5G: A Measurement Study in Europe and US* (arXiv:2310.11000). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.11000>
- Finley, B., Benseny, J., Vesselkov, A., & Walia, J. (2020). How does enterprise IoT traffic evolve? Real-world evidence from a Finnish operator. *Internet of Things*, 12, 100294. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100294>
- Fredricks, G. A., & Nelsen, R. B. (2007). On the relationship between Spearman's rho and Kendall's tau for pairs of continuous random variables. *Journal of Statistical Planning and Inference*, 137(7), 2143–2150. <https://doi.org/10.1016/j.jspi.2006.06.045>
- Geofabrik. (2025). *Download OpenStreetMap for Germany*. Geofabrik Download Server. <https://download.geofabrik.de/europe/germany.html>
- GSMA. (2024). *The State of Mobile Internet Connectivity 2024*. GSMA - Mobile for Development (SOMIC). <https://www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2024/10/The-State-of-Mobile-Internet-Connectivity-Report-2024.pdf>
- GSMA Intelligence. (2024). *The opportunity for operators in B2B technology services*. <https://www.gsmainelligence.com>
- Harahap, V., Kamp, L. M., & Ubacht, J. (2024). A decision support scheme for solving the mobile coverage gap in rural areas in developing countries – Demonstrated with a case in Indonesia. *Technological Forecasting and Social Change*, 207, 123600. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2024.123600>
- Herrero-Zamorano, M. T., Navío-Marco, J., Bujidos-Casado, M., & Mendieta-Aragón, A. (2026). When defines where: How rural digital divide, customers' mobility and usage patterns have shaped mobile infrastructures. *Telecommunications Policy*, 50(5), 103205. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2026.103205>
- Jha, A., & Saha, D. (2015). Techno-economic assessment of the potential for LTE based 4G mobile services in rural India. *2015 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ANTS.2015.7413612>
- Khan, F. (2009). *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511810336>
- Kheddar, H. (2022). *From 2G to 4G Mobile Network: Architecture and Key Performance Indicators* (arXiv:2210.00642). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.00642>
- Lasierra, O., Garcia-Aviles, G., Municio, E., Skarmeta, A., & Costa-Pérez, X. (2023). *European 5G Security in the Wild: Reality versus Expectations* (arXiv:2305.08635). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.08635>
- Liu, G., Huang, Y., Chen, Z., Liu, L., Wang, Q., & Li, N. (2020). 5G Deployment: Standalone vs. Non-Standalone from the Operator Perspective. *IEEE Communications Magazine*, 58(11), 83–89. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.2000230>

- Neis, P., Zielstra, D., & Zipf, A. (2011). The Street Network Evolution of Crowdsourced Maps: OpenStreetMap in Germany 2007–2011. *Future Internet*, 4(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/fi4010001>
- Neokosmidis, I., Rokkas, T., Parker, M. C., Koczian, G., Walker, S. D., Siddiqui, M. S., & Escalona, E. (2017). Assessment of socio-techno-economic factors affecting the market adoption and evolution of 5G networks: Evidence from the 5G-PPP CHARISMA project. *Telematics and Informatics*, 34(5), 572–589. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2016.11.007>
- OECD. (2004). *Development of Third-Generation Mobile Services in the OECD* (OECD Digital Economy Papers Nr. 85; OECD Digital Economy Papers, Bd. 85). <https://doi.org/10.1787/232562017400>
- Ofcom. (2019). *Economic Geography 2019—An analysis of the determinants of mobile and fixed coverage in the UK*. Ofcom. <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/research-and-data/multi-sector/infrastructure-research/connected-nations-2018/economic-geography-2019?v=321731>
- Openshaw, S. (1984). *The Modifiable Areal Unit Problem* (Bd. 38). Geo Books.
- OpenStreetMap Wiki contributors. (2025). *International highway classification equivalence—OpenStreetMap Wiki*. https://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=International_highway_classification_equivalence&oldid=2883868
- Oughton, E., Frias, Z., Russell, T., Sicker, D., & Cleavelly, D. D. (2018). Towards 5G: Scenario-based assessment of the future supply and demand for mobile telecommunications infrastructure. *Technological Forecasting and Social Change*, 133, 141–155. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.03.016>
- Oughton, E. J., Frias, Z., van der Gaast, S., & van der Berg, R. (2019). Assessing the capacity, coverage and cost of 5G infrastructure strategies: Analysis of the Netherlands. *Telematics and Informatics*, 37, 50–69. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2019.01.003>
- Panwar, N., Sharma, S., & Singh, A. K. (2016). A survey on 5G: The next generation of mobile communication. *Physical Communication, Special Issue on Radio Access Network Architectures and Resource Management for 5G*, 18, 64–84. <https://doi.org/10.1016/j.phycom.2015.10.006>
- Pigaiani, C., Freire, S., & Batista, F. (2025). *JRC-CENSUS population grid 2021*. <https://doi.org/10.2905/98336641-fd1c-4992-8c7b-c470dd5eb81e>
- Popovski, P., Trillingsgaard, K. F., Simeone, O., & Durisi, G. (2018). 5G Wireless Network Slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A Communication-Theoretic View. *IEEE Access*, 6, 55765–55779. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2872781>
- Projekträger Jülich. (2024). *Förderwettbewerb 5G.NRW*. <https://www.ptj.de/index.php?index=731>
- Puth, M.-T., Neuhäuser, M., & Ruxton, G. D. (2015). Effective use of Spearman's and Kendall's correlation coefficients for association between two measured traits. *Animal Behaviour*, 102, 77–84. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2015.01.010>
- Rochman, M. I., Sathya, V., Fernandez, D., Nunez, N., Ibrahim, A. S., Payne, W., & Ghosh, M. (2023). A comprehensive analysis of the coverage and performance of 4G and 5G deployments. *Computer Networks*, 237, 110060. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.110060>
- Sauter, M. (2022). *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: 5G New Radio und Kernnetz, LTE-Advanced Pro, GSM, Wireless LAN und Bluetooth*. Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-36963-7>
- Schumacher, A., Merz, R., & Burg, A. (2019). 3.5 GHz Coverage Assessment with a 5G Testbed. *2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Spring)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2019.8746551>
- Selian, A. N. (2001). *From 2G TO 3G - The Evolution of International Cellular Standards* (arXiv:cs/0110046). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0110046>

- Siddiqi, M. A., Yu, H., & Joung, J. (2019). 5G Ultra-Reliable Low-Latency Communication Implementation Challenges and Operational Issues with IoT Devices. *Electronics*, 8(9), 981. <https://doi.org/10.3390/electronics8090981>
- Sörries, B., Franken, M., Baischew, D., & Lucidi, S. (2020). *Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkabdeckung in der EU* [Diskussionsbeitrag]. Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste (WIK). https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Diskus/2022/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_470.pdf
- Teklemariam, M. H., & Kwon, Y. (2020). Differentiating mobile broadband policies across diffusion stages: A panel data analysis. *Telecommunications Policy*, 44(8), 102006. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.102006>
- Tse, D., & Viswanath, P. (2005). *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807213>
- Tsoulos, G., Athanasiadou, G., Nikitopoulos, G., Tsoulos, V., & Zarbouti, D. (2024). Empirical Insights into 5G Deployments in Highway Operational Environments and Comparative Performance with 4G. *Electronics*, 13(8), 1533. <https://doi.org/10.3390/electronics13081533>
- Tsoulos, G., Athanasiadou, G., Zarbouti, D., Nikitopoulos, G., Tsoulos, V., & Christopoulos, N. (2024). Empirical analysis of 5G deployments: A comparative assessment of network performance with 4G. *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, 186, 155479. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2024.155479>
- VVA, Policytracker, LS. (2022). *5G Observatory Report – 15th edition*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/5g-observatory-report-15th-edition-march-2022>
- VVA, Policytracker, LS. (2023). *5G Observatory Report – 18th edition*. <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/5g-observatory-report-18th-edition-april-2023>