

Abschlussbericht des Projekts CRR-954

**Bewertung verschiedener Mobilfunknetztopologien
im Hinblick auf die Exposition des Menschen, die
Qualität der mobilen Kommunikation und die
Nachhaltigkeit**

Margot Deruyck, German Castellanos, Wout Joseph, Luc Martens
Fachbereich für Informationstechnologie, Universität Gent, Belgien

Sven Kühn, Niels Kuster
Stiftung für die Erforschung der Informationstechnologien in der
Gesellschaft, Schweiz

Zürich, 14. September 2021

Die Namen von IT'IS und der beteiligten Forscher dürfen nur im Zusammenhang mit Aussagen oder Ergebnissen aus diesem Bericht genannt werden.

Zusammenfassung

Im Oktober 2020 beauftragte das Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) die Stiftung IT'IS mit der Evaluierung verschiedener 5G-Netztopologien in Bezug auf die Exposition des Menschen, die Qualität der mobilen Kommunikation und die Nachhaltigkeit, um die Fragen zu beantworten, die in der politischen *Motion Häberli-Koller (19.4043)* vom 30. Juli 2020 gestellt wurden. Die Studie wurde gemeinsam mit der IMEC WAVES-Gruppe des Departements für Informationstechnologie der Universität Gent, Belgien, durchgeführt und ergänzt ein früheres Projekt, das IT'IS 2019 für das Schweizer Bundesamt für Umwelt durchgeführt hat [1].

Arbeitsbeschreibung Im Vorfeld der Studie hat das BAKOM in der Arbeitsbeschreibung (Statement of Work, SoW) eine Reihe von Endpunkten festgelegt, auf die im Folgenden eingegangen wird. Die Studie wurde mit einem von der IMEC WAVES-Gruppe entwickelten Tool zur Planung von Mobilfunknetzen durchgeführt, das an die Besonderheiten des Mobilfunknetzes und der regulatorischen Situation in der Schweiz angepasst wurde. Mit diesem Tool simulierten wir eine Vielzahl von Mobilfunknetzen, um die vom BAKOM vorgegebenen Endpunkte der Studie zu erreichen. Die Simulationen umfassten 4G- und 5G-Netze in ländlichen, vorstädtischen und städtischen Umgebungen mit auf das Jahr 2030 extrapolierten Nutzungsanforderungen. Wir analysierten die Auswirkungen von getrennten Betreibern im Vergleich zu einem einheitlichen Netz, die Trennung von Innen- und Außernetzen sowie unterschiedliche Datenraten und Netze, die für eine geringe Downlink-Exposition optimiert sind. Die Exposition des Menschen gegenüber dem elektromagnetischen Feld des Mobilfunksystems wird als *Expositionsverhältnis* ausgedrückt, d. h. der induzierte zeitlich gemittelte 6-Minuten-Pegel des elektromagnetischen Feldes geteilt durch die Sicherheitsgrenzwerte in Prozent, und zwar getrennt für den Uplink (Exposition durch das eigene Mobilgerät) und den Downlink (Exposition durch das Basisstationsnetz). Alle Mobilfunknetze wurden so realisiert, dass eine Annäherung an die aktuellen Vorsorgegrenzwerte der Schweizerischen Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung eingehalten wird, d.h. die Wirkung einer Erhöhung der Vorsorgegrenzwerte wurde nicht untersucht.

Bei allen folgenden Aussagen ist zu beachten, dass der Anteil der Exposition des eigenen Mobilgeräts (Uplink) an der Gesamtexposition des Nutzers im Durchschnitt mindestens zehnmal höher ist als die Exposition im Downlink (Basisstation). Daher wird für jeden aktiven Nutzer eines Mobilgeräts eine Verringerung der Exposition im Downlink immer unbedeutend für die Gesamtexposition bleiben.

Welche Netzstrukturen sind auf Basis der heute verfügbaren Technologien (4G, 5G, Wireless Local Area Network WLAN, etc.) möglich und welchen Einfluss haben sie auf die räumliche Verteilung der Strahlenbelastung der Bevölkerung? In der vorliegenden Studie wurden Netzinfrastrukturen auf Basis der Kommunikationstechnologien 4G und 5G simuliert. Die Verwendung von WLAN als ergänzende Verbindung für den Empfang in Innenräumen wurde in den Simulationsmodellen nicht berücksichtigt, da 4G und 5G eine bessere spektrale Effizienztechnologie und Ausgangsleistungsregelung als WLAN bieten. Daher wird die Verwendung von WLAN im Hinblick auf die Netzqualität und die Verringerung der Belastung als nicht vorteilhaft angesehen. Andere Gründe wie die Netztrennung und die Kosten können für die Verwendung von WLAN sprechen.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass der Übergang von 4G zu 5G in den meisten simulierten Szenarien die Exposition der Menschen verringert und gleichzeitig eine zehnfache Kapazität bietet.

Ein vereinheitlichtes Mobilfunknetz führt zu ähnlichen Expositionsverhältnissen im Downlink wie das der größten Nutzerbasis in der Schweiz; das vereinheitlichte Netz kann jedoch doppelt so viele Nutzer bedienen. Die Vereinheitlichung des Netzes würde die Uplink-Exposition im Vergleich zur Uplink-Exposition in den Netzen der zweit- und drittgrößten Nutzerbasis in der Schweiz verbessern. Ein vereinheitlichtes Netz würde auch die Anzahl der erforderlichen Basisstationsstandorte zwischen -13% und -50% reduzieren (je nach Technologie

und Umgebung).

Insbesondere die häufig propagierten Ansätze des "St. Galler Modells", die Trennung von Innen- und Außenraumabdeckung, sollen eingehend analysiert werden. Wir haben sowohl die Abdeckung von Innen- und Außenstandorten als auch die Innen- und Außenexposition analysiert. Unsere Ergebnisse zeigen, dass eine vollständige Trennung von Innen- und Außenraumabdeckung zu einer geringeren (Faktor von

4) die Downlink-Exposition im Freien und in unversorgten Innenräumen im Durchschnitt. Die Downlink-Exposition in Innenräumen wird durch die Trennung von Innen- und Außenabdeckung nicht beeinträchtigt. Die Uplink-Exposition blieb trotz zusätzlicher Gebäudedämpfung bei getrennten Innen- und Außennetzen im gleichen Bereich. Wir haben einen Trend zu einer geringeren Uplink-Exposition (Faktor 4) der 5G-Technologie im Vergleich zu 4G festgestellt. Dieser Effekt hängt wahrscheinlich mit der Nutzung der MaMIMO-Funktionen (Massive Multiple Input Multiple Output) in 5G zusammen.

Darüber hinaus sollen die Vor- und Nachteile des Einsatzes adaptiver Antennen, auch im Hinblick auf die Datenrate und die räumliche Verteilung der Strahlenbelastung, aufgezeigt werden. Das 5G-Netz mit adaptiven Antennensystemen ist gut geeignet, die Strahlenbelastung für den Menschen zu reduzieren und gleichzeitig die Netzkapazität um den Faktor 10 zu erhöhen. Insbesondere in weniger dicht besiedelten Umgebungen verbessern adaptive Antennen das Expositionsverhältnis. In ländlicher Umgebung wird das Expositionsverhältnis um den Faktor zwei reduziert, während in städtischen und vorstädtischen Umgebungen die durchschnittliche Exposition durch den Einsatz adaptiver Antennen nicht beeinflusst wird.

Wir haben einen klaren Trend zu niedrigeren Uplink- und Downlink-Expositionsraten für die 5G-Netze mit adaptiven Antennen im Vergleich zu 4G-Netzen ohne adaptive Antennentechnologie festgestellt.

Welchen Einfluss haben die verschiedenen Netzstrukturen auf die Qualität der Mobilfunkversorgung in der Schweiz? Alle Netze in der Studie wurden mit einer Nutzerabdeckung von mindestens 95 % geplant, so dass eine fehlende Abdeckung durch zusätzliche Basisstationsstandorte kompensiert wurde. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Abdeckung mit 5G-Geschwindigkeiten im Vergleich zu 4G-Geschwindigkeiten im Durchschnitt dreimal so viele Basisstationen erfordert. Die Abdeckung nur von Außenstandorten würde den Bedarf an Basisstationen vor allem in städtischen Umgebungen und nur für 4G reduzieren. 5G wird zu einer Verdichtung der Basisstationen für die Außenabdeckung führen, die an vielen Orten bereits für die Innenabdeckung geeignet ist. Wo dies nicht ausreicht, z. B. in großen Gebäuden, kann die volle Abdeckung durch zusätzliche 5G-Indoor-Basisstationen erreicht werden.

Welchen Einfluss haben die verschiedenen Netzstrukturen auf den Ausbau der Mobilfunknetze in der Schweiz (Anzahl Antennenanlagen)? Der Übergang von einem 4G- zu einem 5G-Netz mit zehnfacher Datenbandbreite erfordert in unseren Netzoptimierungssimulationen im Durchschnitt dreimal mehr Basisstationen. Die Anzahl der Basisstationen erhöht sich um 60 % (4G) bzw. 14 % (5G), wenn im städtischen Umfeld auch Innenräume durch das Mobilfunknetz abgedeckt werden. Die Verringerung sinkt auf 20 % (4G) und 6 % (5G) für die vorstädtische Umgebung und verschwindet in der ländlichen Umgebung. Die Erweiterung der Datenübertragungskapazität um einen zusätzlichen Faktor zehn für 5 % der Nutzer führte nur zu einigen zusätzlichen Standorten für Basisstationen, aber zu einer höheren Exposition der Menschen.

Die Studie zeigte auch, dass künftige 5G-Netze ohne eine Erhöhung der Vorsorgegrenzwerte realisiert werden können. Die Anzahl der Basisstationen wird hauptsächlich durch die Datenanforderungen und nicht durch die Expositionsgrenzwerte bestimmt.

Welchen Einfluss hat die Anzahl der Mobilfunknetze auf die Strahlenbelastung der Bevölkerung oder würde ein einziges Netz zu einer geringeren Strahlenbelastung führen als drei getrennte Netze? Unsere Ergebnisse zeigen, dass eine Vereinheitlichung der Mobilfunknetzinfrastruktur die Strahlenexposition der Menschen im Vergleich zu mehreren Betreibern nicht wesentlich verändert. Allerdings könnte eine Vereinheitlichung der Netzinfrastruktur zu einer geringeren Anzahl von erforderlichen Basisstationsstandorten führen (-13 % bis -50 % je nach Umgebung und Kommunikationssystem). Aufgrund der Begrenzung

Nachhaltigkeit. Die Anzahl pro Basisstation für adaptive 5G-Antennen ist die mögliche
Standortreduzierung für 4G größer (-30 % bis -50 %) als für 5G (-13 % bis -30 %).

Wie sieht eine ideale Netzstruktur aus, um die Strahlenbelastung für die Bevölkerung zu minimieren und gleichzeitig eine gute Qualität der Mobilfunkabdeckung zu gewährleisten? Um die Exposition der Menschen gegenüber elektromagnetischen Feldern zu minimieren, sollte die Netzplanung immer sowohl die Exposition im Uplink als auch im Downlink berücksichtigen. Bei aktiven Nutzern ist die Exposition in der Aufwärtsrichtung zehnmal höher als in der Abwärtsrichtung. Unsere Ergebnisse zeigen auch, dass die Berücksichtigung der reinen Downlink-Exposition in der Planungsphase die Exposition für Nicht-Nutzer (Mitglieder der Gesellschaft ohne eigenes Mobilgerät) nicht reduziert. Ein Netz zur Minimierung der kombinierten Uplink- und Downlink-Exposition nutzt die 5G-Technologie und verfügt über eine dichte Basisstations-Infrastruktur, die lokal, z. B. in großen Gebäuden, durch Indoor-Basisstationen ergänzt wird. Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist, dass die Dichte der 5G-Basisstationen hauptsächlich durch die Anforderungen an die Abdeckung bestimmt wird, d. h. eine geringere Anzahl von Basisstationen bei höheren Grenzwerten ist nicht zu erwarten. Die gleiche Überlegung führt zu der Schlussfolgerung, dass eine Lockerung der Vorsorgegrenzwerte wahrscheinlich die Exposition im Uplink, d. h. die Gesamtexposition, erhöht.

Obwohl die Frequenzen über 6 GHz in der Schweiz noch nicht verfügbar sind, sollte die Studie auch die zukünftige Nutzung dieser Frequenzen (Millimeterwellen, in der Schweiz wahrscheinlich im Bereich 24,25-27,5 GHz) einbeziehen. Der Einsatz von Millimeterwellen-Technologien in der Schweiz ist derzeit noch nicht absehbar. Daher haben wir Millimeterwellen nicht in unser Mobilfunk-Simulationsmodell aufgenommen. Basierend auf den ersten internationalen Roll-outs ist die derzeitige Hauptanwendung von 5G-Millimeterverbindungen die *letzte Meile*. Die Anwendung der *letzten Meile* (fester drahtloser Zugang) ist nicht strikt auf die mobile Kommunikation beschränkt. Hier würden drahtlose Punkt-zu-Punkt-Verbindungen die Kupfer- oder Glasfaserverbindungen ersetzen. Da es sich um Punkt-zu-Punkt-Verbindungen handelt, ist eine Exposition von Menschen auf der *letzten Meile* unwahrscheinlich.

Kürzlich wurden die ersten mobilen Geräte (US-Modelle von Apple iPhone 12, Samsung S21) mit Millimeter-

Wellenkommunikationsmöglichkeiten auf den Markt gebracht wurden. Diese Entwicklung wird durch die Nichtverfügbarkeit des 3,5-GHz-Bandes in den Vereinigten Staaten (USA) und den Versuch, den Großteil des Datenvolumens über Millimeterwellen auszulagern, vorangetrieben. In den USA wird die Millimeterwellenkommunikation noch sehr wenig genutzt [2]. Aufgrund von Abschattungseffekten des menschlichen Körpers [3] und der stark gerichteten Strahlformung in diesem Frequenzbereich kann davon ausgegangen werden, dass auch die Nutzung von Millimeterwellen für mobile Anwendungen meist auf Sichtliniensituationen beschränkt sein wird. Dies kann die Exposition des Menschen aufgrund der hochdirektiven und adaptiven Natur der Kommunikationsverbindungen, die aus Gründen der Signalqualität erforderlich sind, verringern.

Einschränkungen der Studie Obwohl die Studie die derzeit fortschrittlichsten Simulationen zur Exposition der Nutzer in Abhängigkeit von der Netztopologie umfasst, wurden aufgrund der Einschränkungen der Instrumente und fehlender Informationen mehrere Annahmen getroffen, die im Abschnitt Methoden (Abschnitt 4) ausführlich beschrieben werden. Die Auswirkungen dieser Annahmen auf die Ergebnisse werden in Abschnitt 6 dieses Berichts im Detail erörtert.

Verbleibende Wissenslücken Im Verlauf dieser Studie haben wir zukünftige Arbeiten und Forschungsbedürfnisse identifiziert, um die verbleibenden Wissenslücken zu füllen. Sobald sich eine mögliche Anwendung von Mobilfunkwellen in der Schweiz abzeichnet, sollte deren Einfluss auf die menschliche Exposition analysiert werden. In der vorliegenden Studie haben wir harmonisierte, aber vereinfachte Modelle verwendet, um die Exposition in Innenräumen gegenüber Mobilfunknetzen zu analysieren. Um die Unsicherheiten in Bezug auf

~~Nachhaltigkeit~~ in Innenräumen zu verringern, würde eine zusätzliche Modellierung in
Innenräumen helfen, unsere Ergebnisse zu untermauern. Sie könnten zudem durch
Validierungsmessungen in den Up- und Downlinks realer 4G- und 5G-Netze in der Schweiz
gestärkt werden. Weitere Bereiche der zukünftigen Forschung umfassen die Erweiterung der
Netze mit verteiltem MaMIMO, Netze mit gemischter Technologie sowie eine realistischere
Zuweisung und Gewichtung von Nutzer- und Basisstationsstandorten.

Inhalt

1	Verzeichnis der Abkürzungen und Akronyme	7
2	Einführung und Struktur	9
3	Zielsetzungen	10
4	Methoden	11
4.1	Studienkonzept.....	11
4.2	Simulationsmatrix.....	12
4.3	Expositionssimulationstool (GRAND).....	12
4.3.1	Eingang.....	12
4.3.2	Algorithmus.....	15
4.3.3	Ausgang.....	15
4.4	Anwendungsfälle.....	15
4.5	Umgebungen.....	16
4.6	Extrapolation auf die ganze Schweiz.....	16
4.7	Szenarien.....	16
4.7.1	Schauplatz: Im Freien.....	17
4.7.2	Szenario: Innenraum.....	17
4.7.3	Szenario: Innenbereich 15 m.....	17
4.8	Netzbetreiber.....	17
4.9	Kommunikationssysteme.....	17
4.9.1	Frequenzbereiche.....	18
4.9.2	4G - Langfristige Entwicklung.....	18
4.9.3	5G - Neues Radio.....	19
4.9.4	Ausbreitungsmodelle für zellulare Netzwerke.....	21
4.10	Dosimetrie und Sicherheitsgrenzwerte.....	22
4.10.1	Vorfall E-Feld Sicherheitsgrenze.....	22
4.10.2	Induzierte Sicherheitsgrenzwerte.....	22
4.10.3	Downlink-induzierte SAR.....	22
4.10.4	Uplink-induzierte SAR.....	23
4.10.5	Expositionsquoten.....	23
4.11	Simulation Eingangsdaten.....	24
4.11.1	Geografische und bauliche Struktur.....	24
4.11.2	Standorte der Basisstationen.....	25
4.11.3	Benutzer und Verwendung.....	25
4.12	Simulation Ausgabe.....	26
5	Ergebnisse	28
5.1	Netzabdeckung und zusätzliche Anforderungen an die Basisstation.....	28
5.2	Exposition in den einheitlichen und individuellen Netzen in städtischen, vorstädtischen und ländlichen Umgebungen.....	30
5.2.1	Städtische Umwelt.....	30
5.2.2	Vorstädtische Umwelt.....	30
5.2.3	Ländliche Umwelt.....	30
5.3	Trennung von Innen- und Außenerfassung.....	33
5.4	Netzqualität und Exposition.....	36
5.5	Kommunikationstechnik.....	36

CRR-954: Bewertung verschiedener Mobilfunknetztopologien im Hinblick auf die Exposition des Menschen, die Qualität der mobilen Kommunikation und die Nachhaltigkeit	8
5.6 Ausschließliche Downlink-Optimierung	38
6 Diskussion	39
7 Schlussfolgerungen	41
Referenzen	42

1 Liste der Abkürzungen und Akronyme

3GPP3rd	Generation Partnership Project
4G4.	Generation des drahtlosen Mobilfunknetzes
5G5.	Generation des drahtlosen Mobilfunknetzes
	BLERBlockError Rate
	BPSKBinaryPhase Shift Keying
BSBase-Station	
	BWBandbreite
CAC-Träger-Aggregation	
	DLDownlink
eMBBEnhanced	Mobile Broadband
	ERExposure-Verhältnis
FDDFrequenz-Duplex	
	GbpsGiga(2^{30}) Bit pro Sekunde
GRANDGreen	Radio Access Network Design
ICNIRPInternationale	Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung
	LoSLine-of-Sight
LTELangfristige Entwicklung	
	LTE-ALongTerm Evolution - Advanced
MaMIMOMassive	Multiple-Input Multiple-Output
	MbpsMega(2^{20}) Bit pro Sekunde
MCSModulations- und Kodierungsschema	
mMTCMachine	Type Communications
	NLoSNon-Line-of-Sight
	NRNeuesRadio
ONIRSchweizerische	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender
Strahlung	QAMQuadratur-Amplitudenmodulation
QPSKQuadratur-Phasenumtastung	
	SARSpezifischeAbsorptionsrate

SDL	Zusätzlicher Down-Link (nur)
TDD	Zeitduplex
UABS	Unbemannte Luftfahrzeug-Basisstation
UL	Uplink
ULLC	Ultra-zuverlässige Kommunikation mit niedriger Latenzzeit
Wi-Fi	Wireless Fidelity - Drahtlose Netzwerkprotokolle, basierend auf IEEE 802.11
TAS	Zeitgemittelte spezifische Absorptionsrate

2 Einführung und Struktur

Im Oktober 2020 beauftragte das Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) die Stiftung IT'IS mit der Evaluierung verschiedener 5G-Netztopologien in Bezug auf die Exposition des Menschen, die Qualität der mobilen Kommunikation und die Nachhaltigkeit, um die Fragen zu beantworten, die in der politischen *Motion Häberli-Koller (19.4043)* vom 30. Juli 2020 gestellt wurden. Die Studie wurde gemeinsam mit der IMEC WAVES-Gruppe des Departements für Informationstechnologie der Universität Gent, Belgien, durchgeführt und ergänzt ein früheres Projekt, das IT'IS 2019 für das Schweizer Bundesamt für Umwelt durchgeführt hat [1].

Im Vorfeld der Studie hat das BAKOM eine Reihe von Endpunkten in der Arbeitsbeschreibung (Statement of Work, SoW) festgelegt, und die Studie wurde so konzipiert, dass sie diese Endpunkte berücksichtigt. Der Ansatz der Studie basierte auf dem von der IMEC WAVES-Gruppe entwickelten fortschrittlichen Planungswerkzeug für Mobilfunknetze und wurde auf die Besonderheiten von Mobilfunknetzen und, soweit möglich, auf die Vorschriften in der Schweiz erweitert. Die regulatorischen Rahmenbedingungen für 5G-Massive-Multi-Input-Multi-Output (MaMIMO)-Basisstationen änderten sich im Laufe der Studie [4] und konnten daher nicht direkt in das Simulationstool integriert werden. Zu Beginn des Projekts stimmte das BAKOM zu, dass die menschliche Exposition als Durchschnitt über 6 Minuten betrachtet werden sollte, wie in [5] definiert. Die Methode der Zeitmittelung berücksichtigt implizit die Wirkung der in [4] definierten *Korrekturfaktoren*. Die Verwendung der zeitlichen Mittelwertbildung ist außerdem repräsentativ dafür, wie die Exposition in modernen Mobilgeräten begrenzt wird, die die so genannte zeitlich gemittelte spezifische Absorptionsrate (TAS) zur aktiven Steuerung der Ausgangsleistung eines Mobilgeräts [6] verwenden, um die Einhaltung des Grenzwerts für die spezifische Absorptionsrate (SAR) bei der zeitlichen Mittelung über 6 Minuten sicherzustellen. Die detaillierten Ziele der Studie sind in Abschnitt 3 zusammengefasst. Die Bewertungsstrategien, die zur Erreichung der Studienziele eingesetzt wurden, werden in Abschnitt 4 beschrieben. Abschnitt 5 fasst die Ergebnisse der Simulationen zur Planung von Mobilfunknetzen mit statistischen Zusammenfassungen zusammen, um die Hauptziele dieser Studie anzugehen, d. h. die Qualität von Mobilfunknetzen, die vollständige Einführung von 5G oder eine Erweiterung von 4G, die Trennung von Innen- und Außenabdeckung sowie die Exposition des Menschen in Kombination mit allen anderen Faktoren. Ein Vergleich der Ergebnisse mit den in der wissenschaftlichen Literatur verfügbaren Daten wird in Abschnitt 6 zusammen mit einer Diskussion möglicher Einschränkungen vorgenommen. Die Schlussfolgerungen werden in Abschnitt 7 dargelegt.

3 Zielsetzungen

Ziel dieser Studie war es, eine Bewertung verschiedener Mobilfunktopologien in Bezug auf die Exposition des Menschen, die Kommunikationsqualität und die Nachhaltigkeit in der Schweiz vorzunehmen.

Konkret ging es darum, diese Netztopologien im Hinblick auf die folgenden Schlüsselaspekte zu bewerten:

- die Exposition für verschiedene Netztechnologien auf der Grundlage von 4G / 5G (und Wi-Fi, nur für Innenräume);
- die Auswirkungen der Trennung von Innen- und Außenbereichen auf die menschliche Exposition;
- die Wirkung eines einheitlichen Mobilfunknetzes im Gegensatz zu drei getrennten Netzen;
- die Auswirkung adaptiver (MaMIMO-)Antennen auf die räumliche Expositionsverteilung und die Datenraten.

Weitere Ziele der Studie waren:

- Identifizierung von Netzen, die für geringe Belastung, gute Kommunikation, Geschwindigkeit und Qualität optimiert sind;
- die Korrelation zwischen der Netzqualität und der Exposition des Menschen zu bewerten;
- die Anzahl der für die verschiedenen Topologien erforderlichen Basisstationen zu bestimmen.

4 Methoden

In diesem Abschnitt werden die Methoden beschrieben, die zur Analyse verschiedener Mobilfunktopologien und ihrer Auswirkungen auf die menschliche Belastung, die Netzqualität und die Nachhaltigkeit in der Schweiz verwendet wurden. Abschnitt 4.1 gibt einen Überblick über das Studienkonzept, und die folgenden Abschnitte gehen näher auf die angewandten Methoden ein.

4.1 Studienkonzept

Die Exposition des Menschen ("Gesamtexposition") wird in dieser Studie als die Summe der Exposition im Uplink und im Downlink im Vergleich zu ihren Sicherheitsgrenzwerten (Expositionsquotienten) betrachtet. In den meisten Fällen werden jedoch die Expositionsverhältnisse von Uplink und Downlink getrennt angegeben, um ihre Beiträge besser zu verstehen. Da frühere Studien gezeigt haben, dass die Exposition in der Aufwärtsstrecke die bedeutendste oder dominante Quelle der menschlichen Exposition [1, 7] in mobilen Kommunikationssystemen ist, wird die Metrik der Gesamtexposition verwendet. Um die Gesamtexposition zu senken, optimiert unser Netzwerkdesign-Tool das Netzwerk mit einer Gewichtung von 40 % für die Uplink-Exposition, 40 % für die Downlink-Exposition und 20 % für den Energieverbrauch des Netzwerks. Um nur die Belastung im Downlink zu senken, haben wir ein Szenario einbezogen, bei dem die Minimierung der Belastung im Uplink keine Rolle spielt. In diesem Fall wollten wir ein optimales Netzwerk in Bezug auf die menschliche Belastung für Nicht-Nutzer (Nutzer ohne eigene Mobilgeräte) bestimmen und gleichzeitig die Bedürfnisse der Mobilfunknutzer erfüllen. In diesem Szenario wurde die Minimierung der Exposition im Downlink mit 80 % und der Energieverbrauch des Netzes mit 20 % gewichtet.

Die Kommunikationsqualität wird durch die Einführung von Netzleistungskriterien behandelt, die die Anforderungen von 4G- und 5G-Mobilfunknetzen widerspiegeln, extrapoliert auf das Jahr 2030 in der Schweiz. Durch die Auswahl von drei verschiedenen geografischen Regionen (ländlich, vorstädtisch und städtisch) und die Sicherstellung, dass die Leistung mit einer Nutzerabdeckung von mindestens 95 % erfüllt wird, können die Netze in allen drei Regionen umgesetzt werden.

Die Nachhaltigkeit wird angesprochen, indem (i) die Datennutzung und die gleichzeitigen Nutzeranforderungen in unseren Bewertungen auf das Jahr 2030 projiziert werden, (ii) der Stromverbrauch des Netzes im Optimierungsprozess mit einem Faktor von 20 % gewichtet wird, (iii) die Anzahl der erforderlichen Basisstationen in getrennten und vereinheitlichten Netzen bewertet wird und (iv) die Eignung von 4G- und 5G-Netzen für die Datenkommunikationsanforderungen der Zukunft analysiert wird.

Abbildung 1 fasst die in dieser Studie angewandte Bewertungsstrategie zusammen. Auf der Grundlage der Permutationen aller Anwendungsfälle, Szenarien, Umgebungen und Netzbetreiber wird in Abschnitt 4.2 eine Simulationsmatrix erstellt. Weitere Einzelheiten zu den Untersuchungsmethoden, Eingabe- und Ausgabedaten finden sich in den Abschnitten 4.3-4.12.

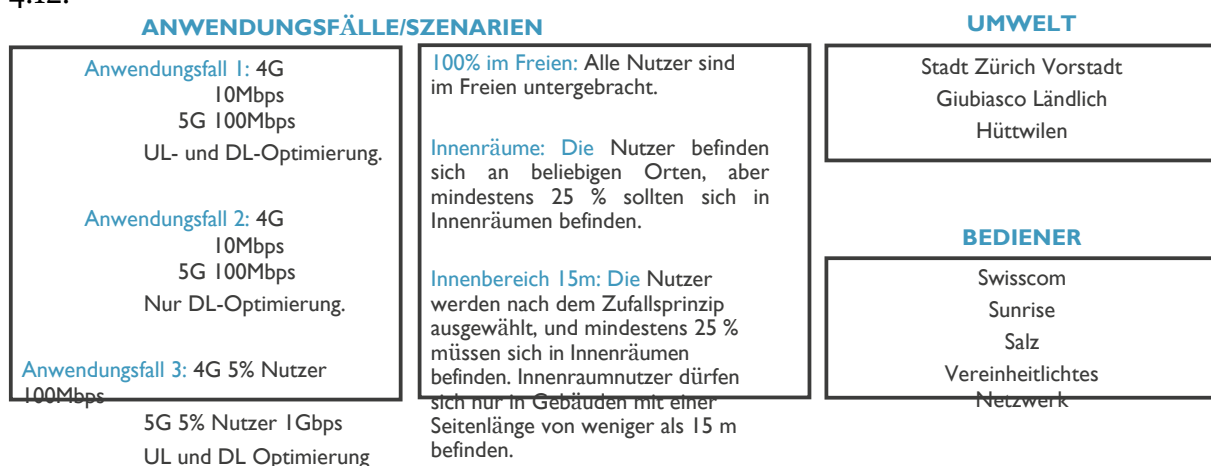


Abbildung 1: Überblick über die Bewertungsstrategie zur Optimierung von Mobilfunknetzen im Hinblick auf (i) geringe menschliche Belastung, (ii) Kommunikationsqualität und (iii) Nachhaltigkeit

4.2 Simulation Matrix

Die Abbildungen 2 und 3 geben einen Überblick über die durchgeführten Simulationen (blau hervorgehoben), basierend auf den Anforderungen an die Datenrate, den Netzbetreiber und die Technologie, die Umgebung und das Abdeckungsszenario (siehe Abb. 1). Für alle blauen Blöcke wurden Simulationen sowohl für die 4G- als auch für die 5G-Technologie durchgeführt. Alle Simulationen wurden zunächst mit dem ursprünglichen, vom jeweiligen Betreiber festgelegten Standort der Basisstation durchgeführt. Für das vereinheitlichte Netz besteht die ursprüngliche Liste der Basisstationsstandorte aus allen Basisstationsstandorten der drei betrachteten Betreiber. Wurde keine Nutzerabdeckung von 95 % erreicht, wurde eine zusätzliche Simulation mit einer erweiterten Basisstationsliste durchgeführt (siehe Abschnitt 4.11.2). Jede Simulation wurde 30 Mal wiederholt, um die Varianz und Zufälligkeit der verschiedenen Szenarien zu berücksichtigen.

4.3 Expositionssimulationstool (GRAND)

Das für diese Studie verwendete Expositionssimulationstool ist das von der WAVES-Forschungsgruppe an der Universität Gent entwickelte GRAND (Green Radio Access Network Design)-Einsatztool [8]. Das Tool entwirft drahtlose Outdoor-Zugangnetze, die hinsichtlich des Stromverbrauchs und/oder der menschlichen Belastung optimiert sind. Es ist ein kapazitätsbasierter Planer, d. h. es reagiert auf die Anzahl der aktiven Nutzer und deren momentane Bitratenanforderung. Ursprünglich wurde es für die 4G-Technologie entwickelt, aber in den letzten Jahren wurden viele Erweiterungen implementiert, wie z. B. 5G NR (New Radio) [9], MaMIMO [10], UABS (Unmanned Aerial Base Station) Netzwerkdesign [11] und erneuerbare Energiequellen und Energiekosten [12].

4.3.1 Eingabe

Da das Tool kapazitätsbasiert ist, ist es wichtig, ein realistisches Bild von der Anzahl der Nutzer, ihren Daten- und Sprachanforderungen, dem Standort und der Umgebung zu haben. Daher berücksichtigt das Tool die folgenden Eingaben (siehe auch Abb. 4):

- *Input 1 - Shapefile der Umgebung:* enthält detaillierte 3D-Informationen über die Gebäude (d. h. Lage, Form, Höhe usw.) in der gewählten Umgebung und bestimmt, ob sich ein Benutzer in LoS (Line-of-Sight) oder NLoS einer bestimmten Basisstation befindet und ob es sich um einen Innen- oder Außenbereich handelt.
- *Input 2 - Maximale Anzahl von Nutzern:* die maximale Anzahl von gleichzeitig aktiven Nutzern, die von der Bevölkerungsdichte des betrachteten Gebiets abhängt und sich im Laufe des Tages verändert. Dabei handelt es sich in der Regel um vertrauliche Daten, die von den in dem betreffenden Gebiet tätigen Mobilfunkbetreibern bereitgestellt werden.
- *Eingabe 3 - Standortverteilung:* bestimmt den Standort der aktiven Nutzer in der Umgebung. Dabei handelt es sich in der Regel um eine gleichmäßige Verteilung, bei der jeder Standort in dem Gebiet die gleiche Chance hat, als möglicher Standort ausgewählt zu werden. Sie bestimmt auch die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein Benutzer im Freien oder in einem Gebäude aufhält.
- *Input 4 - Bitratenverteilung:* definiert die von jedem Nutzer geforderte Bitrate.
- *Eingabe 5 - Zeitstempel:* Bestimmt den Zeitstempel, für den das Netz ausgelegt werden soll. In der Regel wird ein Worst-Case-Szenario betrachtet, bei dem der Zeitstempel mit der höchsten Anzahl gleichzeitig aktiver Nutzer gewählt wird.

Die Eingaben 1-5 werden in einer sogenannten Verkehrsdatei (Abb. 4, Ausgabe) zusammengefasst, die dem Tool zur Verfügung gestellt wird. Neben den Informationen über die Umgebung und den Nutzerverkehr werden dem Tool auch die Link-Budget-Parameter für die betrachtete Funktechnologie und eine Liste möglicher Basisstationsstandorte in der Umgebung zur Verfügung gestellt.

Bitrate	Netzwerk	Umwelt	Frequenz	BS-Liste	Draußen	Vollständig überdacht	Innenbereich < 15m Seitenlänge
10 Mbps/Benutzer für 4G 100 Mbps/Benutzer für 5G DL & UL Optimierung	Bediener 1	Ländlich	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
		Vorstadt	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
		Urban	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
	Bediener 2	Ländlich	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
		Vorstadt	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
		Urban	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
	Bediener 3	Ländlich	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
		Vorstadt	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
		Urban	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95		
	Vereinheitlicht	Ländlich	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
		Vorstadt	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
		Urban	800 MHz 4G 2100 MHz 4G	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
			800 MHz 5G 2100 MHz 5G 3500 MHz 5G MaMIMO	Original			
				Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95

Abbildung 2: Simulationsmatrix (blau = simuliert; rot = nicht simuliert).

Bitrate	Netzwerk	Umwelt	Frequenz	BS-Liste	Draußen	Vollständig überdacht	Innenbereich < 15m Seitenlänge	
10 Mbit/s/Benutzer für 4G 100 Mbit/s/Benutzer nur für 5G DL	Vereinheitlicht	Ländlich	800 MHz 4G	Original				
			2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95			
				800 MHz 5G	Original			
				2100 MHz 5G	Erweitert	Wenn UC<95		
		3500 MHz 5G MaMIMO		800 MHz 4G	Original			
				2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95		
		Vorstadt		800 MHz 5G	Original			
				2100 MHz 5G	Erweitert	Wenn UC<95		
		3500 MHz 5G MaMIMO		800 MHz 4G	Original			
				2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95		
		Urban		800 MHz 5G	Original			
				2100 MHz 5G	Erweitert	Wenn UC<95		
3500 MHz 5G MaMIMO		800 MHz 4G	Original					
		2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95				

95% 100 Mbps/Benutzer 5% 1 Gbit/s/Benutzer DL- und UL-Optimierung	Vereinheitlicht	Ländlich	800 MHz 4G	Original				
			2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95	
				800 MHz 5G	Original			
				2100 MHz 5G	Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
		3500 MHz 5G MaMIMO		800 MHz 4G	Original			
				2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
		Vorstadt		800 MHz 5G	Original			
				2100 MHz 5G	Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
		3500 MHz 5G MaMIMO		800 MHz 4G	Original			
				2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
		Urban		800 MHz 5G	Original			
				2100 MHz 5G	Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95
3500 MHz 5G MaMIMO		800 MHz 4G	Original					
		2100 MHz 4G	Erweitert	Wenn UC<95	Wenn UC<95	Wenn UC<95		

Abbildung 3: Simulationsmatrix, Fortsetzung (blau = simuliert; rot = nicht simuliert).

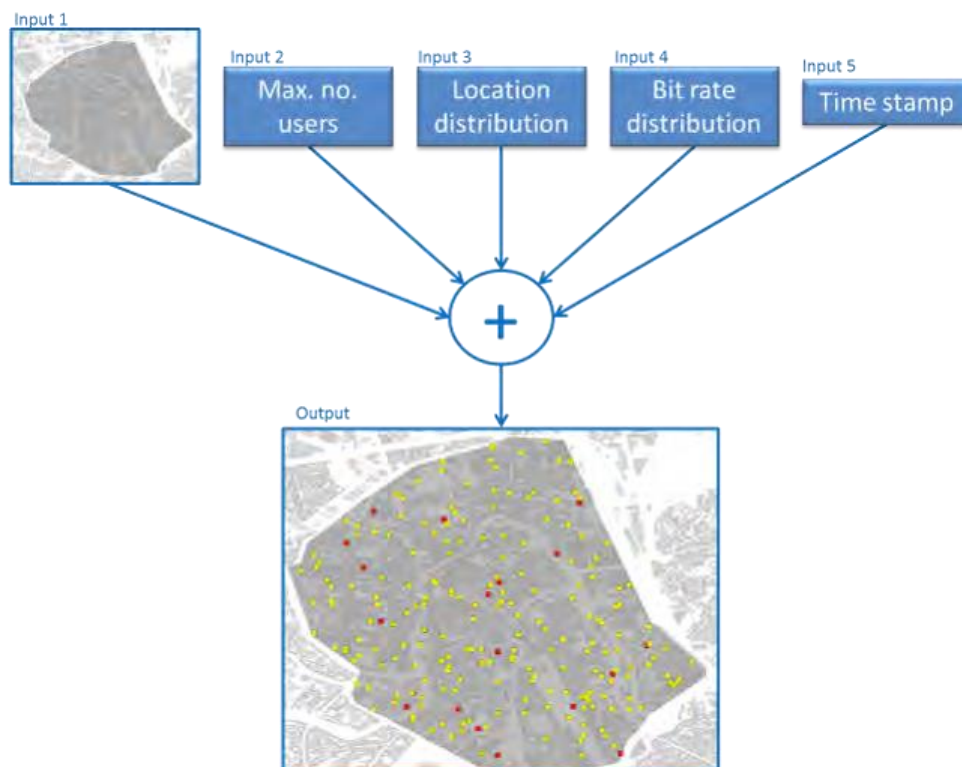


Abbildung 4: Erforderliche Eingaben für das GRAND-Tool (rote Quadrate: mögliche Standorte von Basisstationen, gelbe Quadrate: Nutzer)

4.3.2 Algorithmus

Der Entwurfsalgorithmus ist ein heuristischer Algorithmus, der die Nutzerabdeckung, den Energieverbrauch des Netzes und die Belastung der Menschen gleichzeitig optimiert. Hinsichtlich der Belastung der Menschen sind zwei Optimierungsstrategien möglich: (i) Uplink- und Downlink-Optimierung, d. h. ein "gutes" Netz für Nutzer und Nichtnutzer, und (ii) reine Downlink-Optimierung, d. h. ein "optimiertes" Netz mit geringer Exposition der Nichtnutzer, wie oben beschrieben.

4.3.3 Ausgabe

Als Ausgabe liefert GRAND verschiedene quantitative Ergebnisse wie die Anzahl der verwendeten Basisstationen, den Stromverbrauch des Netzes, die angebotene Kapazität des Netzes, die Anzahl der abgedeckten Nutzer (sowohl in absoluten Zahlen als auch als Prozentsatz), die Flächendeckung, die globale Exposition des Netzes [8], das elektrische Feld sowohl für die Abwärts- als auch für die Aufwärtsstrecke und die SAR sowohl für die Aufwärts- als auch die Abwärtsstrecke. Neben den quantitativen Ergebnissen ermöglicht das GRAND-Tool auch die Visualisierung der erhaltenen Lösungen. Einige Beispiele für diese Visualisierungen sind in Abb. 5 dargestellt.

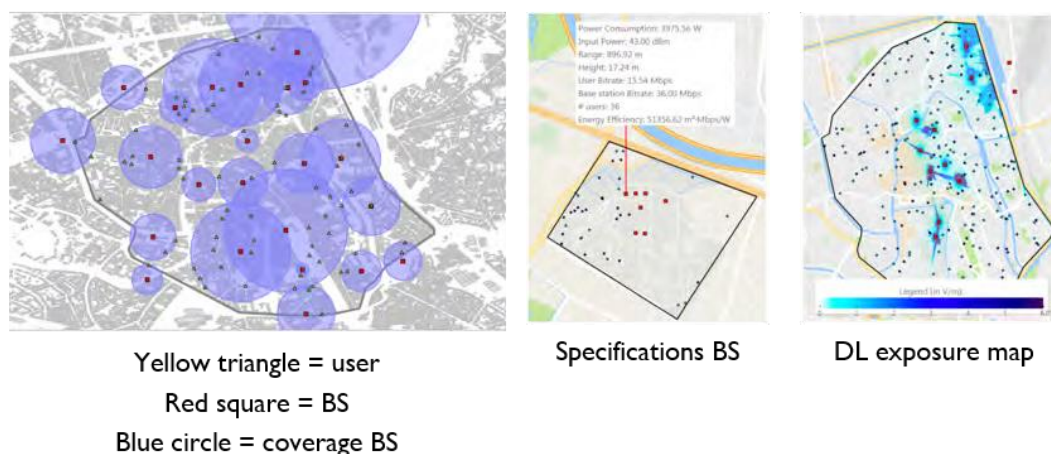


Abbildung 5: Beispiele für mögliche Visualisierungen durch das GRAND-Tool (links: optimiertes Netz, Mitte: Spezifikationen jeder Basisstation (BS), rechts: Downlink-Expositionskarte).

4.4 Anwendungsfälle

Die Studie wurde konzipiert, um verschiedene Anwendungsfälle zu analysieren, die auf den Anforderungen an die Datenbandbreite für 4G- und 5G-Kommunikationssysteme in der Schweiz basieren. Im Anwendungsfall 1 beinhalten die Anforderungen für ein 4G-Netz eine garantierte Datenrate von 10 Mbit/s für alle Nutzer, während die garantierte Datenrate auf 100 Mbit/s gesetzt wurde, um die Anforderungen an ein 5G-Netz darzustellen. In diesem Anwendungsfall wurde die Minimierung der Belastung im Up- und Downlink gleich gewichtet.

Für den Anwendungsfall 2 wurden dieselben Datenraten wie für Anwendungsfall 1 angenommen, aber das Netz wurde nur für eine geringe Belastung im Downlink optimiert. Es kann ein Netz mit der gleichen Dienstqualität wie für den Anwendungsfall 1 analysiert werden, das jedoch darauf abzielt, die Exposition der Nichtnutzer zu optimieren.

Im Anwendungsfall 3 wurde das Netz so optimiert, dass es die Spitzendatenanforderungen für 4G- und 5G-Netze, d. h. 100 Mbit/s und 1 Gbit/s, für 5 % der Nutzer erfüllt.

4.5 Umgebungen

Um unterschiedliche Bevölkerungsdichten in der Netzplanung abzubilden, haben wir Studienregionen ausgewählt, die städtische, vorstädtische und ländliche Gebiete in der Schweiz abdecken. Die verschiedenen Umgebungen werden durch die in Tabelle 1 beschriebenen Regionen repräsentiert.

Umwelt	Region	Größe km^2	Dichte pp/km^2
Urban	Zürich	70.4	5897
Vorstadt	Giubiasco (Bellinzona)	3.7	2216
Ländlich	Hüttwilen	5.9	288

Tabelle 1: Umweltregion und ihre Gebiete.

Die Karten der drei Regionen sind in Abbildung 6 dargestellt. Für eine realistische Netzplanung in diesen Regionen wurden dreidimensionale Gebäudemodelldaten erfasst und im Simulationsmodell verwendet.



Abbildung 6: Karten (nicht maßstabsgetreu) der drei simulierten Regionen (a) Zürich: städtisch, (b) Giubiasco: vorstädtisch, (c) Hüttwilen: ländlich).

4.6 Extrapolation auf die ganze Schweiz

Basierend auf den Simulationsergebnissen in den drei verschiedenen Umgebungen wurde die durchschnittliche Exposition in der Schweiz als Ganzes unter Verwendung der geografischen Verteilung der Schweizer Bürger berechnet, wenn keine regionspezifischen Ergebnisse präsentiert werden. Die Mittelwertbildung wurde mit der Bevölkerungsverteilung in der Schweiz gemäss [13] Tabelle 9 gewichtet (siehe Tabelle 2). Unter Verwendung der Bevölkerungsanteile für jede Umgebung wurden die gewichteten dosimetrischen Größen ($X_{ER_{DL}}$, $X_{ER_{UL}}$, X_{ER}) wie folgt berechnet:

$$XCH = p_{rural} \cdot X_{rural} + p_{suburban} \cdot X_{suburban} + p_{urban} \cdot X_{urban}. \quad (1)$$

Wenn die Ergebnisse nicht für ein bestimmtes Umfeld vorgelegt wurden, wurde die oben genannte gewichtete Summe angewandt.

4.7 Szenarien

Drei Netzabdeckungsszenarien wurden definiert, um Netzarchitekturen zu bewerten, die Innen- und Außenabdeckung voneinander trennen.

Umwelt	Anteil an der Bevölkerung
Urban	p_{env} 16%
Vorstadt	21%
Ländlich	63%

Tabelle 2: Bevölkerungsanteile pro Umwelt. (Quelle [13] Tabelle 9.)

4.7.1 Schauplatz: Im Freien

Für den Optimierungsprozess wurden alle Nutzer des Mobilfunknetzes nach dem Zufallsprinzip in Außenbereichen platziert. Dieses Szenario wird verwendet, um ein Mobilfunknetz zu planen, das so optimiert ist, dass es nur an Außenstandorten eine ausreichende Abdeckung bietet. Die drahtlose Versorgung in Innenräumen müsste auf andere Weise sichergestellt werden, z. B. durch separate Wi-Fi- oder 4G/5G-Femtozellen.

4.7.2 Szenario: Innenraum

In diesem Szenario wurde das Netz so optimiert, dass alle Gebäude sowohl im Freien als auch in Innenräumen vollständig von Basisstationen im Freien versorgt werden. Um dies zu ermöglichen, werden in den Simulationen mindestens 25 % der Nutzer innerhalb von Gebäuden verteilt. Der Rest (75 %) der Nutzer wird zufällig im Freien verteilt.

Die Exposition aller Nutzer wurde im Post-Processing sowohl für die kombinierte Innen- und Außenexposition zusammen als auch für die Innen- und Außenexposition getrennt ausgewertet. Durch die Trennung der Exposition im Innen- und Außenbereich kann ein Vergleich mit den anderen Netzabdeckungsszenarien, d. h. nur im Außenbereich und 15 m im Innenbereich, vorgenommen werden.

4.7.3 Szenario: Innenbereich 15 m

Dieses Szenario ähnelt dem vorherigen Szenario, allerdings ist das Mobilfunknetz nur für die Außenabdeckung und die Abdeckung kleiner Gebäude (maximale Seitenlänge < 15 m) optimiert. Bei Gebäuden, die größer als 15 m sind, geht die Studie von zusätzlichen Basisstationen in Innenräumen aus, z. B. separaten Wi-Fi- oder 4G/5G-Femtozellen, um die Abdeckung zu gewährleisten.

In diesem Szenario sind die Gebäudeverluste und die Anforderungen der Nutzer in größeren Gebäuden hoch und würden zu einer höheren Exposition im Freien führen, wenn diese von außen abgedeckt werden müssten. Wir gingen davon aus, dass das Szenario "Indoor 15 m" weniger Anforderungen an die Anzahl der erforderlichen Basisstationen in Innenräumen stellt als das Szenario "100% Outdoor".

Auch hier wurde die Exposition in der Nachbearbeitung sowohl für die kombinierte Innen- und Außenexposition als auch für die getrennte Innen- und Außenexposition bewertet.

4.8 Netzbetreiber

Die Netzbetreiber wurden so berücksichtigt, wie sie derzeit in der Schweiz in Bezug auf verfügbare Basisstationsstandorte und Marktanteile positioniert sind (siehe Abschnitte 4.11.2 und 4.11.3 für weitere Einzelheiten). Zusätzlich zu den bestehenden Betreiberetzen haben wir auch ein Unified-Netz betrachtet. Im Unified-Netz sind alle Basisstationsstandorte, die derzeit einem Betreiber zur Verfügung stehen, in der Netzplanung verfügbar. Das Unified-Netz ist außerdem so konzipiert, dass es die Summe der Nutzer und der Datennutzung aller derzeitigen Betreiber bedient.

4.9 Kommunikationssysteme

In diesem Abschnitt und den folgenden Unterabschnitten wird beschrieben, wie die verschiedenen Kommunikationssysteme 4G (LTE) und 5G New Radio im Simulationsmodell implementiert wurden.

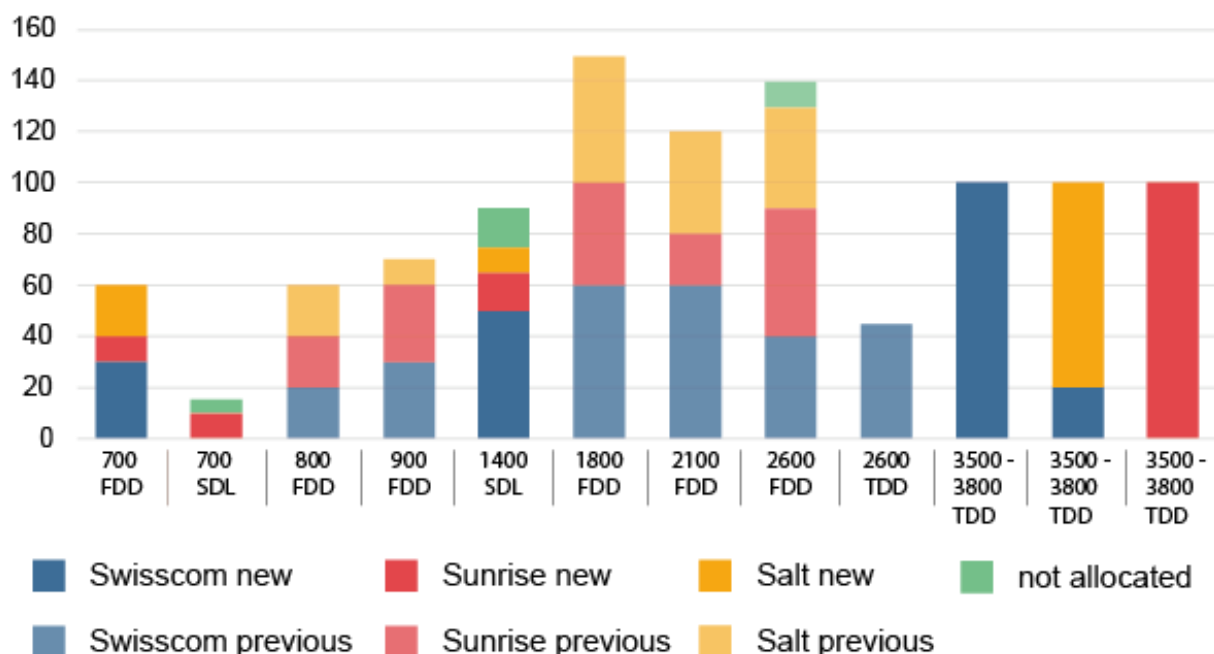


Abbildung 7: Frequenzuteilung für den Mobilfunk (5G) in der Schweiz nach der letzten Auktion im Jahr 2019 (Quelle: www.bakom.admin.ch).

	800 MHz	2100 MHz	3500 MHz
Bediener 1	30 + 20 + 30	50(SDL) + 60 + 60 + 45 + 50(TDD)	120
Bediener 2	10 + 20 + 10(SDL) + 30	15(SDL) + 40 + 20 + 50	100
Bediener 3	20 + 20 + 10	10(SDL) + 50 + 40 + 40	80

Tabelle 3: Verfügbare Bandbreiten pro simulierter Trägerfrequenz und Betreiber. SDL: gilt nur für Downlink. TDD: Bänder teilen sich denselben Frequenzbereich im Zeitduplexverfahren. Andere: verwenden Frequenzduplex, d. h. getrennte Frequenzbänder für Uplink und Downlink.

4.9.1 Frequenzbereiche

In der Schweiz stehen für den 4G- und 5G-Mobilfunk verschiedene Frequenzbereiche und -bänder zur Verfügung, die von den Betreibern gemeinsam genutzt werden (siehe Abbildung 7). Um die Anforderungen an die Simulationsgröße zu reduzieren, haben wir Frequenzbereiche mit ähnlichen Ausbreitungs- und Absorptionseigenschaften gruppiert und gleichzeitig die verfügbare Bandbreite pro Betreiber in jeder Frequenzgruppe beibehalten. Als Ergebnis haben wir drei Trägerfrequenzen bei 800 MHz, 2100 MHz für 4G und 5G und 3500 MHz nur für 5G definiert. Eine Zusammenfassung der verfügbaren Bandbreiten pro Betreiber und Träger ist in Tabelle 3 enthalten.

Auf der Grundlage dieser maximal verfügbaren Bandbreiten haben wir den verschiedenen Betreibern und Mobilkommunikationssystemen obere Bandbreitengrenzen zugewiesen (siehe Tabelle 4).

4.9.2 4G - Langfristige Entwicklung

Für 4G wurde Long Term Evolution - Advanced (LTE-A) als Technologie in Betracht gezogen. LTE-A umfasst eine Gruppe von Funktionen, die aus dem 3GPP-Release 10 [14, 15] oder später übernommen wurden, und bietet die folgenden Verbesserungen im Vergleich zu den früheren LTE-Standards:

- Erhöhung der Datenbitrate;

	800 MHz		2100 MHz		3500 MHz
	4G	5G	4G	5G	5G
Bediener 1	80	80	100	120	120
Bediener 2	60	60	100	120	100
Bediener 3	50	50	100	120	80
Vereinheitlicht	100	120	100	120	120

Tabelle 4: Obere Bandbreitengrenze pro simulierter Trägerfrequenz und Betreiber für 4G- und 5G-Kommunikationssysteme.

- Größere Flexibilität bei der Frequenzzuweisung;
- Reduzierung der Latenzzeit;
- Bessere Kommunikationseffizienz.

Eines der Hauptmerkmale von LTE-A ist die Nutzung von Carrier Aggregation (CA). CA zielt darauf ab, die Bandbreite eines Betreibers von 20 MHz bis zu 100 MHz zu maximieren, indem verschiedene Träger als Gesamtbandbreite genutzt werden, um Nutzer-Bitraten von bis zu 1 Gbit/s zu erreichen. Für diese Studie wurde ein LTE-A-Netz mit einer Trägeraggregation von bis zu fünf Trägern bei 800 MHz und 2100 MHz betrachtet, zwei Frequenzbändern, die typischerweise für 4G-Mobilfunkkommunikation verwendet werden. Eine Übersicht über alle 4G-Netzparameter ist in Tabelle 5 zu finden. Tabelle 6 zeigt die Empfängerempfindlichkeit für die verschiedenen Kombinationen von Modulations- und Kodierungsverfahren (MCS).

4.9.3 5G - Neues Radio

5G NR gilt derzeit als neuer globaler Standard für die Netze der nächsten Generation. 5G führt einen Paradigmenwechsel hin zu einem nutzer- und anwendungszentrierten Technologierahmen ein, mit dem Ziel, drei wichtige Anwendungsfälle flexibel zu unterstützen [16]:

- Enhanced Mobile Broadband (eMBB): extremer Durchsatz, verbesserte Spektraleffizienz und erweiterte Abdeckung. eMBB konzentriert sich auf datengesteuerte Anwendungsfälle, die hohe Datenraten über einen großen Abdeckungsbereich erfordern, wie z. B. VR (Virtual Reality)-Medien und -Anwendungen, Ultra High Definition oder 360-Grad-Video-Streaming.
- Machine Type Communications (mMTC): hohe Verbindungsdichte, geringe Komplexität und erweiterte Abdeckung. mMTC muss eine sehr große Anzahl von Geräten unterstützen, die möglicherweise nur sporadisch Daten in einem sehr kleinen Bereich senden. mMTC konzentriert sich auf das entstehende Internet der Dinge, in dem alles miteinander verbunden sein wird.
- Ultrazuverlässige Kommunikation mit geringer Latenz (URLLC): geringe Latenz, höchste Zuverlässigkeit und Standortgenauigkeit. URLLC-Anwendungsfälle haben strenge Anforderungen an Latenz und Zuverlässigkeit für Missionen wie Fernoperationen, autonome Fahrzeuge oder das taktile Internet.

In dieser Studie konzentrieren wir uns auf den ersten Anwendungsbereich, d. h. die eMBB. 5G NR Release 14 ermöglicht die Verwendung eines fortschrittlichen Antennen-Array-Systems mit bis zu Hunderten von Antennenelementen, die als MaMIMO bezeichnet werden, um den erzielten Durchsatz drastisch zu erhöhen. MaMIMO bündelt alle Daten und die Signalisierung in Richtung des Nutzers, was sich positiv auf das Verbindungsbudget auswirkt und Interferenzen reduziert, was zu höheren Datenraten führt. Dies ist ein ganz anderer Ansatz als bei 4G, wo die Basisstationszelle normalerweise aus drei Sektoren besteht, die jeweils 120 Grad abdecken. Der Nachteil eines solchen "breiten" Bündels besteht darin, dass das Signal, wenn es an einen einzelnen Nutzer gesendet werden soll, an den gesamten Sektor gesendet werden muss, was sich negativ auf die Verbindung auswirkt.

4G				
	Parameter	Einheit	Häufigkeit 1	Frequenz 2
Band	simulierte Frequenz	MHz	800	2100
	Kanalbandbreite (maximal verfügbar)	MHz	100	100
	verwendete Unterträger	#	6010	6010
	Gesamtunterträger	#	10240	10240
	Stichprobenfaktor	-	1536	1536
	tdd Einschaltdauer dl	%	K.A.	K.A.
	tdd Einschaltdauer ul	%	K.A.	K.A.
	räumliches Tastverhältnis	%	K.A.	K.A.
TX / RX	bs-Sendeantennengewinn (gesamt)	dBi	17	18
	bs sendegruppenantenne speiseverlust	dBi	2	2
	bs Gesamtstrahlungsleistung (neue Standorte)	dBm	43	49
	bs Anzahl der Antennenelemente	#	1	1
	ms Gewinn des Empfangsantennenelements	dBi	0	0
	ms Sendeleistung	dBm	23	23
	ms Antennenhöhe	m	1.5	1.5
	ms Anzahl der Antennenelemente	#	1	1
	Umsetzungsverlust	dB	0	0
	rx-Rauschzahl	dB	8	8
	Übergabegewinn	dB	0	0
	Geschwindigkeit	m/s	0	0
Ausbreitung	Pfadverlustmodell	-	TR 38.901	TR 38.901
	geringer Gebäudeverlust (70%)	dB	12.4	12.6
	hoher Gebäudeverlust (30%)	dB	29.8	30.2
	andere Verluste (Schatten, Fading)	dB	22.8	25.2
	Zellstörungsgrenze	dB	2	2
	Sicherheitsabstand (Benutzer-bs)	m	15	15
SNR	SNR erforderlich für 100 MBps	dB	10.5	10.5
	SNR erforderlich für 1 GBps	dB	K.A.	K.A.

Tabelle 5: Netzparameter für die Simulation von LTE (4G)-Mobilfunknetzen

Modulation	CR	SNR BLER=10%	Bandbreite/MHz			
			Bitrate /Mbps			
			50	60	80	100
BPSK	1/10	-2.0	5.0	6.0	8.0	10.0
BPSK	1/8	0.0	6.3	7.5	10.0	12.5
BPSK	1/6	1.0	8.3	10.0	13.3	16.7
QPSK	1/1	2.0	10.0	12.0	16.0	20.0
QPSK	1/2	10.5	50.0	60.0	80.0	100.0
16QAM	1/3	14.0	62.5	75.0	100.0	125
16QAM	5/12	17.0	83.3	100.0	133.3	166.7
16QAM	1/2	21.0	100.0	120.0	160.0	200.0
16QAM	3/4	29.4	216.0	256.0	348.0	438.0

Tabelle 6: Signal-Rausch-Verhältnisse und entsprechende Bitraten für LTE (4G)-Netze.

Budget und verursacht Interferenzen. Für unsere Simulationen sind wir davon ausgegangen, dass 50 % der Basisstationen in einem 5G-Netz die MaMIMO-Technologie bei einer Frequenz von 3500 MHz verwenden werden. Alle anderen Basisstationen im Netz werden nur 5G NR unterstützen und die derzeitige 4G-Technologie auf den Frequenzbändern 800 MHz und 2100 MHz ersetzen. Tabelle 7 und Tabelle 8 zeigen die Netzparameter bzw. die Empfängerempfindlichkeiten für die 5G NR-Technologie. Aus Tabelle 8 geht hervor, dass bei den Bandbreiten 50 MHz und 60 MHz die maximal unterstützte Bitrate weniger als 1 Gbit/s beträgt (kursiv hervorgehoben).

		5G			
	Parameter	Einheit	Freq.1	Freq.2	Freq.3
Band	simulierte Frequenz	MHz	800	2100	3500
	Kanalbandbreite (max. verfügbar)	MHz	120	120	120
	verwendete Unterträger	#	7680	7680	7680
	Gesamtunterträger	#	12288	12288	12288
	Stichprobenfaktor	-	1536	1536	1536
	tdd Einschaltdauer dl	%	75	75	75
	tdd Einschaltdauer ul	%	25	25	25
	räumliches Tastverhältnis	%	0	0	15
TX / RX	bs-Sendeantennengewinn (gesamt)	dBi	16	18	24
	bs sendegruppenantenne speiseverlust	dBi	2	2	3
	bs Gesamtstrahlungsleistung (neue Standorte)	dBm	46	49	53
	bs Anzahl der Antennenelemente	#	1	1	64
	ms Gewinn des Empfangsantennenelements	dBi	0	0	0
	ms Sendeleistung	dBm	23	23	23
	ms Antennenhöhe	m	1.5	1.5	1.5
	ms Anzahl der Antennenelemente	#	1	1	1
	Umsetzungsverlust	dB	0	0	3
	rx-Rauschzahl	dB	8	8	7
	Übergabegewinn	dB	0	0	0
	Geschwindigkeit	m/s	0	0	0
Ausbreitung	Wegverlustmodell	-	TR 38.901	TR 38.901	TR 38.901
	geringer Gebäudeverlust (70%)	dB	12.4	12.6	12.9
	geringer Gebäudeverlust (30%)	dB	29.8	30.2	30.6
	andere Verluste (Schatten, Fading)	dB	22.8	25.2	20
	Zellstörungsgrenze	dB	2	2	2
	Sicherheitsabstand (Benutzer-bs)	m	15	15	15
SNR	SNR erforderlich für 100 MBps	dB	0 @120 MHz	0 @120 MHz	0 @120 MHz
	SNR erforderlich für 1 GBps	dB	27 @120 MHz	27 @120 MHz	27 @120 MHz

Tabelle 7: Für die Simulation von 5G NR-Mobilfunknetzen verwendete Netzparameter.

4.9.4 Ausbreitungsmodelle für zellulare Netzwerke

Das hier verwendete Ausbreitungsmodell stammt aus der Spezifikation 3GPP TR 38.901 [17], die städtische und ländliche Umgebungen umfasst. Da kein spezielles Modell für vorstädtische Umgebungen definiert wurde, haben wir das städtische Modell für die vorstädtischen Umgebungen verwendet. Darüber hinaus haben wir für den Gebäudedurchdringungsverlust einen niedrigen und einen hohen Gebäudeverlust aus dem ECC-Bericht 302 und der ITU-R P.2109-Empfehlung [18, 19] ermittelt. In unseren Simulationen besteht eine 70-prozentige Chance auf einen niedrigen und eine 30-prozentige Chance auf einen hohen Gebäudedurchdringungsverlust, wie dargestellt

MCS Index	CQI	Modulation	CRxM Bestell ung	SNR BLER=10%	Bandbreite/MHz Bitrate /Mbps				
					50	60	80	100	120
1	2	QPSK	0.38	-3.0	44	52	70	86	98
3	3	QPSK	0.88	0.0	56	50	96	100	100
5	4	16QAM	1.48	3.0	86	100	100	170	208
7	5	16QAM	1.91	5.0	100	144	188	236	288
21	12	256QAM	5.55	27.0	416	488	664	832	1000
23	13	256QAM	6.23	29.0	486	592	774	1000	1184
27	15	256QAM	7.41	30.0	614	722	1000	1230	1498

Tabelle 8: Signal-Rausch-Verhältnisse und entsprechende Bitraten für 5G-NR-Netze. in Tabelle 5 und Tabelle 7.

4.10 Dosimetrie und Sicherheitsgrenzwerte

Im folgenden Unterabschnitt werden die Sicherheitsgrenzwerte sowie die in der Studie verwendeten dosimetrischen Größen beschrieben. Um die Fernfeldexposition durch das Antennennetz der Basisstation mit der Nahfeldexposition durch die mobilen Geräte zu kombinieren, wird die induzierte SAR als wichtigste dosimetrische Größe verwendet. Die kombinierte Exposition durch Mobilgeräte und das Netz wird durch das Expositionsverhältnis ausgedrückt, d. h. durch das Verhältnis der SAR-Werte für die Abwärts- und die Aufwärtsstrecke und die SAR-Sicherheitsgrenzwerte.

4.10.1 Vorfall E-Feld Sicherheitsgrenze

Die einfallenden elektrischen Felder wurden begrenzt, um die Beschränkungen der Schweizer Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ONIR) [20] nachzuahmen. Zur Vereinfachung des Simulationsmodells wurde für den Standort der Basisstation ein Grenzwert von 5 V/m festgelegt:

$$E_{tot} = \frac{3500}{f=900} E_{tot} \leq 5V/m. \quad (2)$$

Dieser Grenzwert wurde an allen simulierten Innen- und Außenstandorten eingehalten. Es wurde eine Schutzzone von 15 m um alle Basisstationen herum eingerichtet, in der sich keine mobilen Nutzer befanden. Innerhalb der Schutzzone können höhere Feldpegel von mehr als 5 V/m auftreten.

4.10.2 Induzierte Sicherheitsgrenzwerte

Für die Berechnung des Expositionsverhältnisses (Anteil am Sicherheitsgrenzwert) wurden die von der Internationalen Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) [5] festgelegten Sicherheitsgrenzwerte verwendet. Für die Uplink-Richtung wird der Sicherheitsgrenzwert für die lokalisierte SAR über 10 g Gewebe angewendet: $SAR_{lim_{10g}} \leq 2 W/kg$. Für die Abwärtsrichtung wird der Sicherheitsgrenzwert für die durchschnittliche Ganzkörper-SAR angewandt: $SAR_{lim_{wba}} \leq 0,08 W/kg$.

4.10.3 Downlink-induzierte SAR

Die Abwärts-SAR ($SAR_{DL_{wba}}$) des Basisstationsnetzes an einem beliebigen Nutzerstandort wird auf der Grundlage der Summe der einfallenden Leistungsdichten (S_{BS_k}) für alle k Basisstationen berechnet, multipliziert mit der SAR-Umrechnungsfaktor für die Abwärtsstrecke (SAR^{REF}):

$$SAR_{DL_{wba}} = \sum_k^a S_{BS_k} - \frac{REF}{a} SAR_{DL_{wb}} \quad (3)$$

Frequenz/MHz	SAR _{DLwba} ^{REF} / $\frac{mW/kg}{m^2}$
800	6.96
2100	5.84
3500	4.8

Tabelle 9: Downlink-SAR-Faktoren zur Umrechnung der einfallenden Leistungsdichte in ganzkörpergemittelte SAR.

Frequenz/MHz	SAR _{UL10g} ^{REF} / $\frac{W/kg}{g}$
800	0.55
2100	2.15
3500	2.26

Tabelle 10: Uplink-SAR-Faktoren zur Umrechnung der Sendeleistung des Mobilgeräts in 10 g gemittelte SAR. Basierend auf gemittelten SAR-Messergebnissen pro Frequenzband von zwei modernen Mobilgeräten.

Die SAR-Konversionsfaktoren für die Abwärtsstrecke wurden auf der Grundlage numerischer Simulationen [10] berechnet und sind in Tabelle 9 zusammengefasst.

4.10.4 Uplink-induzierte SAR

Uplink-SAR-Umrechnungsfaktoren SAR_{UL10g}^{REF} (Tabelle 10) werden zusammen mit dem mobilen Gerät (SAR^{REF}) verwendet.

Sendetastverhältnis und seine Ausgangsleistung (P_n), um die SAR des Mobilgeräts zu bestimmen:

$$SAR_{UL10g} = SAR_{UL10g}^{REF} \cdot \frac{P_n}{P_n^{REF}} \cdot DCT_{DD}^{UL} \quad (4)$$

$$P_n = 10^{\frac{\min(RX_{sens} + pl, 23)}{10}} \quad (5)$$

$$RX_{sens} = 10 \cdot \log_{10}(KTB) + NF + SNR. \quad (6)$$

Die Ausgangsleistung des Mobilgeräts ist auf 23 dBm begrenzt, und die Leistungsregelung wird in Abhängigkeit von den Pfadverlusten pl und der Empfängerempfindlichkeit RX_{sens} (in dB) durchgeführt. RX_{sens} wird als Funktion des thermischen Grundrauschens KTB , der Systemrauschzahl NF und der erforderlichen Modulation berechnet abhängig von Signal-Rausch-Verhältnis SNR . SAR_{UL10g}^{REF} wurde durch Frequenzband- und spezifische Mittelung der gemessenen SAR-Werte von zwei modernen Mobilgeräten über alle standardisierten SAR-Testpositionen [21, 22].

4.10.5 Exposure-Verhältnisse

Um die Exposition in der Aufwärts- und Abwärtsstrecke zu kombinieren, wird das Expositionsverhältnis verwendet. Im Prinzip ist das Expositionsverhältnis die Aufwärts- und Abwärts-SAR zu einem beliebigen Zeitpunkt, normiert mit den 10-g-Grenzwerten und dem durchschnittlichen Ganzkörper-SAR-Wert:

$$ER_{UL} = T_{UL} \frac{1}{T_{REF}} \frac{SAR_{UL10g}}{SAR_{lim10g}^{UL}} \quad (7)$$

$$ER_{DL} = T_{DL} \frac{1}{T_{REF}} \frac{SAR_{DLwba}}{SAR_{limwba}^{DL}} \quad (8)$$

$$ER = ER_{UL} + ER_{DL} \quad (9)$$

T_{UL} und T_{DL} werden verwendet, um die unterschiedlichen Expositionsdauern im 6-Minuten-Referenzintervall (T_{REF}) widerzuspiegeln. Für T_{DL} wird ebenfalls eine konstante Exposition über den Zeitraum von 6 Minuten angenommen. Für die

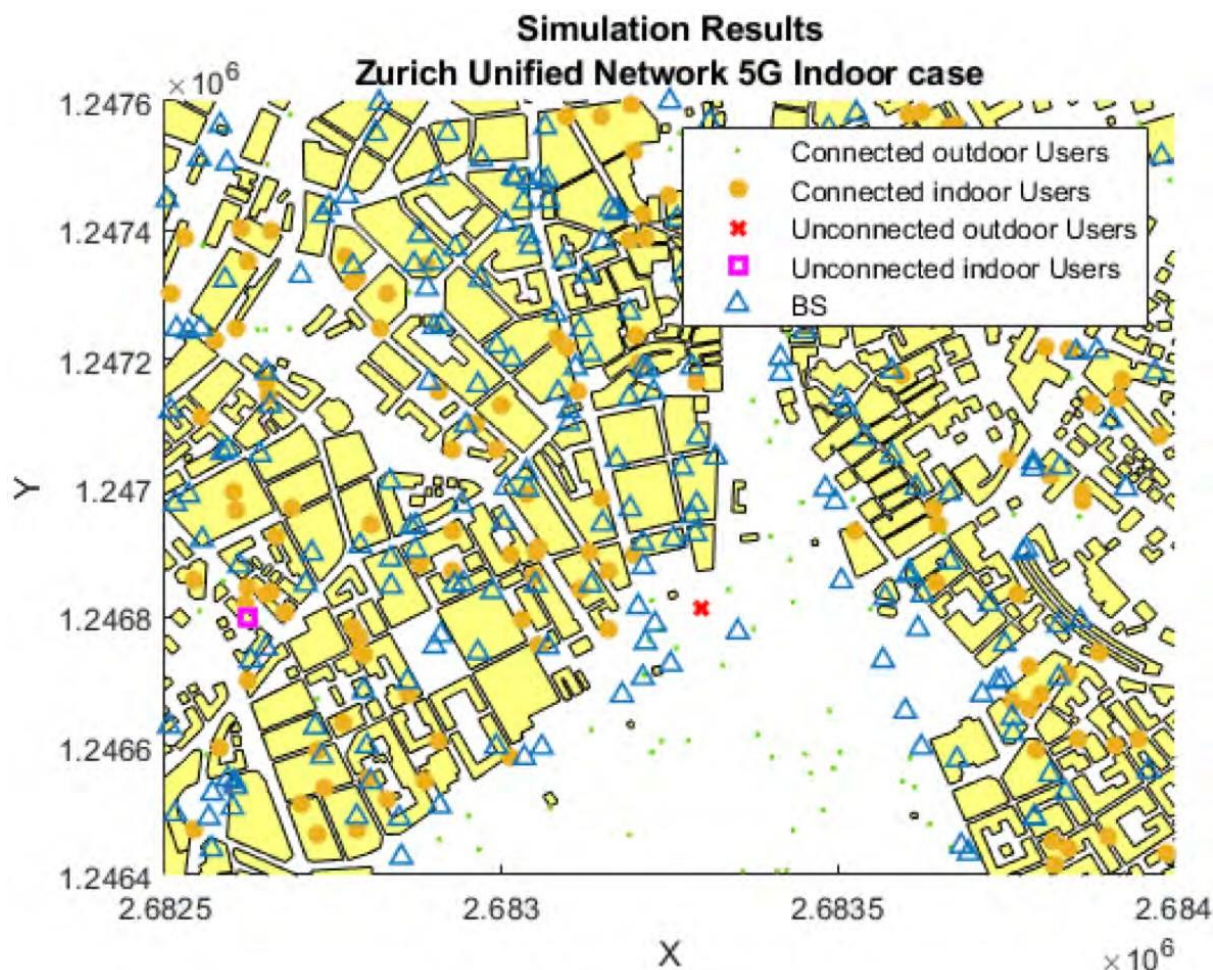


Abbildung 8: Simulationsergebnis des Innenraumszenarios mit Gebäudeformen für die Umgebung von Zürich, basierend auf topologischen Daten aus der Schweiz.

Uplink-Expositionsdauer im Referenzintervall wurde ein $T_{UL} = 3,5$ s gewählt, basierend auf Literaturdaten [23]. Wir gehen von einer homogenen Ganzkörperexposition durch das Downlink-Signal und einer lokalisierten Exposition durch das Uplink-Signal des eigenen Mobilgeräts aus. Durch die Normalisierung der SAR-Werte für die Aufwärts- und Abwärtsstrecke auf die spezifischen Sicherheitsgrenzwerte können die beiden Beiträge zu einem Gesamtexpositionsverhältnis ER addiert werden.

4.11 Simulation Eingangsdaten

In den folgenden Abschnitten werden die Quellen und die Behandlung der vom BAKOM und von den Mobilfunkbetreibern erhaltenen Inputdaten beschrieben.

4.11.1 Geografische und bauliche Struktur

Die Gebäudestrukturen wurden als 3D-Shapefiles aus [24] übernommen und in das Simulationsmodell importiert. Ein Beispiel für die Umgebung von Zürich ist in Abbildung 8 dargestellt. Für die Simulationen wurden 30 % der Gebäude nach dem Zufallsprinzip dem verlustreichen Modell nach 3GPP TR 38.901 zugeordnet. Den anderen 70% wurde das verlustarme Modell nach 3GPP TR 38.901 zugewiesen.

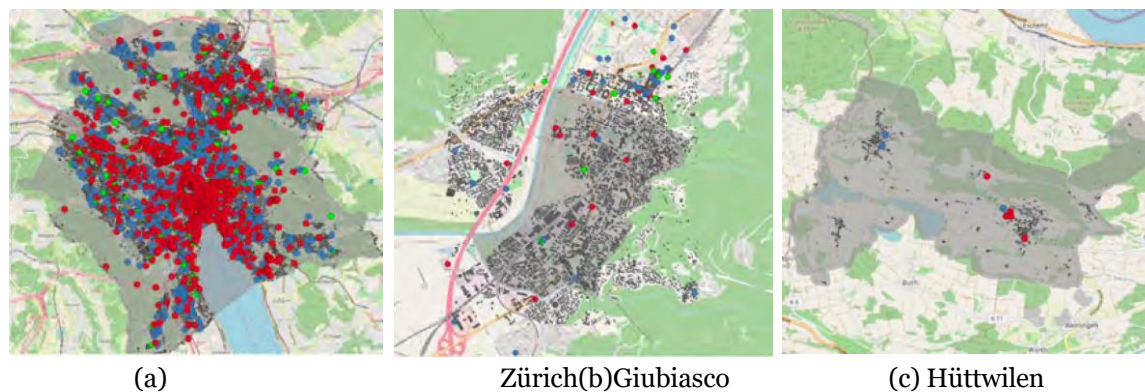


Abbildung 9: Visualisierung der Standorte der Basisstationen in den drei Untersuchungsgebieten. (Operator 1: rot, Operator 2: blau, Operator 3: grün). Die Karten sind nicht maßstabsgetreu.

Betreiber	Zürich	Giubiasco	Hüttwilen
Bediener 1	815	23	7
Bediener 2	859	29	4
Bediener 3	260	24	1
Vereinheitlicht	1898	64	12

Tabelle 11: Anzahl der Basisstationen pro Umgebung und Betreiber.

4.11.2 Standorte der Basisstationen

Die Standort- und Konfigurationsdaten der Basisstationen für die drei Untersuchungsregionen wurden vom Schweizer Bundesamt für Kommunikation (BAKOM) zur Verfügung gestellt. Von den Basisstationen haben wir alle Standorte mit positiver Höhenlage in die Studie aufgenommen. In diesem Bericht bezeichnen wir diese Standorte als Standorte. Je nach Kommunikationstechnologie können sich an jedem Standort mehrere Basisstationen befinden, die auf unterschiedlichen Frequenzen arbeiten (4G: 800 und 2100 MHz, und 5G: 800, 2100 und 3500 MHz). Während der Datenkuratierung wurden 27 Duplikate in der Umgebung von Zürich sowie 134 gemeinsame Standorte mit weniger als zehn Metern Abstand zwischen den Standorten entfernt. Die resultierenden Basisstationsstandorte pro Betreiber und Umgebung sind in Tabelle 11 zusammengefasst und in Abbildung 9 dargestellt.

Darüber hinaus wurde eine erweiterte Liste von Basisstationen erstellt, um die 95 %ige Nutzerabdeckung für alle Netze zu erreichen. Um eine ähnliche Netzdichte aufrechtzuerhalten, wurden zusätzliche Basisstationsstandorte in einer zufälligen Entfernung von der maximalen Reichweite jedes Standorts erstellt. Nachdem eine Iteration für alle Standorte abgeschlossen war, wurde die neue erweiterte Liste bewertet. In der Regel sind mehrere Iterationen erforderlich, bis die Nutzerabdeckung die 95 %-Grenze für das jeweilige Netz überschreitet.

4.11.3 Benutzer und Verwendung

Die Daten zur Nutzung des Nutzerverkehrs wurden durch Messungen eines Betreibers in Zürich, Giubiasco und Hüttwilen während 31 Tagen zwischen Oktober und November 2020 erhoben. Die Daten umfassen 243 Standorte in Zürich, 13 Standorte in Giubiasco und vier Standorte in Hüttwilen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Spitzenstunde zwischen 15 und 16 Uhr liegt und die meisten Sprachverbindungen (19150 Benutzer/Stunde) und die höchste Datenkapazität (14,5 GB/Stunde) aufweist. Wir gingen von einer durchschnittlichen Gesprächsdauer von 3 Minuten und einer typischen Nutzung mobiler Anwendungen von 214,5 KB pro Minute aus [25]. Daraus ergaben sich 1984 gleichzeitige Nutzer (963 Sprach- und 1021 Datennutzer) für diesen Betreiber in Zürich. Ein ähnliches Verfahren wurde angewandt, um 132 gleichzeitige Nutzer in Giubiasco und 50 in Hüttwilen zu ermitteln,

beziehungsweise.

Die Aufteilung des Postpaid-Mobilfunkmarktes auf Basis der Betreiberdaten vom Dezember 2020 beträgt 56,7 % für Betreiber 1, 23,9 % für Betreiber 2, 15,3 % für Betreiber 3 und 4,1 % für andere, wie in Abbildung 10 [26] dargestellt. Die Eidgenössische Kommunikationskommission (ComCom) fasst die Gesamtmarktanteile wie folgt zusammen: "Die uns vorliegenden Daten zeigen, dass Swisscom Ende 2020 einen Marktanteil von rund 56% hatte, Sunrise 25% und Salt 16%." [26]. In dieser Studie haben wir die von der ComCom geschätzten Marktanteile verwendet und den Marktanteil von CATV proportional auf die Anteile der drei Mobilfunkbetreiber verteilt.

Darüber hinaus wird bei der Projektion des Nutzerverbrauchs bis zum Jahr 2030 eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate (CARG) von 2,2 % zugrunde gelegt, die auf der Zahl der mobilen Internetnutzer [27] und der Smartphone-Nutzung in der Schweiz [28] basiert. Die prognostizierte Zahl der Nutzer für jeden Betreiber in jeder Umgebung ist in Tabelle 12 dargestellt.

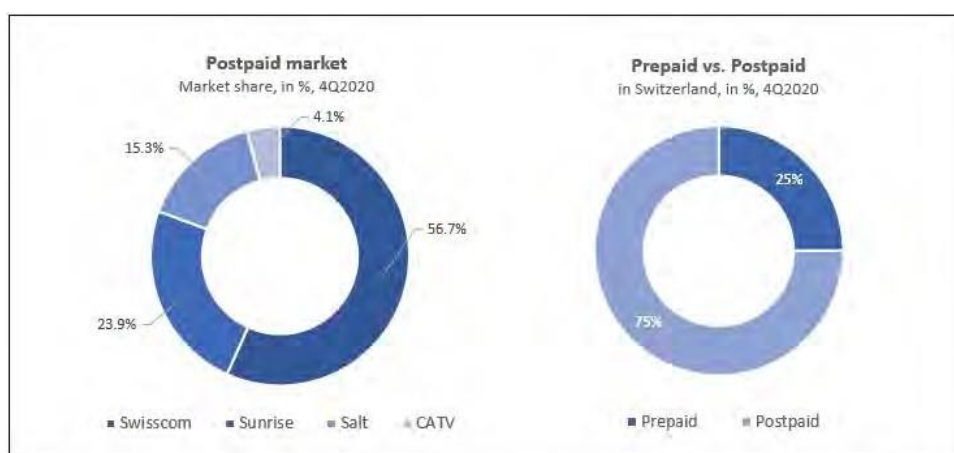


Abbildung 10: Mobilfunkmarktanteil in der Schweiz im Dezember 2020 (Quelle [26]).

Betreiber	Zürich	Giubiasco	Hüttwilen
Bediener 1	5546	369	139
Bediener 2	2466	164	62
Bediener 3	1583	105	40
Vereinheitlicht	9595	638	241

Tabelle 12: Voraussichtliche Nutzerverteilung für jede Umgebung.

4.12 Simulation Ausgabe

Wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, wurden die Nutzer in dieser Studie gleichmäßig über das betrachtete Gebiet verteilt. Dies kann jedoch zu einer Abhängigkeit zwischen den erzielten Ergebnissen und den tatsächlichen Nutzerstandorten führen. Um diese Abhängigkeit zu minimieren, werden in der Regel mehrere Durchläufe für ein einzelnes Szenario durchgeführt. Für die in dieser Studie betrachteten Szenarien wurden 30 Durchläufe als ausreichend angesehen, um diese Abhängigkeit zu vermeiden. Die Ergebnisse des Tools lassen sich, wie in Tabelle 13 dargestellt, in drei Teile unterteilen: (i) Informationen über die Nutzer, (ii) Informationen über die im Netz verwendeten Basisstationen und (iii) Informationen über den Standort der Basisstationen.

(iii) allgemeine Informationen über das Netz. Tabelle 13 zeigt die verschiedenen Parameter, die für jeden Lauf für jeden der drei oben genannten Teile erhalten wurden.

	Variabel	Beschreibung
Benutzer	Standort	X- und Y-Koordinaten des Standortes des Nutzers
	Innenbereich	Boolescher Wert, der angibt, ob der Benutzer im Haus ist (true) oder nicht (falsch)
	Angefordertes Bitrate	Vom Nutzer gewünschte Bitrate
	BS-ID	Identifiziert die Basisstation, mit der der Benutzer verbunden ist. (Leer bedeutet, dass der Benutzer nicht verbunden ist)
	DL SAR	DL SAR, die der Benutzer von der Umgebung erfährt (Basisstationen (vgl. Gleichung. (3))).
	UL SAR	UL-SAR für den Nutzer (vgl. Gleichung (4), 0, wenn unverbunden).
	ER	Expositionsverhältnis für diesen Nutzer (vgl. Gl. (9))
	E-Feld	Elektrisches Feld, das der Benutzer von der Oberfläche erfährt. (Rundung der Basisstationen)
Basisstationen	Standort	X- und Y-Koordinaten des Standortes der (aktiven) Basisstation
	Technologie	4G oder 5G (einschließlich der gewählten Frequenz)
	Maximale zulässige Leistung	Maximale Sendeleistung der Basisstation
	Übermittelte Leistung	Tatsächliche Sendeleistung der Basisstation
Netzwerk	Nr. der BS	Die Anzahl der verwendeten Basisstationen im Netz
	Bediente Benutzer	Die Anzahl der über das Netz angeschlossenen Nutzer
	Bediente Kapazität	Vom Netz bediente Kapazität
	Benutzerabdeckung	Verhältnis zwischen den angeschlossenen Nutzern und der Gesamtzahl der Nutzer in der Gegend
	Perzentile	p50, p90 und p99 Perzentile der DL SAR, UL SAR, DL ER, UL ER, ER, und EField

Tabelle 13: Beschreibung der Variablen in der Simulationsausgabedatei.

5 Ergebnisse

Die Abschnitte 5.1-5.6 fassen die wichtigsten Ergebnisse der Studie zusammen, wobei der Schwerpunkt auf den Endpunkten der Studie liegt, die in den in Abschnitt 3 beschriebenen Zielen definiert sind.

5.1 Netzabdeckung und zusätzliche Anforderungen an die Basisstation

Tabelle 14 zeigt die erreichte Nutzerabdeckung mit dem ursprünglichen Standort der Basisstation für Anwendungsfall 1 (10 Mbit/s/100 Mbit/s), dem Szenario für die Außenabdeckung für alle Betreiber und Umgebungen. Für einige dieser Netze und Umgebungen (kursiv gedruckt) lag die mit der ursprünglichen Basisstation (Abb. 9) erzielte Nutzerabdeckung unter dem angestrebten Ziel von 95 %. In diesen Fällen wurde die Anzahl der Basisstationen erweitert, bis eine Nutzerabdeckung von mindestens 95 % erreicht wurde (siehe Tabelle 15). Die Erweiterung erfolgte durch die Einführung neuer Standorte, unabhängig von der baulichen Machbarkeit an diesen Standorten.

Betreiber	Zürich		Giubiasco		Huttwilen	
	4G	5G	4G	5G	4G	5G
Bediener 1	94.5%	94.6%	94.5%	93.4%	58.9%	65.3%
Bediener 2	97.6%	97.7%	82.7%	87.5%	52.2%	50.7%
Bediener 3	96.2%	95.8%	81.8%	80.4%	26.3%	26.6%
Vereinheitlicht	98%	96.5%	98.1%	98.1%	66.8%	68.1%

Tabelle 14: Nutzerabdeckung, die von den verschiedenen Netzen mit der ursprünglichen Basisstation aus Abb. 9 erreicht wurde (fett = das Ziel einer Nutzerabdeckung von 95 % wird erreicht; kursiv = das Ziel einer Nutzerabdeckung wird nicht erreicht).

Betreiber	Zürich		Giubiasco		Huttwilen	
	4G	5G	4G	5G	4G	5G
Bediener 1	98%	98.1%	98.1%	98.1%	97.6%	97.7%
Bediener 2	K.A.	K.A.	98.2%	98.2%	97.4%	95.9%
Bediener 3	K.A.	K.A.	98.1%	98.1%	99.8%	100%
Vereinheitlicht	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	97.3%	97.1%

Tabelle 15: Von den verschiedenen Netzen mit dem erweiterten Basisstationsatz erzielte Nutzerabdeckung (N/A = die angestrebte Nutzerabdeckung von 95 % wurde bereits mit dem ursprünglichen Basisstationsatz erreicht, wie in Tabelle 14 dargestellt).

Die Tabellen 16, 17 und 18 zeigen die Anzahl der von den verschiedenen Netzen genutzten Basisstationen und die Nutzungsszenarien, um eine Nutzerabdeckung von 95 % zu erreichen. Im Allgemeinen (sowohl für das einheitliche Netz als auch für die Betreibernetze) benötigt das 5G-Netz im Durchschnitt etwa dreimal so viele Basisstationen wie das 4G-Netz, um den gleichen Grad an Nutzerabdeckung zu erreichen. Für das Szenario der Outdoor-Abdeckung (Tabelle 16) mit der Basisdatenrate benötigt das 5G-Netz in der Stadt Zürich einen Faktor von 3,35 mehr Standorte im Vergleich zu einem Faktor von 2,5 in Giubiasco und Huttwilen. Das 5G-Netz in der städtischen Umgebung (d. h. in Zürich) erfordert mehr Standorte, um die höhere Anzahl von NLoS-Situationen (Non-Line-of-Sight) im Vergleich zu den anderen Umgebungen zu kompensieren. Darüber hinaus beträgt die Benutzeranforderung im 5G-Szenario 100 Mbit/s, was zehnmal höher ist als die 10-Mbit/s-Anforderung im 4G-Szenario. Um eine so hohe Datenrate zu liefern, muss das Netz dichter sein. Darüber hinaus können die 5G-MaMIMO-Basisstationen nur eine begrenzte Anzahl von acht Nutzern unterstützen.

Die Vereinheitlichung des Netzes hat einen positiven Einfluss auf die Anzahl der Basisstationen in einer bestimmten Umgebung. Für alle Umgebungen gilt, dass die Summe der erforderlichen

der einzelnen Betreiber ist höher als die Anzahl der für das einheitliche Netz erforderlichen Basisstationen. Für 4G sind für das einheitliche Netz 41 %, 50 % und 30 % weniger Basisstationen erforderlich als für die Summe der getrennten Netze in den Szenarien Stadt, Vorstadt und Land. Für 5G wurden entsprechende Reduzierungen von 30 %, 26 % und 13 % festgestellt. Wie bereits erwähnt, wird in 5G-Netzen eine geringere Anzahl von Nutzern pro Basisstation unterstützt.

Betreiber	Zürich		Giubiasco		Huttwilen	
	4G	5G	4G	5G	4G	5G
Bediener 1	167	521	16	32	5	13
Bediener 2	67	214	6	16	3	6
Bediener 3	38	120	8	18	2	4
Vereinheitlicht	161	595	15	49	7	20

Tabelle 16: Anzahl der genutzten Basisstationen für Szenarien mit reiner Außenabdeckung für die drei Betreiber und das einheitliche Netz in den drei verschiedenen Umgebungen.

Durch die Ergänzung des einheitlichen Netzes um die Innenraumabdeckung (Tabelle 17) erhöht sich die Anzahl der erforderlichen Basisstationen für die 4G-Netze in Umgebungen mit hoher Bebauungsdichte (städtisch: +60 %, vorstädtisch: +20 %, ländlich: +0 %). Für die 5G-Netze ist der Bedarf an zusätzlichen Basisstationen viel geringer (städtisch: +14 %, vorstädtisch: +6 %, ländlich: +5 %). Bei 5G wird die Dichte der Basisstationen durch die hohen Anforderungen an die Datenrate bestimmt, so dass die zusätzlichen Gebäudeverluste kaum Auswirkungen auf die Netze haben.

Betreiber	Zürich		Giubiasco		Huttwilen	
	4G	5G	4G	5G	4G	5G
Draußen	161	595	15	49	7	20
Innenbereich	258	680	18	52	7	21
Indor 15 m	268	684	18	52	7	20

Tabelle 17: Anzahl der genutzten Basisstationen beim Hinzufügen der Szenarien "Indoor" und "Indoor 15 m Abdeckung" zum Szenario "Outdoor" für das vereinheitlichte Netz.

Tabelle 18 zeigt die Anforderungen an die Basisstationen für 5 % der Nutzer, die mit 4G- und 5G-Spitzenraten (100 Mbit/s, 1 Gbit/s) versorgt werden. In der städtischen Umgebung ist eine höhere Anzahl von Basisstationen erforderlich als im Szenario mit der Basisdatenrate. Insgesamt ist der relative Anstieg der Anzahl zusätzlicher Basisstationen zur Unterstützung der hohen Datenrate gering.

Es gibt Fälle, in denen die Anzahl der Basisstationen in den Netzen mit hoher Datenrate geringer ist als im Szenario mit niedriger Datenrate (in Städten, in Innenräumen und in Vororten sowie in Innenräumen in 15 m Entfernung). Der Grund dafür ist, dass wir eine Nutzerabdeckung zwischen 95 % und 100 % zulassen. In all diesen Fällen sank die Nutzerabdeckung im Vergleich zum Szenario mit der Basisdatenrate um durchschnittlich 1 %, was zu einer geringeren Anzahl von Basisstationen führte.

Betreiber	Zürich		Giubiasco		Huttwilen	
	4G	5G	4G	5G	4G	5G
Draußen	201	702	12	45	8	21
Innenbereich	207	802	18	52	8	21
Indor 15 m	230	751	18	52	8	21

Tabelle 18: Anzahl der genutzten Basisstationen in den Szenarien "100 % Außenbereich", "Innenbereich" und "Innenbereich 15 m" für den Fall einer hohen Bitrate (100 Mbit/s, 1

5.2 Exposition in den einheitlichen und individuellen Netzen in städtischen, vorstädtischen und ländlichen Umgebungen

Abbildung 11 zeigt die statistischen zusammenfassenden Werte (p_{50} , p_{90} und p_{99}) des Expositionsverhältnisses sowohl im Uplink als auch im Downlink für den Anwendungsfall 1 im Szenario der Außenabdeckung für alle Betreiber. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse für jede Umgebung separat analysiert.

5.2.1 Städtische Umwelt

In der städtischen Umgebung ist das maximale Expositionsverhältnis im Uplink (p_{99}) für alle Netze (alle Betreiber und einheitlich) ähnlich, da es von der maximalen Ausgangsleistung des Mobilgeräts dominiert wird. Eine städtische Umgebung ist in der Regel durch das Vorhandensein vieler Gebäude gekennzeichnet, was zu weniger Sichtlinienbedingungen (Line-of-Sight, LOS) führt. Daher gibt es viele Orte, an denen das mobile Gerät die volle Leistung nutzen muss, um die Basisstation zu erreichen. Bei Betrachtung der Werte p_{50} und p_{90} wird die geringste Belastung im Uplink von Betreiber 1 erreicht. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass Betreiber 1 die größte und dichteste Gruppe von verfügbaren Basisstationsstandorten hat, was die Entfernung zwischen der Basisstation und dem Nutzer verringert und somit die Belastung im Uplink reduziert. Vergleicht man jedoch das Uplink p_{50} Expositionsverhältnis des vereinigten Netzes mit dem Wert von Betreiber 1, so stellt man eine höhere Uplink-Exposition für das vereinigte Netz fest. Dies ist auf die größere Anzahl von Nutzern zurückzuführen, die das vereinigte Netz bedienen muss (Summe aller Nutzer aller Betreiber). Während Betreiber 1 6,8 Nutzer pro verfügbarer Basisstation versorgen kann, kann das vereinigte Netz nur fünf Nutzer pro Basisstation versorgen, so dass das vereinigte Netz die Abdeckung im Durchschnitt mit einer höheren Uplink-Leistung aufrechterhält.

Für alle betrachteten Netze sind die maximalen Expositionsverhältnisse im Downlink (p_{90} , p_{99}) um einen Faktor 10 niedriger als die Expositionsverhältnisse im Uplink und nähern sich dem Faktor 100 für den Durchschnittswert (p_{50}). Das Expositionsverhältnis im Downlink für das einheitliche Netz und Betreiber 1 ist aufgrund einer ähnlichen und sehr dichten Netzstruktur sehr ähnlich. Da die Nutzer von Betreiber 2 und 3 im Allgemeinen weiter von den Basisstationen entfernt sind, sind ihre Expositionsraten im Downlink niedriger als im einheitlichen Netz und im Netz von Betreiber 1.

Die Gesamtbelastung der aktiven Nutzer, unabhängig vom Betreiber, wird in hohem Maße von der Uplink-Belastung (der Belastung durch das eigene Mobilgerät) dominiert, da der Anteil der Uplink-Belastung um einen Faktor von *mehr als* 10 höher ist als der Anteil der Downlink-Belastung (siehe oben). In diesem Fall ist ein dichteres Netz, wie es von Betreiber 1 oder dem einheitlichen Netz bereitgestellt wird, die bevorzugte Wahl.

5.2.2 Vorstädtische Umwelt

In der vorstädtischen Umgebung sind die relativen Unterschiede zwischen den Verhältnissen in der Aufwärts- und Abwärtsrichtung ähnlich wie in der städtischen Umgebung. Die durchschnittlichen Expositionsverhältnisse sind jedoch niedriger als im städtischen Szenario. Für die Abwärtsstrecke hängt dies mit der allgemein größeren Entfernung zwischen der Basisstation und den Nutzern zusammen. Für den Uplink ist dies durch mehr LOS-Situationen bedingt.

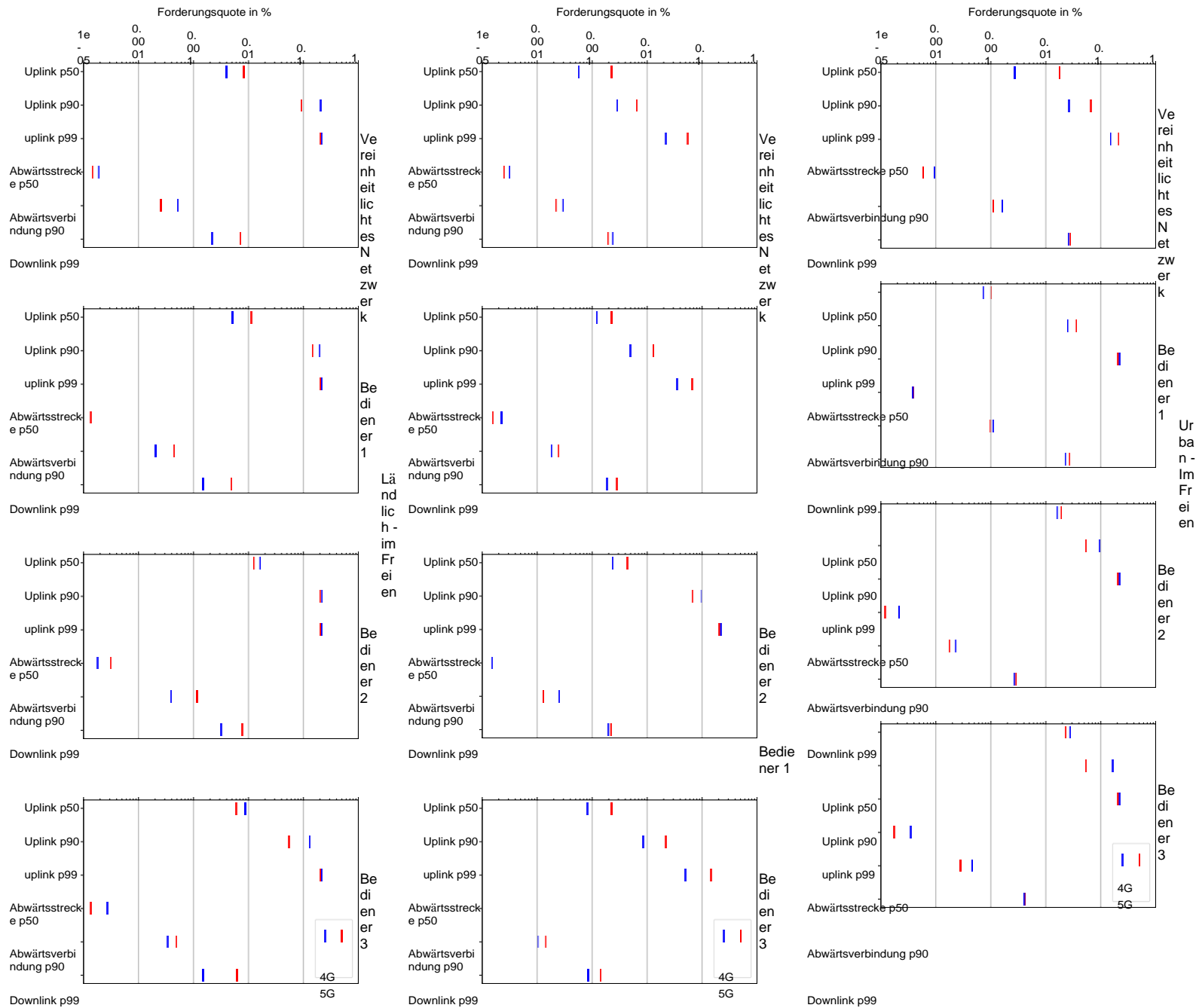
5.2.3 Ländliche Umwelt

In der ländlichen Umgebung gibt es im Allgemeinen mehr Uplink-Situationen mit hoher Belastung. Sowohl der p_{90} als auch der p_{99} liegen auf ähnlich hohen Werten. Auch die p_{50} Werte für die Uplink-Exposition sind höher als in den Städten und Vorstädten. Dies hängt mit den größeren Entfernungen zwischen der Basisstation und den Nutzern als in den anderen Umgebungen zusammen, während die Expositionswerte im Downlink in der ländlichen Umgebung denen in der vorstädtischen Umgebung sehr ähnlich sind.

~~Nachteiligkeit~~ das vereinheitlichte Netz mit den anderen Netzen, so verursachen das
vereinheitlichte Netz sowie das Netz von Betreiber 1 nur in der städtischen Umgebung eine
spürbar höhere Downlink-Belastung aufgrund der

die Nähe der Nutzer in diesen dichten Basisstationsnetzen, aber nicht in den anderen Umgebungen. In städtischen und vorstädtischen Umgebungen tragen die dichteren Netze von Betreiber 1 und das vereinheitlichte Netz dazu bei, die Exposition in der Aufwärtsrichtung zu verringern. Aufgrund der Dominanz des Expositionsverhältnisses in der Aufwärtsrichtung gegenüber dem Expositionsverhältnis in der Abwärtsrichtung führen das vereinheitlichte Netz und das Netz von Betreiber 1 zu den niedrigsten Expositionsverhältnissen insgesamt.

Abbildung 11: Uplink- und Downlink-Exposure-Verhältnisse zwischen verschiedenen Betreibern und einem einheitlichen Netz in den drei verschiedenen Umgebungen für Szenario 1 (10 Mbit/s / 100 Mbit/s) für optimierte Netzstrukturen.



CRR-954: Bewertung verschiedener Mobilfunknetztopologien im Hinblick auf die Exposition des Menschen, die Qualität der mobilen Kommunikation und die Nachhaltigkeit.

5.3 Trennung von Innen- und Außenerfassung

Die Abbildungen 12 und 13 fassen die Uplink- und Downlink-Expositionsverhältnisse für verschiedene Netzabdeckungsszenarien im Innen- und Außenbereich des einheitlichen Netzes zusammen. Abbildung 12 enthält die Ergebnisse für ein Netz mit der Basisdatenrate (10 Mbit/s / 100 Mbit/s, d. h. Anwendungsfall 1), während Abbildung 13 die Ergebnisse für Anwendungsfall 3, d. h. 100 Mbit/s (4G) und 1 Gbit/s (5G) Spitzendatenraten für 5 % der Nutzer zeigt. Die Ergebnisse sind für die drei Abdeckungsszenarien Außenbereich, Innenbereich und Innenbereich 15 m getrennt. Statistische Zusammenfassungen werden durch die Werte p_{50} , p_{90} , p_{99} dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Downlink-Exposition an Außenstandorten um den Faktor 10 steigt, wenn

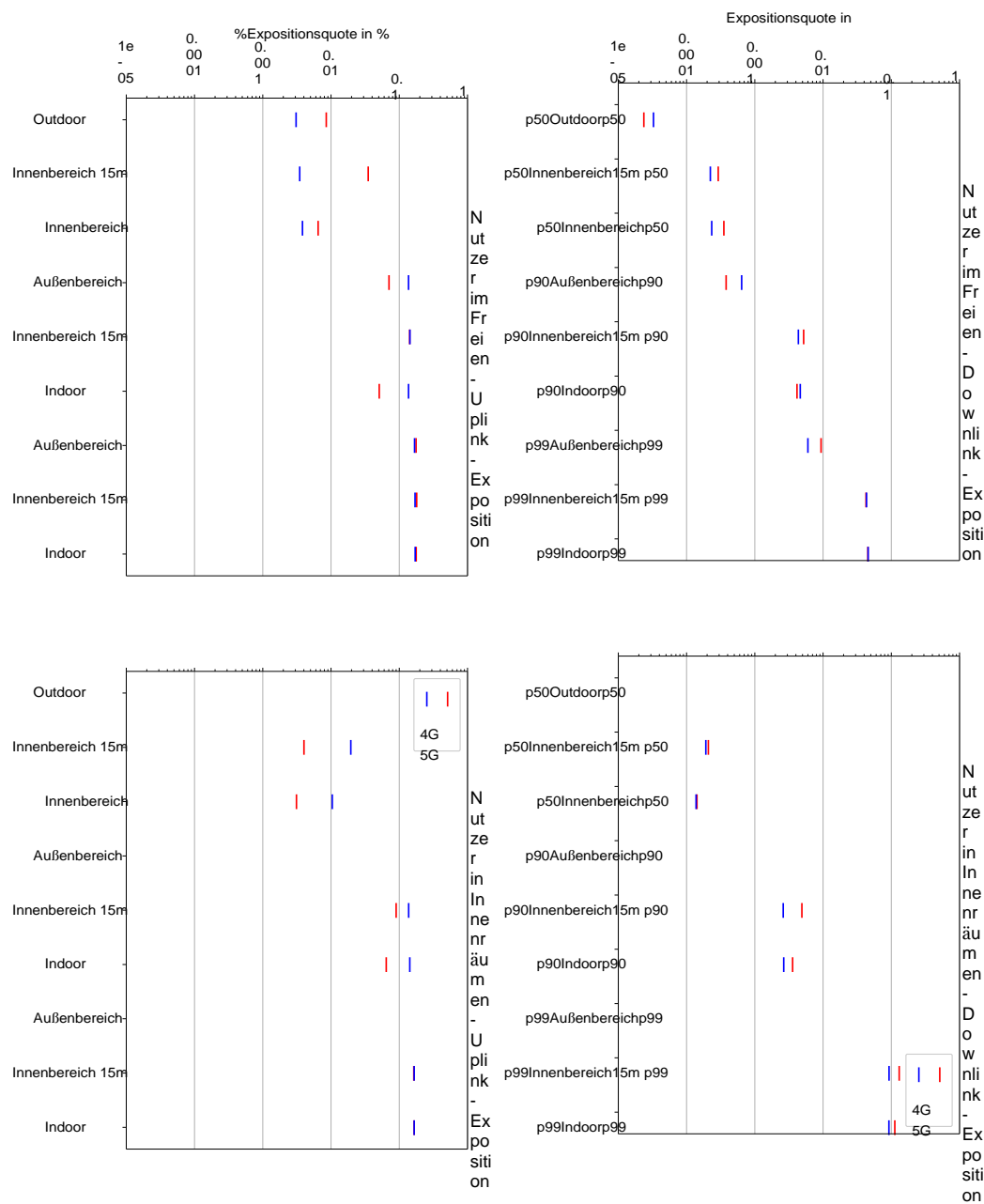
müssen auch Innenstandorte abgedeckt werden. In den Szenarien mit Innenraumabdeckung bleibt die Downlink-Exposition für Innenraumstandorte ebenfalls höher als die Downlink-Exposition für Außenstandorte im Szenario mit Außenabdeckung. Die Exposition in Innenräumen in den Szenarien mit Innenraumabdeckung ist jedoch geringer als die Exposition im Freien in diesen Szenarien.

Die Expositionswerte für Uplink p_{90} und p_{99} liegen nahe dem Höchstwert von ER_{uplink} 0,2 %. Die durchschnittlichen Expositionswerte (p_{50}) liegen für alle Versorgungsszenarien und Nutzerstandorte im gleichen Bereich. Nutzer im Freien sind im Allgemeinen niedrigeren durchschnittlichen (p_{50}) Uplink-Expositionsraten in 5G als in 4G ausgesetzt (Faktor 1,5 bis 2), während in Innenräumen die 5G-Uplink-Expositionsraten höher sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei den geplanten Szenarien für die Innen- und Außenabdeckung nur die Downlink-Exposition im Freien bei einem Netz, das nur die Außenabdeckung garantiert, reduziert wird. Auf der Grundlage der in Abschnitt 5.1 vorgestellten Ergebnisse wird jedoch auch ein 5G-Netz, das nur den Außenbereich abdeckt, einen erheblichen Teil der Innenbereiche abdecken. Diese Schlussfolgerung wird auch durch die geringen Unterschiede zwischen der Abdeckung aller und nur kleiner Gebäude gestützt. Da die Uplink-Exposition in allen Abdeckungs- und Datenraten-Szenarien sehr ähnlich und im Vergleich zur Downlink-Exposition dominant ist, führt eine Trennung von Innen- und Außenabdeckung in den simulierten Szenarien nicht zu einer geringeren Exposition der Menschen.

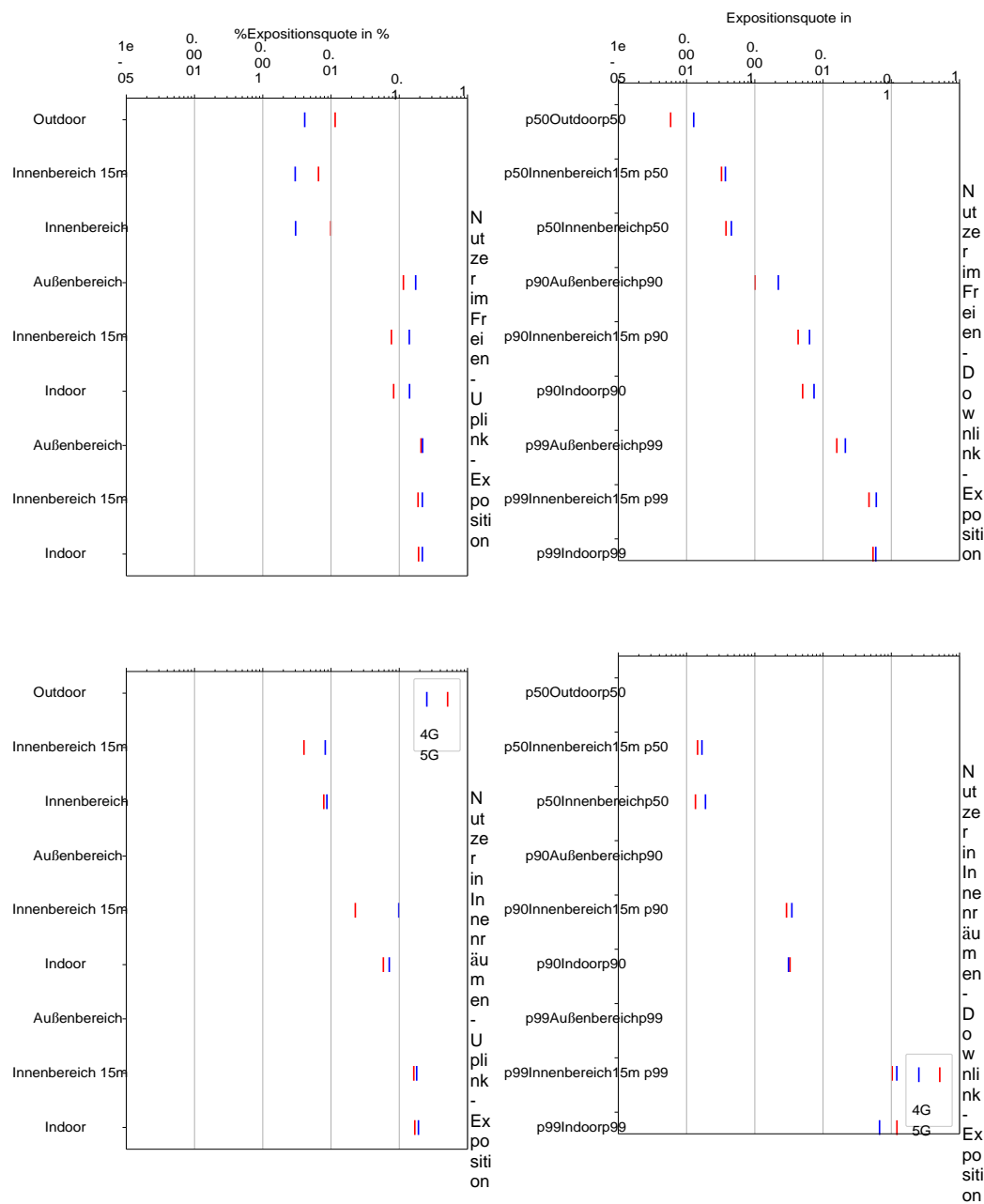
Abbildung 12:

Expositionsverhältnisse für Nutzer im Freien und in Gebäuden für verschiedene Szenarien der Netzoptimierung in Gebäuden und im Freien für das Szenario der Basisdatenrate



CRR-954: Bewertung verschiedener Mobilfunktopologien im Hinblick auf die Exposition des Menschen, die Qualität der mobilen Kommunikation und die Nachhaltigkeit

Abbildung 13: Expositionsverhältnisse für Nutzer im Außen- und Innenbereich für verschiedene Szenarien der Netzoptimierung im Innen- und Außenbereich für das Szenario mit hoher Datenrate (Anwendungsfall 3) (d.h. 100 Mbit/s (4G) und 1 Gbit/s (5G) Spitzenleistung)



CRR-954: Bewertung verschiedener Mobilfunktopologien im Hinblick auf die Exposition des Menschen, die Qualität der mobilen Kommunikation und die Nachhaltigkeit

5.4 Netzqualität und Exposition

Abbildung 14 zeigt die Expositionsverhältnisse im Uplink und im Downlink für verschiedene Netzqualitäten in Bezug auf die Datenrate. Die Expositionsergebnisse werden für eine Ziel-Basisdatenrate von 10 Mbit/s (4G) und 100 Mbit/s (5G) für alle Nutzer sowie Ergebnisse für zehnfach höhere Datenraten für 5 % der Nutzer, d. h. 100 Mbit/s (4G) und 1 Gbit/s (5G), gezeigt. Der Vergleich der Expositionsverhältnisse im Downlink für das Szenario mit hoher Datenrate und das Szenario mit der Basisdatenrate zeigt ähnliche Ergebnisse mit einem Trend zu einer höheren durchschnittlichen Exposition im Downlink p_{50} (+15 % bei 4G und +100 % bei 5G). Der größte Anstieg der Exposition im Downlink ist in der städtischen Umgebung zu verzeichnen (+49 % bei 4G und +153 % bei 5G). Die p_{99} Werte der Downlink-Expositionsverhältnisse werden durch hohe Expositionsverhältnisse von Nutzern im Freien in den Szenarien mit Innenraumabdeckung, die in diesen Daten enthalten sind, bestimmt. Die durchschnittlichen Uplink-Expositionsraten für p_{50} im Szenario mit hoher Datenrate sind bei 4G um 28 % und bei 5G um 80 % höher als im Szenario mit Basisrate. Im Szenario mit hoher Datenrate ist die Exposition im Uplink höher und nähert sich den Höchstwerten für den p_{90} -Wert in den Vororten und Städten. Dieser Effekt hängt mit einem höheren erforderlichen Signal-Rausch-Verhältnis und damit einer höheren Ausgangsleistung der Mobilgeräte zusammen.

5.5 Kommunikationstechnik

Abbildung 14 kann auch verwendet werden, um die Abhängigkeit der Expositionsverhältnisse vom Kommunikationssystem zu vergleichen.

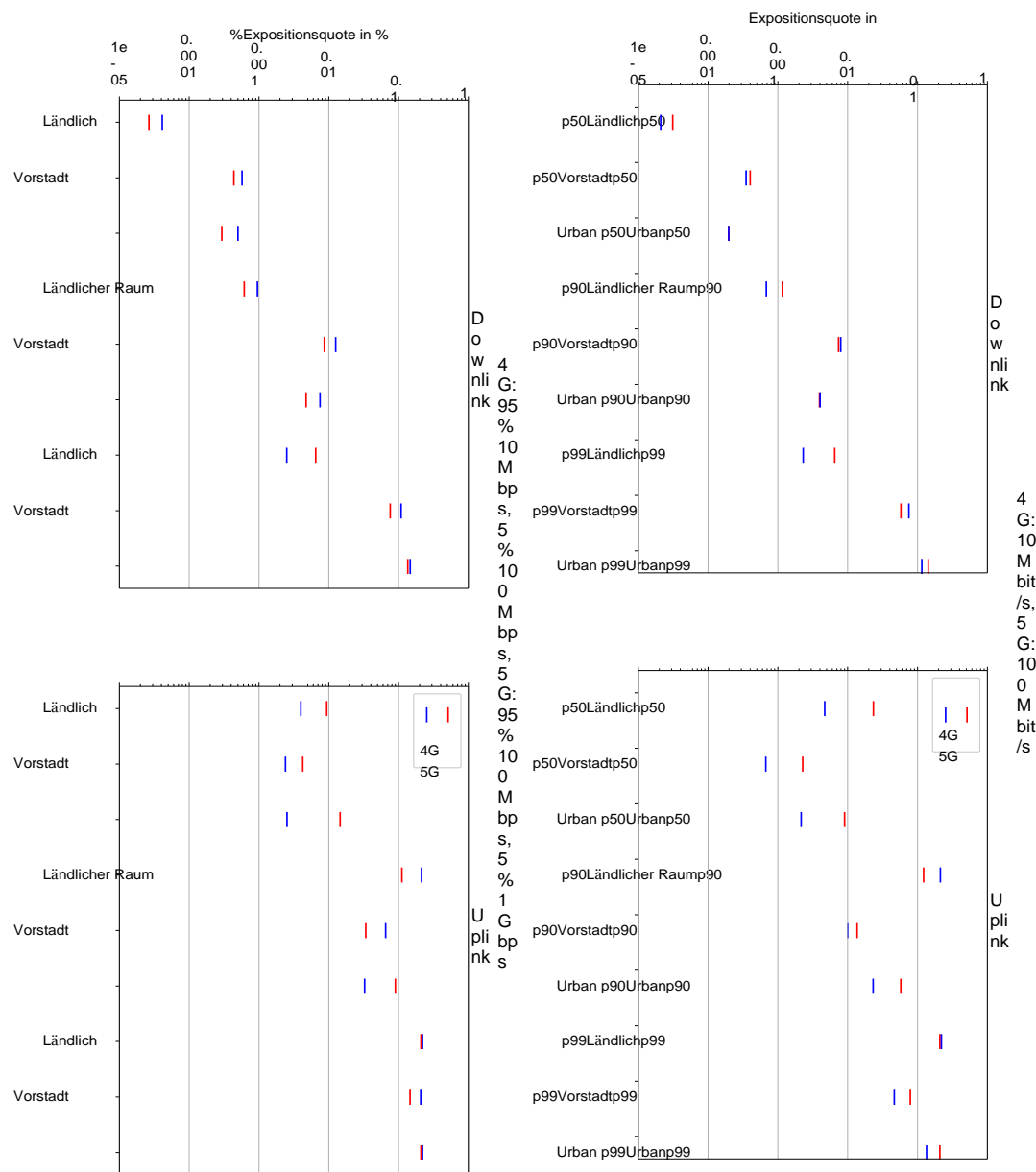
In der Downlink-Richtung des Basisdatenraten-Szenarios gibt es keinen klaren Trend zwischen 4G- und 5G-Systemen hinsichtlich des Expositions-niveaus. Beide Systeme führen zu ungefähr den gleichen durchschnittlichen (p_{50}) und Spitzenwerten (p_{90} , p_{99}) der Exposition. In der ländlichen Umgebung gibt es einen leichten Trend zu einer geringeren Exposition bei 5G (-45 %) für das Basisdatenraten-Szenario.

Im Szenario mit hoher Datenrate ist ein Trend zu einer höheren Downlink-Belastung durch das 5G-Netz festzustellen (+34 % insgesamt, 46 % in der städtischen Umgebung). Die Bereitstellung von 1 Gbps bringt das 5G-Netz an seine Kapazitätsgrenze und erfordert höhere Leistungspegel, um die erforderlichen Signal-Rausch-Verhältnisse aufrechtzuerhalten.

Es gibt einen Trend zu einer geringeren durchschnittlichen (p_{50}) Uplink-Belastung im 5G-Netz bei der Basisrate (-75 %) und der hohen Datenrate (-61 %).

Bei den Werten p_{90} und p_{99} ist dieser Effekt geringer und kehrt sich im Szenario mit hoher Datenrate sogar um, da die maximale Belastung im Uplink hauptsächlich durch die maximale Ausgangsleistung des Mobilgeräts bestimmt wird.

Abbildung 14: Downlink- und Uplink-Exposition-Verhältnisse in verschiedenen Umgebungen für das einheitliche Netz für die Szenarien mit niedriger und hoher Data rate



CRR-954: Bewertung verschiedener Mobilfunktopologien im Hinblick auf die Exposition des Menschen, die Qualität der mobilen Kommunikation und die Nachhaltigkeit

5.6 Ausschließliche Downlink-Optimierung

Abbildung 15 zeigt die Auswirkungen auf die Downlink- und Uplink-Belastung, wenn nur die Downlink-Netzrichtung in den Netzoptimierungssimulationen berücksichtigt wird.

Die Ergebnisse zeigen Unterschiede zwischen den 4G- und 5G-Netzen. Bei 4G sinkt die Downlink-Belastung (-30 %), wenn nur der Downlink in der Optimierungsstrategie berücksichtigt wird, während bei 5G die Downlink-Belastung sogar steigt (> 100 %). Die MaMIMO-Teile des 5G-Netzes benötigen auch die Uplink-Informationen für eine erfolgreiche Downlink-Optimierung.

Es überrascht nicht, dass die Uplink-Belastung in Netzen, die nur für den Downlink optimiert sind, im Durchschnitt höher ist als in Netzen, die sowohl für den Uplink als auch für den Downlink optimiert sind (11 % für 4G und 77 % für 5G).

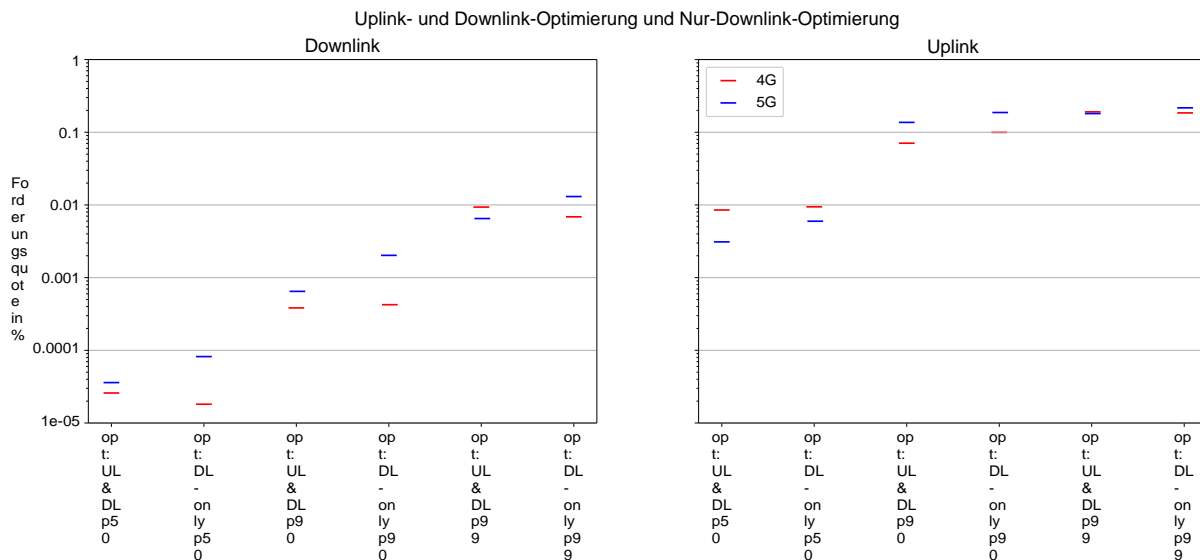


Abbildung 15: Downlink- und Uplink-Exposure-Verhältnisse für das Basis-Datenraten-Szenario bei kombinierter Uplink- und Downlink-Exposure-Optimierung (opt: DL&UL) sowie bei reiner Downlink-Exposure-Optimierung (opt: DL-only).

6 Diskussion

In dieser Studie wurden die Expositionsverhältnisse in Aufwärts- und Abwärtsrichtung in verschiedenen Mobilfunknetztopologien analysiert. Die Hauptergebnisse zeigen, dass i) die Exposition des Menschen in realen Mobilfunknetzen durch eine um den Faktor zehn höhere Uplink-Exposition als eine Downlink-Exposition bestimmt wird,

ii) Der Aufbau einer 5G-Infrastruktur erfordert eine dreimal so dichte Basisstationsinfrastruktur wie 4G, und iii) 5G kann eine zehnfache Netzdatenkapazität bei ähnlicher oder geringerer menschlicher Belastung als 4G bieten.

Die in dieser Studie beobachteten Expositionsverhältnisse liegen in der gleichen Größenordnung wie die in einer 2019 in der Schweiz durchgeführten Studie [1] berichteten Ergebnisse. In [1] wurden die Expositionswerte auf der Grundlage von Messungen der Downlink-Signalstärke und des Uplink-Pfadverlusts in einem der Schweizer 4G-Mobilfunknetze geschätzt. Die Exposition in 5G wurde auf der Grundlage von 5G-Bandbreiten- und Datenratenspezifikationen extrapoliert. Im Gegensatz zur vorliegenden Studie wurde in [1] jedoch die Verwendung von MaMIMO-Basisstationen in 5G nicht modelliert.

Nach Kenntnis der Autoren ist diese Studie derzeit die am weitesten fortgeschrittene Studie zur Exposition der Nutzer in Abhängigkeit von der Netztopologie. Um die Studie mit den entwickelten Werkzeugen und den verfügbaren Informationen durchführen zu können, wurden mehrere Annahmen getroffen, die im Abschnitt Methoden (Abschnitt 4) ausführlich beschrieben werden. Die Auswirkungen dieser Annahmen auf die Ergebnisse sind wie folgt:

- Die Verwendung vereinfachter Modelle für die Ausbreitung und die Umgebung (Gebäude usw.) entspricht möglicherweise nicht genau der Ausbreitungs- und Umgebung in realen Mobilfunknetzen.
- Das gewählte Ziel einer Abdeckung von 95 % der Nutzer in allen Studienumgebungen an jedem Nutzerstandort könnte in einigen Umgebungen höher sein als in realen Netzen.
- Die für die Modellierung von Mobilfunknetzen gewählten Konfigurationen können sich in der tatsächlichen Netzimplementierung unterscheiden.
- Ein globaler Grenzwert von 5 V/m für die Downlink-Exposition und ein 6-Minuten-Durchschnitt der Exposition wurden zur Abbildung der regulatorischen Grenzen verwendet. Dies bedeutet, dass nicht alle Details der aktuellen regulatorischen Anforderung in Bezug auf die Mobilfunkexposition 1:1 im Simulationstool modelliert werden konnten.
- Auch wenn die Vorsorgegrenzwerte nur annähernd erreicht wurden, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Netze im Rahmen der geltenden Verordnung realisiert werden können.
- Die Ergebnisse basierten auf der durchschnittlichen Nutzung, doch aufgrund der dominierenden Wirkung der Uplink-Exposition sind die Expositionsverhältnisse stark von der persönlichen Nutzung von Mobilgeräten abhängig, die hier nicht im Detail untersucht wurde.
- Die Standorte der Basisstationen in der erweiterten Gruppe wurden durch den Optimierungsalgorithmus unabhängig von der tatsächlichen baulichen Machbarkeit zugewiesen.
- Derzeit gibt es relativ wenig Wissen über die tatsächliche Einführung und Entwicklung von 5G in der Schweiz.
- Es wurden nur Frequenzbereiche berücksichtigt, die derzeit in der Schweiz für die Mobilfunknutzung zugelassen sind, d.h. Millimeterwellen-Kommunikationsverbindungen (5G NR FR2) wurden bei der Netzplanung nicht berücksichtigt.

- Die auf statistischen Daten basierende Modellierung der Exposition und die begrenzten Umweltdetails und Auflösungsaussagen über die absoluten Expositionsniveaus haben ein höheres Maß an Unsicherheit als relative Vergleiche zwischen Szenarien.

- Andere Expositionsquellen als die simulierten Mobilkommunikationsnetze wurden nicht berücksichtigt.
- Es wurde davon ausgegangen, dass andere Mobilfunkdienste, z. B. 2G, 3G, in den analysierten Szenarien nicht vorhanden sind.
- Die derzeit diskutierte Lockerung der Vorsorgegrenzwerte wurde nicht im Detail untersucht; die Simulationen deuten jedoch darauf hin, dass die 5G-Basisstationsdichte hauptsächlich durch die Abdeckungsanforderungen bestimmt wird, d. h. eine geringere Anzahl von Basisstationen bei höheren Grenzwerten ist nicht zu erwarten. Darüber hinaus erhöhen [1] gelockerte Grenzwerte wahrscheinlich die Exposition im Uplink, d. h. die Gesamtexposition.

Im Rahmen dieser Studie haben wir zukünftige Arbeiten und Forschungsbedürfnisse identifiziert, um die verbleibenden Wissenslücken zu füllen. Sobald sich eine mögliche Anwendung von Millimeterwellen in der Schweiz abzeichnet, sollte deren Einfluss auf die menschliche Exposition analysiert werden. In der vorliegenden Studie haben wir harmonisierte, aber vereinfachte Modelle verwendet, um die Exposition in Innenräumen gegenüber Mobilfunknetzen zu analysieren. Um die Unsicherheiten in Bezug auf die Exposition in Innenräumen zu verringern, würde eine zusätzliche Modellierung in Innenräumen helfen, unsere Ergebnisse zu untermauern. Sie könnten zudem durch Validierungsmessungen in den Up- und Downlinks realer 4G- und 5G-Netze in der Schweiz gestärkt werden. Weitere Bereiche der zukünftigen Forschung umfassen die Erweiterung der Netze mit verteiltem MaMIMO, Netze mit gemischten Technologien sowie eine realistischere Zuweisung und Gewichtung von Nutzer- und Basisstationsstandorten.

7 Schlussfolgerungen

Die in dieser Studie vorgestellten Ergebnisse bestätigen, dass die Exposition des Menschen in einem Mobilfunknetz durch das Uplink-Signal des eigenen Mobilgeräts dominiert wird. Die Expositionsverhältnisse im Uplink waren im Durchschnitt zehnmal höher als die Expositionsverhältnisse im Downlink. Bei der Optimierung von Netzen für eine niedrige Exposition von Menschen müssen immer sowohl der Uplink als auch der Downlink berücksichtigt werden. Unsere Ergebnisse zeigen, dass es nicht möglich ist, ein Netz mit einer guten Datenübertragungsqualität zu entwerfen, indem nur die Exposition im Downlink optimiert wird.

Aus Sicht der Datennetzqualität wurden die 5G-Netze in dieser Studie mit einer zehnfachen Kapazität im Vergleich zu den 4G-Netzen ausgelegt. Diese 5G-Kapazitätserhöhung führt nicht zu einer signifikanten Erhöhung der Downlink-Exposition im Vergleich zu 4G. Nur in den Szenarien mit der höchsten Datenrate stieg die Exposition in den 5G-Downlink-Netzen in allen drei Umgebungen um durchschnittlich 34 %. In der Uplink-Richtung trug der Einsatz von 5G dazu bei, die Exposition im Durchschnitt um -75 % bei der Basisdatenrate und um -61 % im Szenario mit hoher Datenrate zu verringern.

Was die Trennung von Innen- und Außenabdeckung betrifft, so zeigen unsere Ergebnisse, dass die Downlink-Belastung im Freien um den Faktor 10 reduziert werden kann, wenn nur die Außenabdeckung angestrebt wird. Für eine erfolgreiche Innenraumabdeckung waren im 4G-Netz im städtischen Umfeld hauptsächlich zusätzliche Basisstationen erforderlich. Insbesondere bei 5G ist der Bedarf an zusätzlichen Basisstationen zur Abdeckung von Innenräumen gering. In absoluten Zahlen benötigten die 5G-Netze jedoch im Durchschnitt dreimal so viele Basisstationsstandorte wie das betrachtete 4G-Netz. Da die Exposition im Uplink in allen Abdeckungs- und Datenraten-Szenarien sehr ähnlich und im Vergleich zur Exposition im Downlink dominant ist, führte eine Trennung von Innen- und Außenabdeckung in unseren Simulationen nicht zu einem Vorteil hinsichtlich der menschlichen Exposition.

Das vereinheitlichte Basisstationsnetz hat die Exposition der Menschen nicht wesentlich verändert, obwohl es in einigen Situationen aufgrund der begrenzten Netzkapazität zu einer höheren Exposition im Uplink führt. Das einheitliche Netz kann jedoch dazu beitragen, die Anzahl der erforderlichen Basisstationen im Mobilfunknetz zu verringern. Die gleiche Netzqualität wurde in den drei verschiedenen Umgebungen mit 30 % bis 50 % weniger Basisstationen bei 4G bzw. mit 13 % bis 30 % weniger Basisstationen bei 5G erreicht. Die Reduzierung bei 5G ist geringer, da die in 5G verwendeten adaptiven MaMIMO-Antennen weniger Nutzer pro Basisstation unterstützen.

Die Studie hat gezeigt, dass zukünftige Netze ohne eine Erhöhung der Vorsorgegrenzwerte realisiert werden können. Die Anzahl der Basisstationen wird hauptsächlich von den Datenanforderungen und nicht von den Grenzwerten bestimmt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Übergang zu einem 5G-Mobilfunknetz empfohlen wird, um die Exposition der Menschen zu verringern und hohe Datenraten zu erzielen. Die Vereinheitlichung der Netzinfrastruktur ist von Vorteil, um die Anzahl der Basisstationen zu verringern.

Referenzen

- [1] S. Kuehn, S. Pfeifer, and N. Kuster, "Total local dose in hypothetical 5g mobile networks for varied topologies and user scenarios," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 17, p. 5971, 2020.
- [2] "Verizon "führt" alle US-Carrier bei der mmWave-5G-Verfügbarkeit mit 0,8 % an". [Online]. Verfügbar unter: <https://arstechnica.com/information-technology/2021/04/verizon-leads-all-us-carriers-in-mmwave-5g-availability-at-0-8/>
- [3] M. F. Khajeim, G. Moradi, R. S. Shirazi, and S. Zhang, "Body Blockage Analysis and Comparison between Human and Full-body Phantom Using Measurements at 28 GHz," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2021.
- [4] "Adaptive Antennen. Nachtrag vom 23. Februar 2021 zur Vollzugsempfehlung zur Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV) für Mobilfunk- und WLL-Basis-Stationen, BUWAL2002". [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/elektrosmog/uv-umwelt-vollzug/adaptive-antennen-nachtrag.pdf.download.pdf/Nachtrag%20zur%20Vollzugshilfe%20zur%20NISV%20of%20C3%BCr%20adaptive%20Mobilfunkantennen.pdf>
- [5] I. Guideline, "Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 ghz)", *Health phys*, vol. 74, no. 4, pp. 494-522, 1998.
- [6] T. Logan, J. Nadakuduti, L. Lu und P. Guckian, "Real-time specific absorption rate implementation in wireless devices," Apr. 11 2017, uS Patent 9,622,187.
- [7] D. Plets, W. Joseph, K. Vanhecke, G. Vermeeren, J. Wiart, S. Aerts, N. Varsier, and L. Martens, "Joint minimization of uplink and downlink whole-body exposure dose in indoor wireless networks," *BioMed research international*, vol. 2015, 2015.
- [8] M. Deruyck, E. Tanghe, D. Plets, L. Martens, and W. Joseph, "Optimizing lte wireless access networks towards power consumption and electromagnetic exposure of human beings," *Computer Networks*, no. 94, pp. 29-40, 2016.
- [9] M. Matalatala, M. Deruyck, E. Tanghe, L. Martens, and W. Joseph, "Performance evaluation of 5g millimeter-wave cellular access networks using a capacity-based network deployment tool," *Mobile Information Systems*, pp. 1-11, 2017.
- [10] M. Matalatala, S. Shikantsov, M. Deruyck, E. Tanghe, D. Plets, S. K. Goudos, L. Martens, und W. Joseph, "Combined ray-tracing/fdtd and network planner methods for the design of massive mimo networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 206 371-206 387, 2020.
- [11] M. Deruyck, J. Wyckmans, W. Joseph, and L. Martens, "Designing uav-aided emergency networks for large-scale disaster scenarios," *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2018, no. 79, pp. 1-12, 2018.
- [12] M. Deruyck, D. Renga, M. Meo, L. Martens, and W. Joseph, "Accounting for the varying supply of solar energy when designing wireless access networks," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 2, no. 1, pp. 275-290, 2018.
- [13] Schweizerische Eidgenossenschaft, "Raumgliederungen der Schweiz - Gemeindetypologie und Stadt/Land-Typologie 2012", Bundesamt für Statistik BfS, Tech. Rep., 2021.
- [14] ETSI, "ETSI TS 136 213 v10.1.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures (3GPP TS 36.213 version 10.1.0 Release 10)," Tech. Rep., Apr. 2011. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/10.01.00_60/ts_136213v100100p.pdf
- [15] --, "ETSI TS 136 211 V10.0.0 - LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physikalische Kanäle und Modulation (3GPP TS 36.211 Version 10.0.0 Release 10)," Tech. Rep., Jan. 2011. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136211/10.00.00_60/ts_136211v100000p.pdf

- [16] Rohde & Schwarz. Be ahead in 5G - Seien Sie bereit für die Zukunft. [Online]. Verfügbar: https://www.rohde-schwarz.com/fi/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/5g-overview_229437.html#media-gallery-6
- [17] ETSI, "ETSI TR 138 901 v15.0.0 - 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz (3GPP TR 38.901 version 15.0.0 Release 15)," Tech. Rep.", Jul. 2018.
- [18] ECC, "ECC-Bericht 302: Sharing and compatibility studies related to Wireless Access Systems including Radio Local Area Networks (WAS/RLAN) in the frequency band 5925-6425 MHz," Tech. Rep. 302, Mai 2019.
- [19] "Empfehlung ITU-R P.2109-1 (08/2019) Vorhersage von Gebäudeeintrittsverlusten", S. 7.
- [20] Der Schweizerische Bundesrat, "814.710 Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung." [Online]. Verfügbar: <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2000/38/de>
- [21] [Online]. Verfügbar unter: <https://fccid.io/BCG-E3542A>
- [22] [Online].Verfügbar :<https://fccid.io/A3LSMG998U/RF-Exposure-Info/Teil-1-SAR-Bericht-5052600>
- [23] M. Matalatala, M. Deruyck, S. Shikhantsov, E. Tanghe, D. Plets, S. Goudos, K. E. Psannis, L. Martens, and W. Joseph, "Multi-objective optimization of massive mimo 5g wireless networks towards power consumption, uplink and downlink exposure," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 22, p. 4974, 2019.
- [24] [Online]. Verfügbar: [swisstopo.admin.ch](https://www.swisstopo.admin.ch)
- [25] Schweden:DurchschnittlicheDauer von Mobilfunkgesprächen 2007-2020, "Jun.2021. [Online]. Verfügbar: <https://www.statista.com/statistics/654331/average-mobile-call-length-in-sweden/>
- [26] Eidgenössische Kommunikationskommission (ComCom), "Mobilfunkmarktanteil in der Schweiz (Zugriff: März 2021)", März 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.comcom.admin.ch/comcom/en/home/dokumentation/zahlen-und-fakten/mobilfunkmarkt/martanteile-der-mobilfunkanbieter.html>
- [27] GSMA, "GSMA Mobile Economy 2018 Europe", 2018. [Online]. Verfügbar: https://www.gsma.com/mobileeconomy/wp-content/uploads/2020/03/GSMA_MobileEconomy2020_Europe.pdf
- [28] Statista, "Smartphone-Nutzer in der Schweiz 2018-2024", Okt. 2018. [Online]. Verfügbar: <https://www.statista.com/statistics/494640/smartphone-users-in-switzerland/>