



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Machbarkeitsstudie eines auf Smartphone-Apps
beruhenden Hochfrequenz-Messnetzwerkes zur
Abschätzung der Exposition der Bevölkerung mit
elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks

Vorhaben 3619S82468

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Dipl.-Ing. S. Schießl

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz,
nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und im Auftrag des Bundesamtes
für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0

Fax: +49 30 18333-1885

E-Mail: ePost@bfs.de

De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-215/23

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:

urn:nbn:de:0221-2023071238477

Salzgitter, Juli 2023

Projektleitung beim Auftragnehmer

Dipl.-Ing. Sascha Schießl
Institut für Hochfrequenztechnik
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen
Melatener Straße 25
52074 Aachen
E-Mail: schiessl@ihf.rwth-aachen.de

Autor

Dipl.-Ing. Sascha Schießl

Projektleitung beim Auftraggeber

Dr. Jens Kuhne
Bundesamt für Strahlenschutz
Kompetenzzentrum elektromagnetische Felder | KEMF
Ingolstädter Landstraße 1
85764 Oberschleißheim-Neuherberg
E-Mail: jkuhne@bfs.de

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung des Auftraggebers (Bundesamt für Strahlenschutz) übereinstimmen.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	3
Kurzzusammenfassung	8
Abstract	10
Zusammenfassung	11
Summary.....	15
1 Einleitung	18
1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens	18
1.2 Gliederung des Berichts	19
2 Relevanter Stand von Wissenschaft und Technik.....	21
2.1 Signalstärkeindikatoren der Mobilfunkstandards.....	21
2.1.1 LTE	22
2.1.1.1 Wesentliche Eigenschaften	22
2.1.1.2 Von Endgeräten erfasste Signalstärkeindikatoren	25
2.1.1.3 Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik.....	28
2.1.2 UMTS.....	30
2.1.2.1 Wesentliche Eigenschaften	31
2.1.2.2 Vom Endgerät erfasste Signalstärkeindikatoren	31
2.1.2.3 Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik.....	34
2.1.3 GSM.....	34
2.1.3.1 Wesentliche Eigenschaften	34
2.1.3.2 Von Endgeräten gemessene Signalstärkeindikatoren	36
2.1.3.3 Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik.....	36
2.1.4 5G	37
2.1.4.1 Wesentliche Eigenschaften	37
2.1.4.2 Vom Endgerät erfasste Signalstärkeindikatoren	40
2.1.4.3 Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik.....	42
2.2 Das Android-Betriebssystem.....	43
2.2.1 Aufbau und Funktionsweise.....	44
2.2.2 Zugriff auf Signalstärkeindikatoren und Informationen der Funkzelle über die Android-API-Funktionen	46
2.2.2.1 LTE	46
2.2.2.2 UMTS (W-CDMA).....	48
2.2.2.3 GSM	49
2.2.2.4 5G.....	50
2.2.2.5 Sendeleistung des Endgeräts	51
2.2.2.6 Messung von Nachbarzellen.....	51
2.2.2.7 Dual-SIM.....	52

2.2.3	Zugriff auf weitere Informationen	53
2.2.3.1	Standort	53
2.2.3.2	Zeitstempel	54
2.2.3.3	Gerätespezifische Informationen	54
2.2.3.4	Sensordaten	54
2.2.4	Alternativer Zugriff auf Signalstärkeindikatoren und Informationen der Funkzelle	55
2.2.5	Existierende Apps zur Erfassung von Signalstärkeindikatoren und Informationen über die Funkzelle	55
2.2.6	Erfahrungen aus der Entwicklung einer eigenen Android-App.....	60
2.3	Bestehende Arbeiten	62
2.3.1	Arbeiten des Auftragnehmers	62
2.3.1.1	Stabilität der Messergebnisse von RSRP bei LTE	62
2.3.1.2	Messreihe zum Umrechnungsfaktor zwischen Smartphone-Messwerten und Feldstärkewerten	63
2.3.1.3	Untersuchung der Messbandbreite der RSSI-Messung bei LTE	66
2.3.1.4	Dynamikkorrektur von RSSI-Messungen bei LTE.....	68
2.3.2	Arbeiten anderer Stellen	72
2.3.2.1	Machbarkeitsstudie für das Bundesamt für Umwelt der Schweiz	72
2.3.2.2	VigiExpo	74
2.3.2.3	LEXNET	76
2.3.3	Vergleichbare Ansätze	85
2.3.3.1	Überwachung der Lärmbelastung.....	85
2.3.3.2	Messung der Lufttemperatur.....	85
2.3.3.3	Erkennung von Erdbeben	86
2.3.3.4	Überwachung des Straßenzustands	87
2.3.3.5	Structural Health Monitoring (SHM)	87
2.3.3.6	Ermittlung der Netzabdeckung & Netzwerk-Performance.....	88
2.3.3.7	Standortbestimmung aus Radio Maps.....	90
2.4	Weitere Aspekte	90
2.4.1	Datenschutz	90
2.4.2	Datenbasis zur Immissionsabschätzung	91
2.4.2.1	Anforderungen an die Datenbasis	91
2.4.2.2	Bestehende Datenbanken	92
2.4.3	Mean Effective Gain & Nutzereinfluss	94
2.5	Zusammenfassung & Fazit	97
3	Untersuchung der Messeigenschaften von Smartphones.....	99
3.1	Vorstellung der für die Messungen verwendeten App „CellViewer“ ..	99
3.2	Untersuchte Smartphones	102
3.2.1	Auswahlkriterien der für die Messungen verwendeten Endgeräte	102
3.2.2	Übersicht über die untersuchten Smartphones	102
3.3	Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der Messwertaufnahme und Auswirkungen auf die Immissionsmessung	105
3.3.1	Signalpegeländerungen	105
3.3.1.1	Ziel der Untersuchung	105
3.3.1.2	Durchführung.....	105

3.3.1.3	Ergebnisse.....	107
3.3.1.4	Erkenntnisse.....	114
3.3.2	Aktualisierungsrate der Signalstärkewerte	115
3.3.2.1	Ziel der Untersuchung	115
3.3.2.2	Durchführung.....	116
3.3.2.3	Ergebnisse.....	116
3.3.2.4	Erkenntnisse.....	117
3.3.3	Messbandbreite bei LTE	118
3.3.3.1	Ziel der Untersuchung	118
3.3.3.2	Durchführung.....	118
3.3.3.3	Ergebnisse.....	120
3.3.3.4	Erkenntnisse.....	124
3.3.4	Übersprechen.....	125
3.3.4.1	Ziel der Untersuchung	125
3.3.4.2	Durchführung.....	125
3.3.4.3	Ergebnisse.....	126
3.3.4.4	Erkenntnisse.....	128
3.3.5	Wertebereiche und Limits.....	129
3.3.5.1	Ziel der Untersuchung	129
3.3.5.2	Durchführung.....	129
3.3.5.3	Ergebnisse.....	130
3.3.5.4	Erkenntnisse.....	131
3.4	Untersuchungen zur Bestimmung eines Umrechnungsfaktors von Signalstärke- zu Feldstärkewerten.....	132
3.4.1	Untersuchungen unter Laborbedingungen	132
3.4.1.1	Allgemeine Beschreibung des Messaufbaus	132
3.4.1.2	Linearität der Signalstärkemessung.....	139
3.4.1.3	Richtungsabhängigkeit der Signalstärkemessung	143
3.4.1.4	Umrechnungsfaktoren	151
3.4.1.5	Nutzereinfluss.....	153
3.4.2	Untersuchungen unter Feldbedingungen	157
3.4.2.1	Messgebiete & Messorte	157
3.4.2.2	Umrechnungsfaktor	160
3.4.2.3	Richtungsabhängigkeit	171
3.4.2.4	Nutzereinfluss.....	175
3.4.2.5	Wiederholungsmessungen	179
3.4.2.6	Langzeitmessungen.....	183
3.5	Abschätzung der mit einem einzelnen Endgerät erzielbaren Messgenauigkeit.....	193
3.5.1	Modellgleichung	193
3.5.2	Unsicherheitsbeiträge	193
3.5.2.1	Unsicherheit der Signalpegelmessung	193
3.5.2.2	Unsicherheit des Umrechnungsfaktors.....	194
3.5.2.3	Unsicherheit der Dämpfung durch den Nutzer.....	195
3.5.3	Abschätzung aus allgemeinen Informationen	195
3.5.3.1	Unsicherheit durch den Empfänger des Smartphones	195
3.5.3.2	Unsicherheit durch die Quantisierung auf ganzzahlige Werte	196
3.5.4	Abschätzung aus den Feldmessungen	196
3.5.4.1	Unsicherheit des Umrechnungsfaktors.....	197
3.5.4.2	Unsicherheit durch die Richtungsabhängigkeit.....	204
3.5.4.3	Unsicherheit durch den Nutzereinfluss	205

3.5.5	Abschätzung aus den Labormessungen	207
3.5.5.1	Variation des Umrechnungsfaktors verschiedener Smartphones	207
3.5.5.2	Vergleich des Umrechnungsfaktors aus Labor- & Feldmessungen	211
3.5.5.3	Unsicherheit durch den Nutzereinfluss	213
3.5.6	Unsicherheitsbudget	215
3.6	Zusammenfassung & Fazit	216
4	Untersuchung von Smartphone-Crowdsourcingdaten	218
4.1	Ursprung & Eigenschaften der Datenbasis	218
4.2	Überblick über die vollständige Verarbeitungskette	221
4.3	Vorbereitung der Daten	222
4.3.1	Import & Konvertierung der Daten	222
4.3.2	Aussortieren unvollständiger & unbrauchbarer Datensätze	223
4.3.3	Frequenzzuordnung	227
4.4	Statistischer Überblick	229
4.4.1	Verteilung der Messungen auf Netzbetreiber auf Netzbetreiber, Funkdienste & Frequenzbänder	229
4.4.2	Verteilung der Messungen auf Hersteller & Modelle	233
4.4.3	Verteilung der Messungen in der Fläche	234
4.4.4	Zeitliche Verteilung	243
4.4.5	Verteilung der Signalstärken	244
4.4.6	Anzahl Mobilfunkzellen	246
4.4.7	Standortgenauigkeit	247
4.5	Methoden zur Interpolation der Smartphone-Messdaten	249
4.5.1	Eigenschaften von Crowdsourcingdaten	249
4.5.2	Auswertungsmethoden	250
4.5.3	Umsetzung und Anwendung	254
4.6	Erstellung von Immissionskarten	255
4.6.1	Darstellung der Rohdaten der Signalstärkemessungen der Smartphones & Erprobung des Auswertungsverfahrens	255
4.6.2	Immissionskarten für den Großraum München	259
4.6.3	Immissionskarten für das Stadtgebiet Aachen	282
4.7	Exemplarische Untersuchungen zum Einfluss weiterer Informationen auf die Immissionsabschätzung	286
4.7.1	Zeitliche Stabilität	286
4.7.2	Fortbewegungsmittel	291
4.7.3	Marke & Modell des Smartphones	294
4.7.4	Displayzustand	300
4.8	Validierung der Immissionsabschätzung	303
4.8.1	Genutzte Mess- und Hochrechnungsverfahren	303
4.8.2	Verteilung der Messpunkte in den Untersuchungsgebieten	304
4.8.3	Ergebnisse der Vergleichsmessungen	306
4.8.3.1	München	307
4.8.3.2	Aachen	313
4.8.4	Vergleich der Maximalimmission mit der Momentanimmission	319

4.9	Verbesserung der Ergebnisgenauigkeit gegenüber der Einzelmessung.....	319
4.10	Zusammenfassung & Fazit	324
5	Bewertung des Konzepts „Messnetzwerk“	326
5.1	Anforderungen & Voraussetzungen für den Aufbau eines crowdsourcingbasierten Expositionsmonitorings für den Mobilfunk mittels Smartphones	326
5.1.1	Ziel und Anspruch eines zeitkontinuierlichen und flächendeckenden Expositionsmonitorings.....	326
5.1.2	Anforderungen und Voraussetzungen für ein Expositionsmonitoring mittels Smartphones	328
5.1.3	Abgleich der erarbeiteten Erkenntnisse mit den Anforderungen an ein Expositionsmonitoring mittels Smartphones.....	330
5.2	Vor- & Nachteile eines Smartphone-basierten Expositionsmonitorings.....	334
5.3	Schwachstellen des Ansatzes & Lösungsmöglichkeiten zu deren Überwindung.....	336
5.4	Zukunftsfähigkeit des Konzeptes.....	338
5.5	Einschätzung des Implementierungsaufwandes	339
5.6	Zusammenfassung & abschließende Bewertung	340
	Danksagung	342
	Abkürzungsverzeichnis	343
	Literaturverzeichnis	346

Kurzzusammenfassung

Die vorliegende Machbarkeitsstudie hat zum Ziel die Fragestellung zu beantworten, ob es technisch und wirtschaftlich möglich ist, die im Rahmen eines crowdsourcingbasierten Ansatzes auf gewöhnlichen Smartphones gemessenen Signalstärken zu nutzen, um ein repräsentatives Bild der Exposition der Allgemeinbevölkerung durch elektromagnetische Felder des Mobilfunks zu generieren. Nach der Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik wurden im Rahmen der Studie der Zusammenhang zwischen den Signalstärkeindikatoren von Smartphones und der elektrischen Feldstärke in Labor- und Feldmessungen eingehend untersucht, die Abschätzung der Immission anhand von Smartphone-Signalstärkemessungen eines bestehenden Crowdsourcing-Netzwerkes erprobt und mit Feldstärkemessungen verglichen. Da Smartphones sich typischerweise in direkter Nähe zu Personen befinden, ließen sich aus den gewonnenen Daten prinzipiell Beiträge zur Exposition der Bevölkerung abschätzen.

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass die grundsätzliche technische Machbarkeit für ein auf Smartphones basierendes Messnetzwerk zur Immissionsabschätzung gegeben ist. Sie ergibt sich daraus, dass die wichtigsten erforderlichen Parameter von den Smartphones erfasst werden und im Betriebssystem Android für eine App abrufbar sind. Diese beziehen sich jedoch nur auf die Maximalimmission sowie den Downlink und erlauben keine Bestimmung der Momentanimmission oder des Uplink-Beitrages zur Exposition. Zu den weiteren erfüllten Voraussetzungen zählt, dass die Messeigenschaften der Smartphones einen ausreichend direkten Zusammenhang zwischen der gemessenen Signalstärke und der vorliegenden Feldstärke aufweisen. Auch die benötigte technische Infrastruktur lässt sich mit den heutigen Möglichkeiten mit vertretbarem Aufwand umsetzen.

Allerdings haben sich andererseits erhebliche Schwachpunkte herausgestellt, die einer erfolgreichen Anwendung entgegenstehen. Dazu gehört, dass die Abdeckung aller relevanten Immissionsbeiträge des Mobilfunks nicht gewährleistet werden kann. Insbesondere die ausreichende Erfassung aller Mobilfunkstandards ist nach derzeitigem Stand nicht zu erreichen. Weiterhin bleibt eine hohe Ungewissheit darüber bestehen, ob sämtliche Immissionsanteile für einen Ort ermittelt werden konnten oder nicht. Dies ist vor allem in Gebieten mit weniger Verkehr durch messende Smartphones ein großes Problem. Zuletzt ist die zukünftige Anwendbarkeit bei 5G und darüber hinaus aufgrund der hohen Komplexität neuer Mobilfunktechnik ungewiss. Die pauschale Extrapolation auf Maximalimmission ist unter den erschwerten Bedingungen beim Einsatz von aktiven Antennen nur bedingt oder nicht möglich.

Dem Anspruch eines vollumfänglichen Monitoringsystems zur quantitativen Abschätzung der Exposition kann ein Messnetzwerk mit Smartphones daher nicht gerecht werden. Trotzdem könnte ein derartiges System einen gewissen Nutzen entfalten. So wäre zumindest für den derzeit gebräuchlichsten Funkstandard, LTE, eine einigermaßen verlässliche Aussage zur Immission in gut abgedeckten Gebieten zu erreichen. Die ableitbaren Immissionskarten können einen Eindruck davon vermitteln, wie die Immission verteilt ist und zur gezielten Auswahl von Messpunkten für Messkampagnen mit Feldstärkemessgeräten dienen. Dennoch bleibt der

Nutzen einer Umsetzung voraussichtlich insgesamt zu gering und rechtfertigt daher vermutlich die erforderlichen Aufwendungen langfristig nicht.

Abstract

This feasibility study aims at answering the question whether it is technically and economically possible to use the signal strengths measured on common smartphones in a crowdsourcing-based approach to generate a representative picture of the exposure to mobile radio electromagnetic fields. After reviewing the relevant state of the art in science and technology, the study thoroughly investigated the relationship between smartphone signal strength indicators and electric field strength, and tested the estimation of exposure using smartphone signal strength measurements from an existing crowdsourcing network and compared it with field strength measurements.

Overall, the investigations were able to show that the basic technical feasibility for a smartphone-based measurement network for exposure estimation is given. This results from the fact that the most important required parameters are recorded by the smartphones and can be retrieved in the Android operating system by an app. However, the parameters only refer to the maximum exposure and the downlink and do not allow determination of the instantaneous or uplink exposure. Other fulfilled requirements include that the measurement characteristics of the smartphones show a sufficiently direct correlation between the measured signal strength and the field strength present. The required technical infrastructure can also be implemented with reasonable effort using today's possibilities.

On the other hand, however, significant weaknesses have emerged preventing a successful application. These include that it is not possible to guarantee the coverage of all relevant exposure contributions of mobile radio. In particular, sufficient coverage of all mobile radio standards cannot be achieved according to the current status. Furthermore, there remains a high degree of uncertainty about whether all exposure contributions for a location could be determined or not. This is a major problem, especially in less frequented areas. Finally, the future applicability for 5G and beyond is only possible to a limited extent or not at all due to the high complexity and difficult conditions regarding a blanket extrapolation to maximum exposure when using active antennas.

Therefore, a measurement network with smartphones cannot meet the requirement of a fully comprehensive monitoring system for quantitative estimation of the exposure. Nevertheless, such a system could be of some use. At least for the currently most common radio standard, LTE, a reasonably reliable statement on the exposure in well-covered areas could be achieved. The exposure maps that can be derived can give an impression of how the exposure is distributed and can be used for the targeted selection of measurement points for measurement campaigns with field strength measuring devices. Nevertheless, the overall benefit of implementation is likely to remain too low and therefore probably does not justify the necessary expenditure in the long term.

Zusammenfassung

Die vorliegende Machbarkeitsstudie hat zum Ziel die Fragestellung zu beantworten, ob es technisch und wirtschaftlich möglich ist, die im Rahmen eines crowdsourcingbasierten Ansatzes auf gewöhnlichen Smartphones gemessenen Signalstärken zu nutzen, um ein repräsentatives Bild der Exposition durch elektromagnetische Felder des Mobilfunks zu generieren.

Die Grundidee beruht darauf, dass Mobilfunkendgeräte für den Aufbau und die Aufrechterhaltung einer Verbindung mit dem Mobilfunknetz regelmäßig die Signalstärken der umgebenden Funkzellen erfassen müssen. Die Signalstärken sind wiederum unmittelbar mit der zugrundeliegenden elektromagnetischen Feldstärke und somit auch der Immission verknüpft. Da Smartphones sich typischerweise in direkter Nähe zu Personen befinden, ließen sich aus den gewonnenen Daten prinzipiell Beiträge zur Exposition der Bevölkerung abschätzen. Die Ermittlung einer Feldstärkeschätzung aus einer einzelnen Signalstärkemessung eines Smartphones ist jedoch mit größeren Unsicherheiten behaftet als es bei Messung mit einem dezidierten Feldstärkemessgerät der Fall ist. Deshalb soll die deutlich größere Anzahl von Messungen, die sich mit vielen Smartphones aufzeichnen lassen, dazu genutzt werden, eine stabilere Immissionsschätzung zu gewinnen. Hierfür kommt das sogenannte Crowdsourcing zum Einsatz, bei dem die Datenerhebung mithilfe einer zu installierenden App auf den Smartphones von gewöhnlichen Nutzern erfolgt. Das verbreitete Betriebssystem Android bietet hierfür die passenden Voraussetzungen. Die Messergebnisse werden anschließend auf einem Server zentral gesammelt und ausgewertet, um daraus eine Immissionsabschätzung zu erhalten. Auf diese Weise könnte ein Monitoringsystem etabliert werden, das deutlich flächendeckendere und zeitkontinuierlichere Daten für darauf aufbauende Expositionsabschätzungen liefert, als es mit konventionellen Methoden möglich wäre.

Die Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik hat gezeigt, dass in den Mobilfunkstandards von den Endgeräten auszuführende Messungen definiert sind, deren Messgrößen in direktem Zusammenhang mit der Immission stehen. Die in der Immissionsmesstechnik gebräuchlichen codeselektiven Messmethoden basieren auf der Extraktion der gleichen Signalanteile, wie sie von den Smartphones genutzt werden. Ein Abgleich mit der Android-Dokumentation und die praktische Umsetzung einer für die Untersuchungen der Studie genutzten App machte deutlich, dass die wichtigsten Messgrößen und Informationen zur Funkzelle über entsprechende Schnittstellen innerhalb des Betriebssystems Android erhalten werden können. Diese ermöglichen eine Abschätzung der Maximalimmission des Downlinks, die unter Volllast der Funkzellen auftritt, nicht jedoch der Momentanimmission und des Beitrags des Uplinks zur Exposition. Allerdings sind für bestimmte Parameter der Extrapolation pauschale Annahmen zu treffen, da die entsprechenden Informationen nicht aus den Smartphone-Aufzeichnungen zu erhalten sind. Weiterhin verdeutlicht die Literaturstudie, dass die Fragestellung dieser Studie zuvor nicht ausreichend beantwortet wurde, da weder der Zusammenhang zwischen den Signalstärkeindikatoren von Smartphones und der elektrischen Feldstärke eingehend untersucht wurde noch der Ansatz des Crowdsourcings in diesem Kontext unter realistischen Bedingungen verfolgt worden ist. Beides wurde in der vorliegenden Studie vorgenommen.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten Untersuchungen der Messeigenschaften von Smartphones beinhalteten die Beobachtung des Verhaltens bei starken Signalpegelsprüngen und die Ermittlung von Aktualisierungsraten der Messwerte. Es konnte demonstriert werden, dass Signalpegeländerungen so zügig verfolgt werden, dass auch für den Fall eines bewegten Endgeräts verlässliche Messwerte der am Ort vorliegenden Signalstärke erhalten werden, vorausgesetzt, dass die GPS-Daten ausreichend genau aufgezeichnet werden. Durch weitere Messungen wurde verifiziert, dass die Messungen der Signalstärken auch durch starke Signale bei Frequenzen in unmittelbarer Nachbarschaft zum genutzten Frequenzkanal nicht beeinflusst werden, solange die Störungen außerhalb der jeweiligen Signalbandbreite des Mobilfunkkanals liegen. Labormessungen zur Überprüfung der Wertebereiche und Limits ergaben, dass sämtliche Signalpegel in 1 dB-Schritten über den gesamten im Standard vorgegebenen Wertebereich vom Smartphone-Modem erfasst und an die Basisstation gemeldet werden können. Die Erfahrungen bei der Verwendung des Datenzugriffs über Android haben jedoch für UMTS und GSM ergeben, dass die Signalstärken über die API nur in Schritten von 2 dB ausgegeben werden. Außerdem wird der obere Wertebereich bei -51 dBm abgeschnitten, obwohl der dieser eigentlich bis -48 dBm (GSM) bzw. -24 dBm (UMTS) reicht. Dies bedeutet, dass bei hohen Feldstärken eine nicht kompensierbare Unterschätzung durch den Verlust der höheren Werte der Signalstärkeskala auftritt.

Bei den Messungen zur Ermittlung von Umrechnungsfaktoren von Signal- in Feldstärkewerte konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Signalstärke der Smartphones und den vorliegenden Feldstärken festgestellt werden. Trotz einzelner Sprünge im linearen Verlauf unter Laborbedingungen wurde im freien Feld ein monotoner Zusammenhang festgestellt. Die ermittelten Umrechnungsfaktoren stiegen tendenziell mit zunehmender Kanalfrequenz. Die Schwankungsbreite der Umrechnungsfaktoren über die verschiedenen untersuchten Smartphones hinweg lag bei den Messungen im freien Feld abhängig vom Frequenzband und Funkdienst zwischen etwa 5 bis 8 dB. Es erscheint daher sinnvoll möglich pauschale Faktoren für alle Smartphones eines Messnetzwerks anzuwenden. Eine Bestimmung von Umrechnungsfaktoren für jedes Smartphone-Modell, welches an der Datenerhebung in einem Messnetzwerk teilnimmt, scheidet aufgrund der Vielzahl der Geräte und des damit verbundenen Aufwands aus.

In den Labormessungen offenbarte sich für den Fall eines aus nur einer einzigen Richtung einfallenden Signals eine starke Richtungsabhängigkeit des Signalstärkemesswerts. Diese erwies sich jedoch bei ähnlichen Untersuchungen unter Feldbedingungen, wo durch Mehrwegeausbreitung das Signal aus mehreren Richtungen gleichzeitig beim Endgerät eintrifft, als erheblich schwächer. Ähnlich, wenn auch nicht im gleichen Ausmaß, fiel die Dämpfung durch den Nutzereinfluss in den Labormessungen größer aus als im freien Feld. Insgesamt konnte aus den verschiedenen durchgeführten Messungen eine erweiterte Messunsicherheit für die Bestimmung der elektrischen Feldstärke aus einer einzelnen Smartphone-Signalstärkemessung von 16,7 dB abgeschätzt werden.

Die messtechnischen Untersuchungen haben deutlich gemacht, dass ein ausreichender Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke und den Signalstärkemessungen besteht und die wichtigsten messtechnischen Eigenschaften gegeben sind, um mit einer gewissen Unsicherheit Schätzwerte der Feldstärke ableiten zu können.

Die Ermittlung von Immissionsabschätzungen aus Smartphone-Signalstärkemessungen wurde in weiteren Arbeitsschritten praktisch anhand zweier Datenpakete erprobt, die durch ein bestehendes Crowdsourcing-Netzwerk erhoben wurden. Eines umfasste Smartphone-Daten aus dem Großraum München über den Zeitraum eines Jahres und das zweite aus dem Stadtgebiet Aachen über einem Monat. Hierfür wurde eine Verarbeitungskette entworfen und umgesetzt, die die Rohdaten vorbereitet und aussortiert, die Messdaten geeignet interpoliert, die Signalstärken in Feldstärken umwandelt sowie durch Überlagerung und Extrapolation aller Immissionsbeiträge die maximale Gesamtimmission für Standorte innerhalb der Untersuchungsgebiete zweidimensional orts aufgelöst abschätzt.

Bei der Vorbereitung der Daten musste ein Großteil der Daten aussortiert werden, weil die Datensätze als unzuverlässig eingestuft wurden oder unvollständig waren bzw. ungültige Werte enthielten. Der statistische Überblick über die Zusammensetzung der Datenpakete zeigte ein starkes Ungleichgewicht der Netzbetreiber. Telefónica war etwa doppelt so oft vertreten wie die beiden anderen deutschen Netzbetreiber. Noch gravierender fiel der Unterschied zwischen der Anzahl von Messungen bei LTE gegenüber UMTS und vor allem GSM aus. Auf diese Netzwerkgeneration entfielen im Großraum München insgesamt nur 2,3 % aller Einträge. Diese Angaben sind das Resultat der Zusammensetzung der Nutzerschaft des genutzten Crowdsourcingnetzwerks und der von Smartphones bevorzugten Nutzung neuerer Netzwerkgenerationen. Sie lassen keinen Rückschluss auf die tatsächliche Verbreitung der Netzbetreiber und Mobilfunkgenerationen zu.

Die erstellten Immissionskarten zeigen für LTE, dass sich Bereiche höherer und geringerer Immission erkennen lassen. Allerdings besteht Ungewissheit darüber, ob in Gebieten mit geringerer geschätzter Immission tatsächlich niedrigere Feldstärken vorliegen oder stattdessen nicht alle Funkzellen mit relevanten Immissionsbeiträgen erfasst wurden. Bei UMTS und vor allem GSM ist aber durch die Lücken in der Karte und den geringen Datenbestand klar ersichtlich geworden, dass keine Abdeckung erreicht wurde, die alle Immissionsbeiträge enthalten kann.

Dies manifestierte sich schließlich auch beim Vergleich von Feldstärkemessungen mit der Immissionsabschätzung aus den Smartphone-Daten, da an kaum einem der Messorte eine Immissionsabschätzung für GSM möglich war. Dort, wo überhaupt Schätzwerte erhalten wurden, unterschritten diese die durch die Feldstärkemessung ermittelte Immission massiv. Für LTE hingegen fiel die Übereinstimmung der Messungen für den Großraum München deutlich besser aus. Zwar gibt es auch hier abhängig vom Frequenzband deutliche Unterschiede, in der Gesamtbilanz sind jedoch die wesentlichen Immissionsbeiträge erhalten. Eine leichte Tendenz zur Unterschätzung bleibt bestehen. Die maximale Unterschätzung der Grenzwertausschöpfung liegt etwa bei Faktor vier. Gemessen daran, dass die bei der Feldstärkemessung für LTE aufgetretenen Ausschöpfungsgrade insgesamt ungefähr über den Faktor 200 variieren, ist dies jedoch noch immer eine moderate Abweichung. Es kann daher davon gesprochen werden, dass zumindest zu LTE eine grobe Orientierung für die Gesamtimmission aus den Smartphone-Daten gewonnen werden kann. Die Daten aus nur einem Monat für das Gebiet Aachen reichten jedoch auch bei LTE nicht für eine brauchbare Immissionsabschätzung aus. Es sind daher längere Datenerhebungszeiträume erforderlich, um eine ausreichende Datenbasis aufzubauen.

Insgesamt haben die Untersuchungen im vorliegenden Projekt zeigen können, dass die grundsätzliche technische Machbarkeit für ein auf Smartphones basierendes Messnetzwerk zur Immissionsabschätzung gegeben ist. Diese ergibt sich daraus, dass die wichtigsten erforderlichen Parameter von den Smartphones erfasst werden und im Betriebssystem Android für eine App abrufbar sind. Außerdem weisen die Messeigenschaften der Smartphones einen ausreichend direkten Zusammenhang zwischen der gemessenen Signalstärke und der vorliegenden Feldstärke auf. Auch die benötigte technische Infrastruktur lässt sich mit den heutigen Möglichkeiten mit vertretbarem Aufwand umsetzen.

Allerdings haben sich andererseits erhebliche Schwachpunkte herausgestellt, die einer erfolgreichen Anwendung entgegenstehen. Dazu gehört, dass die Abdeckung aller relevanten Immissionsbeiträge des Mobilfunks nicht gewährleistet werden kann. Insbesondere die ausreichende Erfassung aller Mobilfunkstandards ist nach derzeitigem Stand nicht zu erreichen. Weiterhin bleibt eine hohe Ungewissheit darüber bestehen, ob sämtliche Immissionsanteile für einen Ort ermittelt werden konnten oder nicht. Dies ist vor allem in weniger frequentierten Gebieten ein großes Problem. Zuletzt ist die zukünftige Anwendbarkeit bei 5G und darüber hinaus aufgrund der hohen Komplexität und erschwerten Bedingungen hinsichtlich einer pauschalen Extrapolation auf Maximalimmission beim Einsatz von aktiven Antennen nur bedingt oder nicht möglich.

Dem Anspruch eines vollumfänglichen Monitoringsystems zur quantitativen Abschätzung der Exposition kann ein Messnetzwerk mit Smartphones daher nicht gerecht werden. Trotzdem könnte ein derartiges System einen gewissen Nutzen entfalten. So wäre zumindest für den derzeit gebräuchlichsten Funkstandard, LTE, eine einigermaßen verlässliche Aussage zur Immission in gut abgedeckten Gebieten zu erreichen. Die ableitbaren Immissionskarten können einen Eindruck davon vermitteln wie die Immission verteilt ist und zur gezielten Auswahl von Messpunkten für Messkampagnen mit Feldstärkemessgeräten dienen. Dennoch bleibt der Nutzen einer Umsetzung voraussichtlich insgesamt zu gering und rechtfertigt daher vermutlich die erforderlichen Aufwendungen langfristig nicht.

Summary

This feasibility study aims to answer the question whether it is technically and economically possible to use the signal strengths measured on ordinary smartphones in a crowdsourcing-based approach to generate a representative picture of the exposure to mobile radio electromagnetic fields. The basic idea is that in order to establish and maintain a connection with the mobile network, mobile terminals need to regularly detect the signal strengths of the surrounding radio cells. The signal strengths are in turn directly linked to the underlying electromagnetic field strength and thus also to the exposure emanating from it. However, the determination of a field strength estimate from a single signal strength measurement of a smartphone is subject to greater uncertainties than is the case for measurements with a dedicated field strength meter. Therefore, the significantly larger number of measurements that can be recorded with many smartphones is to be used to obtain a more stable exposure estimate. For this purpose, crowdsourcing is used, in which data is collected with the help of an app to be installed on the smartphones of ordinary users. The measurement results are then collected centrally on a server and evaluated to obtain an exposure estimate. In this way, a monitoring system could be established that provides much more comprehensive and time-continuous data for exposure estimates based on it than would be possible with conventional methods.

The review of the relevant state of the art in science and technology has shown that the mobile radio standards define measurements to be performed by the terminal equipment, for which the measured quantities are directly related to the exposure. The code-selective measurement methods commonly used in exposure measurements are based on the extraction of the same signal components as used by smartphones. A comparison with Android documentation and the practical implementation of an app for the study's investigations made it clear that the most important measured variables and information on the radio cell can be obtained via corresponding interfaces within the Android operating system. These allow an estimation of the maximum exposure of the downlink, which occurs under full load of the radio cells, but not of the instantaneous exposure and the uplink exposure. However, general assumptions have to be made for certain parameters of the extrapolation, since the corresponding information cannot be obtained from the smartphone records. Furthermore, the literature study illustrates that the research question has not been answered sufficiently before, since neither the correlation between the signal strength indicators of smartphones and the electric field strength has been investigated in detail nor the crowdsourcing approach has been pursued in this context under realistic conditions. Both were comprehensively undertaken in the present study.

The investigations into the measurement properties of smartphones carried out as part of the study included observing their behavior in the event of sharp signal level jumps and determining update rates for the measured values. It was demonstrated that signal level changes are tracked so quickly that reliable measurements of the signal strength present at the location are obtained even in the case of a moving device. Further measurements verified that the signal strength measurements are not affected by strong signals at frequencies in the immediate vicinity of the used frequency channel, as long as the interference is outside the respective signal bandwidth of the mobile radio channel. Laboratory measurements to check the value ranges and limits showed that all signal levels can be detected by the smartphone modem and

reported to the base station in 1 dB steps over the entire value range specified in the standard. However, when using data access via Android, experience has shown for UMTS and GSM that the signal strengths are only output via the API in steps of 2 dB and the value range is cut off at -51 dBm, although the value range actually extends to -48 dBm (GSM) and -24 dBm (UMTS). This means that an underestimation occurs at high field strengths due to the loss of the higher values of the signal strength scale, which cannot be compensated for easily.

During the measurements to determine conversion factors from signal to field strength values, a linear relationship was found between the measured signal strength of the smartphones and the field strengths present. Despite individual jumps in the linear curve under laboratory conditions, no impairment was observed in the field. The conversion factors determined tended to be greater in the higher frequency bands. Across the different smartphones, the fluctuation ranges for the conversion factors in the field were between about 5 and 8 dB, depending on the frequency band and radio service, and thus remained within tolerable limits.

In the laboratory measurements, a strong directional dependence of the signal strength measurement value was revealed for the case of a signal arriving from only a single direction. This dependence was considerably weaker in similar investigations under field conditions, where the signal arrives at the smartphone from several directions simultaneously due to multipath propagation. Similarly, although not to the same extent, the attenuation due to user influence was greater in the laboratory measurements than under field conditions. Overall, an expanded measurement uncertainty for the determination of electric field strength from a single smartphone signal strength measurement of 16.7 dB could be estimated.

The measurements clearly showed that there is a sufficient correlation between the electric field strength and the signal strength measurements and that the most important metrological properties are given in order to derive estimated values of the field strength with a certain uncertainty.

The determination of exposure estimates from smartphone signal strength measurements was practically tested in further work steps using two data packages that were collected by an existing crowdsourcing network. One included smartphone data from the Munich metropolitan area over a period of one year and the second from the Aachen urban area over a period of one month. For this purpose, a processing chain was designed and implemented that prepared and sorted out the raw data, suitably interpolated and smoothed the measured data, converted the signal strengths into field strengths, and estimated the maximum total exposure for locations within the study areas by superimposing and extrapolating all exposure contributions.

During data preparation, much of the data had to be sorted out because the data sets were deemed unreliable or were incomplete or contained invalid values. The statistical overview of the composition of the data packets showed a strong imbalance among the network operators. Telefónica was represented about twice as often as the other two German network operators. The difference between the number of measurements for LTE versus UMTS and especially GSM was even more serious. This network generation accounted for a total of only 2.3% of all entries in the Munich metropolitan area.

The exposure maps produced showed for LTE that areas of higher and lower exposure can be identified. However, there is uncertainty about whether areas with lower estimated exposure

actually have lower field strengths or whether instead not all radio cells with relevant exposure contributions were recorded. In the case of UMTS and especially GSM, however, it has become clear from the gaps in the map and the small amount of data that no coverage has been achieved that can contain all exposure contributions.

Finally, this also manifested itself in the comparison of field strength measurements with the exposure estimate from the smartphone data, since an exposure estimate for GSM was hardly possible at any of the measurement locations. Where estimated values were obtained at all, they fell massively below the exposure determined by the field strength measurement. For LTE, on the other hand, the agreement between the measurements for the Munich area was significantly better. Although there are also significant differences depending on the frequency band, the overall balance includes the main exposure contributions. A slight tendency to underestimation remains. The maximum underestimation of the exposure level is about a factor of four. Measured against the fact that the degree of exhaustion of the field strength measurement for LTE varies overall by a factor of about 200, it is still possible to classify the exposure level. It can therefore be said that, at least for LTE, a rough orientation for the total exposure can be obtained from the smartphone data. However, the data from only one month for the Aachen area were not sufficient for a useful exposure estimate, even for LTE. Longer data collection periods are therefore required to build up a sufficient database.

Overall, the investigations in this project have shown that the basic technical feasibility of a smartphone-based measurement network for exposure estimates is given. This results from the fact that the most important required parameters are recorded by the smartphones and can be retrieved by an app in the Android operating system. In addition, the measurement properties of the smartphones show a sufficiently direct correlation between the measured signal strength and the field strength present. The required technical infrastructure can also be implemented with reasonable effort using today's possibilities.

On the other hand, however, considerable weaknesses have emerged that prevent a successful application. One of these is that the coverage of all relevant exposure contributions of mobile radio cannot be guaranteed. In particular, sufficient coverage of all mobile radio standards cannot be achieved according to the current status. Furthermore, there remains a high degree of uncertainty about whether all exposure contributions for a location could be determined or not. This is a major problem, especially in less frequented areas. Finally, the future applicability for 5G and beyond is only possible to a limited extent or not at all due to the high complexity and difficult conditions regarding a blanket extrapolation to maximum exposure when using active antennas.

Therefore, a measurement network with smartphones cannot meet the requirement of a fully comprehensive monitoring system for quantitative estimation of the exposure. Nevertheless, such a system could be of some use. At least for the currently most common radio standard, LTE, a reasonably reliable statement on the exposure in well-covered areas could be achieved. The exposure maps that can be derived can give an impression of how the exposure is distributed and can be used for the targeted selection of measurement points for measurement campaigns with field strength measuring devices. Nevertheless, the overall benefit of implementation is likely to remain too low and therefore probably does not justify the necessary expenditure in the long term.

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Ein Expositionsmonitoring hochfrequenter elektromagnetischer Felder könnte zur Abschätzung der von den Feldern ausgehenden gesundheitlichen Risiken für die Bevölkerung hilfreich sein. Damit zeitliche und örtliche Variationen mit einer für belastbare Expositionsdaten ausreichenden Auflösung erfasst werden können, sind regelmäßig wiederholte Messungen an vielen Punkten nötig. Die Realisierung eines flächendeckenden und kontinuierlichen Monitorings ist aufgrund des mit herkömmlichen Methoden verbundenen Aufwands nicht möglich. Für den Bereich des Mobilfunks könnte ein crowdsourcingbasierter Ansatz, der auf die Erhebung von Messdaten mittels Standard-Smartphones setzt, Abhilfe schaffen. Hiermit ließe sich womöglich ein engmaschiges und kontinuierlich arbeitendes Messnetzwerk aufbauen. Das vorliegende Vorhaben beabsichtigt daher die technische und wirtschaftliche Umsetzbarkeit dieses Ansatzes zu untersuchen. Konkret soll die Frage geklärt werden, ob die von vielen Endgeräten gemessenen Signalstärkeindikatoren ein repräsentatives Bild der Exposition über das gesamte genutzte Mobilfunkspektrum zeichnen können. Dazu ist zu ermitteln, welche Parameter mithilfe einer entsprechenden Anwendung auf dem weit verbreiteten Smartphone-Betriebssystem Android erfassbar sind und zu diesem Zweck ausgewertet werden können. Auch wenn Smartphones in der Regel über weitere Funkschnittstellen wie WLAN, Bluetooth oder NFC verfügen, beschränkt sich dieses Forschungsvorhaben ausschließlich auf die Abschätzung der Exposition durch den Mobilfunk.

Das Konzept macht sich zunutze, dass Mobilfunkendgeräte zum Einbuchen in eine Funkzelle und zur Aufrechterhaltung der Verbindung regelmäßig Empfangsparameter erfassen, die mit der Feldstärke des Mobilfunk-Downlinks und somit auch mit der Immission verknüpft sind. Da Smartphones sich typischerweise in direkter Nähe zu Personen befinden, ließen sich aus den gewonnenen Daten prinzipiell Beiträge zur Exposition der Bevölkerung abschätzen. Zwar ist die Einzelmessung eines Smartphones mit größeren Unsicherheiten behaftet, vor allem wenn der Einfluss des Nutzers hinzukommt, als es beim Einsatz eines dezidierten Feldstärkemessgeräts der Fall ist, aber dafür lassen sich Messwerte in wesentlich größerer Zahl erfassen. Hierfür kommt das sogenannte Crowdsourcing zum Einsatz, bei dem die Datenerhebung von wenigen Fachleuten auf eine große Zahl von Laien übertragen wird, die mit ihren Smartphones Messwerte aufzeichnen. Grundsätzlich kann dies mit aktiver Mitwirkung des Nutzers geschehen, der einzelne Messungen startet, oder aber nach entsprechender Zustimmung kontinuierlich im Hintergrund erfolgen. Werden diese Messwerte von einer großen Menge an Endgeräten und in kurzen Zeitabständen aufgezeichnet, lassen sich diese Daten zentral sammeln und auswerten. Ziel der gemeinsamen Auswertung der Messdaten ist die Verbesserung der Messgenauigkeit des Gesamtsystems gegenüber der Genauigkeit der Einzelmessung eines Endgeräts. Eine spezielle App kann die Messdaten erfassen, zwischenspeichern und an einen Cloud-Dienst weitergeben. Dort können die Daten aufbereitet und ausgewertet werden. Zu erfassen sind, neben den Messwerten selbst, der Zeitpunkt und die genaue Position der Messung. Weitere Informationen über den Nutzungszustand können helfen den möglichen Einfluss

des Nutzers abzuschätzen. Abbildung 1-1 veranschaulicht noch einmal das Grundprinzip des beschriebenen Ansatzes.

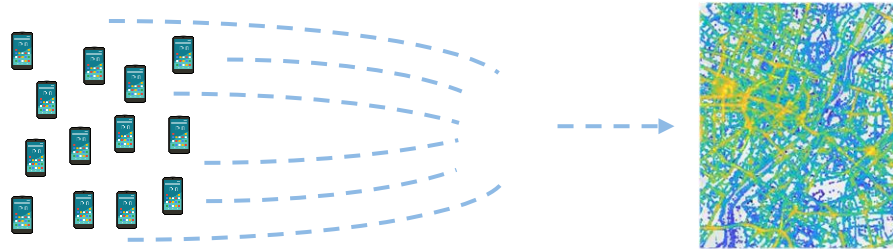


Abbildung 1-1 Veranschaulichung des Ansatzes zur Immissionsabschätzung mit Smartphones

1.2 Gliederung des Berichts

Der vorliegende Bericht gliedert sich wie folgt:

In Kapitel 2 erfolgt eine umfangreiche Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik. Darin wird zunächst anhand der Spezifikationen der Mobilfunkstandards ergründet, welche Signalstärkeindikatoren durch Mobilfunkendgeräte erfasst werden, bevor in einem weiteren Schritt geprüft wird, welche Informationen zur Mobilfunkverbindung im Android-Betriebssystem über entsprechende Schnittstellen durch eine App abgerufen werden können. Weiterhin werden die bereits bestehenden Arbeiten im Umfeld der Forschungsfragestellung vorgestellt und weitere relevante Aspekte vor der weiteren Bearbeitung erörtert.

Kapitel 3 widmet sich der Untersuchung der Messeigenschaften von Smartphones. Dafür werden zuerst die physikalischen Eigenschaften der Messwertaufnahme wie das Verhalten bei Signalpegelsprüngen, Aktualisierungsraten sowie Wertebereiche und Limits betrachtet. Anschließend werden Labor- und Feldmessungen präsentiert, die der Ermittlung von Umrechnungsfaktoren von Signalstärken in Feldstärkewerte und Einflüssen auf die Signalstärkemessergebnisse zum Ziel haben. Den Schluss des Kapitels bildet eine Abschätzung der Genauigkeit der aus einer einzelnen Smartphone-Signalstärkemessung ermittelten Feldstärke auf Basis der vorliegenden Messergebnisse.

Im Mittelpunkt von Kapitel 4 steht die praktische Erprobung der Auswertung von Smartphone-Crowdsourcingdaten anhand zweier Datenpakete eines bestehenden Crowdsourcing-Netzwerks. Dazu gehört nach erfolgtem Import in die genutzte Auswertungsumgebung die eingehende Prüfung auf Plausibilität und Verwertbarkeit der enthaltenen Datensätze. Nach dem Aussortieren unbrauchbarer Einträge wird ein statistischer Überblick über die Zusammensetzung der Datenpakete und die Verteilung der Messungen in der Fläche präsentiert. Es folgt die Vorstellung von möglichen Methoden zur Interpolation der Rohdaten, die anschließend zur Erstellung von Immissionskarten angewendet werden. Abschließend erfolgt ein Vergleich von Feldstärkemessungen mit den Ergebnissen der Immissionsabschätzung aus den Smartphone-Daten.

Das abschließende Kapitel 5 nimmt eine finale Bewertung des Konzepts eines Smartphone-basierten Messnetzwerks zur Expositionsabschätzung des Mobilfunks vor. Nach Beschreibung der Anforderungen an ein solches System erfolgt ein Abgleich mit den Ergebnissen der vorhergehenden Kapitel, um zu prüfen, inwieweit diese erfüllt sind. Die Vor- und Nachteile des

Ansatzes werden ebenso wie die Schwächen und mögliche Lösungen dieser diskutiert, bevor ein endgültiges Fazit mit einer Bewertung gezogen wird.

2 Relevanter Stand von Wissenschaft und Technik

Dieses Kapitel stellt wesentliche Grundlagen zur Beantwortung der Fragestellung nach der Machbarkeit eines derartigen Expositionsmonitorings mittels Smartphones dar und widmet sich der Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik. Es gliedert sich wie folgt: Zunächst werden die Signalstärkeindikatoren der Mobilfunkstandards zusammengestellt und erläutert. Anschließend wird der Bezug dieser Indikatoren zu den Messgrößen der Immissionsmesstechnik betrachtet und diskutiert. Abschnitt 2.2 geht darauf ein, welche der zuvor beschriebenen Signalstärkeindikatoren innerhalb des Betriebssystems Android abgerufen werden können und welche weiteren zur Expositionsauswertung erforderlichen Daten erhältlich sind. Die bestehenden Arbeiten des Auftragnehmers und anderer Stellen werden in Teilkapitel 2.3 vorgestellt und die daraus abzuleitenden Erkenntnisse benannt. Abschnitt 2.4 befasst sich mit weiteren relevanten Aspekten im Zusammenhang mit der Umsetzung eines Messnetzwerks wie etwa dem Datenschutz, verfügbaren Datenbanken und Nutzereinflüssen. Schließlich werden in Abschnitt 2.5 Schlussfolgerungen aus den erarbeiteten Erkenntnissen gezogen und in Bezug zu den weiteren Arbeiten gestellt.

Die durchgeführte Literaturstudie umfasste einerseits zahlreiche Dokumente, die die Mobilfunkstandards spezifizieren und andererseits Recherchen in einschlägigen Literaturdatenbanken, um die wissenschaftlichen Aspekte zu erfassen. Als Suchbegriffe wurden verschiedene Kombinationen von Wörtern genutzt, die Ergebnisse rund um die Themen Immissionserfassung mit Smartphones erwarten ließen. Die genutzten Datenbanken waren:

- IEEE Xplore
- PubMed
- Web of Science
- SpringerLink
- CrossRef

Daneben wurden Internetrecherchen betrieben, um die Literatursuche abzurunden und zu vervollständigen. Die gefundenen Dokumente wurden gesichtet und anhand der Themen des Berichts geordnet und ausgewertet. Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Kapitels vorgestellt.

2.1 Signalstärkeindikatoren der Mobilfunkstandards

Mobilfunkendgeräte erfassen verschiedene Signalstärkeindikatoren, um eine Verbindung mit dem Mobilfunknetz herstellen und aufrechterhalten zu können. Außerdem werden sie zur Leistungsregelung und Auswahl geeigneter Modulationsverfahren für die jeweilige Empfangssituation genutzt. Diese Signalstärkeindikatoren hängen mit der Feldstärke, die an der Empfangsantenne vorherrscht, zusammen und somit letztlich auch mit der vorhandenen elektromagnetischen Immission. Aus den Definitionen der Mobilfunkstandards und weiteren Quellen, werden

im Folgenden die in den Mobilfunknetzwerken der zweiten bis fünften Generation aufgenommenen Messgrößen extrahiert und deren Eigenschaften zusammengestellt. Anschließend werden sie den in der Immissionsmesstechnik angewendeten Messgrößen gegenübergestellt und mit ihnen verglichen. Ähnlichkeiten und Unterschiede werden aufgezeigt und diskutiert.

2.1.1 LTE

2.1.1.1 Wesentliche Eigenschaften

Zum Verständnis der Signalstärkeindikatoren werden im Folgenden die grundlegenden Eigenschaften der physikalischen Schicht von LTE (Long Term Evolution) und der verwendeten Signalstruktur dargestellt. Aufgrund der Komplexität und Flexibilität wird die Darstellung auf die für das Vorhaben relevanten Aspekte und in Deutschland gebräuchliche Konfigurationen beschränkt. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit für den Up- und Downlink zeitlich abwechselnd die gleiche Frequenz zu nutzen (Time Division Duplex (TDD)) oder Up- und Downlink-Kanal simultan, aber auf zwei unterschiedlichen Frequenzen zu senden (Frequency Division Duplex (FDD)). In Deutschland wird bei LTE im operativen Netzbetrieb bislang überwiegend FDD verwendet und daher in den weiteren Ausführungen als Standard angenommen.

Bei LTE wird ein Verfahren mit der Bezeichnung *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)* genutzt, das mehrere orthogonale Träger zur Datenübertragung für verschiedene Nutzer verwendet. Das Signal setzt sich im Frequenzbereich aus nebeneinanderliegenden Unterträgern (Subcarrier) der Bandbreite 15 kHz und im Zeitbereich aus aufeinanderfolgenden Symbolen im Abstand von 71,4 μ s zusammen [1]. Diese Struktur, das sogenannte Resource Grid (Ressourcengitter), ist in Abbildung 2-1 in einem Ausschnitt um die Mitte des Frequenzkanals dargestellt. Die kleinste Einheit innerhalb des Resource Grids besteht aus der Kombination eines Unterträgers mit einem Symbol und wird Resource Element genannt. Sieben aufeinanderfolgende Symbole bilden einen Slot, von denen wiederum zwei zusammen einen Subframe ergeben. Ein Frame von 10 ms Länge besteht aus insgesamt 10 Subframes. Zwölf nebeneinanderliegende Unterträger und die Symbole eines Subframes formen an bestimmten Stellen im Resource Grid zusammen einen Physical Resource Block (PRB). Zwei zeitlich aufeinanderfolgende PRBs bilden die kleinste Einheit, die beim Zuteilen von Übertragungsressourcen („Scheduling“) an ein Endgerät (bei LTE als User Equipment bezeichnet (UE)) vergeben werden können.

Eine Basisstation kann die Signale einer Funkzelle in verschiedenen sogenannten Transmission Modes über mehrere Antennen abstrahlen. Gängig sind derzeit eine, zwei oder vier Antennen, wobei zwei bzw. vier Antennen in Deutschland am häufigsten anzutreffen sind. Diese Antennen sind in der Regel in einem gemeinsamen Gehäuse verbaut und durch unterschiedliche Polarisierung und ihre Anordnung derart entkoppelt, dass die von ihnen ausgehenden Signale möglichst unterschiedliche Signalwege nehmen und entlang des Pfades möglichst unterschiedlich beeinflusst werden. Auf diese Weise lässt sich die Übertragungskapazität oder die Robustheit der Übertragung steigern. Die neuesten Releases von LTE ermöglichen darüber hinaus noch die Nutzung von Massive MIMO, das aber bei LTE derzeit nur geringe Bedeutung im operativen Betrieb in deutschen Mobilfunknetzen hat.

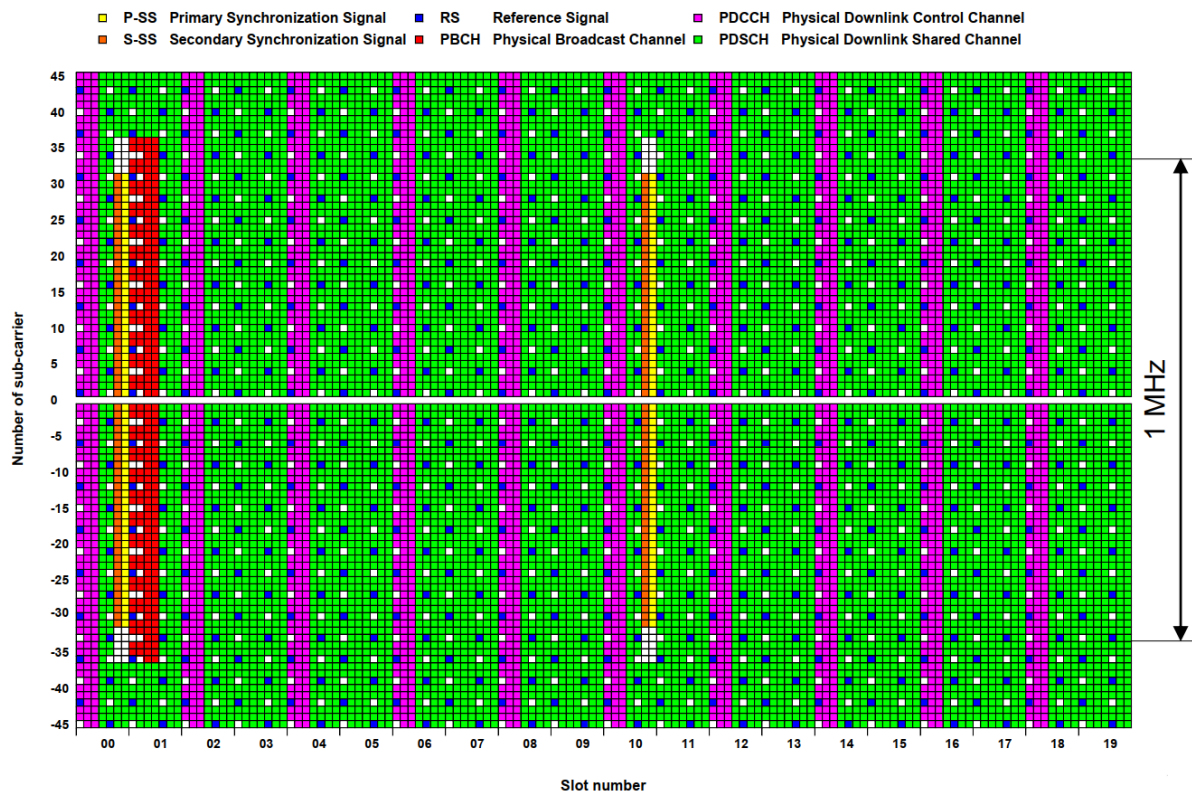


Abbildung 2-1 Signalstruktur von LTE im Downlink an Antennen-Port 0 für den Fall von zwei Sendeantennen und Frequency Division Duplex (FDD) [2]

Die unterschiedlichen Farben innerhalb des Resource Grids in Abbildung 2-1 differenzieren zwischen verschiedenen physikalischen Kanälen und Signalen [3]:

- **Primary Synchronization Signal (P-SS) und Secondary Synchronization Signal (S-SS):** Ermöglicht Endgeräten das Auffinden von Funkzellen und das Ermitteln des Startzeitpunkts der Frames und wird in jedem ersten und sechsten Subframe auf den mittleren 72 Unterträgern (1,08 MHz) eines Kanals übertragen.
- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** Stellt wichtige Systemparameter für die Synchronisation der Endgeräte bereit und wird in den drei Symbolen nach dem PSS und S-SS auf den mittleren 72 Unterträgern des Kanals in jedem vierten Frame ausgesendet.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** Wird genutzt, um den Endgeräten mitzuteilen, wann und wo sie Daten empfangen und senden sollen.
- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** Dient der Übertragung von Nutzerdaten und nimmt den größten Teil der Ressourcen-Elemente ein.
- **Reference Signal (RS):** Das Referenzsignal wird unter anderem während der Netzwerksuche verwendet und um die Signalstärke einschätzen zu können. In ihm wird durch spezielle Signalsequenzen die Physical Cell ID (PCI) ausgesendet, die sich für benachbarte Funkzellen unterscheidet und dem Endgerät ermöglicht zwischen diesen zu unterscheiden. Es ist also zellspezifisch. Das Referenzsignal wird in einzelnen Ressourcen-Elementen ausgesendet, die in einem definierten Muster im gesamten Re-

source Grid verteilt sind. Das Muster unterscheidet sich an den verschiedenen Antennen-Ports abhängig davon, ob ein, zwei oder vier Antennen genutzt werden. Abbildung 2-2 zeigt, wo die Ressourcenelemente des Referenzsignals für die unterschiedlichen Antennen-Ports liegen. Diese werden abhängig von der Nummer des Antennen-Ports als R_0 , R_1 , R_2 bzw. R_3 bezeichnet. An den jeweiligen Stellen im Resource Grid, an denen an einem anderen Antennen-Port ein Referenzsignal gesendet wird, findet keine Übertragung statt und diese Ressourcen-Elemente bleiben leer. Dies ist in Abbildung 2-2 durch X-gemusterte Flächen gekennzeichnet.

Die Sendeleistung der Ressourcenelemente des Referenzsignals ist konstant über Frequenz und Zeit [4] und die Aussendung erfolgt unabhängig von jeglicher anderen Datenübertragung. Die Sendeleistungen anderer Ressourcenelemente, wie etwa für den PDSCH, werden im Verhältnis zur Sendeleistung des Referenzsignals definiert und können sowohl zellspezifisch als auch nutzerspezifisch sein. Meist ist es üblich, dass die Leistung des Referenzsignals gegenüber den übrigen Ressourcenelementen um 3 dB erhöht ist. Man spricht hier vom sogenannten „RS-Boost“. Dies trifft in der Regel auch auf die Synchronisierungssignale zu.

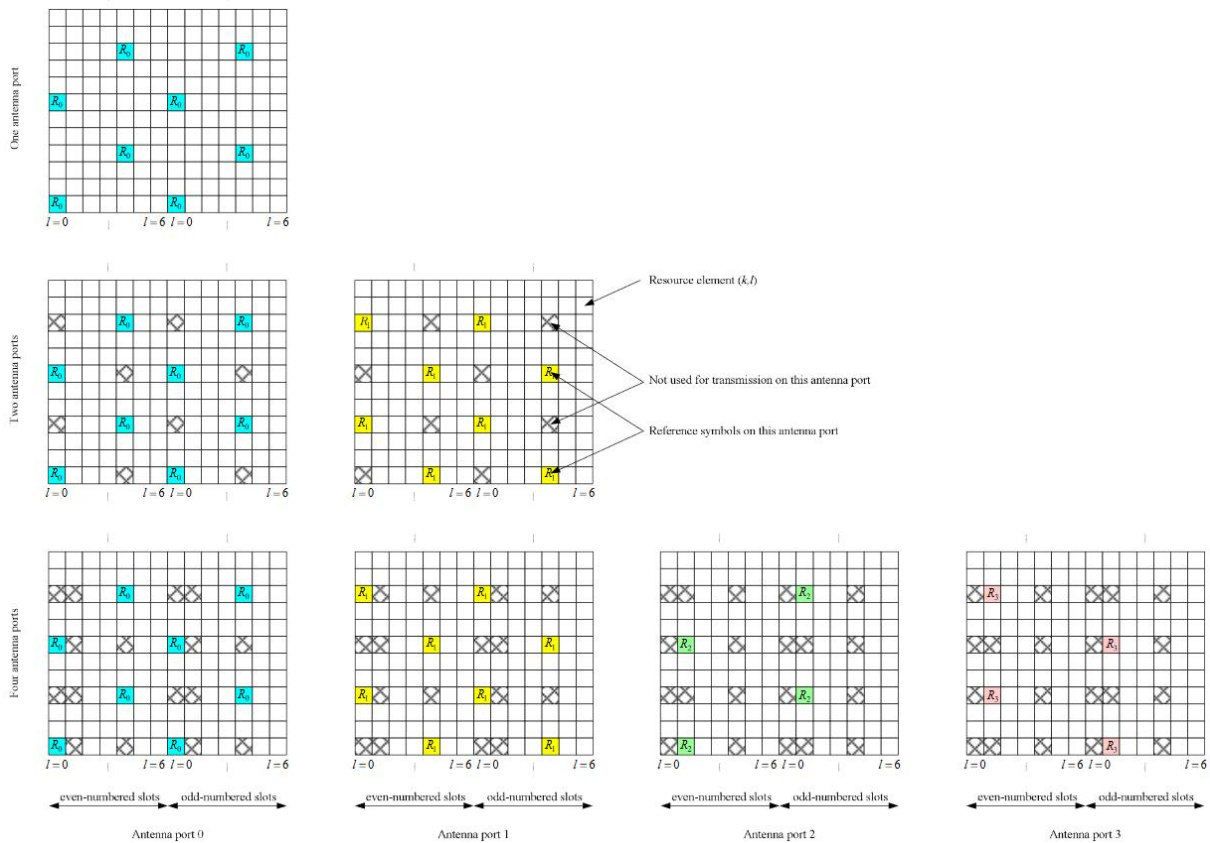


Abbildung 2-2 Verteilung des Referenzsignals abhängig von der Anzahl genutzter Antennen-Ports [1]

Die in Deutschland gebräuchlichen Kanalbandbreiten bei LTE sind mit den zugehörigen Signalbandbreiten sowie der Anzahl an Physical Resource Blocks und Unterträgern in Tabelle 2-1 aufgeführt. Damit benachbarte Kanäle einander nicht stören, ist die Signalbandbreite stets geringer als die Kanalbandbreite.

Kanalbandbreite	Signalbandbreite	Anzahl PRBs	Anzahl Unterträger
5 MHz	4,5 MHz	25	300
10 MHz	9 MHz	50	600
15 MHz	13,5 MHz	75	900
20 MHz	18 MHz	100	1200

Tabelle 2-1 In Deutschland gebräuchliche Kanal- und Signalbandbreiten bei LTE

2.1.1.2 Von Endgeräten erfasste Signalstärkeindikatoren

Die von den Endgeräten gemessenen Signalstärkeindikatoren werden in den Standards [5] definiert und als Physical Layer Measurements bezeichnet. Die wichtigsten Parameter werden im Weiteren aufgeführt und erläutert.

2.1.1.2.1 Reference Signal Received Power (RSRP):

Der Parameter *Reference Signal Received Power (RSRP)* ist definiert als der lineare Mittelwert über die Leistungsbeiträge der Ressourcenelemente, die das zellspezifische Referenzsignal tragen. Das heißt, dass die entsprechenden Ressourcenelemente aus dem Resource Grid extrahiert werden und die Leistung summiert wird. Anschließend wird durch die Anzahl der summierten Ressourcenelemente dividiert, um die mittlere Leistung bezogen auf ein Ressourcenelement zu erhalten. Die Basisstation kann eine Messbandbreite vorgeben, die schmäler ist als die Signalbandbreite, sodass möglicherweise nicht alle Ressource-Elemente mit Referenzsignal entlang der Frequenz in die Messung eingehen. Grundsätzlich wird zur Bestimmung von RSRP das Referenzsignal vom Antennen-Port 0 (R_0) genutzt, sofern das Endgerät jedoch verlässlich auch RS_1 identifizieren kann, so können dessen Ressourcenelemente ebenfalls in die Mittelung einbezogen werden. Insgesamt bleibt es der Implementierung des Endgeräts überlassen, wie viele Ressourcenelemente innerhalb der Messbandbreite und der Messperiode verwendet werden, um RSRP zu ermitteln, solange die Anforderungen an die Messgenauigkeit erfüllt werden.

Als Referenzpunkt für die Leistungsmessung wird der Antennenanschluss des Endgeräts angesehen. Wenn am Endgerät mehrere Empfangszweige existieren, um Diversität zu nutzen, soll der ermittelte RSRP-Wert nicht kleiner als der höchste RSRP-Wert sein, der an allen anderen Zweigen bestimmt wurde.

Der Meldebereich von RSRP reicht von -156 dBm (in früheren Releases -140 dBm) bis -44 dBm und besitzt eine Auflösung von 1 dB [6]. Endgeräte müssen jedoch nicht den gesamten Bereich abdecken.

Der Standard gibt verschiedene Messgenauigkeiten vor, die bei der Bestimmung von RSRP unter verschiedenen Bedingungen einzuhalten sind. Es wird zwischen absoluter und relativer Genauigkeit unterschieden, wobei „absolut“ bedeutet, wie die Abweichung vom tatsächlichen Absolutwert ausfallen darf. „Relative Genauigkeit“ meint, wie groß die Abweichung zwischen Messungen in unterschiedlichen Funkzellen ausfallen darf. Es wird in beiden Fällen zwischen Funkzellen auf der gleichen Frequenz (intra-frequency) und Funkzellen auf anderen Frequenzen (inter-frequency) unterschieden. Die relativen Messgenauigkeiten sind für das Endgerät

relevant, um die Empfangsleistung von verschiedenen Funkzellen zum Zwecke der Entscheidung über einen Zellwechsel verlässlich vergleichen zu können. Für das Smartphone als Messsonde eines Messnetzwerks hingegen ist dieser Wert weniger relevant. Stattdessen sind die absoluten Messgenauigkeiten von Bedeutung und daher in Tabelle 2-2 aufgeführt. Mit dem dort aufgeführten Parameter „Bedingungen“ sind Umstände wie Akkuladezustand, Temperatur und Vibrationen gemeint. Extrembedingungen liegen demnach vor, wenn der Akkuladezustand sehr niedrig ist, die Temperatur sehr hoch ist oder das Endgerät anderen ungünstigen Konditionen wie Vibrationen ausgesetzt ist. Daneben wird zwischen unterschiedlich hohen Empfangsleistungen (hier vereinfacht dargestellt) unterschieden, bei denen verschiedene Genauigkeiten einzuhalten sind. Für sehr hohe und sehr niedrige Empfangsleistungen sind keine Anforderungen an die Messgenauigkeiten definiert.

Empfangene Kanalleistung	Bedingungen	
	normal	extrem
≤ -70 dBm	$\pm 4,5$ dB	± 9 dB
> -70 dBm	± 8 dB	± 11 dB

Tabelle 2-2 Mindestanforderungen an absolute Messgenauigkeiten von RSRP laut Standard [6]

Diese Anforderungen sind als absolute Mindestanforderungen an ein Endgerät zu verstehen, die unter allen Umständen einzuhalten sind. Es ist davon auszugehen, dass die tatsächlichen Werte in der Regel besser ausfallen, da die Geräte auch bei Schwankungen einer Serienproduktion die Anforderungen erfüllen müssen.

Die Messgenauigkeit ist nach der Mittelung im sogenannten Layer 1, auch als „Layer 1 Filtering“ bezeichnet, einzuhalten. Diese sieht laut [7] typischerweise so aus, dass die Messung über einen Subframe alle 40 ms erfolgt, also in jedem vierten Frame. Über insgesamt fünf dieser Messungen wird wiederum blockweise gemittelt, sodass sich eine Mittelungsdauer von 200 ms ergibt. Die so bestimmten Werte, werden an das Layer 3 zur Entscheidung über Zellwechsel weitergegeben [8]. Dort wird jedoch zunächst eine weitere Filterung vorgenommen und zwar, indem der aktuelle Messwert mit dem vorherigen gefilterten Wert wie in Gleichung 2-1 verrechnet wird [9]. Dies entspricht einem Filter mit unendlicher Impulsantwort (IIR-Filter), wodurch sich der Messwert nur allmählich ändert. Der Gewichtungsfaktor des vorherigen Messwerts ist konfigurierbar ebenso wie die Häufigkeit der Aktualisierung des Messwerts.

$$F_n = (1 - a) \cdot F_{n-1} + a \cdot M_n \quad 2-1$$

Mit

- M_n neuester Messwert aus der physikalischen Schicht (Layer 1)
- F_{n-1} vorheriger gefilterter Wert
- F_n neuer gefilterter Wert
- a Gewichtungsfaktor für den neuen Messwert

2.1.1.2.2 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Der *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* umfasst den linearen Mittelwert der gesamten Empfangsleistung (in Watt), die durch das Endgerät in bestimmten Symbolen von Measurement Subframes innerhalb der Messbandbreite (eine Anzahl N nebeneinanderliegender Ressourcenblöcke in der Mitte des Frequenzkanals) beobachtet wird. Dies schließt die Leistung aller Quellen inklusive benachbarter Funkzellen, Interferenzen benachbarter Kanäle, thermischen Rauschens etc. ein. Die Messbandbreite entspricht derjenigen von RSRP und wird von der Basisstation vorgegeben.

Soweit nicht anders durch höhere Schichten (Layer) vorgegeben, wird RSSI in Symbolen von Measurement Subframes gemessen, die das Referenzsignal für Antennen-Port 0 enthalten. Wenn von höheren Layern angezeigt, wird RSSI über alle Symbole der Measurement Subframes gemessen. Auch bestimmte Measurement Subframes können vorgegeben werden.

Der Referenzpunkt der Messung liegt wieder beim Antennenanschluss.

Für RSSI sind für den allgemeinen Fall keine Anforderungen an die Genauigkeit angegeben. Vielmehr ergeben sich diese aus den Vorgaben für RSRQ (siehe nächster Abschnitt), in dessen Bestimmung RSSI eingeht.

2.1.1.2.3 Reference Signal Received Quality (RSRQ)

Der Parameter *Reference Signal Received Quality (RSRQ)* ist ein Maß für die Qualität des empfangenen Signals und wird aus dem Verhältnis von RSRP zu RSSI berechnet (siehe Gleichung 2-2). Dabei wird RSRP zusätzlich mit der Anzahl N der entlang der Frequenz benachbarten Ressourcenblöcke multipliziert, über die die beiden Messungen ausgeführt werden. Dadurch wird erreicht, dass RSRQ unabhängig von der Messbandbreite wird, denn, während RSRP immer auf ein Ressourcenelement bezogen ist, vergrößert sich RSSI mit zunehmender Messbandbreite.

$$\text{RSRQ} = \frac{N \cdot \text{RSRP}}{\text{RSSI}} \quad 2-2$$

mit

- N : Anzahl der Physical Resource Blocks, die entlang der Messbandbreite in die Messung eingehen.

Die Messungen im Zähler und Nenner sollen jeweils über den gleichen Satz von Ressourcenblöcken erfolgen.

Auch bei RSRQ liegt der Bezugspunkt der Messung am Antennenanschluss und bei mehreren Empfangszweigen soll der Wert nicht niedriger sein als bei jedem der einzelnen Zweige.

Der Meldebereich von RSRQ reicht üblicherweise von -19,5 dB bis -3 dB, kann aber abhängig von den Fähigkeiten des Endgeräts auch nach unten bis -34 dB bzw. nach oben bis +2,5 dB erweitert sein. Die Schrittweite beträgt 0,5 dB. Niedrige Werte repräsentieren schlechte Empfangsbedingungen, während höhere Werte gute Empfangsbedingungen anzeigen. Für den Fall, dass sich die Funkzelle und deren Nachbarzellen im Leerlauf befinden, im Prinzip also

nur Referenzsignale ausgesendet werden, werden bei der RSSI-Messung auch nur diese erfasst und es ergibt sich ein hoher RSRQ-Wert. Je stärker die verbundene Funkzelle ausgelastet ist und je mehr Störungen durch Nachbarzellen hinzukommen, desto kleiner wird RSRQ.

Die Anforderungen an die Messgenauigkeit sind in Tabelle 2-3 aufgeführt. Hier erfolgt eine Unterscheidung von Empfangsbedingungen mit hoher nutzbarer Energie von Ressourcenelementen verglichen mit der gesamten Leistungsdichte des Rauschens und der Interferenz in entsprechenden Ressourcenelementen (vereinfachte Darstellung).

Energie pro RE/gesamte Leistungsdichte des Rauschens und der Interferenz des REs	Bedingungen	
	normal	extrem
≥ -3 dB	$\pm 2,5$ dB	± 4 dB
≥ -6 dB	$\pm 3,5$ dB	± 4 dB

Tabelle 2-3 Mindestanforderungen an absolute Messgenauigkeiten von RSRQ laut Standard [6]

2.1.1.2.4 Weitere Indikatoren

Es existieren weitere Indikatoren zur Beurteilung der Signalqualität, die zum Teil nutzer- bzw. anwendungsspezifische Referenzsignale erfassen. Diese sind jedoch im Gegensatz zu den erläuterten Messgrößen unbedeutend und würden keine weitergehende Information über die Exposition liefern. Außerdem sind sie im Android-Betriebssystem bislang nicht abrufbar (vgl. Kapitel 2.2).

2.1.1.3 *Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik*

Bei der Bestimmung der Immission kann grundsätzlich zwischen der Momentanimmission und der Maximalimmission unterschieden werden. Während die maximale Immission vor allem für die Überprüfung der Einhaltung von Grenzwerten bzw. der maximalen Grenzwertausschöpfung bedeutsam ist, weil sie den ungünstigsten Fall bei maximaler Sendeleistung und maximaler Zellauslastung betrachtet, kann die Abschätzung von typischen Immissionshöhen anhand der Momentanimmission sinnvoll sein.

Zur auslastungsunabhängigen Bestimmung der Maximalimmission hat sich bei LTE die code-selektive Messung des zellspezifischen Referenzsignals mit anschließender Extrapolation auf Anlagenvollauslastung als verlässlich erwiesen und durchgesetzt [2, 10–12]. Dieses Verfahren beruht auf der Extraktion der Ressourcenelemente, die das Referenzsignal enthalten, und Bestimmung der mittleren Leistung bezogen auf ein Ressourcenelement. Aufgrund der Zuordenbarkeit der Referenzsignale zu einzelnen Funkzellen, kann nach den Immissionsbeiträgen von einzelnen Basisstationen unterschieden werden. Für die Hochrechnung auf Anlagenvollauslastung werden Informationen wie das Verhältnis der Leistung des Referenzsignals zur gesamten maximalen Sendeleistung der Funkzelle bzw. die Kanalbandbreite, Anzahl der Antennen-Ports und Nutzung von RS-Boost benötigt, aus denen sich ein Hochrechnungsfaktor bestimmen lässt. Zur Ermittlung der Maximalimmission wird in der Regel die Schwenkmethode verwendet, um durch räumliche Mittelung in einem Messvolumen das örtliche Maximum zu finden. Der aufgetretene Maximalwert wird als Ergebnis festgehalten. Durch Schwankungen der Feldstärke aufgrund von zum Beispiel Interferenz und Mehrwegeausbreitung könnte ansonsten die Immission ggf. unterschätzt werden. Geeignete Feldstärkemessgeräte sind in der

Lage entsprechend der Anzahl genutzter Antennen-Ports die Referenzsignale R_0 bis R_3 zu unterscheiden und einzeln zu bestimmen. Somit kann der Immissionsbeitrag von jedem Antenne-Port bestimmt werden und auch die Gesamtsumme gebildet werden.

Beim Vergleich mit dem Signalstärkeindikator RSRP wird deutlich, dass die Messung prinzipiell ähnlich funktioniert, da in beiden Fällen das Referenzsignal betrachtet wird und dieses codeselektiv aus dem Ressourcengitter extrahiert wird. Allerdings gibt es einige Unterschiede zu beachten. So werden bei der RSRP-Messung nur die Signale des Antennen-Port 0 und ggf. Antennen-Port 1 berücksichtigt und außerdem nicht alle Ressourcenelemente mit Referenzsignal im Ressourcengitter miteinbezogen. Stattdessen werden nur die Symbole in Measurement Subframes und nur Ressourcenelemente innerhalb der vorgegebenen Messbandbreite um die Kanalmitte berücksichtigt. Somit können Schwankungen (Fading), die kurzzeitig oder über die Frequenzbandbreite des Kanals auftreten, ggf. nicht erfasst werden. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass im Mittel auch die Einbeziehung aller Ressourcenelemente nur unwesentlich präzisere Ergebnisse erzielt und die Abweichung durch die Beschränkung nur geringfügig ausfällt. Für die Expositionsbestimmung sind derartige Kurzzeitschwankungen für ein Monitoring ohnehin nicht relevant und der Informationsgewinn vernachlässigbar. Auch in der Immissionsmesstechnik wird häufig nur in einem schmalen Bereich um die Kanalmitte gemessen, um die Zeitdauer für einen einzelnen Messdurchlauf gering zu halten. Entsprechende Untersuchungen haben ergeben, dass sich beim Einsatz der Schwenkmethode nur ein vernachlässigbarer Unterschied zwischen Messergebnissen bei hoher und niedriger Messbandbreite ergibt [13]. Außerdem darf nicht außer Acht gelassen werden, dass Feldstärkemessgeräte zwar isotrope Sonden nutzen und damit unabhängig von der Richtung, aus der die Signale eintreffen, sind, dafür aber auch Blindzeiten aufweisen. So werden etwa beim Messgerät Narda SRM-3006 im Messmodus Level Recorder die drei Achsen der isotropen Messsonde nacheinander durchgeschaltet und je für 20 ms zur Messung genutzt. Auf den anderen Achsen und während des Umschaltvorgangs von ebenfalls 20 ms ist das Messgerät auf den anderen Achsen bzw. komplett blind [14]. So dauert ein kompletter Messdurchlauf über alle Achsen etwa 120 ms. Für den Messmodus zur codeselektiven Messung von LTE sind mindestens ähnliche Blindzeiten zu erwarten.

Für die RSRP-Messung im Rahmen eines Messnetzwerkes lässt sich damit folgern, dass sich durch die Messung von vielen Endgeräten in der gleichen Umgebung eine räumliche und zeitliche Mittelung ergibt, aufgrund derer die nur teilweise Berücksichtigung der Ressourcenelemente des Referenzsignals zu keinen Nachteilen führen dürfte. Einzig die Tatsache, dass die Referenzsignale an Antennen-Port 1 nur optional und für die Antennen-Ports 2 & 3 gar nicht in die Messung eingehen, führt zum Fehlen relevanter Informationen über die Exposition. Dies dürfte nicht änderbar sein und muss als Schwäche akzeptiert werden. Wie sehr sich dies auswirkt, ließe sich allerdings im Rahmen der durchgeführten Vergleichsmessreihe zwischen Endgerät und Feldstärkemessgerät im freien Feld berücksichtigen, sodass eine Abschätzung des zu erwartenden Fehlers möglich wird. Ein wesentlicher Unterschied bei der RSRP-Messung besteht schließlich auch noch darin, dass Mobilfunkendgeräte lediglich die Leistung am Antennenanschluss bestimmen, nicht aber die zugrundeliegende Feldstärke, die an der Antenne vorliegt. Der Antennenfaktor ist für die Funktion des Endgeräts nicht erforderlich und deshalb unbekannt. Entsprechende Umrechnungsfaktoren wurde daher im Rahmen der Untersuchungen in Kapitel 3.4 messtechnisch ermittelt.

Die Messung der Momentanimmision lässt sich mit einem Spektrumanalysator ausführen, dessen Auflösebandbreite so eingestellt ist, dass die Kanalbandbreite hineinpasst, aber keine weiteren Signale. Alternativ kann eine kleinere Auflösebandbreite gewählt werden und das Ergebnis anschließend über die Kanalbandbreite integriert werden. Die Messungen hängen von der Zellauslastung aller empfangbaren Funkzellen auf der gleichen Frequenz ab und sind nicht zellspezifisch.

Die Messung von RSSI kann prinzipiell mit derjenigen eines Spektrumanalysators verglichen werden, denn auch hier wird innerhalb einer bestimmten Messbandbreite die Signalleistung aller Quellen erfasst. Es gibt jedoch zwei wesentliche Aspekte, die sich unterscheiden und berücksichtigt werden müssen, damit die Ergebnisse korrekt interpretiert werden und mit der Exposition korrespondieren.

Der erste Punkt besteht darin, dass die Messbandbreite von RSSI bei entsprechender Konfiguration nicht mit der Signalbandbreite übereinstimmen muss. Sie kann stattdessen geringer ausfallen und spiegelt damit nicht die vollständige Leistung und auch nicht die vollständige Immission wider. Wenn bekannt ist, welche Messbandbreite verwendet wird, kann jedoch unter der Annahme, dass im Mittel eine gleichmäßige Verteilung der Auslastung bzw. der Leistung entlang der Frequenzbandbreite des Signals erfolgt, eine Extrapolation auf die volle Signalbandbreite vorgenommen werden.

Die zweite Schwierigkeit ergibt sich aus dem Umstand, dass die RSSI-Messung standardmäßig nur über diejenigen Symbole erfolgt, die das Referenzsignal von Antennen-Port 0 enthalten. Dadurch ergibt sich ein geringerer Dynamikbereich zwischen Leerlauf und Vollauslastung der Funkzelle als bei der Spektrumanalysatormessung. Bei RSSI wird bei auftretendem Datenverkehr neben dem Referenzsignal nämlich nur die zusätzliche Leistung über die Frequenz, aber nicht über die Zeit erfasst. Aufgrund der Tatsache, dass aber immer ganze Physical Resource Blocks zur Datenübertragung vergeben werden, lässt sich die Dynamik jedoch geeignet korrigieren. Dies wurde in [15] vom Auftragnehmer prinzipiell schon erprobt und sollte vergleichsweise einfach umzusetzen sein.

RSSI eignet sich also prinzipiell, um Informationen über die Schwankungen der Immission aufgrund der Auslastung von Funkzellen zu erhalten. Beispielsweise könnten sich Immissionsprofile im Tagesverlauf ableiten lassen. Wie auch bei RSRP ist die Messung von RSSI eine reine Leistungsmessung und keine Feldstärkemessung, weshalb ein Umrechnungsfaktor benötigt wird. Dieser ist jedoch prinzipiell für alle Signalstärkeindikatoren gleich und muss nicht separat bestimmt werden.

Der Parameter RSRQ hat gemäß seiner Definition nur indirekten Bezug zu den Messgrößen in der Immissionsmesstechnik über die beiden einfließenden Indikatoren RSRP und RSSI.

2.1.2 UMTS

Seit Ende 2021 sind die deutschen UMTS-Netze aller Betreiber vollständig abgeschaltet worden. Die nachfolgenden Betrachtungen und Untersuchungen berücksichtigen diesen Standard der Vollständigkeit halber dennoch, da er über weite Teile der Projektlaufzeit noch relevant und prägend für die Mobilfunklandschaft einschließlich der Immissionssituation war.

2.1.2.1 *Wesentliche Eigenschaften*

Bei UMTS kommt auf der Luftschnittstelle ein Verfahren, das sich Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA) nennt, zum Einsatz. CDMA bezeichnet ein Multiplexverfahren, welches die parallele Übertragung verschiedener Nutzerdatenströme innerhalb des gleichen Frequenzbereichs ermöglicht. Hierfür werden schmalbandige Datenströme durch spezielle Spreizcodes auf die vollständige Signalbandbreite gestreckt. Ein Spreizcode besteht aus einer Folge von sogenannten Chips, mit denen die einzelnen zu übertragenden Bits multipliziert werden, sodass jedes Bit durch mehrere Chips repräsentiert wird. Anhand der Spreizcodes können die für einzelne Nutzer bestimmte Signale wieder getrennt werden. Der Zusatz „Wideband“ bedeutet, dass eine besonders starke Spreizung vorgenommen wird. Durch einen weiteren Vorgang, der als Scrambling bezeichnet wird, wird durch Multiplikation mit einem Pseudo-Zufallscode (Scrambling Code) dafür gesorgt, dass eine gleichmäßige spektrale Verteilung erfolgt und eine Unterscheidung von auf der gleichen Frequenz sendenden Basisstationen möglich wird. Bei UMTS werden (in Deutschland) Frequenzkanäle mit der Bandbreite 5 MHz verwendet, wobei die Signalbandbreite 4,6 MHz beträgt.

Wie auch bei LTE besteht bei UMTS die Möglichkeit sowohl Frequenzmultiplex (FDD) als auch Zeitmultiplex (TDD) für die Trennung von Up- und Downlink zu verwenden. In Deutschland wurde jedoch ausschließlich Frequenzmultiplex eingesetzt.

Vergleichbar mit LTE wird ein Pilotsignal auf dem sogenannten Primary Common Pilot Channel (P-CPICH) ausgesendet [16], das ebenfalls über die gesamte Frequenzbandbreite des Signals gespreizt wird. Anhand des P-CPICH kann der Scrambling Code einer Funkzelle bestimmt werden. Er wird permanent und mit konstanter Sendeleistung ausgesendet und macht laut [17] ungefähr 10 % der maximalen Sendeleistung des gesamten UMTS-Signals aus. Die Steuer- und Datenkanäle überlagern sich im Frequenzspektrum additiv, wodurch sich eine gleichmäßige Anhebung der Amplitude im Spektrum ergibt. Die Sendeleistung der einzelnen Datenkanäle wird alle 0,67 ms an die vorherrschenden Datenübertragungseigenschaften angepasst.

2.1.2.2 *Vom Endgerät erfasste Signalstärkeindikatoren*

Die bei UMTS von den Endgeräten gemessenen Signalstärkeindikatoren werden ebenfalls in den Standards [5] definiert und als Physical Layer Measurements bezeichnet. Die wichtigsten Parameter werden im Weiteren aufgeführt und erläutert.

2.1.2.2.1 Received Signal Code Power (RSCP)

Der Messwert Received Signal Code Power (RSCP) bzw. vollständig CPICH RSCP ergibt sich aus der empfangenen Leistung gemessen auf einem Pilotkanal einer Funkzelle (P-CPICH). Hierfür wird vom Endgerät zunächst dieser Kanal aus dem gesamten UMTS-Signal extrahiert und anschließend die Leistung ermittelt. Dabei wird diese auf den Antennenanschluss des Endgeräts bezogen. Wird das Pilotsignal über mehrere Antennen zur Nutzung von sendeseitiger Diversität abgestrahlt, so wird die Leistung von jeder Antenne separat gemessen und anschließend zu einer gesamten empfangenen Leistung summiert. Werden empfangsseitig mehrere Antennen genutzt, soll der RSCP-Wert nicht niedriger als der höchste Wert bei der Messung an einem der Empfangszweige sein.

RSCP dient als Indikator für die Signalstärke, als Entscheidungskriterium für einen Zellwechsel, zur Sendeleistungsregelung im Downlink sowie zur Bestimmung des Pfadverlustes [18]. Die Received Signal Code Power rührt daher, dass die physikalischen Kanäle anhand der Spreizcodes unterschieden werden und die zugehörige Leistung zu genau demjenigen Code des P-CPICH bestimmt wird.

Der Meldebereich von RSCP reicht von -120 dBm bis -25 dBm mit einer Auflösung von 1 dB [18].

Die Mindestanforderungen an die Messgenauigkeit für RSCP sind in Tabelle 2-4 aufgeführt. Für sehr hohe und sehr niedrige Empfangsleistungen sind wiederum keine Anforderungen an die Messgenauigkeiten definiert.

Empfangene Leistung innerhalb der Signalbandbreite	Bedingungen	
	normal	extrem
≤ -70 dBm	± 6 dB	± 9 dB
> -70 dBm	± 8 dB	± 11 dB

Tabelle 2-4 Mindestanforderungen an absolute Messgenauigkeiten von RSCP laut Standard [18]

Die Genauigkeitsanforderungen sind nach der Filterung im Layer 1 zu erfüllen, das heißt nach der ersten Mittelung nach Erhebung der Messwerte [19]. Der Standard spezifiziert nicht die Methoden, wie die Messung auszuführen ist, sondern gibt nur die genannten Genauigkeiten vor. Die Implementierung ist daher endgerätespezifisch. Es ist weder eine Abtastrate vorgeschrieben noch, ob die Abtastung periodisch erfolgen soll oder nicht. Erst die Filterung im Layer 3 ist wieder spezifiziert und kann von der Basisstation konfiguriert werden [19]. Es kommt die gleiche Formel zur zeitlichen Glättung unter Verwendung des aktuellen sowie des vorangegangenen Messwert wie bei LTE (Gleichung 2-1) zum Einsatz [20]. Das Endgerät soll imstande sein alle 200 ms einen Messwert an höhere Layer zu liefern [18].

2.1.2.2.2 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Bei UMTS gibt es wie auch bei LTE eine Messgröße, die als *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* bezeichnet wird und auch hinsichtlich der Definition Ähnlichkeiten aufweist. Demnach erfasst RSSI die empfangene Breitbandleistung innerhalb der Bandbreite des Empfänger-Pulsformungsfilters. Das bedeutet, dass sämtliche Leistung in die Messung eingeht, die am Empfänger auf dem Funkkanal ankommt, und zwar unabhängig von welcher Quelle diese stammt. Dies schließt neben den Signalen aller Funkzellen auch thermisches Rauschen sowie Rauschen des Empfängers ein. Im Gegensatz zu LTE ist die Messbandbreite nicht variabel, sodass immer die Signalleistung des gesamten Spektrums eingeht.

Referenzpunkt ist der Antennenanschluss des Endgeräts. Sofern mehrere Empfangszweige für Diversität genutzt werden, darf der angegebene Wert nicht geringer sein als einer der Werte, der für die einzelnen Zweige gemessen wurde.

Der Meldebereich startet bei -100 dBm und endet bei -25 dBm und weist eine Auflösung von 1 dB auf.

Empfangene Leistung innerhalb der Signalbandbreite	Bedingungen	
	normal	extrem
≤ -70 dBm	± 4 dB	± 7 dB
> -70 dBm	± 6 dB	± 9 dB

Tabelle 2-5 Mindestanforderungen an absolute Messgenauigkeiten von RSSI bei UMTS laut Standard [18]

2.1.2.2.3 CPICH E_c/N_o

Der Parameter *CPICH E_c/N_o* beschreibt das Verhältnis der empfangenen Leistung pro Chip auf dem Pilotkanal P-CPICH zur gesamten Leistungsdichte im Frequenzband. Sofern empfangsseitig keine Diversität genutzt wird (\triangleq nur ein Empfangszweig genutzt wird), entspricht dies direkt dem Verhältnis von RSCP und RSSI wie in Gleichung 2-3:

$$\frac{E_c}{N_o} = \frac{RSCP}{RSSI} \quad 2-3$$

Ansonsten darf der angegebene Wert für E_c/N_o nicht geringer ausfallen als das größte Verhältnis RSCP/RSSI in allen einzelnen Empfangszweigen. Bei sendeseitiger Diversität (\triangleq mehrere Sendezweige) soll die empfangene Leistung pro Chip E_c zunächst für jeden Sendezweig einzeln gemessen und anschließend summiert werden, bevor das Verhältnis zur gesamten Leistungsdichte N_o berechnet wird.

Als Referenzpunkt gilt wie in allen Fällen der Antennenanschluss.

Der Meldebereich deckt Werte von -24 dB bis 0 dB mit einer Auflösung von 0,5 dB ab. Wie auch RSRQ bei LTE ist E_c/N_o ein Maß für die Signalqualität, wobei niedrige Werte schlechte und höhere Werte gute Empfangssituationen kennzeichnen. Bei Leerlauf der Funkzellen liegen annähernd nur die Pilotsignale vor, sodass auch nur diese in die RSSI-Messung eingehen, was zu einem hohen Wert für E_c/N_o führt. Kommen weitere Leistungsanteile durch Datenübertragungen hinzu, vergrößert sich die gemessene Leistung in RSSI, wodurch E_c/N_o sinkt.

Zur Messgenauigkeit gibt der Standard die in Tabelle 2-6 aufgeführten Werte an. In diesem Fall werden die Bereiche für unterschiedliche Messgenauigkeiten direkt an dem Wert von E_c/N_o selbst unterschieden.

E_c/N_o	Bedingungen	
	normal	extrem
-14 dB $\leq E_c/N_o$	$\pm 1,5$ dB	± 3 dB
-16 dB $\leq E_c/N_o < -14$ dB	± 2 dB	± 3 dB
-20 dB $\leq E_c/N_o < -16$ dB	± 3 dB	± 3 dB

Tabelle 2-6 Mindestanforderungen an absolute Messgenauigkeiten von E_c/N_o bei UMTS laut Standard [18]

2.1.2.2.4 Weitere Indikatoren

Es existieren auch bei UMTS noch weitere Parameter, die sich jedoch im Wesentlichen auf Fehlerraten und zeitliche Aspekte beziehen. Für Immissionsabschätzungen sind diese ungeeignet.

2.1.2.3 *Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik*

Wie in Abschnitt 2.1.1.3 für LTE erläutert, kann auch bei UMTS zwischen momentaner und maximaler Immission abhängig von der Zellauslastung unterschieden werden. Die Maximalimmission kann durch codeselektive Messung des permanent und mit konstanter Leistung ausgesendeten Pilotkanals P-CPICH und anschließender Hochrechnung auf maximale Sendeleistung erfolgen [17]. Hierfür wird gleichermaßen wie bei der Bestimmung des Signalstärkeindikators RSCP der genannte Kanal durch ein geeignetes Messgerät codeselektiv aus dem Gesamtsignal extrahiert. Das Signal ist zellspezifisch und lässt somit eine Zuordnung zu einzelnen Funkzellen als Quelle der Immission zu. Für die Hochrechnung ist die Kenntnis des Leistungsverhältnisses des Pilotkanals P-CPICH und der gesamten maximalen Sendeleistung der Funkzelle erforderlich. Dieses kann jedoch nach [17] typischerweise als 1/10 angenommen werden. Bis auf die Tatsache, dass bei RSCP nur die Leistung am Antennenanschluss bekannt ist, nicht aber die ursächliche Feldstärke am Ort der Antenne, unterscheidet sich die Erfassung nicht von derjenigen in der Immissionsmesstechnik. Sofern also ein geeigneter Umrechnungsfaktor bestimmen lässt, der den unbekanntem mittleren Antennenfaktor repräsentiert, lässt sich mit diesem Indikator grundsätzlich eine Abschätzung der Maximalimmission durch eine UMTS-Funkzelle ableiten.

Zur Bestimmung der Momentanimmission kann bei UMTS ein Spektrumanalysator mit kalibrierter Antenne dienen, dessen Auflösebandbreite 5 MHz zur Abdeckung der vollständigen Kanalbandbreite beträgt. Bei einer kleineren Auflösebandbreite muss ansonsten über die Kanalbandbreite integriert werden, um die vollständige Leistung zu erhalten. Die Messergebnisse resultieren aus der Summenleistung aller empfangbaren Funkzellen in dem entsprechenden Frequenzbereich und sind nicht zellspezifisch, aber von der Auslastung der Funkzellen abhängig.

Ein analoges Ergebnis ergibt sich aus der RSSI-Messung, bei der die Gesamtleistung innerhalb der Bandbreite des Empfänger-Pulsformungsfilters aufgenommen wird, was abgesehen von unbeabsichtigten Abstrahlungen außerhalb der Kanalbandbreite, sämtliche Leistung umfasst. Derartige ungewollte Emissionen außerhalb des Frequenzbandes (Out-of-Band Emissions) sind aufgrund der Störung benachbarter Funkkanäle in den Standards streng begrenzt und sollten daher vernachlässigbar sein. In der Immissionsmesstechnik wird dies in der Regel ebenfalls nicht gesondert betrachtet. Mithilfe von RSSI können also Auslastungsschwankungen verfolgt werden und ggf. Tageszeitprofile erstellt werden.

Das Verhältnis E_c/N_0 hat keine Entsprechung in der Immissionsmesstechnik, außer dass die Werte von RSCP und RSSI darin eingehen.

2.1.3 **GSM**

2.1.3.1 *Wesentliche Eigenschaften*

Bei GSM stand die Sprachübertragung im Vordergrund, weshalb die Bandbreiten noch schmal sind und die Übertragung leitungsvermittelt erfolgt, sodass bei bestehender Verbindung einem Nutzer dauerhaft definierte Ressourcen zur Verfügung stehen. Zur gleichzeitigen Kommunikation mit mehreren Teilnehmern werden Frequenzmultiplex (Frequency Division Multiple Access, FDMA) und Zeitmultiplex (Time Division Multiple Access, TDMA) genutzt. Bei FDMA

werden mehrere Frequenzen für eine Funkzelle genutzt, auf denen jeweils ein eigener Übertragungskanal mit der Bandbreite von 200 kHz existiert. TDMA ermöglicht das Kommunizieren mehrerer Teilnehmer auf einem dieser Frequenzkanäle, indem eine Unterteilung in Zeitabschnitte, sogenannte Zeitschlitz (Time Slots), gleicher Länge erfolgt. Je acht aufeinanderfolgende Bursts der Länge 577 μ s bilden einen Frame der Länge 4,615 ms. Jeder Burst an einer festen Stelle innerhalb des Frames gehört zu einem Zeitschlitz, der für die Übertragung zu einem aktiven Nutzer verwendet wird.

Up- und Downlink können im Gegensatz zu LTE und UMTS nur über verschiedene Frequenzen abgewickelt werden (FDD). Außerdem können die von einer Basisstation genutzten Frequenzen erst wieder in größerer Entfernung wiederverwendet werden, da sie sich sonst gegenseitig stören würden.

Damit die Funkzelle von einem Endgerät aufgefunden werden kann, wird ein spezieller Pilotkanal, der Broadcast Control Channel (BCCH), permanent ausgesendet. Der BCCH wird zusammen mit anderen Informationen in den ersten beiden Zeitschlitz auf einer der Trägerfrequenzen der Funkzelle übertragen. Diese Trägerfrequenz wird daher auch häufig als BCCH-Träger bezeichnet. Die übrigen sechs Zeitschlitz auf diesem Träger können für die Nutzerdatenübertragung genutzt werden. Daneben kann es weitere Trägerfrequenzen geben, die reine Verkehrskanäle (Traffic Channels (TCH)) darstellen und bei denen alle acht Zeitschlitz für die Übertragung von Nutzerdaten genutzt werden.

Die Sendeleistung der Basisstation setzt sich somit aus der Sendeleistung auf allen genutzten Trägerfrequenzen zusammen. Auf den reinen Verkehrskanälen kann eine Reduzierung der Sendeleistung individuell für jeden Zeitschlitz stattfinden, sofern das zu keinen Einbußen der Verbindungsqualität führt. Bei niedriger Auslastung bleiben ungenutzte Zeitschlitz ohne Leistung. Der Träger mit dem BCCH hingegen unterliegt keiner Leistungsregelung. Stattdessen wird auf diesem immer mit konstanter Sendeleistung gesendet. Dazu werden ungenutzte Zeitschlitz mit Leerinformationen gefüllt [21]. Der Unterschied der Leistungsregelung auf den BCCH- und TCH-Trägern wird in Abbildung 2-3 aufgezeigt.

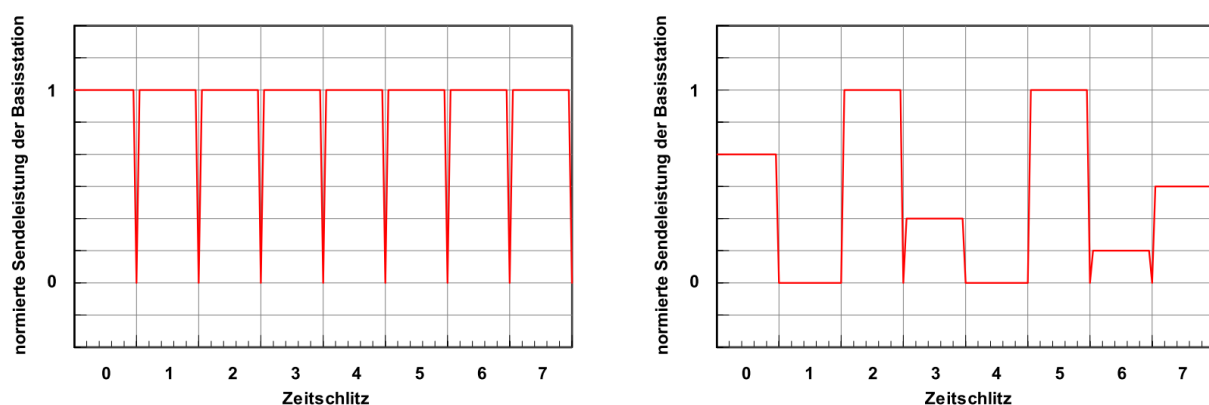


Abbildung 2-3 Unterschied in der Leistungsregelung bei GSM: BCCH-Träger (links), reiner Verkehrskanal (TCH) (rechts) [22]

2.1.3.2 Von Endgeräten gemessene Signalstärkeindikatoren

2.1.3.2.1 Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Bei GSM ist, wie bereits bei LTE und UMTS erläutert, ein Signalstärkeindikator mit der Bezeichnung *Received Signal Strength Indicator (RSSI)* definiert (insbesondere in alten Versionen der Standards auch als *RXLEV* bezeichnet). Er ergibt sich aus der empfangenen Breitbandleistung innerhalb der relevanten Kanalbandbreite, also 200 kHz. Die Messung erfolgt immer auf dem Träger mit dem Broadcast-Kanal (BCCH). Der Referenzpunkt für die Messung ist der Antennenanschluss.

RSSI kann bei GSM über einen Bereich von -110 dBm bis -48 dBm mit einer Auflösung von 1 dB gemeldet werden. Die Anforderungen an die Messgenauigkeit zeigt Tabelle 2-7.

RSSI	Bedingungen	
	normal	extrem
-110 dBm – -70 dBm	±4 dB	±6 dB
sonst	±6 dB	±6 dB

Tabelle 2-7 Mindestanforderungen an die absolute Messgenauigkeit von RSSI bei GSM laut Standard [23]

Die Art und Weise der Bestimmung von RSSI ist im Standard nicht vorgegeben. Die Implementierung ist dem Hersteller überlassen. Es müssen nur die Genauigkeitsanforderungen erfüllt und mindestens alle 480 ms ein neuer Messwert geliefert werden können.

2.1.3.2.2 Weitere Indikatoren

Für GSM sind neben RSSI im Sinne von Physical Layer Measurements keine wesentlichen weiteren Messparameter definiert, wenngleich es insbesondere bei den Erweiterungen zu GPRS und EDGE weitere Leistungs- bzw. Qualitätsmessungen auf spezifischen Kanälen gibt. Diese spielen jedoch für eine Immissionsabschätzung keine Rolle.

2.1.3.3 Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik

Die Bestimmung der Maximalimmission erfolgt bei GSM dadurch, dass die maximale Feldstärke des Funkkanals gemessen wird, auf dem der BCCH abgestrahlt wird. Dazu eignet sich ein Spektrumanalysator mit kalibrierter Antenne und einer eingestellten Auflösebandbreite von 200 kHz, um die Leistung bzw. Feldstärke innerhalb der Kanalbandbreite zu erfassen. Das Ergebnis wird entsprechend der genutzten zusätzlichen Traffic Channels (TCH) für den Fall maximaler Auslastung und maximaler Sendeleistung hochgerechnet. Da bei GSM die Frequenzen in einer Umgebung nur exklusiv von einer Funkzelle belegt werden dürfen, ist die Zuordnung der Immission zu einer bestimmten Basisstation prinzipiell möglich.

Die Messung von RSSI erfasst vergleichbar mit einem Spektrumanalysator die Signalleistung auf dem BCCH. Die Verkehrskanäle werden hingegen in keiner Messung des Endgeräts erfasst. Dies ist insofern ungünstig, als dass die Anzahl der Verkehrskanäle bekannt sein muss, um die Exposition korrekt zu bestimmen. Diese Information liegt jedoch im Android-Betriebssystem nicht vor. Daher könnte ohne Kenntnis aus anderen Quellen nur eine typisch genutzte Anzahl von Verkehrskanälen zur Immissionsabschätzung genutzt werden.

Eine Messung der Momentanmission ist auf Basis der bei GSM am Endgerät zur Verfügung stehenden Messwerte nicht möglich.

2.1.4 5G

2.1.4.1 Wesentliche Eigenschaften

Der neue Mobilfunkstandard 5G baut auf einige Konzepte aus dem Vorgängerstandard LTE auf, ergänzt diesen jedoch um zahlreiche Neuerungen und bietet sehr viel mehr Flexibilität und Variationsmöglichkeiten. Neben neuen Anwendungsszenarien für die massive Maschinenkommunikation und Verbindungen mit sehr niedriger Latenz, steht vor allem die Realisierung von wesentlich höheren Datenraten häufig im Vordergrund. Dazu ist unter anderem mehr Frequenzbandbreite erforderlich, die allerdings in den aktuell vom Mobilfunk genutzten Frequenzbereichen unterhalb von 6 GHz nur begrenzt zur Verfügung steht. Daher wird zusätzlich zum Frequenzbereich von 410 MHz bis 7.125 MHz, bei 5G als Frequenzbereich 1 (FR 1) bezeichnet, auf höhere Frequenzen im Bereich von 24.250 MHz bis 52.600 MHz, dem sogenannten Frequenzbereich 2 (FR 2), gesetzt [24]. Die Aktivitäten in Deutschland konzentrierten sich zu Beginn im Wesentlichen auf das 3,6 GHz-Band im Frequenzbereich 1. Dort ist für die Trennung von Up- und Downlink ausschließlich die Nutzung des in Deutschland im Mobilfunk bisher ungebräuchlichen Zeitmultiplex (Time Division Duplex (TDD)) spezifiziert. Für den Kanal können im FR 1 Bandbreiten von 5 MHz bis 100 MHz eingesetzt werden. Neben der Vergrößerung der Bandbreite stellt der Einsatz von massivem Multiple-Input-Multiple-Output (massive MIMO) einen Schlüssel für die Erhöhung von Datenübertragungsraten dar. Durch den Einsatz mehrerer Antennen auf Sende- und Empfangsseite können Daten entweder gleichzeitig auf verschiedenen Schichten übertragen oder aber in bestimmte Raumrichtungen abgestrahlt werden. Inzwischen ist die 5G-Technik in Deutschland großflächig ausgerollt worden, sodass auch weitere Frequenzbänder in FR 1 mit FDD-Betrieb genutzt werden. Teilweise wird 5G auch parallel zu LTE auf einem Frequenzkanal mit sogenanntem Dynamic Spectrum Sharing betrieben.

Als Zugriffsverfahren wird bei 5G grundsätzlich, wie schon bei LTE, OFDMA verwendet, allerdings wurde das Verfahren erweitert [25]. Es ergibt sich wie in Abbildung 2-4 gezeigt ein Ressourcengitter vergleichbar mit dem von LTE. Hinsichtlich des Trägerabstands und der Symboldauer, bei 5G als *Numerologie* bezeichnet, bietet 5G eine hohe Flexibilität. Der Trägerabstand und die Dauer der OFDM-Symbole bzw. die Zusammensetzung eines Frames (Rahmen) sind fest miteinander verknüpft. Die in FR 1 möglichen Trägerabstände sind zusammen mit ihren zugehörigen Rahmenstrukturen in Tabelle 2-8 aufgeführt. Frames haben in 5G immer eine feste Dauer von 10 ms. Die kleinste Einheit, die einem Endgerät zugewiesen werden kann, wird Resource Block (RB) genannt, und besteht wie bei LTE aus zwölf nebeneinanderliegenden Unterträgern. Zeitlich umfasst ein Resource Block hingegen nur ein einzelnes OFDM-Symbol, während es bei LTE sieben aufeinanderfolgende Symbole sind. Sogenannte Bandwidth Parts (BWP) bestehen aus einer Menge benachbarter Resource Blocks, die eine bestimmte Numerologie nutzen [26]. Die Numerologie kann sich in verschiedenen Bandwidth Parts voneinander unterscheiden [27], um damit unterschiedliche Anwendungsszenarien mit

verschiedenen Anforderungen an Datenraten, Latenz und Verlässlichkeit zu realisieren. Außerdem können mit kleineren Bandwidth Parts Endgeräte unterstützt werden, die nicht die volle Bandbreite von bis zu 100 MHz abdecken können.

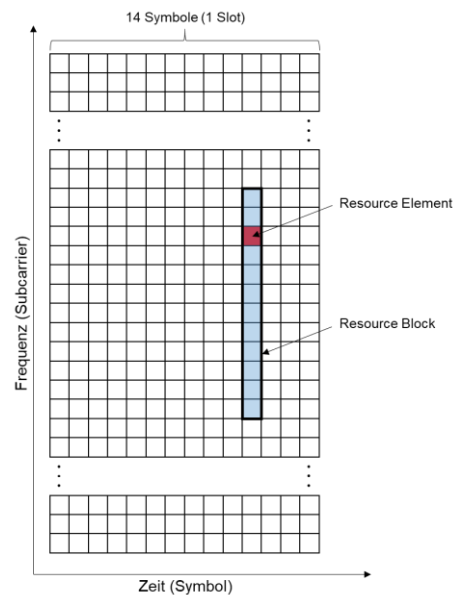


Abbildung 2-4 Ressourcengitter bei 5G

Trägerabstand	Anzahl Symbole pro Slot	Anzahl Slots pro Frame	Anzahl Subframes pro Frame
15 kHz	14	10	1
30 kHz	14	20	2
60 kHz	14	40	4

Tabelle 2-8 Zusammenhang der Trägerabstände mit den Anzahlen von Symbolen , Slots und Subframes bei 5G

Ähnlich zu LTE gibt es im Downlink bei 5G die folgenden physikalischen Kanäle und Signale [26, 28]:

- **Primary Synchronization Signal (PSS) und Secondary Synchronization Signal (SSS):** Ermöglicht Endgeräten das Auffinden von Funkzellen und das Ermitteln des Startzeitpunkts der Frames.
- **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH):** Dient der Übertragung von Nutzerdaten und nimmt den größten Teil der Ressourcen-Elemente ein. Teilweise werden auch endgerätespezifische Kontrollinformationen übertragen.
- **Physical Downlink Control Channel (PDCCH):** Wird genutzt, um den Endgeräten mitzuteilen, wann, wo und wie sie Daten empfangen und senden sollen.
- **Physical Broadcast Channel (PBCH):** Übertragung grundlegender Informationen über die Basisstation. Er ist Bestandteil des Synchronization Signal Blocks (SSB).

Im Gegensatz zu LTE wird bei 5G kein zellspezifisches Referenzsignal mehr ausgesendet, das in bestimmten Ressourcenelementen über das gesamte Ressourcengitter verteilt ist. Statt

eines zellweit und unabhängig von der Zellauslastung ausgesendeten Referenzsignals, werden im Downlink nur noch Referenzsignale zur Demodulation (Demodulation Reference Signal (DM-RS)) und zur Kompensation des Phasenrauschens (Phase-Tracking Reference Signal (PT-RS)) verwendet [26]. Daneben gibt es noch das *Channel State Information Reference Signal (CSI-RS)*, das bei Bedarf nutzerspezifisch ausgestrahlt wird, damit das Endgerät die Kanalqualität schätzen und mitteilen kann.

Das Synchronization Signal (SS) und der Physical Broadcast Channel (PBCH) bilden in Bereichen aus vier OFDM-Symbolen im Zeitbereich und 127 bis 240 Trägern im Frequenzbereich den *SS/PBCH-Block (SSB)* wie in Abbildung 2-5 gezeigt. PSS und SSS sind 127 Träger breit, während der PBCH 240 Träger umfasst. Bei einem Trägerabstand von 30 kHz entspricht dies Bandbreiten von 3,81 MHz bzw. 7,2 MHz [26].

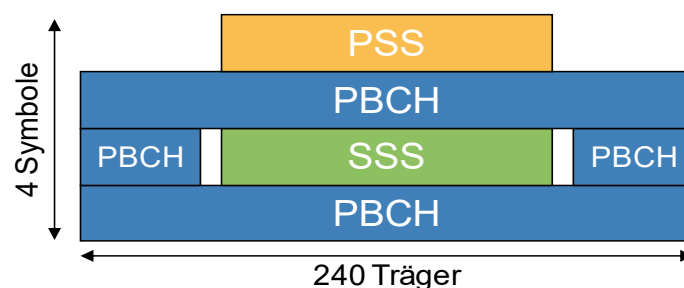


Abbildung 2-5 Schematische Darstellung eines SSB in 5G

Die Position im Frequenz- und Zeitbereich kann in Abhängigkeit vom Trägerabstand und von anderen Parametern höherer Schichten variieren [27]. Das bedeutet insbesondere, dass der SSB nicht in der Mitte des Frequenzkanals liegen muss. Der SSB kann durch Strahlformung (Beamforming) in verschiedene Richtungen innerhalb der Funkzelle ausgesendet werden. Dafür werden im FR 1 bis zu acht und in FR 2 bis zu 64 unterschiedlich ausgerichtete Beams genutzt, über die die SSBs in spezieller zeitlicher Abfolge ausgesendet werden. Die Überlagerung der SSB-Beams bildet den Abdeckungsbereich der Funkzelle. Für das Endgerät sind die über die verschiedenen Beams ausgesendeten SSBs durch einen entsprechenden Index zu unterscheiden. Aus den unterschiedlichen Empfangspegeln der SSBs, kann das Endgerät der Basisstation Informationen liefern, um einen geeigneten Beam für den Downlink auszuwählen. Die Datenübertragung und die Aussendung des SSBs kann mit unterschiedlichen Beams erfolgen, die sich auch hinsichtlich des Antennengewinns und der Richtcharakteristik unterscheiden. Abbildung 2-6 verdeutlicht dies für die Fälle von übereinstimmenden und nicht übereinstimmenden Formen der Einhüllenden von SSB-Beam und Daten-Beam. Dies ist ein fundamentaler Unterschied zu früheren Mobilfunkgenerationen, in denen davon ausgegangen wurde, dass die ausgestrahlten Broadcast- und Verkehrssignale gleiches Abstrahlverhalten (gleiche Abdeckungsbereiche und identische Gewinne) an der Antenne aufweisen.



Abbildung 2-6 Unterschiedliche Abstrahlungseigenschaften von SSBs (blau) und Datenübertragung (gelb).
Links: gleiche Form der Einhüllenden, rechts: unterschiedliche Form der Einhüllenden [29]

Die Sendeleistung der einzelnen Ressourcenelemente des sekundären Synchronisationssignals ist identisch, sowohl innerhalb eines SSBs als auch in den SSBs unterschiedlicher Beams [30]. Für die Ressourcenelemente eines CSI-RS gilt ebenfalls, dass die Sendeleistungen über die konfigurierte Bandbreite und die konfigurierten Symbole konstant sind.

2.1.4.2 Vom Endgerät erfasste Signalstärkeindikatoren

Die bei 5G durchgeführten Physical Layer Measurements werden gemäß ihrer Definition und Eigenschaften entsprechend der Standards [31] im Folgenden zusammengestellt.

Die Ausführungen an die Anforderungen beschränken sich auf den Frequenzbereich 1 (FR 1).

2.1.4.2.1 SS Reference Signal Received Power (SS-RSRP)

Der Parameter *Synchronisation Signal Reference Signal Received Power (SS-RSRP)* wird als der lineare Mittelwert über die Leistungsbeiträge derjenigen Ressourcenelemente definiert, die das sekundäre Synchronisationssignal (SSS) tragen. Weiterhin dürfen die Referenzsignale zur Demodulation des Physical Broadcast Channels (PBCH DM-RS) und, sofern von höheren Schichten angezeigt, auch vom Referenzsignal zur Bestimmung des Kanalzustands (CSI-RS) zusätzlich genutzt werden. In diesem Fall wird über alle einbezogenen Ressourcenelemente gemittelt, wobei etwaige Leistungsunterschiede der Referenzsignale zu berücksichtigen sind. Die bestimmte Leistung ist auf ein Ressourcenelement bezogen.

SS-RSRP soll nur von den Referenzsignalen gemessen werden, die zu SS/PBCH-Blöcken mit dem gleichen Index, also dem gleichen Beam, und der gleichen Funkzelle gehören. Dies bedeutet zugleich, dass für jeden empfangbaren Beam ein eigenes SS-RSRP bestimmt werden kann.

Im Frequenzbereich 1 wird als Bezugspunkt der Messung der Antennenanschluss des Endgeräts betrachtet. Wenn empfangsseitige Diversität genutzt wird, muss der angegebene Wert mindestens so hoch sein, wie der höchste Wert von allen Empfangszweigen.

Der Meldebereich wird für unterschiedliche Zwecke von -140 dBm bis -44 dBm bzw. von -156 dBm bis -31 dBm mit einer Auflösung von 1 dB angegeben [32]. In Tabelle 2-9 sind die Mindestanforderungen an die Messgenauigkeit von SS-RSRP aufgeführt. Wie auch schon bei LTE in Abschnitt 2.1.1.2.1 erläutert, sind die Genauigkeitsanforderungen nach Filterung in Layer 1 zu erfüllen. Diese ist der Implementierung des Endgeräts überlassen. Erst die Filterung in Layer 3 ist im Standard definiert und kann von der Basisstation beeinflusst werden [25]. Das Prinzip stimmt mit dem von LTE überein.

Empfangene Kanalleistung	Bedingungen	
	normal	extrem
≤ -70 dBm	$\pm 4,5$ dB	± 9 dB
> -70 dBm	± 8 dB	± 11 dB

Tabelle 2-9 Mindestanforderungen an absolute Messgenauigkeiten von SS-RSRP laut Standard [32]

2.1.4.2.2 NR Carrier Received Signal Strength Indicator (NR carrier RSSI)

Der Parameter *NR Carrier Received Signal Strength Indicator (NR carrier RSSI)* erfasst den linearen Mittelwert der gesamten Empfangsleistung (in Watt) innerhalb einer definierten Messbandbreite (eine Anzahl von N nebeneinanderliegenden Ressourcenblöcken) in bestimmten Symbolen. Dies schließt die Leistung aller Quellen inklusive benachbarter Funkzellen, Interferenzen benachbarter Kanäle, thermischen Rauschens etc. ein.

Höhere Schichten können eine Auswahl von Symbolen vorgeben, die in die Messung einzu beziehen sind.

Der Referenzpunkt der Messung liegt wieder beim Antennenanschluss.

Für NR carrier RSSI sind keine Anforderungen an die Genauigkeit angegeben. Vielmehr ergeben sich diese aus den Vorgaben für SS-RSRQ (siehe nächster Abschnitt), in dessen Bestimmung NR carrier RSSI eingeht.

2.1.4.2.3 SS reference signal received quality (SS-RSRQ)

Der Parameter *Secondary Synchronization Signal Reference Signal Received Quality (SS-RSRQ)* ist ein Maß für die Qualität des empfangenen Signals und wird aus dem Verhältnis von SS-RSRP zu NR carrier RSSI berechnet (siehe Gleichung 2-4). Dabei wird SS-RSRP zusätzlich mit der Anzahl N der entlang der Frequenz benachbarten Ressourcenblöcke multipliziert, über die die Messung von NR carrier RSSI ausgeführt wurde. Dadurch wird erreicht, dass SS-RSRQ unabhängig von der Messbandbreite wird, denn, während SS-RSRP immer auf ein Ressourcenelement bezogen ist, vergrößert sich NR carrier RSSI mit zunehmender Messbandbreite.

$$\text{SS-RSRQ} = \frac{N \cdot \text{SS-RSRP}}{\text{NR carrier RSSI}} \quad 2-4$$

mit

- N : Anzahl der Ressourcenblöcke, die entlang der Messbandbreite in die Messung eingehen.

Die Messungen im Zähler und Nenner sollen jeweils über den gleichen Satz von Ressourcenblöcken erfolgen.

Auch bei SS-RSRQ liegt der Bezugspunkt der Messung am Antennenanschluss. Wenn empfangsseitige Diversität genutzt wird, muss der angegebene Wert mindestens so hoch sein, wie der höchste Wert von allen Empfangszweigen.

Der Meldebereich von SS-RSRQ reicht von -43 dB bis $+20$ dB mit einer Schrittweite von $0,5$ dB. Niedrige Werte repräsentieren schlechte Empfangsbedingungen, während höhere

Werte gute Empfangsbedingungen anzeigen. Für den Fall, dass sich die Funkzelle und deren Nachbarzellen im Leerlauf befinden, im Prinzip also nur SSBs ausgesendet werden, werden bei der Messung von NR carrier RSSI auch nur diese erfasst und es ergibt sich ein hoher SS-RSRQ-Wert. Je stärker die verbundene Funkzelle ausgelastet ist und je mehr Störungen durch Nachbarzellen hinzukommen, desto kleiner wird SS-RSRQ.

Die Anforderungen an die Messgenauigkeit sind in Tabelle 2-10 aufgeführt. Hier erfolgt eine Unterscheidung von Empfangsbedingungen mit hoher nutzbarer Energie von Ressourcenelementen verglichen mit der gesamten Leistungsdichte des Rauschens und der Interferenz der entsprechenden Ressourcenelemente (vereinfachte Darstellung).

Energie pro RE/gesamte Leistungsdichte des Rauschens und der Interferenz des REs	Bedingungen	
	normal	extrem
≥ -3 dB	$\pm 2,5$ dB	± 4 dB
≥ -6 dB	$\pm 3,5$ dB	± 4 dB

Tabelle 2-10 Mindestanforderungen an absolute Messgenauigkeiten von SS-RSRQ laut Standard [32]

2.1.4.2.4 Weitere Indikatoren

5G nutzt weitere Indikatoren zur Bewertung der Signalqualität und Kanaleigenschaften. Unter anderem gibt es ein CSI-RSRP und CSI-RSRQ, das sich auf das CSI-Referenzsignal bezieht. Nach derzeitigem Stand ist nicht absehbar, ob diese brauchbare Informationen über die Exposition liefern können. Daher werden sie vorerst ausgespart.

Weitere Parameter sind für eine Immissionsabschätzung nach derzeitigem Stand allerdings ungeeignet.

2.1.4.3 Bezug der Signalstärkeindikatoren zur Immissionsmesstechnik

Die Komplexität des neuen 5G-Mobilfunkstandards mit der Möglichkeit der Nutzung von Beamforming mittels Massive MIMO, stellen die Immissionsmesstechnik vor neue Herausforderungen. Das Fehlen eines regelmäßig zellweit ausgesendeten Referenzsignals erschwert die Bestimmung der maximalen Immission. Hinzu kommt, dass die Broadcast-Signale der SSBs mit anderen Abstrahlungseigenschaften der Antennen abgestrahlt werden können als die eigentlichen Datenkanäle. Weiterhin existieren derzeit noch keine ausreichenden Erfahrungen über üblicherweise genutzte Konfigurationen, die Annahmen über typische Extrapolationsfaktoren zulassen würden. Nach wie vor sind Verfahren zur Bestimmung der Maximalimmission dabei sich zu etablieren. Inzwischen sind jedoch Lösungen zum Erhalt auslastungsunabhängiger Messgrößen durch codeselektive Messmethoden von verschiedenen Herstellern am Markt erhältlich. Ein ebenfalls im Auftrag des Bundesamts für Strahlenschutz durchgeführtes Vorhaben hat sich eingehend mit der Entwicklung von Verfahren zur Bestimmung der Immission bei 5G beschäftigt [33].

Aus diesem Grund ist nur eine erste Einschätzung möglich, ob und wie eine Immissionserfassung mittels Endgeräten bei diesem Mobilfunkstandard aussehen könnte. Eine abschließende Beurteilung ist erst dann sinnvoll, wenn Verfahren zur Immissionsmessung bei 5G etabliert sind.

Die bislang entwickelten Ansätze zur Expositionserfassung zielen darauf ab die SS/PBCH-Blöcke (SSB) als Basis für eine Extrapolation auf maximale Immission heranzuziehen. Dies erfolgt durch geeignete codeselektive Messgeräte, die die SSBs extrahieren und deren Empfangsleistung bestimmen. Am mobilen Endgerät liegt mit SS-RSRP ein vergleichbarer Messwert vor. Wenn die Informationen für eine korrekte Extrapolation vorliegen, wäre eine Abschätzung der Immission daher prinzipiell auch für ein Messnetzwerk denkbar. Eine wesentlich einfachere Situation ergibt sich, wenn kein Massive MIMO eingesetzt wird und somit kein grundsätzlicher Unterschied in der Aussendung des SSB und den Nutzdaten über verschiedene Beams vorliegt. In diesem Fall ist eine vergleichsweise einfache Extrapolation möglich, da dann der SSB ähnlich wie das Referenzsignal bei LTE ein festes Leistungsverhältnis zur maximalen Sendeleistung bei Vollaustlastung aufweist.

Der Parameter NR Carrier RSSI wiederum könnte grundsätzlich mit der auslastungsabhängigen Immission in Zusammenhang gebracht werden. Allerdings müsste dazu bekannt sein, welche Frequenzanteile in die Messung eingehen. Es muss damit gerechnet werden, dass sie bei den hohen Kanalbandbreiten nicht zwingend die volle Signalbandbreite abdeckt. Je nach Verhalten bei der Ressourcenzuteilung ist bei großen Kanalbandbreiten nicht gesichert, dass die RSSI-Messbandbreite die genutzte Kanalbandbreite umfasst, weshalb signifikante Leistungsanteile außerhalb der RSSI-Messbandbreite auftreten können. Diesen Fragen kann nur mit praktischen Untersuchungen nachgegangen werden.

Die Nutzbarkeit von SS-RSRQ ist derzeit noch nicht absehbar. Aufgrund der Verbindung von SS-RSRP und NR carrier RSSI beinhaltet er auslastungsabhängige sowie -unabhängige Informationen.

2.2 Das Android-Betriebssystem

Android ist ein Betriebssystem und eine Softwareplattform für mobile Endgeräte, vor allem Smartphones und Tablets, aber auch Fernseher, Mediaplayer und andere Geräte können das System nutzen. Es wird von einem von Google gegründeten Konsortium aus über 80 Unternehmen, der Open Handset Alliance, entwickelt. Das System wird auf Endgeräten von zahlreichen Herstellern ausgeliefert. Der Marktanteil von Smartphones mit dem Android-Betriebssystem am gesamten Absatz beläuft sich seit Jahren weltweit auf über 80% [34] und auch in Deutschland liegt der Anteil nur geringfügig niedriger [35]. Der Aufbau eines Messnetzwerkes zum Zwecke eines Expositionsmonitorings bietet sich daher auf Grundlage dieser Plattform besonders an, da aufgrund der weiten Verbreitung ein hohes Potential zum Erreichen einer großen Nutzerbasis existiert.

Bei Android handelt es sich um freie Software auf der Grundlage des Linux-Kerns (Kernel), Als weitere Konzepte bei der Umsetzung kommen Java und eine auf der C-Standard-Bibliothek aufbauende Programmbibliothek zum Einsatz. Durch die Installation von Anwendungen (Apps) können nahezu beliebige Funktionen auf dem Endgerät realisiert werden. Die meisten Apps werden über den Google Play Store verbreitet. Für die Entwicklung von Apps steht eine Entwicklungsumgebung mit dem Namen Android Studio zur Verfügung. Im Gegensatz zu zum Beispiel Desktop-PCs besitzt der Nutzer innerhalb des Betriebssystems in der Regel nur ein

beschränktes Administrationsrecht. So lässt sich nicht sämtliche vorinstallierte Software deinstallieren und auch nicht alle Eingriffe im Betriebssystem sind möglich.

Etwa im Jahresrhythmus werden neue Versionen veröffentlicht, die erweiterte Möglichkeiten und Funktionen bieten und die Nutzeroberfläche weiterentwickeln. Die Aktualisierungen können nur von den Geräteherstellern ausgeliefert werden, da sie an die jeweilige Hardware angepasst werden müssen. Neben der Betriebssystemversion gibt es das sogenannte API-Level (Application Programming Interface), das den Entwicklungsstand der Programmierschnittelle angibt. Je höher das API-Level ist, desto größer ist der implementierte Funktionsumfang. Damit eine App kompatibel ist und problemlos ausgeführt werden kann, muss die Android-Version mindestens das API-Level aufweisen, das die Anwendung aufgrund der verwendeten Funktionen erfordert. Die derzeit aktuellste Version ist Android 10 mit API-Level 29.

2.2.1 Aufbau und Funktionsweise

In diesem Abschnitt werden die wesentlichen aufeinander aufbauenden Software-Komponenten (Software Stack) des Android-Betriebssystems vorgestellt und die Zusammenhänge erläutert. Abbildung 2-7 zeigt die Anordnung der verschiedenen Schichten.

Das Fundament bildet der Linux-Kernel, der die Speicher- und Prozessverwaltung auf der untersten Ebene übernimmt. Hier sitzen auch die Gerätetreiber, die die Interaktion mit der verbauten Hardware steuern. Darüber befindet sich die Hardware-Abstraktionsschicht (Hardware Abstraction Layer (HAL)), die zwischen der physischen Hardware und dem Rest des Software Stack vermittelt. Jeder Zugriff auf die Hardware kann nur über die Hardware-Abstraktionsschicht erfolgen. Sie bildet eine standardisierte Schnittstelle zwischen den Hardware-Fähigkeiten des Geräts und dem in der höheren Schicht gelegenen Java API Framework. Das HAL besteht aus einzelnen Bibliotheks-Modulen, die je eine Schnittstelle für eine bestimmte Hardware-Komponente implementieren, wie z.B. das WLAN-Modul. Wenn aus dem Framework auf eine Komponente zugegriffen werden soll, wird das entsprechende Bibliotheksmodul hierfür geladen.

Auf der nächsten Schicht befindet sich die Android Runtime (ART), eine Java-basierte Laufzeitumgebung, in der die Anwendungen (Apps) ausgeführt werden. Jede App führt eine eigene Instanz der ART aus. Auf der gleichen Ebene befinden sich native C/C++-Bibliotheken, die Funktionen für bestimmte Anwendungszwecke wie z.B. das Webbrowsing anbieten. Im darüberliegenden Application Framework werden wiederum Klassen zur Verfügung gestellt, mit denen die Anwendungen selbst entwickelt werden können. Es stellt eine generische Abstraktion für den Hardware-Zugriff bereit sowie für die Verwaltung der Nutzerschnittstelle und Anwendungsressourcen. Die oberste Schicht stellt die Anwendungsschicht (Application Layer) dar, die durch die System-Apps sowie sämtliche Apps von Hersteller und Drittanbietern gebildet wird.

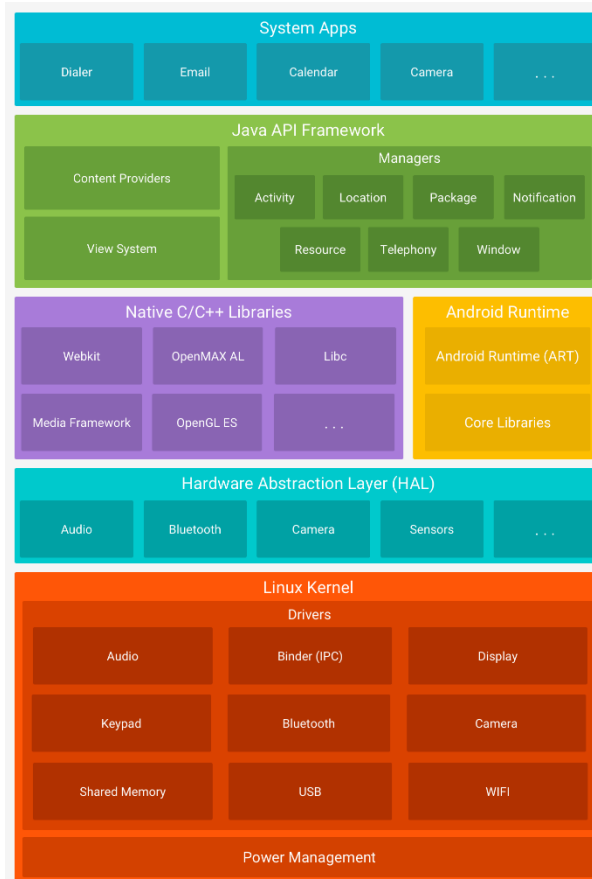


Abbildung 2-7 Der Android Software Stack [36]

In der Hardware-Abstraktionsschicht befindet sich das Radio Interface Layer (RIL), das speziell zwischen dem Modem mit der Funk-Hardware und den Telefoniediensten (Telephony Services) in Android arbeitet. Es besteht aus zwei Komponenten, dem RIL Daemon und dem Vendor RIL [37]. Der RIL Daemon initialisiert das Vendor RIL, kommuniziert mit den Telefoniediensten über eine standardisierte Schnittstelle und sendet Kommandos an das Vendor RIL (z.B. Anruf aufbauen/trennen). Das Vendor RIL wird vom Hersteller für den Zugriff auf eine spezifische Funk-Hardware implementiert. Es kommuniziert mit dem Modem und sendet Aufrufe an den RIL Daemon (z.B. neu empfangene SMS, eingehender Anruf, geänderte Signalstärke). Dieser Software-Teil ist proprietär und nicht einsehbar. Das Vendor RIL kann ein beliebiges Protokoll nutzen, um mit dem Modem selbst zu kommunizieren. Es ist ein proprietärer Satz von Kommandos notwendig, um die volle Funktionalität des Modems zu nutzen. Diese sind im Allgemeinen nur den Herstellern der Modems bekannt.

Es ist auch möglich C/C++-Anwendungen zu schreiben, die, statt über das API Framework zuzugreifen, näher an dem zugrundeliegenden Linux-Kern laufen. Allerdings geht dadurch die Hardware-unabhängige Standardisierung, die durch die dazwischenliegenden Schichten realisiert wird, verloren. Weiterhin sind in den mit Smartphones ausgelieferten Android-Versionen bestimmte Zugriffe nur für Systemanwendungen möglich. Diese können nur umgangen werden, wenn sich der Nutzer Administrationsrechte auf dem Gerät verschafft durch sogenanntes „Rooten“ oder eine eigene Betriebssystemversion, in dem Zusammenhang meist als „ROM“ bezeichnet, aufgespielt wird. Dies ist mit einem enormen Entwicklungsaufwand verbunden und

muss für jedes Gerät an die entsprechende Hardware angepasst werden. Außerdem sind entscheidende Software-Teile nicht von den Herstellern dokumentiert und nicht quelloffen. Für ein crowdsourcingbasiertes Monitoringsystem stellt dies somit keine Option dar. Stattdessen muss auf möglichst standardisierte Schnittstellen zugegriffen werden, um eine Nutzung von möglichst vielen Geräten zu ermöglichen. Für einzelne Geräte werden jedoch Lösungen zum Beispiel von Rohde & Schwarz mit dem QualiPoc Android [38] angeboten, die für bestimmte Smartphones mit einer eigenen Firmware und einer speziellen Software umfangreiche Messmöglichkeiten und Tests zur HF-Optimierung und Bewertung der Servicequalität ermöglichen. Hiermit ist es etwa auch möglich die Einwahl in bestimmte Funkzellen zu erzwingen und den Zellwechsel zu unterbinden.

2.2.2 Zugriff auf Signalstärkeindikatoren und Informationen der Funkzelle über die Android-API-Funktionen

Wie im vorigen Abschnitt erläutert ist ein direkter Zugriff auf das Modem nicht möglich bzw. würde die Kenntnis von herstellerspezifischen Kommandos erfordern. Im Folgenden werden daher die Abrufmöglichkeiten von Signalstärkeindikatoren und Informationen zur Funkzelle über das API Framework aufgeführt und erläutert.

Wichtig zu beachten ist, dass die grundsätzliche Verfügbarkeit der Funktionen ab einem gewissen API-Level nicht bedeutet, dass diese zwangsläufig vom Gerätehersteller implementiert sein müssen. Sofern keine Implementierung vorliegt, liefern die Funktionen Nullwerte oder Extremwerte außerhalb des zulässigen Wertebereichs zurück.

Die vom Smartphone erfassten Funkzellen können innerhalb des Android-Betriebssystems über den Telephony-Manager in Form einer Liste abgerufen werden. Diese Liste enthält für jede dieser Funkzellen eine Instanz der Klasse „CellInfo“, die wiederum die relevanten Informationen (ID der Funkzelle, Kanalnummer, Signalstärke & -qualität) in den Unterklassen „CellIdentity“ bzw. „CellSignalStrength“ enthalten. Weiterhin enthält die Klasse einen Zeitstempel, wann die Information zu dieser Funkzelle aus dem Modem erhalten wurde, sowie den Verbindungszustand der Zelle. Für jeden Mobilfunkstandard gibt es eigene abgeleitete Klassen, die den jeweiligen Anforderungen und Eigenschaften (Signalstärkeparameter) angepasst sind.

2.2.2.1 LTE

Tabelle 2-11 führt die über API-Funktionen abrufbaren empfangsspezifischen Parameter bei LTE zusammen mit dem mindestens erforderlichen API-Level für die Verwendung auf. Funktionen, die keinen direkten Bezug zur Signalstärke aufweisen, wurden ausgelassen. Die Bedeutungen der einzelnen Werte werden im Weiteren kurz erläutert:

- Die *ASU (Arbitrary Strength Unit)* ist eine universelle Signalstärke-Einheit, die als ganzzahliger Wert ausgegeben wird. Sie wird mobilfunkstandardübergreifend verwendet und soll die unterschiedlichen Signalstärke-Messgrößen vereinheitlichen. Der Wert liefert keine Mehrinformation gegenüber den übrigen Werten und ist daher uninteressant für die Expositionsabschätzung.
- Der Rückgabewert der Funktion *getLevel()* liefert einen abstrakten Wert zurück, der den Signalpegel auf die ganzzahligen Werte 0 bis 4 abbildet. Dies entspricht der in der

Benutzeroberfläche angezeigten Signalstärke, die in der Regel auf diese Anzahl Stufen quantisiert ist und häufig durch eine entsprechende Anzahl von Balken visualisiert wird. Dieser Wert ist aufgrund der Redundanz zu den übrigen Werten, der geringen Auflösung sowie der unbekanntenen Übersetzung in diese Werte unbrauchbar für die Expositionsabschätzung.

- Die Werte für RSRP, RSRQ und RSSI entsprechen den Definitionen des Mobilfunkstandards aus Abschnitt 2.1.1.2.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getAsuLevel()	RSRP als ASU	17
getDbm()	Signalstärke in dBm (entspricht RSRP)	17
getLevel()	Abstrakter Wert für die gesamte Signalqualität	17
getRsrp()	RSRP in dBm	26
getRsrq()	RSRQ in dB	26
getRssi()	RSSI in dBm	29

Tabelle 2-11 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Signalstärkeparametern für LTE [39]

Die über die API abrufbaren Informationen über die Funkzelle bei LTE listet Tabelle 2-12 auf. Die Bedeutungen sind im Detail wie folgt:

- Die Kanalbandbreite entspricht der von der verbundenen Funkzelle genutzten Bandbreite.
- Die Cell Identity ist eine eindeutige Nummer, die nur einmal in einem Funknetz vergeben wird.
- Die E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number (EARFCN) ist eine eindeutige Kanalnummer, aus der sich die Up- und Downlink-Frequenz eines Kanalpaares eindeutig berechnen lässt.
- Der Mobile Country Code (MCC) ist eine Zahl, die das Land des verbundenen Funknetzes identifiziert, und wird von der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) vergeben.
- Der Mobile Network Code (MNC) ist eine Zahl, die eindeutig das Mobilfunknetz innerhalb eines Landes kennzeichnet, und wird von nationalen Behörden vergeben.
- Die Physical Cell ID (PCI) ist eine Nummer aus dem Wertebereich 0 bis 503, die innerhalb eines Gebiets eine Funkzelle eindeutig identifiziert. Durch sie lassen sich Messdaten einer bestimmten Funkzelle zuordnen. Die PCI wird über die Synchronisationssignale S-SS und P-SS sowie das Referenzsignal ausgesendet.

Funktion	Beschreibung	Erforderliches API-Level
getBandwidth()	Kanalbandbreite in kHz	28
getCi()	28-bit Cell Identity	17
getEarfcn()	18-bit Absolute RF Channel Number	24
getMcc()	Dreistelliger Mobile Country Code	17
getMnc()	Zwei- oder dreistelliger Mobile Network Code	17
getPci()	Physical Cell Id	17

Tabelle 2-12 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Zellinformationen bei LTE [39]

Anhand der abrufbaren Parameter stehen wesentliche Informationen wie Signalstärke, Kanalbandbreite und Frequenz bereit, die Voraussetzung für eine Expositionsabschätzung sind. Eine Information die nicht direkt abrufbar ist, ist die Anzahl der genutzten Antennen, über die das zellspezifische Referenzsignal abgestrahlt wird. Diese müsste entweder aus anderen Quellen bekannt sein oder pauschal angenommen werden.

2.2.2.2 UMTS (W-CDMA)

Tabelle 2-13 führt die über API-Funktionen abrufbaren empfangsspezifischen Parameter von UMTS zusammen mit dem erforderlichen API-Level für die Verwendung auf. Funktionen, die keinen direkten Bezug zur Signalstärke aufweisen, wurden ausgelassen. Die Bedeutungen von ASU und Level sind prinzipiell identisch mit denen bei LTE. Die Werte RSCP und Ec/No entsprechen den in Abschnitt 2.1.2.2 genannten Definitionen des Mobilfunkstandards.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getAsuLevel()	RSCP als ASU	18
getDbm()	RSCP in dBm	18
getLevel()	Abstrakter Wert für die gesamte Signalqualität	18
getEcNo()	Ec/No in dB	30

Tabelle 2-13 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Signalstärkeparametern für UMTS [39]

Die über die API abrufbaren Informationen über die Funkzelle von UMTS listet Tabelle 2-14 auf. Die Bedeutungen sind wie folgt:

- Cell Identity, MCC, MNC entsprechen den Bedeutungen von LTE
- Der Primary Scrambling Code (PSC) entspricht dem auf dem Pilotkanal (P-CPICH) ausgesendeten Code, anhand dessen eine Unterscheidung der Messungen zwischen verschiedenen Basisstationen möglich ist.
- Die UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number (UARFCN) ist wie die EARFCN eine eindeutige Kanalnummer, die Rückschluss auf die Frequenz zulässt.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getCid()	28-bit UMTS Cell Identity	18
getMcc()	Dreistelliger Mobile Country Code	18
getMnc()	Zwei- oder dreistelliger Mobile Network Code	18
getPsc()	9-bit UMTS Primary Scrambling Code	18
getUarfcn()	16-bit UMTS Absolute RF Channel Number	24

Tabelle 2-14 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Zellinformationen bei UMTS [39]

Anhand der abrufbaren Parameter stehen wesentliche Informationen wie Signalstärke und Kanalfrequenz als Voraussetzung für eine Immissionsabschätzung zur Verfügung. Außerdem ist die Unterscheidung von Basisstationen möglich. Die Kanalbandbreite ist bei W-CDMA ohnehin nicht variabel und somit nicht erforderlich. Der Messwert von RSSI ist über die API bislang jedoch nicht abrufbar, was einer auslastungsabhängigen Immissionsabschätzung entgegenstehen würde.

2.2.2.3 GSM

In Tabelle 2-20 sind die API-Funktionen zum Abrufen von empfangsspezifischen Parametern bei GSM aufgeführt. Der ASU-Wert und das Level sind identisch mit der Erläuterung bei LTE. Die Signalstärke in dBm entspricht dem RSSI, das auf dem BCCH gemessen wurde wie in Abschnitt 2.1.3 erläutert.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getAsuLevel()	RSSI als ASU	17
getDbm()	Signalstärke in dBm	17
getLevel()	Abstrakter Wert für die gesamte Signalqualität	17

Tabelle 2-15 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Signalstärkeparametern für GSM [39]

Die über die API abrufbaren Informationen über die GSM-Funkzelle listet Tabelle 2-16 auf. Die Bedeutungen der Parameter sind folgendermaßen:

- Die ARFCN (Absolute Radio Frequency Channel Number) entspricht wie schon bei LTE und UMTS einer Kanalnummer, aus der sich die Frequenzen für Uplink und Downlink bestimmen lassen.
- Der Base Station Identity Code (BSIC) ist ein Code, der zur Unterscheidung von benachbarten Basisstationen dient.
- Die Cell Identity (CI) ist eine eindeutige Nummer, die nur einmal in einem Funknetz vergeben wird.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getArfcn()	16-bit GSM Absolute RF Channel Number	24
getBsic()	6-bit Base Station Identity Code	24
getCid()	16-bit GSM Cell Identity	17
getMcc()	Dreistelliger Mobile Country Code	17
getMnc()	Zwei- oder dreistelliger Mobile Network Code	17

Tabelle 2-16 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Zellinformationen bei GSM [39]

Anhand der abrufbaren Parameter stehen wesentliche Informationen wie Signalstärke und Kanalfrequenz, die Voraussetzung für eine Immissionsabschätzung sind, zur Verfügung. Außerdem ist die Unterscheidung von Basisstationen möglich. Die Kanalbandbreite ist bei GSM zwar bekannt, aber die Anzahl der genutzten Verkehrskanäle kann nicht abgefragt werden. Daher müsste diese Information separat bekannt sein oder aber generisch angenommen werden.

2.2.2.4 5G

In Tabelle 2-17 sind die über API-Funktionen in Android abrufbaren empfangsspezifischen Parameter für 5G aufgelistet. Für die Werte ASU, Level und Signalstärke in dBm gelten die bereits bei LTE getroffenen Aussagen. SS-RSRP, SS-RSRQ, CSI-RSRP und CSI-RSRQ entsprechen den in Abschnitt 2.1.4.2 genannten Definitionen des Mobilfunkstandards.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getAsuLevel()	RSRP als ASU	29
getDbm()	Signalstärke in dBm (entspricht SS-RSRP)	29
getLevel()	Abstrakter Wert der gesamten Signalqualität	29
getSsRsrp()	SS-RSRP in dBm	29
getSsRsrq()	SS-RSRQ in dB	29
getCsiRsrp()	CSI-RSRP in dBm	29
getCsiRsrq()	CSI-RSRQ in dB	29

Tabelle 2-17 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Signalstärkeparametern für 5G [39]

Die über die API abrufbaren Informationen über die Funkzelle bei 5G listet Tabelle 2-18 auf. Die Bedeutungen der Parameter sind wie folgt:

- Die Bedeutungen von MCC, MNC und PCI sind analog zu LTE
- Die New Radio Cell Identity ist eine netzweit eindeutige Kennziffer zur Identifizierung von Basisstationen.
- Die New Radio Absolute Radio Frequency Channel Number (NR-ARFCN) ist wie bei den früheren Mobilfunkstandards eine Kanalnummer, die Rückschluss auf die Frequenz zulässt.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getMccString()	Mobile Country Code im String-Format	29
getMncString()	Mobile Network Code im String-Format	29
getNci()	NR (New Radio 5G) Cell Identity [0, 68719476735]	29
getNrarfcn()	New Radio Absolute Radio Frequency Channel Number	29
getPci()	Physical Cell ID im Bereich [0,1007]	29

Tabelle 2-18 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Zellinformationen bei 5G [39]

Auch bei 5G stehen bereits relevante Informationen zur Verfügung, die eine Basis für eine Immissionsabschätzung bilden könnten. Allerdings fehlt bislang die Information über die Kanalbandbreite und auch der Wert von NR carrier RSI ist nicht abrufbar. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass weitere Informationen in zukünftigen Android-Versionen verfügbar werden, wie es auch bei LTE, UMTS und GSM der Fall war.

2.2.2.5 Sendeleistung des Endgeräts

Eine entscheidende Einschränkung hinsichtlich der auslesbaren Informationen über die Funkverbindung des Endgeräts stellt die eigene Sendeleistung dar. Diese ist im Android-System bislang weder über die erläuterten API-Funktionen noch auf anderen Wegen abrufbar. Sie wäre für die Bewertung des Uplink-Beitrags zur Exposition von Bedeutung. Aus diesem Grund lassen sich im Rahmen eines Messnetzwerks mit Android-Smartphones derzeit nur Informationen zum Downlink durch entsprechende Empfangspegel sammeln. Ob sich die Verfügbarkeit der Endgerätesendeleistung in einer späteren Android-Version ändern wird, ist nicht absehbar. Grundsätzlich ist dieser Wert jedoch aus dem Modem der Smartphones entnehmbar und wird in speziellen Software-Lösungen wie dem QualiPoc Android von Rohde & Schwarz oder Hersteller-internen Service Modes realisiert. Zur Abschätzung der Exposition durch den Uplink könnten nur indirekte Methoden, wie zum Beispiel die Ableitung der genutzten Sendeleistung aus dem derzeit empfangenen Signalpegel von der Basisstation verwendet werden. Dieser wird als einer der wesentlichen Parameter für die Leistungsregelung in Endgeräten genutzt. Der Zusammenhang zwischen Empfangs- und Sendeleistung müsste für eine derartige Abschätzung bekannt sein. Zusammen mit abrufbaren Informationen über aktuell übertragene Datenmengen oder geführte Telefongespräche ließe sich womöglich zumindest eine Näherung für die Uplink-Exposition bestimmen.

2.2.2.6 Messung von Nachbarzellen

Die Informationen zur Funkzelle können im Android-System nicht nur für die verbundene Funkzelle, sondern auch für Nachbarzellen auf dem gleichen Frequenzkanal wie auch in anderen Frequenzbändern gleichermaßen abgerufen werden. Die momentane Verfügbarkeit und der Umfang der Nachbarzellemessungen hängt von verschiedenen Faktoren, wie der aktuellen Signalstärke der verbundenen Funkzelle, der Konfiguration durch die Basisstation, dem Nutzungszustand sowie Fähigkeiten des Endgerätes ab. Erfahrungsgemäß werden Messungen auf dem gleichen Funkkanal häufiger ausgeführt als auf anderen Frequenzkanälen/-bändern.

Auch die Nachbarzellmessungen werden jeweils mit Modemzeitstempeln versehen. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass die tatsächliche Aktualisierung der Messung in manchen Fällen dennoch seltener erfolgt und damit die Messung veraltet sein kann. Dies lässt sich jedoch vermeiden, indem exakt gleiche Messwerte, die unmittelbar nacheinander erfasst werden, nicht erneut in eine Auswertung einbezogen werden. Derart gleichbleibende Messwerte sind zumindest bei Fortbewegung sehr unwahrscheinlich.

Für ein HF-Messnetzwerk bietet die Erfassung von Nachbarzellmessungen ein großes Potential, da dadurch die Abdeckung sämtlicher an einem Ort einwirkenden Funkzellen erheblich verbessert werden kann. Auch Frequenzkanäle z.B. im 800 MHz-Band, die aufgrund der Zuteilungsstrategien der Netzbetreiber im Außenbereich kaum als verbundene Zelle genutzt werden, weil sie bevorzugt bei niedrigem Empfangspegel im Innenbereich genutzt werden, können auf diese Weise besser erfasst werden. Nachbarzellmessungen werden auch für andere Funkdienste unter bestimmten Umständen ausgeführt. Allerdings waren diese Messungen bislang auf keinem der getesteten Smartphones verwertbar, da die Messwerte dauerhaft auf dem niedrigsten möglichen Signalpegel liegen.

Bei den Nachbarzellmessungen werden weniger Informationen über die Funkzelle bereitgestellt. Meist werden neben der Signalstärke & -qualität nur die primären Cell-IDs (PCI, PSC, BSIC), die nur innerhalb eines gewissen Umkreises eindeutig sind, sowie die Kanalnummer angegeben. Bei LTE wird die Kanalbandbreite nicht angezeigt und auch der Landes- sowie Netzcode (MCC, MNC) nicht ausgegeben. Diese Informationen sind aber einem Messnetzwerk aus anderen Messungen, bei denen diese Funkzellen die versorgenden Zellen waren, bekannt. Die Werte können dadurch anhand der PCI und Kanalnummer für eine bestimmte Umgebung zusammengeführt werden.

Dennoch reichen diese Informationen zur Zuordnung und Auswertung für ein HF-Messnetzwerk aus.

2.2.2.7 *Dual-SIM*

Bei Geräten die zwei SIM-Karten (Dual-SIM) unterstützen und diese auch gleichzeitig verwenden können (zwei unabhängige Sendempfangseinheiten erforderlich), lassen sich prinzipiell gleichzeitig Messungen in zwei verschiedenen Mobilfunknetzen durchführen.

Durch die Nutzung von Messungen beider SIM-Karten bei Dual-SIM-Smartphones könnten potentiell Messungen sogar in zwei verschiedenen Netzwerken parallel erfolgen. Allerdings zeigte sich bei den getesteten Geräten, dass eine regelmäßige Verlässliche Aktualisierung und Bereitstellung von Messwerten nur für eine der SIM-Karten erfolgt. Dies war immer diejenige, die in den Einstellungen als bevorzugte SIM-Karte für die Datenübertragung eingerichtet wurde. Außerdem wurde für die zweite SIM-Karte nur für die verbundene Funkzelle überhaupt eine Information ausgegeben. Hier scheint es demnach Beschränkungen in der Implementierung der Hersteller zu geben, die trotz aller Möglichkeiten der Android-API eine sinnvolle Ausnutzung von zwei SIM-Karten für ein HF-Messnetzwerk ausschließen.

2.2.3 Zugriff auf weitere Informationen

Neben den direkten Parametern der Funkschnittstelle gibt es weitere relevante Eigenschaften, die über entsprechende Funktionen einfach zugänglich sind. sie werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

2.2.3.1 Standort

Um die erhaltenen Signalstärkemessungen einem Ort zuordnen zu können, werden Informationen zum Standort des Endgeräts zum Zeitpunkt der Erfassung der Signalstärke benötigt. Diese können im Android-Betriebssystem über die in Tabelle 2-19 gezeigten Funktionen detailliert abgefragt werden. Neben dem Längen- und Breitengrad des Standorts, ist auch eine Schätzung über die Genauigkeit dieser Information verfügbar. Die Genauigkeit der Standortinformation kann in Abhängigkeit der Empfangssituation des GPS-Signals stark variieren und kann von metergenaue Angaben bis zu mehreren Hundert Metern Abweichung reichen. Es sei auch erwähnt, dass abhängig von der Ausstattung des Endgeräts neben dem oftmals als Sammelbegriff genutztem GPS auch die Globalen Satellitennavigationssysteme GLONASS, Galileo und Beidou genutzt werden. Durch die parallele Nutzung dieser Systeme kann die Verfügbarkeit und Genauigkeit der Standortinformation verbessert werden.

Zusätzlich kann die Bewegungsgeschwindigkeit, die Höhe, sowie eine Schätzung für deren Genauigkeiten abgefragt werden. Zuletzt gibt es einen Zeitstempel, der angibt, wann der Standort bezogen auf den Systemstart erhalten wurde. Daraus lässt sich zusammen mit dem aktuellen Systemzeitstempel bestimmen, wie alt die Standortinformation ist. Außerdem lässt sich erkennen, ob die erhaltene Standortinformation gegenüber der zuletzt erhaltenen erneuert wurde, da dann der Zeitstempel weiter gezählt worden sein muss.

Funktion	Rückgabewert	Erforderliches API-Level
getLatitude()	Breitengrad in Grad	1
getLongitude()	Längengrad in Grad	1
getAccuracy()	Geschätzter horizontaler Genauigkeitsradius in Metern für diesen Standort für das Konfidenzniveau 0,68	1
getSpeed()	Geschwindigkeit zum Zeitpunkt der Standorterfassung in m/s	1
getSpeedAccuracy()	Geschätzte Geschwindigkeitsgenauigkeit in m/s für das Konfidenzniveau 0,68	1
getAltitude()	Höhe des Standorts in Metern über dem WGS84-Ellipsoid	1
getVerticalAccuracyMeters()	Geschätzte Genauigkeit der Höhe dieses Standorts für das Konfidenzniveau 0,68	1
getElapsedRealtimeNanos()	Zeit des GPS-Fixes in Nanosekunden in der seit dem Systemstart verstrichenen Echtzeit	1

Tabelle 2-19 Android-API-Funktionen zum Abrufen von Standortinformationen [40]

Insgesamt liegen somit alle Informationen vor, um eine sinnvolle Standortzuordnung zu den erhaltenen Modeminformationen vornehmen zu können.

2.2.3.2 *Zeitstempel*

Die für ein Messnetzwerk zu sammelnden Signalstärkemessungen müssen nicht nur einem Standort zuzuordnen sein, sondern auch dem Datum und der Uhrzeit der Erfassung. Auf diese Weise lassen sich Veränderungen im Funknetz oder auch durch Veränderungen der Ausbreitungsbedingungen im Laufe der Zeit erkennen und berücksichtigen. Diese Information steht natürlich auch im Android-System zur Verfügung.

Wichtig für die Bestimmung des Alters von Modem- und Standortinformationen ist hierbei noch die Funktion „elapsedRealtimeNanos()“ der Klasse „SystemClock“, die die aktuelle Zeit in Nanosekunden gezählt vom Zeitpunkt des Systemstarts angibt.

2.2.3.3 *Gerätespezifische Informationen*

Die Information darüber von welchem Hersteller das Gerät stammt und um welches Gerätemodell es sich handelt, sind nützlich um etwaige bekannte hersteller- und gerätespezifischen Eigenschaften zu berücksichtigen. Durch eine derartige Differenzierung wird es grundsätzlich möglich einzelnen Endgeräten Umrechnungsfaktoren für die Empfangsleistungen zu Feldstärkewerten zuzuordnen anstatt einen pauschalen Umrechnungsfaktor ansetzen zu müssen.

Auch die Betriebssystemversion kann relevant sein, da sie zum einen darüber entscheiden kann, welche Informationen überhaupt zur Verfügung stehen, und zum anderen erlaubt zu erkennen, ob es Abhängigkeiten des Verhaltens der Signalstärkebereitstellung von der Betriebssystemversion gibt. Eine Veränderung der Messeigenschaften als solches sind jedoch aufgrund von Betriebssystemupdates nicht zu erwarten, da das Modem weitgehend losgelöst vom Android-System arbeitet.

Diese gerätespezifischen Informationen können durch entsprechende API-Funktionen bei Android einfach erfasst und gespeichert werden.

2.2.3.4 *Sensordaten*

Die Zugriffsmöglichkeiten auf die Sensordaten der Smartphones könnten langfristig wertvolle Auskünfte über den Nutzungszustand zulassen. Bestenfalls lässt sich der derzeitige Nutzungszustand bzw. der Einfluss, den der Nutzer momentan vermutlich auf das Endgerät hat, abschätzen. Beispielsweise könnte anhand der Lage- und Beschleunigungssensoren erkannt werden, ob das Gerät momentan bewegt wird oder still und flach auf einem Tisch liegt. Auch der Displayzustand und der Näherungssensor sind von Interesse, da ein eingeschaltetes Display und bestimmte Bewegungsmuster mit hoher Wahrscheinlichkeit auf direkte Nutzerinteraktion mit der Hand hindeuten. Ein Beispiel, wie gut sich Beschleunigungsinformationen auswerten lassen, sind Schrittzähler-Apps (Fitness-Tracker), die die am Tag gelaufenen Schritte eines Nutzers zählen können und das mit hoher Genauigkeit.

2.2.4 Alternativer Zugriff auf Signalstärkeindikatoren und Informationen der Funkzelle

Zusätzlich zu der erwähnten Liste von Funkzellen mit Instanzen der Klasse „CellInfo“ gibt es die Klasse „SignalStrength“. In Android-Versionen unter API-Level 29 bietet diese Klasse nur rudimentäre Informationen zur Signalstärke der verbundenen Funkzelle. Die Klasse dient offensichtlich vor allem dem Betriebssystem für bestimmte Zwecke wie zum Beispiel die Anzeige der Signalstärke in Form von Balken in der Statusleiste. Intern enthält sie jedoch weitere Informationen, aus denen die auf wenige Stufen quantisierte Empfangsstärke generiert wird. Diese internen Informationen lassen sich mithilfe eines Tricks der als „Reflection“ bezeichnet wird auslesen. Ab API-Level 29 werden die Signalstärkeinformationen der SignalStrength-Klasse wie auch bei der CellInfo-Klasse über die Unterklasse „CellSignalStrength“ ausgegeben. Ab API-Level 30 gibt es außerdem einen Zeitstempel, der angibt, wann die entsprechende Signalstärkeinformation aus dem Modem erhalten wurde. Vorher war das Alter des Messwerts nicht erkennbar.

Diese Zugriffsmöglichkeit erscheint aufgrund der Einschränkungen und der Redundanz zu den Informationen der CellInfo-Klasse nicht erforderlich zu sein. Dennoch wurde, um das Verhalten beider Varianten zu verstehen und etwaige Unterschiede zu erkennen, bei einem Teil der Messungen in Kapitel 3 beides betrachtet und miteinander verglichen. Bei den übrigen Untersuchungen werden nur die Informationen der CellInfo-Klasse betrachtet.

2.2.5 Existierende Apps zur Erfassung von Signalstärkeindikatoren und Informationen über die Funkzelle

Im Google Play Store ist eine große Anzahl an Apps verfügbar, die das Auslesen von Signalstärke-Indikatoren, Zellinformationen und anderen Geräteparametern ermöglichen. Um einen Überblick über die Möglichkeiten zur Informationserfassung zu erhalten und Beispiele für eine Umsetzung zu sehen, wurde eine Sichtung der am Markt verfügbaren Apps mit derartigen Funktionen vorgenommen.

Apps, die eine Erfassung von Daten ausschließlich im Hintergrund vornehmen und die Informationen ohne Zutun des Nutzers an einen Server senden, sind in der Regel nicht direkt als solche zu erkennen, sondern nur anhand der Datenschutzerklärung, sodass sich eine Suche danach als schwierig erweist. Aufgeführt sind daher nur solche Apps, die offiziell die Erfassung derartiger Informationen als Funktion beinhalten und diese auch dem Nutzer ausgeben können.

Folgende Apps wurden im Play Store hierzu gefunden:

- Network Cell Info (Lite)
- NetMonster
- G-NetTrack (Lite)
- NetMonitor Cell Signal Logging
- NetMonitor
- Rf Signal Tracker
- Rx Monitor
- Cell Signal Monitor
- Network Info II
- Netzabdeckung
- Network Signal Info
- ElectroSmart

- Cell Tower Location
- Signal Check
- Network Monitor
- LTE Discovery
- Quanta Monitor

Die Apps wurden heruntergeladen und getestet. Sofern eine kostenpflichtige Version existierte wurde nur die kostenfreie Version installiert. Eine detaillierte Liste des Funktionsumfangs ist in tabellarischer Form im Anhang A enthalten.

Besonders hervorzuheben sind folgende Apps:

G-NetTrack: Die App hat einen hohen Funktionsumfang und bietet die Möglichkeit Daten aufzuzeichnen sowie diese direkt in einer Karte anzeigen zu lassen. Die Messdaten können außerdem exportiert werden. Abbildung 2-8 zeigt Bildschirmfotos dieser Anwendung.



Abbildung 2-8 Bildschirmfotos der App „G-NetTrack

ElectroSmart: Dies ist eine App, die explizit Bezug zur Exposition nimmt und den Nutzer anhand von empfangenen Leistungspegeln von WLANs und Mobilfunkzellen über die aktuelle

Exposition informieren soll. Es wird eine Einstufung und Bewertung der Exposition vorgenommen, um dann Handlungsempfehlungen auszusprechen (z.B. Abstand vergrößern). Jede Quelle (Funkzelle, WLAN) wird mit einem Expositionsindex mit den Werten 1 bis 100 versehen und daraus ein Gesamtindex ermittelt (Wertebereich ebenfalls 1 bis 100). Die Einstufung in den Index soll anhand der Feldstärke in V/m erfolgen. Wie die Feldstärkewerte aus den eigentlichen Empfangspegeln bestimmt werden, ist unklar. Weiterhin werden Abschirmlösungen wie mit Silberfasern versehene Unterwäsche, Decken und Bauchbänder zum Kauf angeboten, um die Strahlenbelastung zu reduzieren. Es ist möglich, dass die App im Hintergrund läuft, Statistiken aufzeichnet und den Nutzer warnt, sobald die Exposition einen hohen Wert annimmt. Neben der kommerziellen Verwertung der aufgezeichneten Daten zielt die App offensichtlich auf den Verkauf der genannten Abschirmungslösungen ab. Abbildung 2-9 zeigt Bildschirmfotos dieser Anwendung.

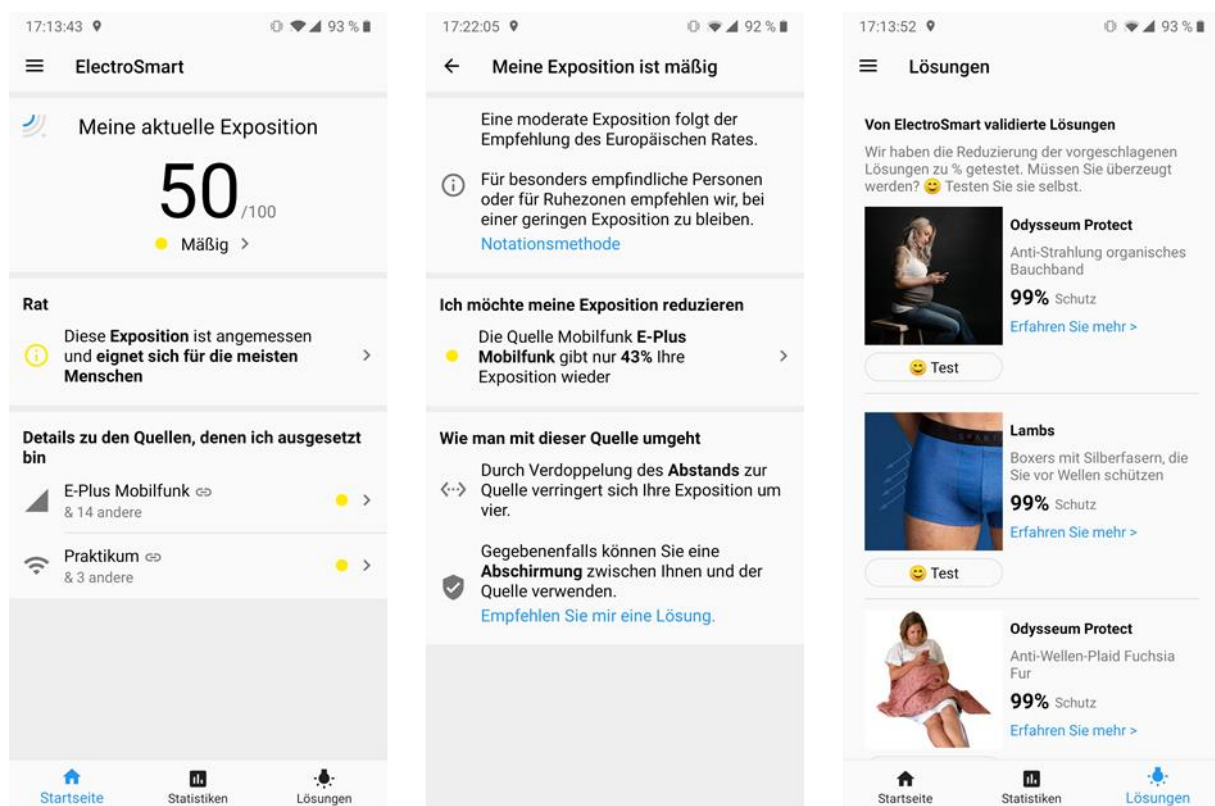


Abbildung 2-9 Bildschirmfotos der App „ElectroSmart“

Quanta Monitor: Die App „Quanta Monitor“ behauptet als erste App imstande zu sein ein Monitoring der Höhe der HF-Immission leisten zu können, der der Nutzer ausgesetzt ist, wenn sich das Endgerät nah am Körper (Abstand kleiner als 10 mm) des Nutzers befindet. Die App laufe im Hintergrund und messe die HF-Exposition sowohl unmittelbar als auch kumulativ in Echtzeit. Mit einem hochentwickelten Algorithmus sei der Entwickler der App imstande die tatsächliche SAR-Exposition darzustellen, welcher der Nutzer ausgesetzt ist [41]. Beim „Quanta Algorithm“ handelt sich um einen proprietären Algorithmus, der in umfangreichen Labortests validiert worden sein soll, um eine genaue Schätzung der HF-Immission von mobilen Endgeräten zuzulassen [42]. Wissenschaftliche Veröffentlichungen oder eine Dokumentation auf der Herstellerwebseite sind hierzu nicht gefunden worden.

Die Beschreibung im Google Play Store erweckt aufgrund der teilweise unpräzisen Beschreibung außerdem den Eindruck sämtliche HF-Immission messen zu können – also auch solche, die nicht in Verbindung mit dem Smartphone und den von diesem genutzten Funkdiensten stehen. Konkret soll die App fähig sein die Leistungsdichte (in $\mu\text{W}/\text{m}^2$) und die SAR (in W/kg) in Echtzeit zu erhalten, denen der Nutzer ausgesetzt ist. Bei der SAR wird nur die Exposition durch das Endgerät berücksichtigt, bei der Leistungsdichte wird außerdem die Exposition durch das Netzwerk einbezogen. Als drittes wird eine kumulative tägliche Exposition in $\mu\text{Wh}/\text{m}^2$ und deren Zusammensetzung (WLAN und Mobilfunk je durch das Endgerät und das Netzwerk) ausgegeben. Diese Werte werden in der App in drei verschiedenen Ansichten angezeigt (siehe Abbildung 2-10). Bei einem Test der App bewegten sich die Zeiger zu höheren Werten, sobald eine Datenübertragung stattfand.

Weiterhin soll die App bei der Ermittlung der Exposition nur berücksichtigen, wenn sich das Endgerät nahe beim Nutzer befindet. Hierzu soll die App fähig sein die Position des Geräts zu erkennen, also ob es sich nah am Nutzer (am Kopf, in der Hand, auf dem Schoß, in der Tasche) befindet oder in größerer Entfernung platziert ist (z.B. auf einem Tisch) [42]. Es erfolgt ein Abgleich der ermittelten Exposition mit den regulatorischen Grenzwerten und im Falle einer Überschreitung der Grenzwerte wird der Nutzer benachrichtigt. Eine weitere App mit dem Namen „Quanta Guard“ wird angekündigt, die die Exposition automatisch um bis zu 90% reduzieren können soll, ohne dass es dadurch zu Einbußen in der Nutzererfahrung kommen soll. Es existieren mehrere Patente mit Bezug zu dieser App [43–45]. Diese beschreiben zwar das Konzept der App als Monitoring-Instrument und zur Reduzierung der Exposition durch Begrenzung der Datenübertragung des Endgeräts, allerdings wird nicht dargestellt, wie die Umrechnung von den durch das Smartphone ermittelte Informationen in die Leistungsdichte und das SAR erfolgt. Es sind weiterhin keinerlei wissenschaftliche Publikationen auffindbar gewesen, die die Methode erläutern würden. Aus den Patenten geht nur hervor, dass Informationen über den Leistungspegel von empfangenen Signalen, Informationen über den Leistungspegel des von dem Endgerät gesendeten Signals, Informationen über den Anruf- und Datenübertragungsstatus des Endgeräts sowie Informationen von einem oder mehreren Sensoren des Endgerätes einbezogen werden. Außerdem wird erläutert, dass eine Anfrage an einen Cloud-Server zum Abfragen von Eigenschaften des Endgeräts erfolgt, wodurch Informationen zum SAR-Wert des Modells erhalten werden sollen. Aus all diesen Informationen wird die Expositionshöhe ermittelt. Eine Expositionsreduzierung soll dann durch steuern der Sprachverbindungs- und Datenübertragungskapazitäten des Endgeräts erfolgen. Wie in Anbetracht der Tatsache, dass es in normalen Android-Installationen (bislang) nicht möglich ist die Sendeleistung des Endgeräts abzurufen, diese ermittelt werden soll, bleibt unklar.

Die aktuellste Version der App wurde am 28. Mai 2020 im Google Play Store veröffentlicht und ist kostenpflichtig (Preis: 2,39€). Bislang scheint die App über diesen Kanal kaum Verbreitung gefunden zu haben, da der Google Play Store angibt, dass es bislang mehr als 10 Installationen (die nächsthöher Stufe ist mehr als 50) gibt. Bewertungen liegen keine vor. Mit Stand 22.03.2022 ist die App im Google Play Store nicht mehr auffindbar.

Dass die in die Expositionsbestimmung einfließenden Informationen (Empfangspegel, aktive Datenübertragung etc.) grundsätzlich ein grober Indikator für die Exposition sein können, ist durchaus richtig und auch Grundlage für das Konzept eines HF-Messnetzwerks. Die Präzision die in den Darstellungen beansprucht wird, muss jedoch stark infrage gestellt werden und wirkt

aufgrund der fehlenden Erläuterung des Verfahrens unseriös. Wegen der mangelnden Transparenz ist es außerdem nicht möglich Erkenntnisse hinsichtlich der Expositionsbestimmung mithilfe von Smartphones aus diesem Ansatz abzuleiten.

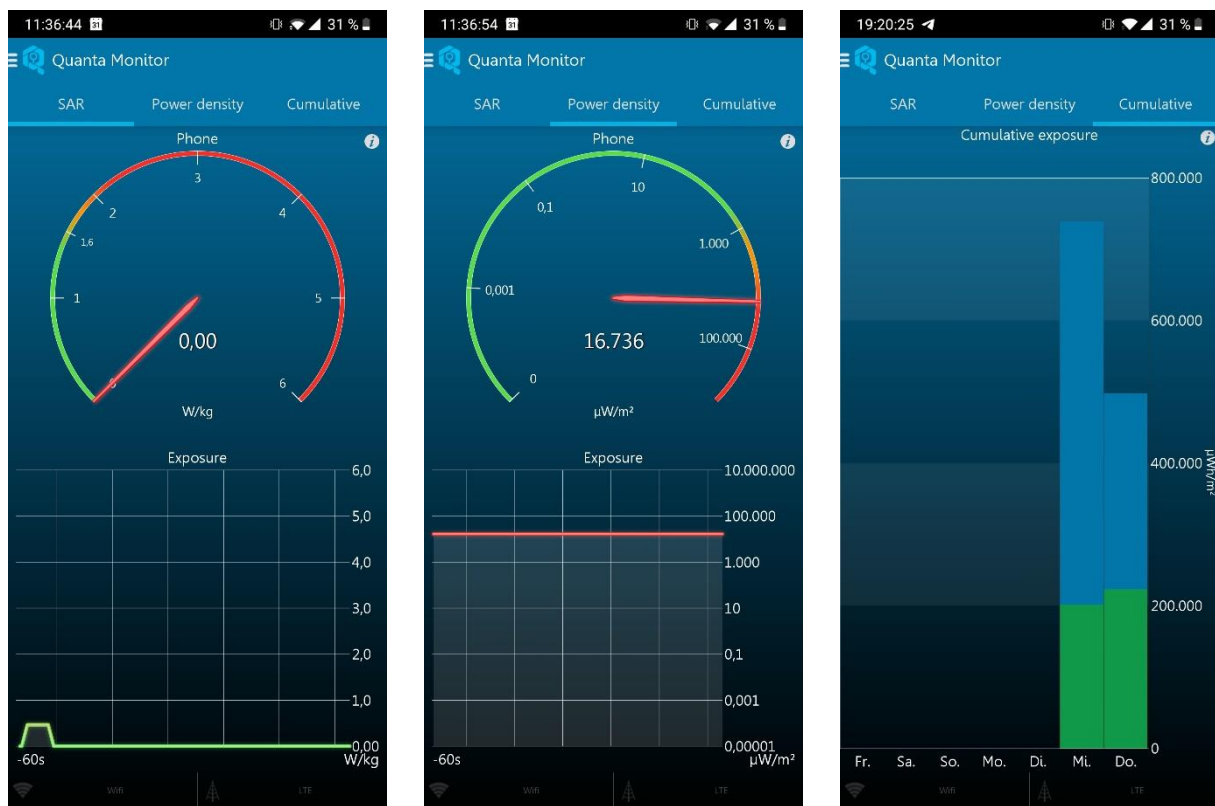


Abbildung 2-10 Bildschirmfotos der App „Quanta Monitor“

Neben den Apps aus dem Google Play Store wurde noch die App „XMobiSense“ auf den Internetseiten des COSMOS-Projekts gefunden [46]. Über die App wurden für das Projekt Nutzungsverhalten und -dauern, Datenmengen sowie Empfangsleistungen aufgezeichnet. Außerdem wurde die Sendeleistung aus der Empfangssituation ermittelt. Ein Zugriff auf die von der App aufgezeichneten Daten ist für den Endnutzer nicht möglich. Die App ist inzwischen veraltet, worauf auch das Betriebssystem Android bei der Installation hinweist. Die letzte Meldung auf der Internetseite des Projekts stammt aus 2017. Abbildung 2-11 zeigt ein Bildschirmfoto der Anwendung.



Abbildung 2-11 Bildschirmfotos der App „XMobiSense“

Trotz des teilweise beachtlichen Funktionsumfangs erfüllte keine der verfügbaren Apps sämtliche Anforderungen (z.B. weiterverarbeitbares Datenformat), um die im Projekt vorgesehenen Messungen durchzuführen, weshalb eine durch das Institut für Hochfrequenztechnik entwickelte App weiterentwickelt und für diese Zwecke eingesetzt wurde. Weitere Apps, die ein Immissionsmonitoring unterstützen, wurden nicht gefunden.

2.2.6 Erfahrungen aus der Entwicklung einer eigenen Android-App

Bereits vor Beginn der vorliegenden Machbarkeitsstudie wurde am Institut für Hochfrequenztechnik zu Forschungszwecken eine App zur Erfassung von Signalstärkemessungen entwickelt. Sie trägt den Arbeitstitel „CellViewer“. Die Funktionen sind ebenfalls in den Tabellen von Anhang A aufgeführt. Ein Bildschirmfoto zeigt Abbildung 2-12. Die weitere Funktionalität, die speziell auf die Messaufgaben zugeschnitten wurde, wird in Abschnitt 3.1 vorgestellt.

Bei der Umsetzung der App wurden die in Abschnitten 2.2.2 beschriebenen Methoden genutzt, um die benötigten Informationen aus dem Betriebssystem zu erhalten. Der Zugriff auf die Informationen benachbarter Funkzellen ist ebenfalls mithilfe der API-Funktionen gelungen. Die Umsetzbarkeit der für ein HF-Messnetzwerk notwendigen Funktionen konnte damit erfolgreich demonstriert werden.

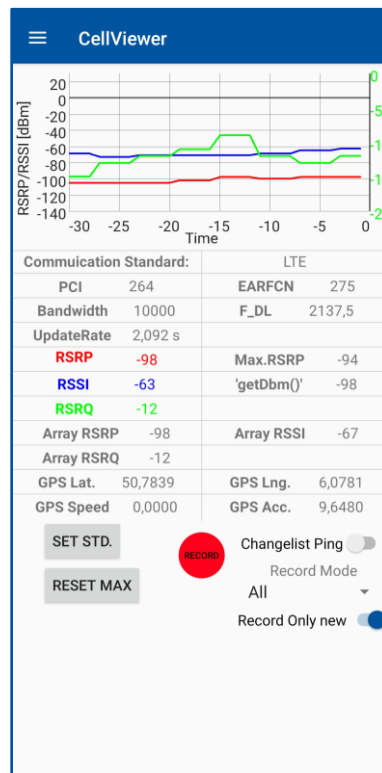


Abbildung 2-12 Bildschirmfoto der vom IHF entwickelten App „CellViewer“ für die Durchführung von Messungen

Drei Dinge stellten sich im Laufe der Entwicklung und Nutzung der App jedoch als problematisch heraus:

Für die Mobilfunkstandards UMTS und GSM geht beim Abrufen über die Android API Information verloren. So werden die Pegel nur in Schritten von 2 dB ausgegeben, obwohl im Standard 1 dB-Schritte vorgehen sind. Im Modem der Geräte liegen also genauere Werte vor, als über die Schnittstellen erhalten werden können. Hierdurch ist die Auflösung der erhaltenen Signalstärkewerte geringer als sie aufgrund der Fähigkeiten der Geräte sein könnte. Der Grund hierfür ist unbekannt. Außerdem wurden bei allen Geräten für UMTS und GSM maximale Signalpegel von -51 dBm über die API-Funktionen erhalten, obwohl die Wertebereiche eigentlich bis -48 dBm (GSM) bzw. -24 dBm (UMTS) reichen. Der Wertebereich wird also abgeschnitten, sodass ab dieser Grenze höhere Signalstärken nicht mehr ausgegeben werden. Hierdurch kommt es bei hohen Signalstärken zu Unterschätzungen der Immission, die nicht kompensiert werden können. Auch für den Messwert RSSI bei LTE, der als Grundlage zur Abschätzung der Momentanmission dienen könnte, wurden Einschränkungen festgestellt. So wird selbst bei Geräten mit Android-Versionen, in denen die entsprechende API-Funktion zur Verfügung steht, kein Messwert ausgegeben. Offensichtlich implementieren die Hersteller vielfach diese Funktion nicht. Aber auch bei den Geräten, die einen Wert ausgeben, stellte sich heraus, dass die Werte oftmals nicht plausibel sind, da sie in keinem Verhältnis zu RSRP stehen. Nach derzeitigem Stand scheint eine sinnvolle Nutzung daher nicht möglich zu sein.

Weiterhin führen die Energiesparbemühungen innerhalb des Android-Systems und durch die Hersteller dazu, dass Anwendungen, sobald sie im Hintergrund laufen und insbesondere, wenn sich das Endgerät im Schlafzustand befindet, in der Ausführung unterbrochen oder ganz beendet werden. Auch durch die geeignete Implementierung eines Hintergrund-Services kann dies nicht vollständig unterbunden werden. Eine Lösung stellt hier nur dar, die App explizit von

der sogenannten Akku-Optimierung auszunehmen und somit eine dauerhaft ungestörte Ausführung zu gewährleisten. Dies muss vom Nutzer in den Systemeinstellungen vorgenommen werden. Zwar ist es möglich die Erlaubnis zur Hintergrundausführung ähnlich einer Berechtigung vom Nutzer anzufragen, allerdings erlauben die Richtlinien des Google Play Stores dieses Vorgehen nicht. Stattdessen darf nur auf das entsprechende Einstellungs Menü verwiesen werden, wo der Nutzer wiederum manuell die Einstellung vornehmen muss. Für die Umsetzung des Crowdsourcingansatzes stellt dies eine nicht zu vernachlässigende Behinderung dar, weil es eine zusätzliche Mitwirkung des Nutzers erfordert. Wird diese Einstellung nicht vorgenommen, ist davon auszugehen, dass es auch unter Ausnutzung sämtlicher Programmier-Techniken zum Aufrechterhalten eines Hintergrunddienstes zu Unterbrechungen oder gar Abbrüchen der Aufzeichnung kommen wird, die die Datenerhebung erheblich beeinträchtigen.

Ein weiterer Punkt ist die Einholung der Standortberechtigung. Ab Android-Version 11 kann die Standortberechtigung innerhalb der App nur noch für den Zugriff während der App-Nutzung vom Nutzer angefragt werden. Damit eine Crowdsourcing-App dauerhaft auch im Hintergrund Daten erfassen kann, müsste jedoch die Berechtigung „immer“ für die App vergeben werden. Diese kann jedoch nur noch vergeben werden, indem vergleichbar mit der Ausnahme für die Akku-Optimierung in den Android-Einstellungen die Berechtigung manuell vom Nutzer erteilt wird. Ab Android 11 kommt noch hinzu, dass der Nutzer entscheiden kann nur den ungefähren Standort für die App freizugeben. Diese Auswahl würde jedoch eine ausreichend genaue Zuordnung zum Standort der Messung verhindern und die erhobenen Daten voraussichtlich komplett unbrauchbar machen. Es ist also auch hier die Mitwirkung des Nutzers gefordert, um die Datenerhebung ungehindert zu ermöglichen.

2.3 Bestehende Arbeiten

In diesem Kapitel werden die bisherigen Arbeiten des Auftraggebers, die mit der Thematik HF-Messnetzwerk in Zusammenhang stehen, vorgestellt. Danach erfolgt eine Zusammenstellung von Arbeiten anderer Stellen, die als Vorarbeiten angesehen werden können und Erkenntnisse für das weitere Vorgehen liefern.

2.3.1 Arbeiten des Auftragnehmers

2.3.1.1 Stabilität der Messergebnisse von RSRP bei LTE

Eine wesentliche Voraussetzung, um mit den Messungen eines HF-Messnetzwerks verlässliche Ergebnisse erhalten zu können, ist, dass diejenigen Messparameter, die ausschließlich aus lastungsunabhängigen Referenzsignalen bestimmt werden, auch über einen längeren Messzeitraum am selben Messort konstant bleiben, solange keine wesentlichen Änderungen im Ausbreitungsweg auftreten. Dies wird im Folgenden am Beispiel von RSRP bei LTE demonstriert.

Im Zuge der in Abschnitt 2.3.1.4 beschriebenen Langzeitmessungen ist auch der RSRP-Wert stets mit aufgezeichnet worden. Eine einfache statistische Auswertung in Form eines Histogramms der aufgetretenen Werte in Abbildung 2-13 zeigt die Stabilität der Messwerte sehr gut. Die Schwankungen betragen über die Messdauern von 60 bzw. 40 Stunden nur ± 1 dB. Dies

ist aufgrund des festen Standorts des Endgeräts und der Vermeidung von Einflüssen durch Abschattung und Ähnliches in direkter Umgebung auch so zu erwarten, denn das Referenzsignal, auf das sich RSRP bezieht, wird mit konstanter Leistung ausgesendet. Kleinere Schwankungen sind durch Änderungen im Übertragungspfad von der Basisstation ebenso normal und zu erwarten.

Es zeigt sich, dass bei weitgehendem Ausschluss von Einflüssen ein verlässliches kontinuierliches Messergebnis bei RSRP erreicht wird.

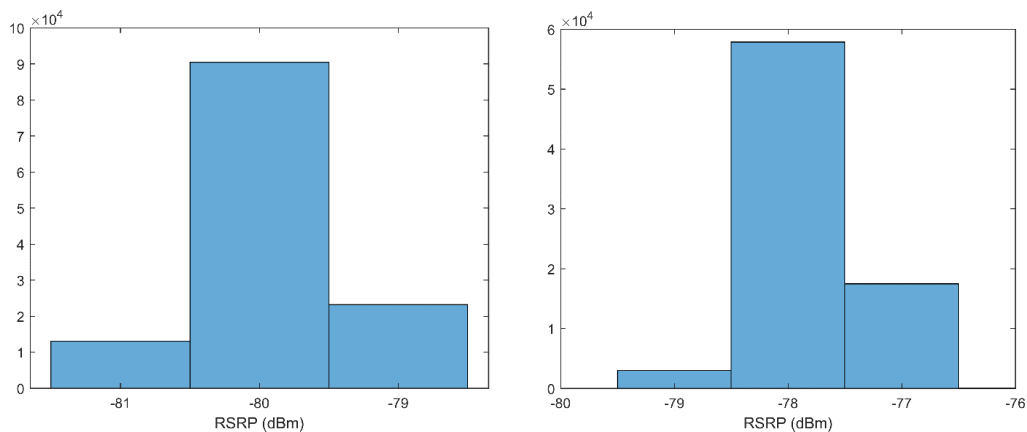


Abbildung 2-13 Histogramme der RSRP-Werte bei Langzeitmessungen, links: 1800 MHz-Band, rechts: 800 MHz-Band

2.3.1.2 Messreihe zum Umrechnungsfaktor zwischen Smartphone-Messwerten und Feldstärkewerten

Eine zentrale Frage bezüglich der Umsetzbarkeit eines Expositionsmonitorings auf der Basis von Smartphones besteht in dem Zusammenhang der von Smartphones gemessenen Signalstärkeindikatoren und der zugrundeliegenden Feldstärke am Ort des Endgeräts. Im Rahmen einer Messreihe, die auch in [47] veröffentlicht wurde, wurde diese Beziehung daher an verschiedenen Orten in mehreren Funkzellen eines realen Mobilfunknetzes im Regelbetrieb untersucht.

Ziel der Messungen war es für die Funkdienste LTE, UMTS und GSM zu demonstrieren, dass sich bei einer ausreichenden Anzahl an Messungen ein konstanter Umrechnungsfaktor von Smartphone-Messwert zur Feldstärke finden lässt. Hierfür wurden an den einzelnen Messorten das Smartphone und die Messantenne des Feldstärkemessgeräts SRM-3006 von Narda nacheinander für eine Minute im gleichen Messvolumen geschwenkt und der jeweils aufgetretene Maximalwert der Feldstärke des jeweiligen Messsignals und des Smartphone-Messwerts, der sich auf die gleiche Funkzelle bezog, festgehalten. Da es sich bei allen Messungen um auslastungsunabhängige Messgrößen handelt, sind Abweichungen aufgrund der sequenziellen Abfolge der Messungen nicht zu erwarten. Um den Nutzereinfluss für diese Untersuchung zunächst zu minimieren wurde das Smartphone auf einem Klemmbrett liegend durch das Messvolumen bewegt.

Abbildung 2-14 zeigt für LTE das Ergebnis aus 46 Messungen mit einem Smartphone vom Modell Huawei P10 im Vergleich zu den Feldstärkemessungen des SRM-3006. Die Messdaten

wurden mit der eigens entwickelten App (siehe Abschnitt 2.2.6) aus dem Android-Betriebssystem ausgelesen und aufgezeichnet. Die Messungen decken einen Dynamikbereich von etwa 40 dB ab. Als mittlerer Umrechnungsfaktor zwischen RSRP und Referenzsignal ergibt sich bei Betrachtung des Medians ein Wert von 149,6 dB. Insgesamt reicht der Wertebereich des Umrechnungsfaktors von 144,9 dB bis 154,6 dB und überdeckt demnach insgesamt 9,7 dB. Das bedeutet, dass sich die Werte ziemlich genau um ± 5 dB vom Median unterscheiden. Die Gerade, der sich die Werte annähern besitzt nahezu die Steigung eins wie für einen konstanten Umrechnungsfaktor zu erwarten.

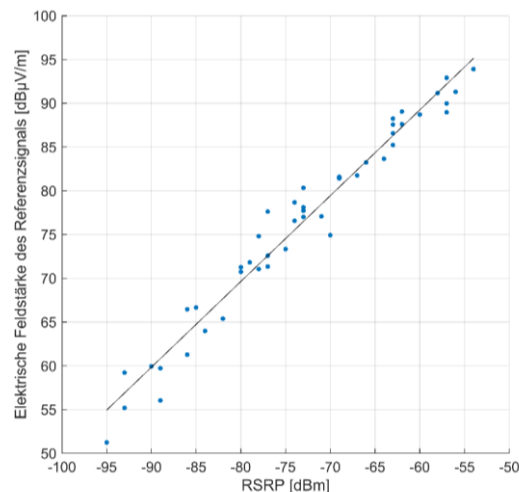


Abbildung 2-14 Vergleich des vom Smartphone erfassten RSRP mit dem durch ein Feldstärkemessgerät gemessenen Referenzsignal bei LTE

In Abbildung 2-15 werden Messungen von vier Smartphones im Vergleich gezeigt. Hierfür wurden an insgesamt 13 Punkten Messungen mit den Smartphones und dem SRM 3006 nacheinander durchgeführt. Die Geraden ergeben sich wie zuvor durch lineare Regression aus den Messwerten und zeigen Unterschiede für den Umrechnungsfaktor. Außerdem entsprechen die Steigungen der Geraden nicht dem Idealwert für einen konstanten Umrechnungsfaktor. Hier macht sich gegenüber dem zuvor gezeigten Ergebnis für nur ein Smartphone vermutlich die geringere Anzahl an Vergleichsmessungen für die einzelnen Smartphones bemerkbar. Die mittleren Umrechnungsfaktoren reichen von 150,0 dB bis 155,0 dB.

Die Ergebnisse für den Funkdienst UMTS sind in Abbildung 2-16 dargestellt. In diesem Fall wurden 20 Messwerte mit einem Smartphone vom Modell OnePlus 6 zum Vergleich mit der codeselektiven Messung des SRM-3006 aufgenommen. Der Umrechnungsfaktor zwischen RSCP und elektrischer Feldstärke des Pilotkanals reicht von 150,0 dB bis 159,8 dB. Der Median liegt bei 154,9 dB. Es ergibt sich also wie zuvor bei LTE, dass die maximalen Abweichungen mit ± 5 dB um den Median liegen. Die bestimmte Regressionsgerade weicht von der idealen Steigung ab und ist geringfügig zu steil. Dies mag an der geringeren Anzahl an Messungen als bei der LTE-Messreihe liegen.

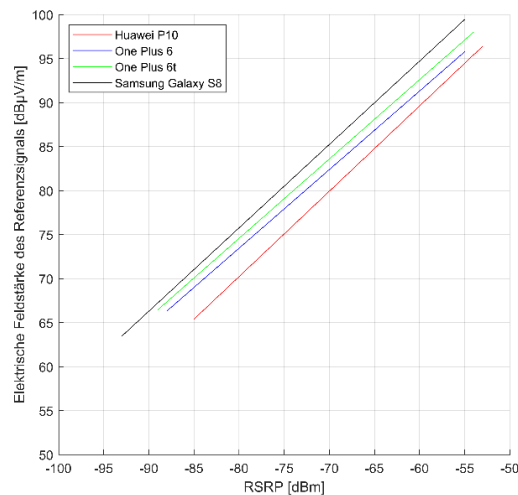


Abbildung 2-15 Vergleich des von vier unterschiedlichen Smartphones erfassten RSRP mit dem durch ein Feldstärkemessgerät gemessenen Referenzsignal bei LTE

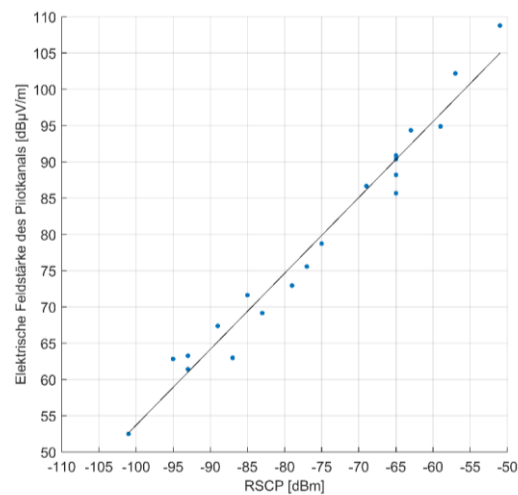


Abbildung 2-16 Vergleich des vom Smartphone erfassten RSCP mit der durch ein Feldstärkemessgerät gemessenen elektrischen Feldstärke des Pilotkanals bei UMTS

Bei GSM wurden 10 Messwerte mit einem Smartphone vom Modell Huawei P10 aufgezeichnet. Abbildung 2-17 gibt die Ergebnisse wieder. Für den Umrechnungsfaktor von RSSI zur elektrischen Feldstärke ergeben sich Werte von 138,2 dB bis 158,7 dB und somit eine Spanne von knapp über 20 dB, die wesentlich größer ist als bei den Messungen von LTE und UMTS. Wird der Ausreißer mit 138,2 dB vernachlässigt, reduziert sich der Wertebereich auf etwas mehr als 11 dB und weicht nicht mehr ganz so stark von denen der LTE- und UMTS-Messungen ab. Der Median liegt bei 150,6 dB. Bildet man trotz der Abweichungen und der geringen Anzahl an Messpunkten eine Regressionsgerade, so liegt diese dennoch bereits relativ nah an der idealen Steigung (Steigung = 1) für einen konstanten Umrechnungsfaktor.

Die Ergebnisse zeigen, dass mit einer hohen Anzahl an Messungen grundsätzlich eine Annäherung an einen mittleren konstanten Umrechnungsfaktor erreicht werden kann. Dieser kann sich jedoch je nach Endgerät um mehrere dB unterscheiden. Durch die Untersuchungen in Kapitel 2.5 wird dieser Zusammenhang weiter systematisch untersucht. Dabei wird sowohl die Anzahl der Messungen je Endgerät als auch die Anzahl verschiedener Endgeräte vergrößert.

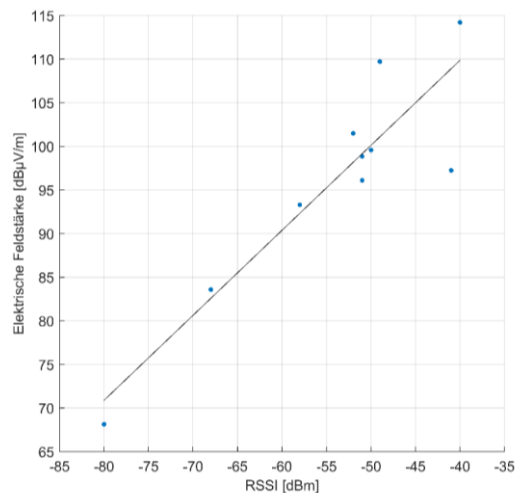


Abbildung 2-17 Vergleich des vom Smartphone erfassten RSSI mit der durch ein Feldstärkemessgerät gemessenen elektrischen Feldstärke des BCCH bei GSM

2.3.1.3 Untersuchung der Messbandbreite der RSSI-Messung bei LTE

Wie bei den Erläuterungen zum Messparameter RSSI bei LTE in Abschnitt 2.1.1.2.2 ausgeführt, kann sich die Messbandbreite abhängig von der durch die Basisstation vorgegebenen Konfiguration von der Signalbandbreite unterscheiden, was unmittelbar Einfluss auf das Messergebnis hat. Daher wurden Untersuchungen angestellt, um die Messbandbreite an Funkzellen eines realen Mobilfunknetzes abzuleiten. Die Ergebnisse wurden in [48] veröffentlicht.

Für den Messaufbau wurde ein Signalgenerator genutzt, um ein sinusförmiges Signal innerhalb der Kanalbandbreite einer LTE-Funkzelle zu erzeugen, in die das zu untersuchende Smartphone eingebucht war. Die Frequenz des Sinussignals wurde langsam über die gesamte Kanalbandbreite variiert und die RSSI-Werte parallel aufgezeichnet. Als Smartphone kam ein Samsung Galaxy S8 mit der Software QualiPoc Android von Rohde & Schwarz zum Einsatz. Zum Vergleich wurde parallel eine Messung mit dem Feldstärkemessgerät SRM-3006 von Narda ausgeführt. Aufgrund der geringen Sendeleistung und der schmalen Bandbreite des Testsignals, die maximal einen Unterträger des LTE-Kanals beeinträchtigen könnte, war eine Störung von anderen Mobilfunknutzern ausgeschlossen. Es wurde weiterhin verifiziert, dass weder das Smartphone noch das Feldstärkemessgerät das Testsignal außerhalb des Labors detektieren konnten.

Da das Smartphone den RSSI-Wert immer für die gesamte Messbandbreite ausgibt, kann diese Bandbreite nur bestimmt werden, indem der Messwert beobachtet wird, während das Sinussignal über die Kanalbandbreite verschoben wird. Der gemessene RSSI-Wert wird der zum Zeitpunkt der Messung eingestellten Frequenz des Sinussignals zugeordnet. Der RSSI-Wert unterliegt einer zeitlichen Mittelung, sodass er sich selbst dann nur langsam zu einem neuen Zielwert ändert, wenn es zu einer sprunghaften Änderung der Empfangsleistung kommt. Daher war die Änderungsgeschwindigkeit der Signalfrequenz niedrig. Sobald das Sinussignal in die Messbandbreite des RSSI fällt, steigt der Wert gegenüber dem ungestörten Fall an.

Die Ergebnisse des RSSI-Messbandbreitentests zeigt Abbildung 2-18 für drei unterschiedliche Frequenzbänder (800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz). Auf der rechten Seite sind die spektralen

Messungen mit dem SRM-3006 zum Vergleich abgebildet, mit je einer Kurve ohne Störsignal (blau) und einer Kurve (orange), nachdem das Signal über die Bandbreite des LTE-Kanals geschoben wurde. Die Messungen wurden mit der Max-Hold-Funktion zum Festhalten des Maximalwerts an jedem Frequenzpunkt aufgezeichnet. Zwei der Kanäle wiesen eine Bandbreite von 10 MHz auf, einer nur 5 MHz. Die Signalbandbreite ist entsprechend 9 MHz bzw. 4,5 MHz. Die linke Seite zeigt die gemessenen RSSI-Werte des Smartphones, die der Frequenz des Sinussignals zugeordnet wurden. Es zeigt sich, dass bei den Kanälen im 1800 MHz- und im 2100 MHz-Band, die Messbandbreite mit der Kanalbandbreite übereinstimmt, während bei dem Kanal im 800 MHz-Band nur bei der halben Kanalbandbreite um die Kanalmitte ein Anstieg des RSSI durch das Testsignal zu beobachten ist. Zusätzlich sind in allen Bändern periodische Schwankungen des Messwerts von 2–4 dB zu erkennen, die vermutlich nicht aus zeitlichen Fluktuationen der RSSI-Messung herrühren. Womöglich hängt dies mit der Frequenzselektivität der Empfangsfilter zusammen, die auf die LTE-Signalstruktur und die dort nebeneinanderliegenden Unterträger angepasst sind.

Aus Expositionserfassungssicht sollte RSSI idealerweise immer über die volle Bandbreite gemessen werden und der Amplitudengang sollte innerhalb des Durchlassbereichs flach sein. Insbesondere eine von der Signalbandbreite nach unten abweichende, schmalere Messbandbreite sollte bekannt sein, damit zumindest eine Extrapolation auf die volle Bandbreite möglich ist. Die Bandbreite bzw. die Anzahl der zugrundeliegenden Physical Resource Blocks kann prinzipiell aus dem Zusammenhang in Gleichung 2-2 abgeleitet werden, wenn Messwerte von RSSI, RSRP und RSRQ für den Leerlauf der Funkzelle vorliegen und weitere Funkzellen auf der gleichen Frequenz an diesem Ort einen vernachlässigbaren Beitrag zum RSSI-Wert leisten.

Als Resultat kann festgehalten werden, dass sich die Messbandbreite von RSSI von der eigentlichen Signalbandbreite unterscheiden kann. Dieser Aspekt müsste bei Nutzung dieses Wertes zur Ermittlung der Momentanmission für weitere Funkzellen vor allem auch anderer Netzbetreiber untersucht werden, um in Erfahrung zu bringen, welche Messbandbreiten typischerweise vorliegen. In Kapitel 2.5 gibt es auch hierzu eine Untersuchung.

Trotz der Nutzung des QualiPoc Android sind die Erkenntnisse grundsätzlich auch auf Smartphones mit herkömmlichen Android-Versionen ohne erweiterte Messmöglichkeiten übertragbar, da die Ausführung der eigentlichen Messung des Modems nicht durch die Messsoftware beeinflusst wird. Von Vorteil erweist sich jedoch, dass ein Zellwechsel bzw. Verbindungsverlust des Endgeräts aufgrund der verschlechterten Signalqualität durch das Störsignal bei QualiPoc bis zu einem gewissen Grad unterdrückt werden kann.

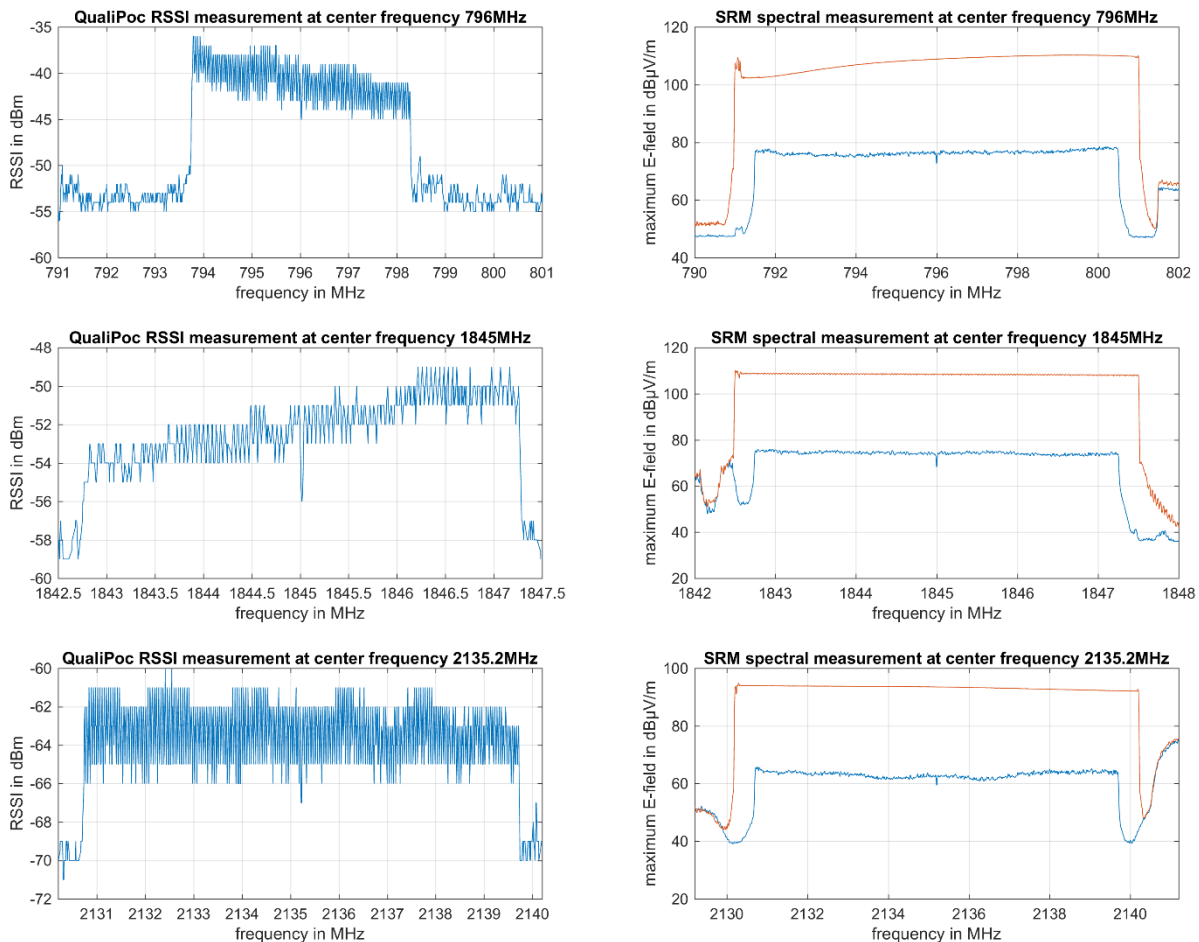


Abbildung 2-18 Messergebnisse zur Untersuchung der Messbandbreite von RSSI bei LTE in drei verschiedenen Frequenzbändern (800 MHz, 1800 MHz, 2100 MHz), links: Vom Smartphone gemessener RSSI, rechts: Vergleichsmessung mit dem Narda SRM-3600 (blau: vor dem Sinussignal, rot: nach verschieben des Sinussignals über die Kanalbandbreite)

2.3.1.4 Dynamikkorrektur von RSSI-Messungen bei LTE

Nach ersten Langzeitmessungen des RSSI-Wertes, die auch in [48] vorgestellt wurden, ist ein Unterschied des Dynamikumfangs der RSSI-Messungen gegenüber den Feldstärkemessungen, die parallel ausgeführt wurden, aufgefallen. Abbildung 2-19 zeigt die Ergebnisse dieser ersten Langzeitmessung, die Ausgangspunkt für weitergehende Untersuchungen war. Die Messkurven des Smartphones und des Feldstärkemessgeräts wurden bei gleicher Skalierung derart entlang der y-Achse verschoben, dass sie für die Phasen schwacher Verkehrsauslastung in der Nacht nah beieinander liegen. Beide Kurven zeigen im Tagesverlauf entsprechend der schwankenden Verkehrsauslastung grundsätzlich jeweils höhere und niedrigere Werte und weisen auch eine gewisse Ähnlichkeit im Verlauf miteinander auf. Es wird jedoch deutlich, dass die mit dem Feldstärkemessgerät gemessenen Werte insgesamt einen wesentlich größeren Dynamikumfang aufweisen als der RSSI-Wert des Smartphones. Als mögliche Erklärung wurde die in der Definition von RSSI im LTE-Standard (vgl. Abschnitt 2.1.1.2.2) genannte Beschränkung auf solche Symbole, die das zellspezifische Referenzsignal für Antennen-Port 0 tragen, identifiziert.

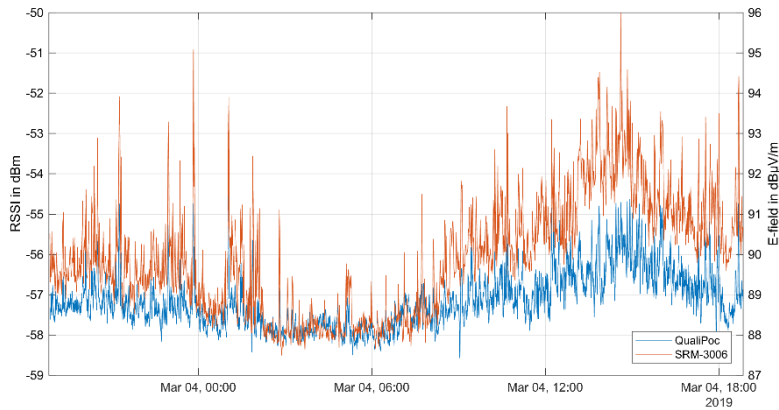


Abbildung 2-19 Erste LTE-Langzeitmessung von Smartphone und Feldstärkemessgerät im Vergleich (Messwerte über eine Minute gemittelt)

Im Leerlauf sind nur Referenzsignale und Synchronisationssignale vorhanden, das heißt, die meisten Ressourcenelemente (REs) sind leer und es wird keine Leistung in ihnen übertragen. Mit zunehmender Auslastung werden mehr Ressourcenelemente belegt, bis unter Volllast alle verwendet werden. Das Feldstärkemessgerät akkumuliert die Leistung aller Ressourcenelemente über die gesamte Bandbreite und mittelt über die Zeit bei RMS-Messung. Da RSSI nur in Symbolen gemessen wird, die das Referenzsignal für den Antennen-Port 0 enthalten, erfasst die Messung nur die zusätzliche Leistung der Ressourcen über alle Unterträger, nicht aber die zusätzliche Leistung in den anderen Symbolen über die Zeit. Dies führt zu einem geringeren Leistungsbereich in den Messergebnissen von RSSI als bei einer Messung mit dem Feldstärkemessgerät. Bei zwei Antennen beträgt das Verhältnis aller Symbole zu denen mit Referenzsignal 7/2. Abbildung 2-20 verdeutlicht noch einmal die Zusammenhänge am Beispiel eines einzelnen Physical Resource Blocks. Beim Wechsel von Leerlauf auf Volllast ist die vom Smartphone erfasste Änderung der RSSI-Messung daher 3,5-mal geringer als die tatsächliche Leistungserhöhung, die von einem Feldstärkemessgerät erfasst wird. Um RSSI für eine korrekte Expositionsabschätzung verwenden zu können, muss dieser Unterschied berücksichtigt und entsprechend korrigiert werden

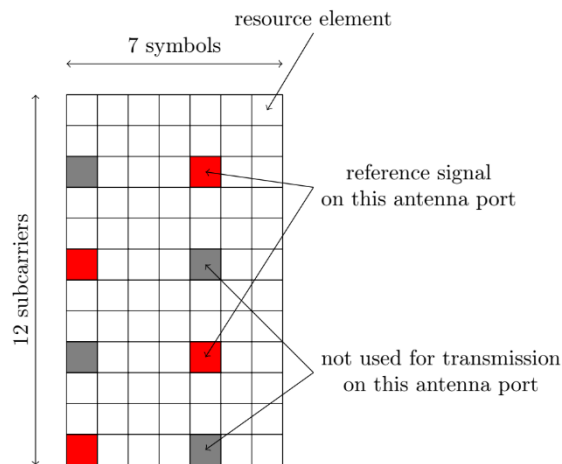


Abbildung 2-20 Ausschnitt eines Physical Resource Blocks aus dem LTE-Ressourcengitter

Wie in Abschnitt 2.1.1.1 über die wesentlichen Eigenschaften von LTE erwähnt, werden bei der Ressourcenzuteilung immer ganze Physical Resource Blocks (PRBs) vergeben, so dass

sich das Ressourcengitter über die Zeit und die Bandbreite bezogen auf einen PRB gleichmäßig füllt. Ein einzelner PRB ist daher im Leerlauf oder voll ausgelastet. Bei der RSSI-Messung wird nur die Leistung in den Symbolen berücksichtigt, die das Referenzsignal enthalten. Beim ausgelasteten PRB ist die Leistung in diesen Symbolen dreimal höher als im Leerlauf (im Fall von zwei Antennen-Ports und der Anhebung (Boosting) des Referenzsignals um 3 dB). Im Ruhezustand tragen nur die beiden Ressourcenelemente (REs), die das Referenzsignal enthalten, Leistung zum RSSI-Messergebnis bei. Im ausgelasteten Fall enthalten acht zusätzliche REs ein Signal und tragen Leistung zum RSSI-Wert bei. Da angenommen wird, dass das Referenzsignal 3 dB stärker ist als von den übrigen REs, beträgt die Leistung pro RE für die Datenübertragung nur die Hälfte der Leistung der REs, die das Referenzsignal enthalten. Insgesamt ist die Leistung im Symbol daher dreimal so hoch wie im Leerlauf ($\frac{2+8}{2} = \frac{6}{2} = 3$).

Tatsächlich steigt die Leistung innerhalb des gesamten PRB jedoch um den Faktor 10,5, also einen zusätzlichen Faktor von 3,5 aufgrund der Symbole ohne Referenzsignal. Diese Kenntnis kann nun zur Anpassung der RSSI-Werte genutzt werden. Wenn nur einige wenige PRBs in Bezug auf die gesamte Kanalbandbreite an der Datenübertragung beteiligt sind, ist der Leistungsanstieg des RSSI entsprechend geringer. Im Prinzip gibt es zwei Referenzpunkte für den Korrekturfaktor: Der Korrekturfaktor beträgt eins (= keine Korrektur erforderlich) im Leerlauf und 3,5 bei Volllast (siehe auch Abbildung 2-21). Ausgehend vom RSSI im Leerlauf ($RSSI_{LL}$) bis zum Wert unter Volllast (dreimal höher) muss der Korrekturfaktor skaliert werden. Wenn genügend Messungen an der gleichen Position aufgezeichnet wurden und diese auch den Leerlauf einschließen, kann der erforderliche $RSSI_{LL}$ -Wert bestimmt und die beschriebene Korrektur für alle Messwerte durchgeführt werden. Eine bessere Methode, anstatt einen globalen $RSSI_{LL}$ -Wert anzunehmen, ist die Berechnung des individuellen $RSSI_{LL}$ für jede Messung. Der Vorteil besteht darin, dass zeitliche Schwankungen im Übertragungskanal, die sowohl RSRP als auch RSSI gleichermaßen betreffen, dann keinen Einfluss auf den Korrekturfaktor haben. Der RSRP-Wert spiegelt das konstante Referenzsignal wider und sollte daher im Laufe der Zeit nicht variieren, es sei denn, die Eigenschaften des Übertragungskanals ändern sich zwischenzeitlich. Das Verhältnis von RSSI zu RSRP hängt von der Messbandbreite aufgrund der Anzahl von N PRBs ab, die in den Physical Layer Measurements einbezogen werden, und natürlich von der aktuellen Zellenlast. Wenn dieses Verhältnis für den Leerlauf bekannt ist, kann der individuelle Wert für $RSSI_{LL}$ berechnet werden, indem er mit dem aktuellen RSRP-Wert multipliziert wird.

Die einzelnen Schritte für die Anpassung sind damit wie folgt:

1. Berechnung des Verhältnisses von RSSI zu RSRP für jeden individuellen Messwert.
2. Auswahl des niedrigsten Verhältnisses der beiden Größen (also im Leerlauf), das nicht nur von Ausreißern herrührt.
3. Berechnung des $RSSI_{LL}$ -Werts für jeden Messwert aus dem zugehörigen RSRP anhand des zuvor bestimmten Verhältnisses von RSSI zu RSRP im Leerlauf.
4. Bestimmung des Korrekturfaktors auf Basis des Verhältnisses aus aktuellem RSSI-Wert und zugehörigen $RSSI_{LL}$.
5. Anpassung des RSSI-Werts mit dem Korrekturfaktor

Diese Anpassung funktioniert auch im Falle benachbarter LTE-Zellen auf der gleichen Frequenz unabhängig vom Verhältnis der Signalleistungen, solange beide Zellen die gleiche Konfiguration verwenden. In diesem Fall ist der RSSI-Wert im Leerlauf entsprechend höher. Die Erhöhung von RSSI unter Last und der notwendige Korrekturfaktor bleiben hingegen unverändert.

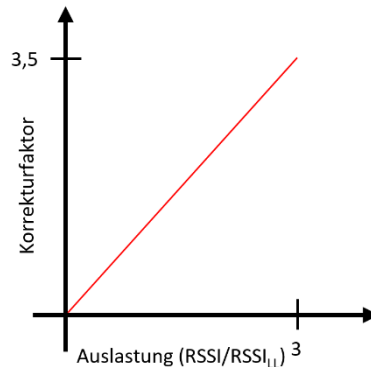


Abbildung 2-21 Abhängigkeit des Korrekturfaktors für RSSI-Messwerte von der Zellauslastung

Im Folgenden wird die Methode an praktischen Messungen demonstriert. Hierfür wurden gleichzeitige Messungen mit dem QualiPoc-Smartphone und dem Feldstärkemessgerät über 60 bzw. 40 Stunden an einem festen Ort bei gleichbleibender Ausrichtung und ohne Einflüsse in der direkten Umgebung ausgeführt. Die Messungen wurden für die Abbildungen über sechs Minuten gemittelt. Beide Messmittel befanden sich im selben Raum in einem Abstand, sodass eine unmittelbare gegenseitige Beeinflussung vermieden wurde. Außerdem wurde der Raum während der Messungen nicht betreten, um Änderungen der Ausbreitungsbedingungen in unmittelbarer Umgebung auszuschließen. Es wurde je eine Messung im 800 MHz- und 1800 MHz-Band durchgeführt. Die Abbildungen 2-22 und 2-23 zeigen die Ergebnisse vor und nach der Korrektur auf der linken bzw. rechten Seite. Es zeigt sich, dass nach der Korrektur die Messkurven von Smartphone und Feldstärkemessgerät sehr viel besser übereinstimmen und die Dynamik von RSSI nun nahezu den gleichen Umfang wie die Feldstärke aufweist. Die Messkurven wurden wieder derart zueinander verschoben, dass sie in Zeiten geringer Auslastung aufeinanderliegen. Nach der Korrektur musste die Verschiebung um 1 dB angepasst werden, da auch die Werte in den Nachtstunden angehoben wurden. Grund dafür ist, dass in den über sechs Minuten gemittelten Werten nie vollständiger Leerlauf vorliegt.

Bislang ist nicht ersichtlich, warum bei der Feldstärke zwischenzeitliche Spitzenwerte auftreten, die in den RSSI-Messungen teilweise nicht einmal angedeutet werden. Umgekehrt treten einzelne Spitzen bei RSSI auf, die wiederum nicht in den Feldstärkewerten zu erkennen sind.

Die Langzeitmessungen haben gezeigt, dass sich der RSSI-Wert bei LTE unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Messwertaufnahme eignet, um damit auslastungsabhängige Schwankungen der Exposition nachzuverfolgen.

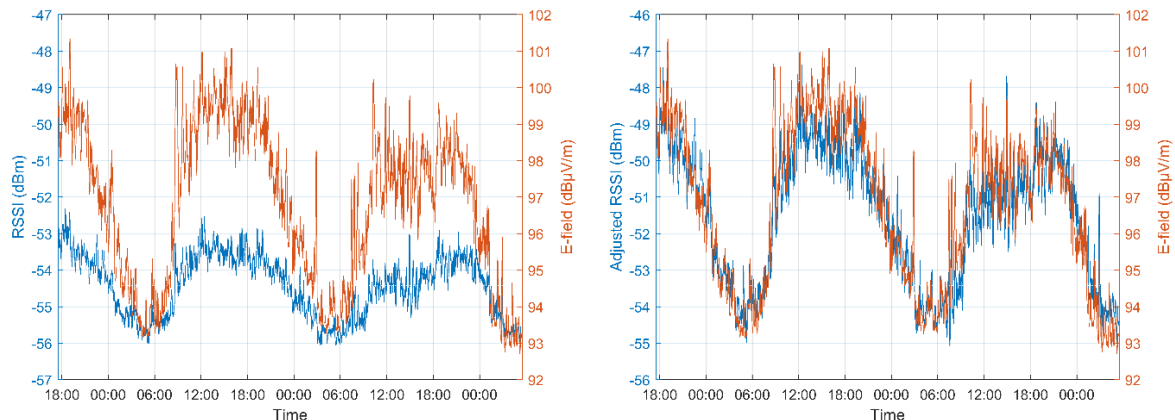


Abbildung 2-22 Ergebnis der Langzeitmessung von RSSI im Vergleich zur elektrischen Feldstärke im 1800 MHz-Band. Links: vor der Anpassung der RSSI-Werte, rechts: nach der Anpassung der RSSI-Werte

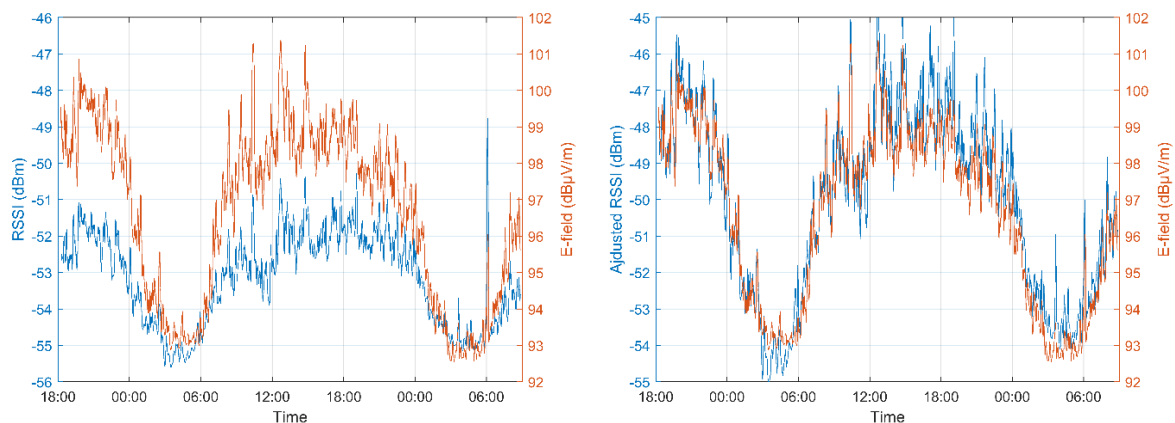


Abbildung 2-23 Ergebnis der Langzeitmessung von RSSI im Vergleich zur elektrischen Feldstärke im 800 MHz-Band. Links: vor der Anpassung der RSSI-Werte, rechts: nach der Anpassung der RSSI-Werte

2.3.2 Arbeiten anderer Stellen

2.3.2.1 Machbarkeitsstudie für das Bundesamt für Umwelt der Schweiz

Bei der im Jahr 2016 erstellten „Machbarkeitsstudie für ein Monitoring von Mobilfunkstrahlung mithilfe von Smartphones“ [49] handelt es sich um die wohl konkreteste Vorarbeit, die das Ziel verfolgt die Umsetzbarkeit eines Expositionsmonitorings mittels Smartphones zu prüfen. Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass ein derartiges Monitoring mit Smartphones nicht umsetzbar sei, da die Ergebnisse zu ungenau und relevante Parameter im Android-Betriebssystem nicht abrufbar seien.

2.3.2.1.1 Zusammenfassung

Die Studie beginnt mit der Definition von Anforderungen an ein Monitoring mit Smartphones, die aus Sicht der Autoren Voraussetzung für eine Umsetzbarkeit sind. Als wesentliche Punkte werden dabei genannt:

- Regelmäßige Erfassung der Immission aller Netzbetreiber und aller Mobilfunktechnologien über alle Mobilfunkfrequenzen hinweg
- Kalibration der gängigsten Smartphone-Modelle

- Berücksichtigung des Nutzereinflusses durch Erkennung von Betriebsparametern bzw. entsprechender Mittelung über verschiedene Bedingungen
- Gewährleistung des Datenschutzes bei Erfassung auf privaten Smartphones
- Zugriff auf alle relevanten Betriebsparameter des Smartphones
- Kompatibilität einer Smartphone-App mit allen gängigen Smartphone-Betriebssystemen
- Minimale Beeinträchtigung des Endgerätenutzers durch die Erfassung der Monitoring-Daten

Die sich anschließende Literaturübersicht verweist auf zwei Veröffentlichungen [50, 51], die sich mit Möglichkeiten zur Erfassung der Exposition durch elektromagnetische Felder und dabei insbesondere der Einbindung bzw. Nutzung von Smartphones befassen. Die beschriebenen software- oder hardwaremodifizierten Mobiltelefone werden vorgestellt. Genannt werden XMobiSense, Quanta Monitor und Tawkon App. Bei der zweiten Veröffentlichung [51] wird eine Pilotstudie beschrieben, bei der mit der Anwendung XMobiSense Nutzungsverhalten und -dauern, Datenmengen sowie Empfangsleistungen und die daraus ermittelten Sendeleistungen aufgezeichnet wurden. Die Studie zielte jedoch insgesamt nur auf das Nutzungsverhalten ab und liefert keine nennenswerten Erkenntnisse für ein Messnetzwerk.

Zur experimentellen Evaluation mit einem Smartphone wurde eine App entwickelt, die die in Android zugänglichen Informationen aufzeichnen kann. Es wurde ein Vergleich zwischen einem von Fields at Work entwickelten Exposimeter und einem Smartphone vorgenommen. Hierzu wurden zwei Strecken durch Zürich mehrfach abgelaufen, wobei je zwei Messungen in jedem der drei Schweizer Mobilfunknetze durchgeführt wurden. Das Exposimeter und das Smartphone befanden sich hierbei zusammen in einem Rucksack, wobei zur Vermeidung von gegenseitiger Beeinflussung für Abstand zwischen den Geräten gesorgt wurde.

Zum Vergleich der vom Exposimeter gemessenen Feldstärke wird der RSSI-Wert des Smartphones herangezogen und in einen Feldstärkewert umgerechnet. Dies geschieht über eine Formel aus der Antennentheorie, in die der Antennengewinn und die Wellenlänge eingehen. Da die Frequenz, bei der die RSSI-Messungen tatsächlich stattgefunden haben, nicht bekannt ist, wird die Umrechnung für drei unterschiedliche angenommene Frequenzen durchgeführt und dargestellt. Die für die Berechnung angenommenen Antennengewinne sind nicht explizit angegeben. Darüber hinaus ist nicht erkennbar zu welchen Zeiten welche Mobilfunktechnik für die Verbindung und den Messwert ursächlich war.

Die RSSI-Messungen lassen erkennen, dass sich die Aktualisierungsrate der Messwerte unterscheidet je nach Mobilfunknetz, also offensichtlich von der Netzkonfiguration abhängig ist. Bei der Gegenüberstellung des vom Exposimeter gemessenen Feldstärkeverlaufs entlang der Strecke mit der aus den RSSI-Werten berechneten und von den drei Mobilfunknetzen summierten Feldstärke, lässt sich eine Ähnlichkeit hinsichtlich der Minimal- und Maximalwerte im Verlauf erkennen. Die berechnete Feldstärke liegt jedoch um mehr als Faktor zehn unterhalb der durch das Exposimeter gemessenen Feldstärke. Außerdem werden nicht alle Anteile der

Expositionsbeiträge erfasst und somit nicht in den Ergebnissen der RSSI-Messung wiedergegeben, was von den Autoren der Studie darauf zurückgeführt wird, dass nur ein Teil des Frequenzspektrums von der RSSI-Messung eingeschlossen wird.

Aufgrund der Messergebnisse wird gefolgert, dass die Erfassung der Frequenzbänder durch eine Smartphone-Anwendung kein ausreichendes Resultat für eine Expositionserfassung liefert.

2.3.2.1.2 Bewertung

In Anbetracht der in neueren Android-Versionen über die Programmierschnittstelle (API) zugänglichen Parameter liegen wesentlich mehr Informationen vor, die die Beurteilung der Immission unterstützen. Auf die konkreten Parameter wurde in Kapitel 2.2 bereits eingegangen. Die Berechnung der resultierenden Feldstärke erfolgt ausschließlich aus theoretischen Überlegungen, bei denen nicht klar ist, ob sie den tatsächlichen Zusammenhang mit den Smartphone-Messwerten widerspiegeln oder nicht. Eine messtechnische Kalibrierung erfolgte, obwohl sie als Anforderung definiert wurde, nicht. Außerdem wurden wichtige Eigenschaften der RSSI-Messung nicht in die Betrachtungen eingezogen, sodass die Dynamik der Messungen nicht korrekt wiedergegeben wird (vgl. Abschnitt 2.3.1.4). Weiterhin stützt sich die Aussage auf eine Messreihe mit relativ geringem Umfang, was auch bei korrekter Kalibrierung und Interpretation der Messdaten keine umfassende Beurteilung ermöglicht.

Ein wesentliches Problem besteht darin, dass der Vergleich der Messergebnisse derart erfolgt, dass die Exposimeter-Messungen sämtlicher Mobilfunkfrequenzen mit Messungen des RSSI verglichen werden, die immer nur die Leistung desjenigen Mobilfunkkanals abbilden, mit dem das Smartphone derzeit verbunden ist. Dies kann zu keiner guten Übereinstimmung führen. Für einen derartigen Vergleich müsste durch eine größere Anzahl an Messungen, bei denen Verbindungen mit den verschiedenen Mobilfunkgenerationen und sämtlichen im Bereich der Messungen vorliegenden Funkzellen hergestellt werden, alle Expositionsbeiträge vom Mobilfunk-Downlink erfasst werden. Dies erfolgte nicht und der Aspekt des Crowdsourcings wird in der Studie zwar am Rande erwähnt, aber nicht weiter in die Untersuchungen einbezogen.

2.3.2.2 *VigiExpo*

2.3.2.2.1 Zusammenfassung

VigiExpo [52–56] (vollständiger Titel: „Système autonome de caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences issus des stations de base de téléphonie mobile, hybridant acquisition collaborative sur Smartphones et simulation numérique“) ist ein Forschungsprojekt, das von der französischen Agentur für Ernährung, Umwelt und Arbeitsschutz (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses)) gefördert wurde. Das Projekt startete im Jahr 2015 und hatte eine Laufzeit von 24 Monaten. Durchgeführt wurde es von den drei Projektpartnern Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), XLIM laboratory und Geomod. Das Ziel von VigiExpo ist die Entwicklung eines autonomen Monitoringsystems für die Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder, die von Mobilfunkbasisstationen verursacht werden. Die Expositionshöhe soll sich dabei an jedem beliebigen Punkt in der Fläche abschätzen lassen. Hierfür wird ein Hybridansatz aus Simulation und Messung verfolgt.

Die Vorteile von Simulationen werden darin gesehen, dass sie günstig sowie schnell sind und flächendeckend ausgeführt werden können. Allerdings hängen sie laut den Autoren stark von den Eingangsinformationen für das Modell ab, wovon nicht alle benötigten Informationen öffentlich zugänglich sind. Gemeint sind vor allem genaue Beschreibungen der Sendeantennen der Basisstationen, von denen der genaue Standort, die Sendeleistung, die Ausrichtung, Neigung und das Richtdiagramm benötigt werden, um detaillierte Simulationen vornehmen zu können. Nur ein Teil dieser Informationen lässt sich über Datenbanken wie Cartoradio, betrieben von der Agentur für Frequenzen in Frankreich (ANFR), abrufen. Daher sollen diese nur unvollständig oder ungenau vorhandenen Angaben ausschließlich für eine initiale Simulation genutzt werden, die damit noch keine exakten Ergebnisse liefert. Anschließend sollen diese Simulationsergebnisse mit standortbezogenen Messungen der Empfangsleistung von Smartphones kombiniert werden. Die fehlenden Eigenschaften bzw. ungenauen Parameter werden dabei durch statistische Auswertung und Optimierung derart ermittelt und angepasst, dass Simulationsergebnisse und Messwerte der Smartphones bestmöglich übereinstimmen. Die Smartphones sollen als Sensoren niedriger Qualität genutzt werden für Informationen wie Empfangsleistung und Standort. Die Ungenauigkeit der Messungen und die Tatsache, dass die Smartphones immer nur Informationen zu der aktuell verbundenen Funkzelle liefern, soll durch eine hohe Anzahl an messenden Smartphones ausgeglichen werden. Für die Untersuchungen wurde eine App mit dem Namen VigiPhone entwickelt, die die Erfassung dieser Daten und die Übertragung zu einem Server ermöglicht. Zusammengefasst besteht das System also aus der Sammlung von Signalstärke-Daten von Smartphones in Verbindung mit einer Simulation der elektromagnetischen Felder sowie einem Optimierungsalgorithmus, der die der Simulation zugrundeliegenden Charakteristiken der Sendeanlagen präzisiert. Auf diese Weise sollen sich dynamische Expositionskarten erstellen lassen.

Zur Optimierung wurde ein genetischer Algorithmus entwickelt, um die Parameter der Simulation anzupassen. Als Kriterium für die Übereinstimmung zwischen Simulationsergebnissen und Messungen werden der Pearson'sche und Spearman'sche Korrelationskoeffizient angewendet. Die Anpassungen, die der Algorithmus vornimmt, wurden so gestaltet und validiert, dass laut den Autoren eine gute Reproduzierbarkeit und Stabilität der Resultate gewährleistet ist und sich eine systematische Konvergenz hin zu den realen Parametern und der physikalischen Situation ergibt. Das Vorgehen wurde in drei Stufen validiert. Zunächst wurde eine rein virtuelle Validierung mit künstlich generierten Daten als erster Konzeptnachweis vorgenommen. Dafür wurden bekannte Antennendaten verfälscht, um als ungenaue bzw. unbekannte Daten in die Simulation einzugehen. Mit den bekannten Antennendaten wurde außerdem eine Referenzsimulation durchgeführt und daraus künstliche Smartphone-Messungen generiert, die ebenfalls verfälscht (Abweichung des Standorts und der Messwerte) wurden, um realistische Bedingungen nachzuahmen. Auf die verfälschten Daten wird der Optimierungsalgorithmus angewendet, um wieder die ursprünglich bekannten Antennenparameter zu bestimmen. Dies hat laut der Autoren auf einem 2 km x 2 km großen Gebiet mit 34 GSM-Sendern und 9000 Empfängern (virtuelle Smartphone-Messungen) zufriedenstellend funktioniert. In einem zweiten Schritt wurde ein Experiment in einer realen Umgebung in einem Stadtteil von Nantes (1,6 km x 1,1 km) durchgeführt. Die Messungen wurden einerseits mit einem Spektrumanalysator (Narda SRM-3006) und andererseits mit mehreren Smartphones entlang der Straßen durch

das untersuchte Gebiet durchgeführt. Es wird nicht verständlich, bei welchen Standards welche Messungen und Vergleiche angestellt wurden. Es ist sowohl von GSM als auch von UMTS die Rede. Die Autoren halten das vorgestellte Konzept aufgrund der erzielten Ergebnisse in jedem Fall für umsetzbar.

In [57] wurde für den Fall von freiem, unbebautem Feld gezeigt, dass die Smartphone-Messungen eng korreliert sein können mit den Simulationsergebnissen. Bei komplexen Umgebungen hingegen sind die Ergebnisse deutlich schlechter. Weiterhin wurden dort einfache Untersuchungen der Variation von RSSI bei GSM vorgenommen. Ein Smartphone wurde in eine abschirmende Metalldose gelegt, welche dann geschlossen und wieder geöffnet wurde. Die Änderung des RSSI-Wertes zwischen beiden Zuständen erfolgte schrittweise und dauerte etwa 15 s. Dies wird als Problem bei bewegten Geräten eingestuft.

2.3.2.2.2 Bewertung

Die Arbeiten vom Projekt „VigiExpo“ verfolgen zwar ein prinzipiell ähnliches Ziel wie das vorliegende Vorhaben, jedoch bilden Simulationen den Ausgangspunkt für die Expositionsabschätzung. Die Messungen von Smartphones sollen nur zur Unterstützung der Simulation dienen, um die unbekanntes bzw. unscharfen Eingangsparameter zu verfeinern. Die Smartphone-Messungen werden selbst nicht genutzt, um daraus direkt Ergebnisse für Expositionshöhen abzuleiten. Auch wird als Ziel die Nutzung von Crowdsourcing zur Kompensation der geringen Qualität der Smartphone-Messungen genannt, allerdings nicht konkret umgesetzt.

Bisher existiert nur ein Konzeptnachweis mit künstlich generierten Daten und Testmessungen mit Spektrumanalysator und mehreren Smartphones. Die Ergebnisse sind in den vorliegenden Veröffentlichungen jedoch nur spärlich dokumentiert und sind daher schwer zu deuten.

Seit 2016 hat es keine weiteren Veröffentlichungen mehr gegeben, die diesen Ansatz fortgeführt hätten. Ein umfassender Abschlussbericht mit Ergebnissen zum Projekt scheint öffentlich nicht zugänglich zu sein. Ebenso scheint ein Zugriff auf das geplante System bislang ebenfalls nicht möglich zu sein, weshalb unklar ist, ob es sich noch in der Umsetzung befindet oder die Umsetzung eingestellt wurde. Abschließend kann festgehalten werden, dass die bekannten Ergebnisse keine Schlussfolgerung zulassen, ob ein Monitoring mit Smartphones und einem Crowdsourcingansatz möglich ist oder nicht.

2.3.2.3 *LEXNET*

Im groß angelegten LEXNET-Projekt [58], das durch die Europäische Union gefördert wurde, ging es allgemein um die Entwicklung von effektiven Methoden zur Reduzierung der Exposition durch elektromagnetische Felder ohne die Servicequalität einzuschränken. Das Projekt lief von November 2012 bis Oktober 2015. Neben der Definition eines globalen Expositionsindex [59] sollten numerische und experimentelle Mittel zu dessen Erfassung über Exposimeter und Netzplanungswerkzeuge entwickelt werden. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde auch die Möglichkeit der Erfassung der Exposition mit mobilen Endgeräten am Rande betrachtet und rudimentäre Tests durchgeführt. Die relevanten Untersuchungen werden im Folgenden kurz beschrieben und eingeordnet.

2.3.2.3.1 Messtechnischer Vergleich zwischen einem Tablet und einem Exposimeter

2.3.2.3.1.1 Zusammenfassung

In einem einfachen messtechnischen Vergleich [60] sollte der Unterschied zwischen den Messungen eines mobilen Endgeräts und eines Exposimeters bei WLAN gezeigt werden. Der Messaufbau in einer Absorberkammer bestand aus einem WLAN-Zugangspunkt, an den eine externe Antenne angeschlossen wurde, und einem Tablet, das in geringer Entfernung auf gleicher Höhe platziert wurde. Der WLAN-Zugangspunkt erzeugte das typische WLAN-Bakensignal, das Endgeräte für das Auffinden des Netzwerks benötigen. Es wird periodisch in Abständen von 100 ms mit konstanter Sendeleistung ausgestrahlt. Das Tablet wurde horizontal und vertikal platziert und dann in 45°-Schritten um die Vertikalachse rotiert. Auch die Polarisation der Sendeantenne wurde um 90° gedreht. Abbildung 2-24 zeigt den Messaufbau und die verschiedenen Ausrichtungen von Sendeantenne und Messobjekten. Die Empfangsleistung des Tablets wurde mit einer Software der Firma Satimo aufgezeichnet. Das Exposimeter war ein EME SPY 140 und wurde nur aufrechtstehend um 360° in 45°-Schritten rotiert. Zusätzlich wurden zwei Referenzmessungen mit einer Breitbandmesssonde an einer zeitbereichsbasierten Messplattform durchgeführt. Alle Messobjekte wurden an der gleichen Stelle in der Messkammer platziert.

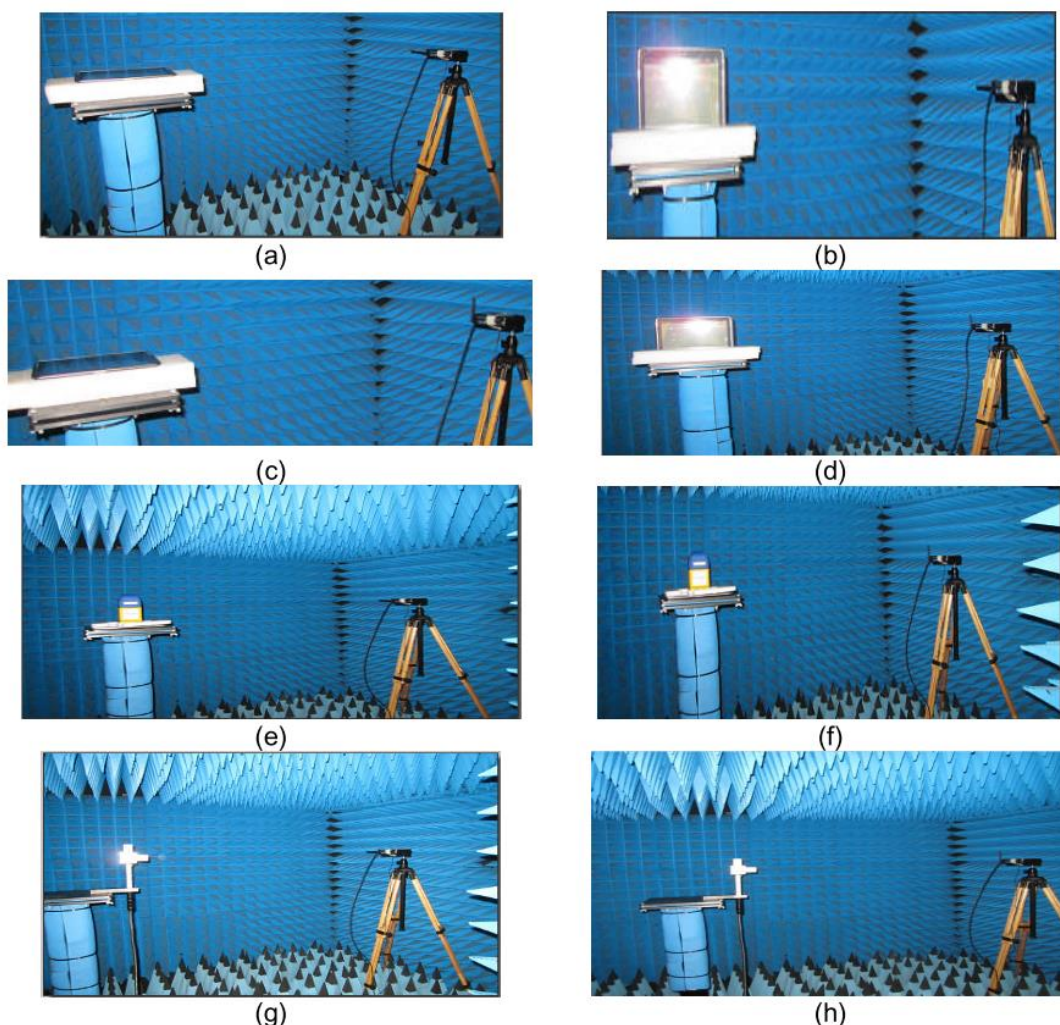


Abbildung 2-24 Messaufbau des messtechnischen Vergleichs zwischen einem Tablet und einem Exposimeter im LEXNET-Projekt [1]

Die Ergebnisse der Referenzmessungen zeigt Abbildung 2-25. Die Werte variieren für beide Polarisierungen der Sendeantenne um höchstens 0,5 dB. Abbildung 2-26 zeigt die Ergebnisse der Messungen von Tablet und Exposimeter im direkten Vergleich. Laut den Autoren schwanken die Messwerte des Exposimeters bei Veränderung der Ausrichtung um ungefähr ± 2 dB, während die Werte des Tablets um bis zu ± 10 dB abweichen. Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass die gesamte Schwankungsbreite beim Tablet je nach Ausrichtung von 10,5 dB bis 18 dB reicht. Die Schlussfolgerung ist, dass die Messwerte des Tablets von der Richtung sowie der Polarisation des einfallenden Signals abhängen und das Tablet daher im Gegensatz zum Exposimeter nicht als isotrop angesehen werden können.

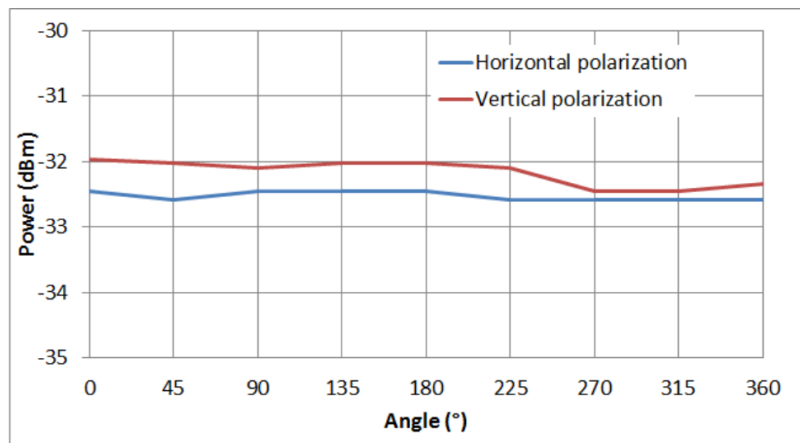
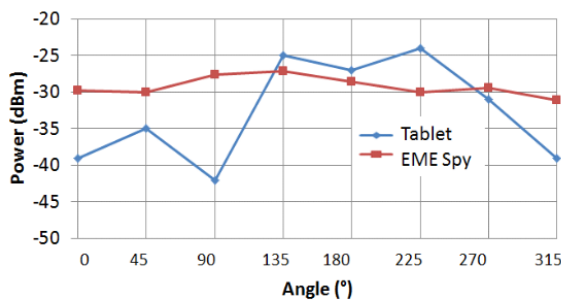
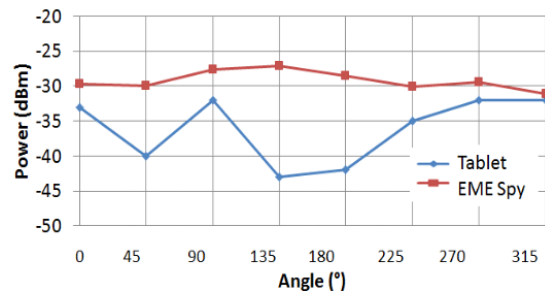


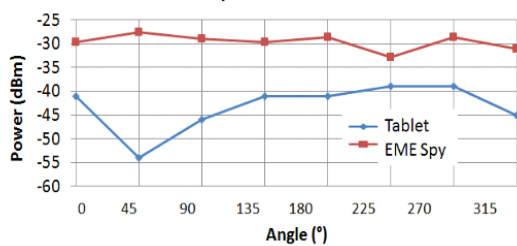
Abbildung 2-25 Messergebnis der Referenzmessung des messtechnischen Vergleichs zwischen einem Tablet und einem Exposimeter im LEXNET-Projekt [1]



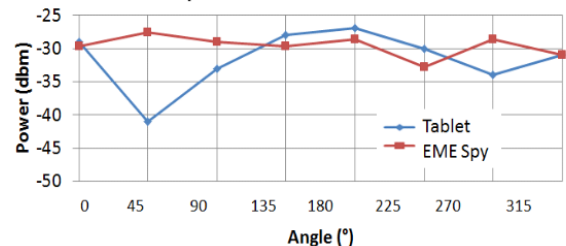
(a) Tablet horizontal, dosimeter vertical, Access point horizontal



(b) Tablet vertical, dosimeter vertical, Access point horizontal



(c) Tablet horizontal, dosimeter vertical, Access point vertical



(d) Tablet vertical, dosimeter vertical, Access point vertical

Abbildung 2-26 Messergebnisse des Vergleichs zwischen einem Tablet und einem Exposimeter im LEXNET-Projekt [60]

2.3.2.3.1.2 Bewertung

Die Messungen geben einen ersten Einblick, welche Variationen der Messergebnisse der Signalstärke aufgrund der Orientierung und der Polarisation bei Endgeräten vom Typ „Tablet“ bei WLAN zu erwarten sind. Die Ergebnisse deuten auf einen deutlichen Einfluss der Orientierung bezüglich des einfallenden Signals hin. Inwieweit sich die Ergebnisse auf andere Geräte, insbesondere auch Smartphones übertragen lassen ist aufgrund dessen, dass nur ein einziges Gerät untersucht wurde, unklar. Auch Unterschiede bei anderen Funkstandards und bei anderen Frequenzen sind möglich.

Den Fällen (b) und (d) in Abbildung 2-24 ist zu entnehmen, dass das Tablet offenbar für die vertikale Messung bei den zwei Polarisationsausrichtungen einmal aufrecht stehend und einmal auf der Seite liegend gedreht wurde. Warum die Ausrichtung derart gewechselt wurde, ist nicht klar und wird im Text nicht thematisiert.

Weiterhin wäre es der Vollständigkeit halber interessant gewesen auch das Exposimeter in liegender Position zu vermessen anstatt nur aufrechtstehend.

Die an dieser Stelle ausgeführte Messung lässt aus den genannten Gründen noch keinen ausreichenden Schluss darüber zu, mit welchen Unterschieden aufgrund der Ausrichtung bei Smartphones im Allgemeinen zu rechnen ist. Außerdem stellt sich aufgrund des gezeigten Beispiels die Frage, inwiefern Messungen mit einer einzigen Empfangsrichtung einen realitätsnahen Anwendungsfall abbilden, da in den meisten Fällen Mehrwegeausbreitung vorliegt und somit eine Mittelung über zahlreiche Empfangsrichtungen stattfindet.

2.3.2.3.2 Messtechnischer Vergleich zwischen einem Smartphone und einem Exposimeter

2.3.2.3.2.1 Zusammenfassung

Im Rahmen einer weiteren Untersuchung wurde ein Smartphone (Samsung Galaxy S4) mit einem Exposimeter (EME Spy 200) hinsichtlich der Isotropie verglichen. Die Messung erfolgte in einer Absorberkammer mit StarMIMO-Messplattform (siehe Abbildung 2-27) mit Mobilfunksignalen der zweiten bis vierten Generation bei unterschiedlichen Frequenzen, die durch einen Basisstationsemulator erzeugt wurden. Beim Smartphone wurde der Parameter RSSI (vgl. Kapitel 2.1) für den Vergleich erfasst. Die Messobjekte wurden aufrechtstehend und liegend jeweils in der Horizontalebene gedreht und die Messung für horizontale wie vertikale Polarisation durchgeführt. Betrachtet wurde der Einfall des Signals aus der Horizontalebene sowie von oben und unten jeweils mit einem Einfallswinkel von 15° , da dies typischen Einfallswinkeln der Exposition im Downlink entsprechen soll.

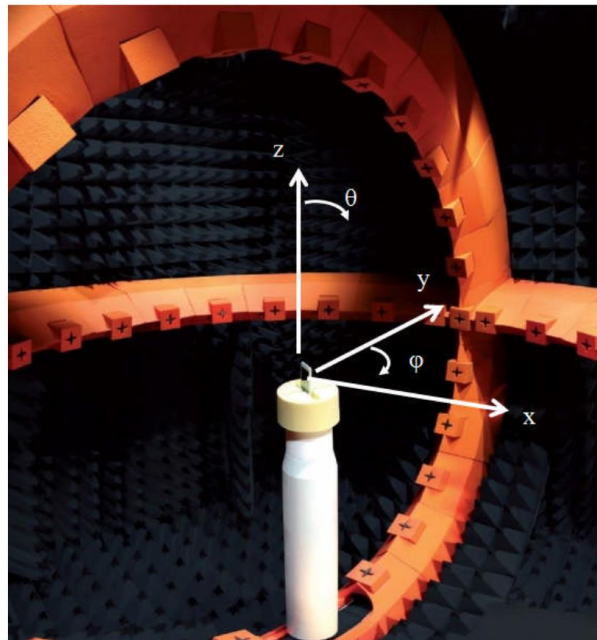


Abbildung 2-27 Messaufbau für den Vergleich von Smartphone und Exposimeter im LEXNET-Projekt [61]

Abbildung 2-28 zeigt die Ergebnisse der Messreihe, wobei stets diejenige Einfallrichtung (+15°, horizontal, -15°) dargestellt ist, die die größte Schwankung aufweist (Anmerkung: Bei GSM1800 scheint die rote durchgehende Linie fälschlicherweise einer weiteren Kurve bei vertikaler Polarisation zu entsprechen, was den vollständigen Ergebnissen aus dem Anhang zu entnehmen war.). Die Schwankungsbreiten der Empfangsleistung sind in Tabelle 2-20 zusammengefasst. Die Studienautoren sagen, dass nur bestimmte Fälle beim Smartphone als weitestgehend isotrop angesehen werden können (Abweichung < 2 dB). In den übrigen Fällen liegen die Werte bei mindestens ca. ±6,5 dB und reichen bis ±14,0 dB. Beim Exposimeter beträgt die größte Schwankung knapp ±1,8 dB (Anmerkung: Bei zwei Messungen des Exposimeters wurde nur der Einfall des Signals in der Horizontalebene, aber nicht bei ±15° gemessen.).

Standard	Isotropy (±) dB			
	Dosimeter		Smartphone (S4)	
	PV	PH	PV	PH
LTEXX-DL	0.55	1.58	1.85	7.05
GSM900-DL	0.32 (@90° only)	0.95 (@90° only)	1.66	10.91
GSM1800-DL	1.79	1.62	8.91	12.98
UMTS-DL	0.26 (@90° only)	0.77 (@90° only)	6.80	14.00
LTEVII-DL	1.13	1.62	6.47	12.55

Tabelle 2-20 Vergleich der Isotropie eines Smartphones und Exposimeters im LEXNET-Projekt

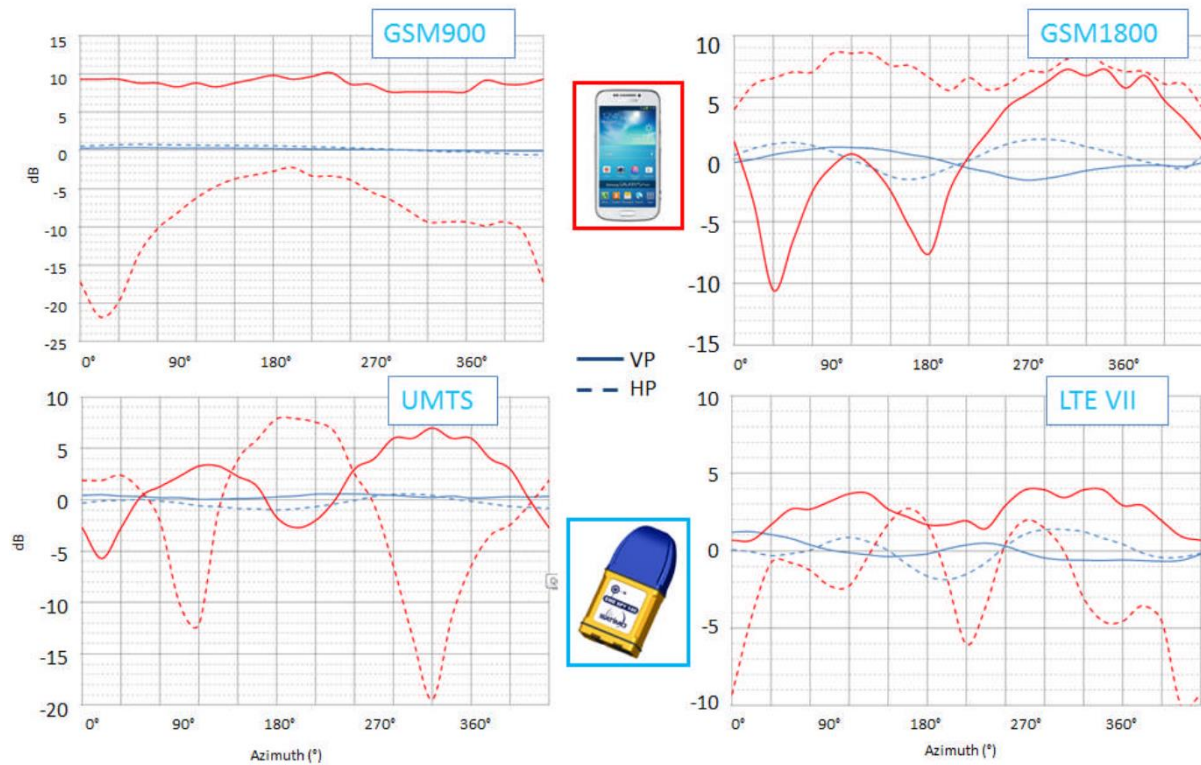


Abbildung 2-28 Messergebnisse des Vergleichs von Smartphone (rote Kurven) und Exposimeter (blaue Kurven) für horizontale (gestrichelte Linie) und vertikale (durchgezogene Linie) Polarisation im LEXNET-Projekt [61]

Aus den Ergebnissen wird geschlossen, dass Messungen, die mit einem Smartphone ausgeführt werden, erhebliche Messfehler verursachen und daher unverlässlich sind.

2.3.2.3.2 Bewertung

Die Messungen zeigen, dass bei Smartphones für ausschließlich aus einer Richtung einfallende Signale je nach Polarisation und Frequenz eine deutliche Anisotropie in den Messungen von Signalstärkeindikatoren festgestellt werden kann. Hiermit zeigt sich eine Schwäche derartiger Laboruntersuchungen, denn in realen Ausbreitungsumgebungen ist dieser Fall praktisch nie anzutreffen. Stattdessen findet fast immer Mehrwegeausbreitung statt, sodass ein Signal durch Streuung und Reflexionen aus unterschiedlichen Richtungen beim Endgerät ankommt. Zwar kann es vorkommen, dass einzelne Einfallrichtungen dominant sind, vor allem etwa bei Sichtverbindung zur Basisstation, aber auch in diesen Fällen gibt es weitere Komponenten. Daher ist auch zu hinterfragen, inwieweit die Beschränkung auf die gewählten Einfallswinkel sinnvoll ist, zumal nicht davon ausgegangen werden kann, dass ein Smartphone sich stets in aufrechter Position befindet.

2.3.2.3.3 Abschätzung der Exposition auf Basis von Netzwerkdaten

2.3.2.3.3.1 Zusammenfassung

Als ein Ansatz zur Abschätzung der Exposition und zur Validierung der in LEXNET entwickelten Ansätze zur Reduzierung der EMF-Exposition werden neben Messungen und Simulationen die Nutzung von Netzwerkdaten diskutiert [60–63]. Gemeint sind damit Daten, die von Netzwerkmanagement und -monitoringsystemen über die Basisstationen bzw. Zugangspunkte oder auch von Endgeräten erfasst werden. Durch die Nutzung der Informationen aus einem

operativen Netzwerk sollen realistische Werte und Verteilungen von Parametern extrahiert werden, die wiederum zur Berechnung der Gesamtexposition herangezogen werden könnten. Als Hauptparameter werden genannt:

- Mittlere Sendeleistung (TX) der Endgeräte je Nutzer oder je Funkzelle
- Mittlere Empfangsleistung (RX) oder empfangene Leistungsdichte der Endgeräte je Nutzer oder je Funkzelle
- Sendeleistung der Basisstationen und Zugangspunkte
- Verkehrsauslastung je Funkzelle im Tagesverlauf

Außerdem sollen Nutzerprofile statistisch aus dem realen Netzwerk bestimmt werden.

Als Probleme dieser Daten werden unter anderem genannt, dass die Erfassung der Leistung nur erfolge, wenn die Sender gerade aktiv seien und das Lastverhältnis (Duty Factor) daher anderweitig bestimmt werden müsse. Außerdem hänge dieses von verschiedenen Faktoren wie der Technologie und der Auslastung ab und müsste für unterschiedliche Situationen bestimmt werden. Ein weiteres Problem ist, dass die Daten auf Netzwerkseite erhoben werden, keinem genauen Standort zugeordnet und oftmals nur auf den Abdeckungsbereich einer Funkzelle eingegrenzt werden können. Allerdings wird berichtet, dass zukünftig mit neuen Optimierungswerkzeugen zu rechnen ist, die eine präzisere Lokalisierung von Nutzern bis zu 50 m genau auch auf Basisstationsseite erlauben.

Die Untersuchungen mit Netzwerkdaten zur Bestimmung des Expositionsindex nutzen aufgrund der Komplexität und Vielseitigkeit dieses Index sehr viel mehr Informationen, die mit Nutzungsdauern für Sprach- und Datenverbindungen, Nutzergruppen und -szenarien sowie weiteren Parametern zusammenhängen. Diese stammen aus verschiedensten Datenbanken wie Kundendaten oder Zensusdaten sowie aus Drive Tests (Messfahrten z. B. zur Netzabdeckung) und anderen Messreihen. Die tatsächlichen Netzwerkmessungen von Signalstärkeindikatoren spielen hier nur eine untergeordnete Rolle und die Empfangsstärke wird auf nur drei Stufen (gut, mittel, schlecht) quantisiert. Auf diese Weise wird der Expositionsindex für ein konkretes Szenario abgeleitet.

An anderer Stelle im Projekt [61] wurden beispielhaft erste statistische Ergebnisse von Netzwerkmessungen für GSM und UMTS gezeigt. Diese umfassten jedoch ausschließlich Informationen zu belegten Time Slots (GSM) und Datenübertragungsraten jeweils im Tagesverlauf und unterschieden nach städtischem, vorstädtischem und ländlichem Bereich. Bei UMTS war außerdem die gesamte Downlink-Sendeleistung der Basisstation erfasst worden. Den Ergebnissen ist zu entnehmen, dass die Auslastung und Sendeleistung tagsüber hoch ist und nachts abfällt. Im vorstädtischen Bereich fällt die Auslastung insgesamt geringer aus und im ländlichen Bereich liegt sie noch einmal deutlich darunter. Die bei den Endgeräten ankommende Signalleistung wurde nicht erfasst.

2.3.2.3.3.2 *Bewertung*

Zwar werden Signalstärkeindikatoren von Endgeräten prinzipiell als Informationsquelle zur Abschätzung der Immission betrachtet und diskutiert, jedoch wird ausschließlich die Erhebung auf Basisstationsseite berücksichtigt, eine Sammlung auf Endgeräteseite jedoch nicht. Daher ergibt sich das Problem, dass keine genauen Standortinformationen vorliegen, die für eine

Untersuchung der Verteilung der Immissionshöhen in der Fläche erforderlich wären. Es wird nicht deutlich, wie die Signalstärkeindikatoren zu Feldstärkewerten umgewandelt werden und wie die Interpretation als Immissionshöhe funktioniert. Die beschriebene Umsetzung lässt insgesamt keinen wirklichen Schluss darüber zu, ob Signalstärkeindikatoren in Kombination mit Standortinformationen ein geeignetes Mittel sind, um Expositionshöhen und deren Verteilung in der Fläche abzuschätzen.

2.3.2.3.4 Extrapolation von einachsiger zu isotropen Messungen

2.3.2.3.4.1 *Zusammenfassung*

Ziel der Untersuchung [64–66] war es eine Möglichkeit zur Extrapolation von Messergebnissen, die von einer einachsigen Antenne aufgenommen wurden, zu isotropen (dreiachsigen) elektrischen Feldstärken zu finden, da zur korrekten und vollständigen Bewertung der Immission isotrope Messungen notwendig sind. Da die im LEXNET-Projekt entwickelte vereinfachte Version eines Exposimeters eine einachsige Antenne nutzt, wird eine derartige Extrapolation benötigt. Außerdem sahen die Planungen vor auch Endgeräte wie Mobiltelefone für Messungen von Empfangsleistungen im Downlink zu nutzen, um daraus Leistungsdichten zu berechnen. Diese nutzen laut den Autoren auch überwiegend einachsige Antennen.

Die Extrapolation erfolgt derart, dass die Messwerte mit einem konstanten Faktor multipliziert werden, was wiederum zu zusätzlich zu berücksichtigender Unsicherheit in den Messergebnissen führt, da dieser nur im Mittel zutreffend ist.

Der Extrapolationsfaktor wurde durch gleichzeitige Messung aller drei Feldkomponenten mit einer isotropen Messsonde und Vergleich mit den Ergebnissen der einachsigen Messung empirisch bestimmt. Dazu wurde ein Breitbandmessgerät vom Typ Narda EMR300 mit E-Feld-Sonde genutzt.

Die Messungen wurden in insgesamt sieben verschiedenen Szenarios ausgeführt, da die Ausbreitungseigenschaften und Depolarisation von elektromagnetischen Wellen von der Umgebung abhängen. Berücksichtigt wurden Szenarios, bei denen Sende- und Empfangsantenne im Innenbereich liegen, beide außerhalb liegen oder nur die Sendeantenne außen liegt. Sowohl Fälle mit als auch ohne Sichtverbindung sind enthalten. Weiterhin wurden dicht bebaute Stadtgebiete, vorstädtische sowie ländliche Bereiche untersucht.

Das Messsystem wurde auf einen Wagen montiert und langsam durch den gewählten Bereich bewegt, wobei langsam um die vertikale Achse gedreht wurde. Damit bei der Drehung alle Achsen eine Änderung erfahren wurde die Sonde im 45°-Winkel zur vertikalen Achse platziert. Die Messungen dauerten jeweils 2 Stunden und umfassten 3600 Messwerte. Das Messgerät liefert einzelne Messwerte der elektrischen Feldstärke für jede der drei Achsen, aus denen sich über die geometrische Summe die Gesamtfeldstärke ergibt.

Für jeden Messwert wurde für jede Achse ein Extrapolationsfaktor aus dem Verhältnis von Gesamtfeldstärke zur Feldstärke der einzelnen Achse bestimmt. Dies wurde statistisch ausgewertet und das arithmetische Mittel, der Median, die Standardabweichung und die durch Verwendung der einachsigen Messung entstehende Unsicherheit bestimmt.

Aufgrund der Ergebnisse wird geschlossen, dass es möglich ist die Messergebnisse von einachsigen Antennen zu isotropen elektrischen Feldstärken zu extrapolieren. Es zeigte sich,

dass die Extrapolationsfaktoren für die verschiedenen Szenarien nur unwesentlich voneinander abwichen. Je nach Szenario lagen der Mittelwert zwischen 1,84 und 2,10 und der Median zwischen 1,76 und 1,84. Allerdings ergeben sich aufgrund der Häufigkeitsverteilung der Extrapolationsfaktoren stärkere Abweichungen bei der Unsicherheit. Diese liegt zwischen 21,8 % und 44,8 %. Als Resultat soll ein Extrapolationsfaktor von 1,95 angesetzt werden und eine zusätzliche Unsicherheit der Messergebnisse von 33,07 % berücksichtigt werden.

Eine ähnliche Untersuchung wurde mit einem EME SPY 140 als frequenzselektive Messung im Gegensatz zur vorherigen Breitbandmessung in drei Frequenzbändern durchgeführt [61]. An drei verschiedenen Orten stand das Exposimeter auf einem Stativ montiert an einer festen Position und zeichnete für 13 Minuten Messwerte auf. Aus den Messwerten für die einzelnen Achsen und der Gesamtfeldstärke wurden wieder mittlere Extrapolationsfaktoren und die Unsicherheit bestimmt. Die mittleren Extrapolationsfaktoren liegen für die drei Frequenzbänder im Bereich von 1,76 bis 1,93 und damit nah bei denen der vorhergehenden Untersuchung. Die mittlere Unsicherheit unterschied sich in diesem Fall kaum und reicht nur von 6,06 % bis 7,40 %, womit sie deutlich geringer ausfällt als zuvor. Eine Erklärung hierfür wird nicht geliefert.

2.3.2.3.4.2 *Bewertung*

Das dargestellte Vorgehen und die Ergebnisse zeigen eine interessante Möglichkeit auf, wie mit anisotropen Messsonden, wie sie auch im Falle der Smartphones vorliegen, grundsätzlich umgegangen werden kann. Außerdem liegen mit den Zahlenwerten erste Abschätzungen für einen Extrapolationsfaktor vor. Ein wichtiger Aspekt wird jedoch noch in [66] genannt, der die Übertragbarkeit auf Smartphones ggf. zum Teil einschränkt. Bei den Messungen wurden mehrere Sender an verschiedenen Orten erfasst, was dazu führt, dass die Signale aus verschiedenen Richtungen stammen. Zwar wird durch Mehrwegeausbreitung in vielen Fällen auch bei nur einem Sender ein ähnlicher Effekt erzielt, jedoch könnte es dennoch zu anderen Ergebnissen führen, wenn zellspezifische Signalstärkeindikatoren gemessen werden, die sich nur auf eine einzige Funkzelle beziehen (siehe Kapitel 2.1). Für eine große Anzahl an Messwerten dürfte dies jedoch im Mittel wieder zu einem ähnlichen Extrapolationsfaktor führen. Allerdings kann sich die Unsicherheit wie schon bei den verschiedenen Szenarien unterscheiden. Diese wächst, wenn nur Signale aus wenigen Richtungen einfallen und somit weniger Komponenten das gesamte elektrische Feld zusammensetzen. Je höher die Anzahl von unterschiedlich polarisierten Komponenten ist, desto unabhängiger wird das Ergebnis von der Ausrichtung des Empfängers und die Unsicherheit geringer.

Warum die Unsicherheit bei der frequenzselektiven Messung so viel geringer ausfällt bleibt unklar, könnte aber damit zusammenhängen, dass nur an fixen Punkten gemessen wurde im Gegensatz zur Breitbandmessung.

2.3.2.3.5 Gesamtbewertung

Das LEXNET-Projekt hat in zahlreichen Untersuchungen die Nutzung von durch Endgeräte wie Smartphones erfassten Daten tangiert. Eine konsequente Verfolgung dieses Ansatzes erfolgte jedoch nicht. Insbesondere wurde der Aspekt des Crowdsourcings und der Möglichkeit damit Messungen mit genauer Standortinformation zu erhalten nicht betrachtet. Somit liefert das Projekt zwar einige Anhaltspunkte für das vorliegende Vorhaben, beantwortet aber nicht die Machbarkeit einer Smartphone-basierten Immissionsabschätzung.

2.3.3 Vergleichbare Ansätze

Die Ausstattung von Smartphones mit verschiedensten Sensoren ermöglicht es ihnen verschiedene Parameter ihrer Umgebung oder auch ihre Bewegung bzw. Orientierung aufzunehmen. Vergleichbar mit dem Ansatz eines HF-Messnetzwerks auf Basis von Smartphones können diese Geräte daher auch in anderen Bereichen als günstige Alternative zu herkömmlichen Messsonden angesehen werden. Im Rahmen der Literaturstudie wurden daher derartige Ansätze gesucht, die möglicherweise hilfreiche Anregungen zur Auswertung der Messdaten bzw. zu erzielbaren Messgenauigkeiten eines HF-Messnetzwerks liefern können. Es wurden nur solche Anwendungen berücksichtigt, die Crowdsourcing nutzen. Die folgenden Ansätze wurden hierbei gefunden:

- Überwachung der Lärmbelastung
- Messung der Lufttemperatur
- Erkennung von Erdbeben
- Überwachung des Straßenzustands
- Structural Health Monitoring
- Standortbestimmung aus Radio Maps
- Ermittlung der Netzabdeckung & Netzwerk-Performance

2.3.3.1 Überwachung der Lärmbelastung

Das Mikrofon des Smartphones kann prinzipiell zur Erfassung von Lautstärkepegeln verwendet werden und somit zur Messung der Lärmbelastung dienen. Mehrere Veröffentlichungen haben sich mit dem Thema in Verbindung mit Crowdsourcing befasst [67–70]. Hierbei wurden vor allem gezielte Messungen durch die Studienteilnehmer durchgeführt. Es zeigte sich laut den Autoren, dass bei geeignet kalibrierten Endgeräten gute Übereinstimmungen im Vergleich zu Messstationen und mobilen Lärmmessgeräten erzielt werden konnten. Direkt verwertbare Erkenntnisse für ein HF-Messnetzwerk ergeben sich durch die Veröffentlichungen jedoch nicht.

2.3.3.2 Messung der Lufttemperatur

Bis auf wenige Ausnahmen besitzen Smartphones zwar keine Sensoren zur Messung der Umgebungstemperatur, allerdings enthalten sie zur Überwachung des Akkus einen Temperatursensor. In der Literatur wird von Ansätzen berichtet, die die Information dieser Sensoren erfolgreich nutzen, um daraus die Lufttemperatur abzuschätzen [71–73]. Um die Umgebungstemperatur aus der Akkutemperatur des Smartphones zu erhalten, wird ein Wärmeübertragungsmodell genutzt, das den Temperatureinfluss des Nutzers und die im Smartphone entstehende Wärmeenergie einbezieht. Messwerte werden aufgenommen, wenn das Smartphone an das Ladegerät angeschlossen oder neu eingeschaltet wird. Das Modell wird kalibriert, indem ein Messdatensatz aus Smartphone-Messungen eines Zeitraums mit Messungen von Wetterstationen abgeglichen wird, um die Modellparameter geeignet festzulegen. Anschließend wird mit einem zweiten Datensatz eine Validierung mit dem ermittelten Modell

durchgeführt und die Leistungsfähigkeit bestimmt. Ein vergleichbares Vorgehen könnte potentiell für ein HF-Messnetzwerk angewendet werden, wenn Messungen mit einem Feldstärkemessgerät parallel zur Datenerhebung durch Smartphones durchgeführt werden. Abgesehen davon ist die Auswertung der über die Fläche verteilten Daten nicht ausreichend beschrieben, um daraus Anhaltspunkte zur Auswertung für ein HF-Messnetzwerk abzuleiten.

2.3.3.3 Erkennung von Erdbeben

Verschiedene Forschergruppen haben sich mit der Erkennung von Erdbeben auf Grundlage der Messdaten von Beschleunigungssensoren von Smartphones beschäftigt. Die umfangreichsten und am meisten fortgeschrittenen Arbeiten sind im Umfeld des sogenannten „MyShake“-Systems entstanden [74–78]. Zentrales Element ist die gleichnamige Android-App, die die Fähigkeit besitzt, Bewegungen, die durch Erdbeben verursacht werden, zu erkennen. Die App läuft im Hintergrund und sendet anonyme Informationen an einen zentralen Server, sobald ein Vibrationsprofil auftritt, das von einem Erdbeben stammen könnte. Auf dem zentralen Server werden die Informationen einer Region zusammengefasst, um den Ort und die Stärke des Erdbebens zu ermitteln. Das System verzeichnet derzeit 40.000 aktive Nutzer verteilt über den ganzen Globus. Das System ist inzwischen prinzipiell voll funktionsfähig und ermöglicht, sowohl Erdbeben zu erkennen als auch Warnungen auszusenden [79]. Erdbeben können innerhalb von fünf bis sieben Sekunden nach dem Auftreten detektiert und inklusive ihrer Stärke lokalisiert werden. Nach weiteren ein bis fünf Sekunden können Alarime an die Smartphones gesendet werden. Ein wesentlicher Unterschied zum Ansatz des HF-Messnetzwerks besteht darin, dass bereits eine Datenverarbeitung auf dem Endgerät stattfindet und nur dann eine Übertragung zum Server erfolgt, wenn definierte Ereignisse eintreten. Bei der Auswertung kommen künstliche neuronale Netze zum Einsatz, die zwischen den Bewegungen durch den Nutzer oder aufgrund eines Erdbebens anhand verschiedener Eigenschaften unterscheiden können [80]. Auf dem Server werden räumliche und zeitliche Clustering-Algorithmen angewendet, um aus den Daten vieler Smartphones Erdbeben zu identifizieren. Die aus den App-Messungen bestimmten Orte von Erdbeben stimmen laut den Autoren gut mit den mit herkömmlichen Methoden katalogisierten Orten überein.

In der Literatur werden auch die Herausforderungen eines solchen Netzwerks beschrieben die Parallelen zu einem HF-Messnetzwerk aufweisen [74]. Hierzu zählt zum Beispiel die Vielfalt der Sensor-Hardware, wodurch es schwierig ist, die Konsistenz der Mess-Hardware zu kontrollieren. Unterschiedliche Empfindlichkeiten aufgrund unterschiedlicher Qualität können eine Folge sein. Es wird daher erläutert, dass ein umfangreiches Verständnis der Gerätevielfalt und -empfindlichkeit zur Erdbebenerkennung benötigt wird. Dies ist auch bei einem HF-Messnetzwerk erforderlich. Es ist notwendig zu verstehen, wie der Zusammenhang zwischen Feldstärke und Signalstärkeindikatoren bei verschiedenen Endgeräten aussieht, sowohl von gleichen wie auch unterschiedlichen Modellen und Herstellern. Ein weiterer genannter Punkt ist das Erfordernis einer Strategie zur Abschätzung der Datenqualität von einzelnen Endgeräten bzw. Gerätemodellen. Dies erfolgt, indem die Sensordaten aus der Minute vor dem Erkennen eines potentiellen Erdbebenmusters mit an den Server geschickt werden, um daraus das Rauschlevel des Sensors abzuschätzen.

Abgesehen von den genannten Parallelen lassen sich die Auswertungsverfahren aus den

oben erläuterten Gründen und wegen grundsätzlich unterschiedlichen Anforderungen nach bisherigen Erkenntnissen nicht auf ein HF-Messnetzwerk übertragen.

2.3.3.4 *Überwachung des Straßenzustands*

In den letzten Jahren wurden viele Studien durchgeführt, um die Möglichkeiten zum Einsatz von Smartphones zur Beurteilung des Straßenzustands zu untersuchen. Übersichtsarbeiten in [81, 82] geben einen Überblick über den aktuellen Forschungsstand. Allgemein kann der Fahrbahnzustand anhand von Mängeln in der Fahrbahnoberfläche klassifiziert werden, die die Fahreigenschaften von Fahrzeugen beeinträchtigen. Schäden können in Form erhöhter Oberflächenrauigkeit, Unebenheiten, Schlaglöchern oder Rissen auftreten. Bisherige Studien konzentrieren sich hauptsächlich auf die Erkennung von Fahrbahnunebenheiten und Anomalien anstatt auf die Abschätzung von Oberflächenrauigkeiten. Die Erkennung erfolgt anhand von Daten des Beschleunigungssensors, aber auch Ansätze zum Einbezug des Mikrofons existieren. In Verbindung mit der Standortinformation ist beim Auftreten charakteristischer Beschleunigungsverläufe eine Erkennung von z. B. Schlaglöchern möglich. In [81] werden mehrere Projekte genannt, die die Eignung dieses Ansatzes erfolgreich und auch in Verbindung mit Crowdsourcing demonstrieren haben. Wie auch bei der Erdbebenerkennung findet bei den meisten Ansätzen bereits ein Teil der Datenauswertung zur Erkennung von Schlaglöchern auf dem Endgerät statt und auf dem Server werden anschließend durch Clustering falsche Erkennungen ausgefiltert [81, 83]. Es kommen vorwiegend neuronale Netze und Machine Learning zum Einsatz [84–89]. Bei den Auswertungen geht es vor allem darum, Anomalien zu erkennen, nicht aber einen der Expositionshöhe vergleichbaren Wert zu bestimmen. Daher ist eine unmittelbare Übertragung der Methoden nach derzeitiger Einschätzung nicht möglich.

2.3.3.5 *Structural Health Monitoring (SHM)*

Beim Structural Health Monitoring (SHM) geht es um die kontinuierliche oder periodische Überwachung des Zustands eines Bauwerks durch automatisierte Methoden. Klassischerweise geschieht dies durch fest installierte Sensoren und Auswertung deren Messdaten. Dadurch können Schäden wie Risse oder Verformungen frühzeitig erkannt werden, was ermöglicht geeignete Gegenmaßnahmen zu ergreifen. Eine verbreitete Methode zur Beurteilung des Bauwerkzustands beruht auf der Vibration. Wie auch bei der Erdbebenerkennung und der Überwachung des Straßenzustands kommen für einen Smartphone-basierten Ansatz daher vor allem die Informationen der Beschleunigungssensoren in Betracht. Zwar gibt es auch Ansätze unter Nutzung der Smartphone-Kamera, allerdings sind diese nicht mit einem HF-Messnetzwerk zu vergleichen. Einen aktuellen Überblick über die zahlreichen Forschungsaktivitäten in diesem Bereich ist in [90] und [81] zu finden. Darunter befinden sich auch crowdsourcingbasierte Ansätze. Eine konkrete Erprobung ist in [91] beschrieben. Die erzielten Ergebnisse stimmten laut den Autoren gut mit Referenzmessungen überein. Ein wichtiger Unterschied zum derzeit verfolgten Ansatz beim HF-Messnetzwerk ist, dass Messungen gezielt durch den Nutzer ausgeführt sowie an einen Server übertragen werden müssen und eine Aufzeichnung im Hintergrund bisher nicht vorgesehen ist. Auch die Auswertung lässt sich auf Basis der vorliegenden Veröffentlichungen und wegen der großen Unterschiede der physikalischen Eigenschaften zwischen Gebäudeschwingungen und elektromagnetischen Feldern nicht auf ein HF-Messnetzwerk übertragen.

2.3.3.6 Ermittlung der Netzabdeckung & Netzwerk-Performance

Die Ermittlung der Netzabdeckung und der Netzwerk-Performance sind für Mobilfunknetzbetreiber, Mobilfunknutzer und auch Behörden von Interesse. Klassische Methoden bestehen in der Simulation anhand von Ausbreitungsmodellen oder messtechnisch durch Drive Tests (Messfahrten). Seit einigen Jahren wird das Crowdsourcing als Möglichkeit zur Erfassung der Netzabdeckung und Leistungsfähigkeit der Netze untersucht und auch praktisch angewendet. Dabei hat insbesondere die Erstellung von Netzabdeckungskarten auf der Basis von Signalstärkemessungen deutliche Parallelen zu einem HF-Messnetzwerk, da die zugrundeliegenden Messgrößen identisch sind. Aus der zu diesem Themenfeld gesichteten Literatur werden im Folgenden die relevantesten Veröffentlichungen und deren wesentlichen Erkenntnisse beschrieben.

In [92] wird untersucht wie sich die Vielfalt von Endgeräten bei der Erstellung von Mobilfunkabdeckungskarten mittels Crowdsourcing auswirkt. Messungen zeigen, dass es signifikante Abweichungen zwischen den gemessenen Signalstärkeverteilungen bei verschiedenen Endgeräten gibt, auch wenn alle anderen Faktoren gleich sind. Dennoch sind die erzeugten Abdeckungskarten verlässlich, solange das Gerät, für welches eine Vorhersage gemacht wird, zu den Geräten gehört, mit denen die Karte erstellt wurde. Eine andere Erkenntnis ist, dass dies auch dann noch gilt, wenn die Messungen nicht aus dem Zeitraum stammen, für die die Abdeckungsvorhersage getätigt wird (z.B. aus dem vorherigen Jahr). Allerdings führen aktuellere Daten zu genaueren Vorhersagen. Weiterhin wird berichtet, dass die Unterschiede zwischen verschiedenen Modellen im Allgemeinen geringer ausfallen als zwischen verschiedenen Herstellern. Zur Generierung der Abdeckungskarten wird Ordinary Kriging als Interpolationsmethode verwendet.

Eine andere Arbeit [93] beschäftigt sich speziell mit der räumlichen Interpolation bei der Vorhersage der Netzabdeckung aus Crowdsourcing-Messungen und vergleicht verschiedene Verfahren miteinander. Dabei wird besonders auf die Auswirkungen der typischen Eigenschaften und Schwächen von Crowdsourcingdaten eingegangen, wie ungenaue Standortinformationen, ungleichmäßige Verteilung der Messpunkte innerhalb des Untersuchungsgebiets, sowie die möglicherweise stellenweise geringe Messpunktdichte. Dazu werden kontrollierte Messungen mit gewöhnlichen Smartphones durchgeführt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen gemäß den Autoren, dass von den insgesamt untersuchten Verfahren (Kriging, Splines, Inverse Distance Weigthing (IDW), Thiessen Polygons (THI), LOESS Surfaces, Trend Surfaces, Classification) Ordinary Kriging eine sehr robuste Methode über alle Szenarien hinweg ist, selbst wenn die Messungen räumlich ungleich verteilt sind und die Messpunktdichte sehr gering ist.

In [94] wird ein Vergleich von RSRP-Messungen durchgeführt, die von einem professionellen Netzwerk-Scanner, einem QualiPoc-Smartphone von Rohde & Schwarz sowie einem herkömmlichen Smartphone durchgeführt wurden. Bei der Messung des QualiPoc-Smartphones werden Messwerte unmittelbar von der Firmware erhalten, also direkt von der Hardware des Endgeräts, während bei herkömmlichen Smartphones die Messwerte über die API des Android-Betriebssystems abgerufen werden (vgl. Kapitel 2.2). Die drei Erfassungsmethoden werden hinsichtlich des Einflusses der unterschiedlichen Mittelwertbildung über mehrere Messungen, ungenauer Quantisierung und der Häufigkeit der Messwertaufzeichnung untersucht. Allerdings wird der Einfluss fast ausschließlich in Hinblick auf die Bestimmung des Exponenten

des Pfadverlustes betrachtet, sodass sich die Ergebnisse nicht unmittelbar auf die Anforderungen eines HF-Messnetzwerks übertragen lassen. Dennoch lassen sich interessante Erkenntnisse entnehmen. Die Abtastrate der drei Geräteklassen unterscheiden sich deutlich voneinander. Während der Netzwerk-Scanner 500 Messwerte pro Sekunde aufnimmt, kann das QualiPoc nur etwa 3 Messwerte und herkömmliche Smartphones über die Android-API nur einen Messwert pro Sekunde aufnehmen. Bei Feldmessungen in verschiedenen Ausbreitungsbedingungen zeigt sich, dass der größte Wertebereich vom Netzwerk-Scanner abgedeckt wird (77 dB), während der des QualiPoc etwas geringer (74 dB) und bei den API-Messungen noch geringer (71 dB) ausfällt. Außerdem fallen die RSRP-Werte des Qualipoc im Mittel um 1,57 dB und die der API-Messungen 4,43 dB geringer aus als beim Netzwerk-Scanner. Woher diese Abweichung resultiert (z.B. unterschiedliche Eigenschaften der Messwertaufnahme oder unterschiedliche Antennenfaktoren), ist nicht zu entnehmen. Sofern der Versatz aus verschiedenen Antennenfaktoren resultiert, würde er sich durch Bestimmung des jeweiligen Umrechnungsfaktors zu Feldstärkewerten für ein Messnetzwerk korrigieren lassen. Die übrigen Untersuchungen beziehen sich auf die Bestimmung des Pfadverlusts. Dabei zeigt sich, dass das Ergebnis gegenüber einem einzelnen Smartphone genauer wird, wenn die Messungen mehrerer herkömmlicher Smartphones kombiniert werden. Insgesamt werden laut den Autoren sehr genaue Ergebnisse erzielt, wenn der festgestellte Versatz zum Netzwerk-Scanner pauschal korrigiert wird.

Ein anderer Vergleich zwischen den RSRP-Messungen eines professionellen Netzwerk-Scanners und über die Android-API von Smartphones erfassten Werten wird in [95] vorgestellt. Dort werden die Messungen in verschiedenen Umgebungen aufgezeichnet und direkt miteinander verglichen. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Untersuchungen die Genauigkeit von Endgeräte-basierten Messsystemen und die Eignung als Alternative zu Netzwerkscannern bestätigen, wie sie für Drive Tests angewendet werden. Die Abweichung als Root Mean Square Error liegt gegenüber dem Netzwerk-Scanner bei etwa 3 dB. Eine andere Forschergruppe hat ebenfalls eine ähnliche Untersuchung vorgenommen [96]. Dort wurden Messungen bei 3G und 4G von gewöhnlichen Smartphones, QualiPoc-Smartphones und einem Netzwerkscanner gegenübergestellt. Zur Messwernerfassung kommt auf den Smartphones eine selbst entwickelte App mit dem Namen NetMap zum Einsatz. Interessant ist auch, dass auf den QualiPoc-Smartphones parallel zusätzlich mit dieser App Messwerte aufgezeichnet wurden. Die Messungen wurden in vier verschiedenen Szenarios ausgeführt (Indoor, Outdoor, Innenstadt, Autobahn). Zunächst wurden die Daten derart kalibriert, dass die konstanten Unterschiede zwischen den Signalstärkemessungen der verschiedenen Geräte aufgrund unterschiedlicher Antennen- und Empfängereigenschaften eliminiert werden. Es zeigt sich, dass diese von Gerät zu Gerät und abhängig vom Funkstandard variieren, aber für einen festen Vergleich zwischen zwei Geräten sehr konstant über alle Szenarien sind. Wie zu erwarten, stimmen die Messergebnisse auf den QualiPoc-Smartphones mit denen der NetMap-App auf dem gleichen Gerät trotz schlechterer Auflösung und Abtastrate laut den Autoren gut überein. Die Vergleiche zwischen den verschiedenen Geräten liefern weniger übereinstimmende Ergebnisse (Root Mean Squared Error 3–5 dB (UMTS) bzw. 2–3 dB (LTE)). Aufgrund der Ergebnisse kommen die Autoren zu dem Schluss, dass kommerzielle Smartphones trotz niedrigerer Auflösung und Erfassungsrates in der Lage sind Messungen mit ausreichender Genauigkeit auszuführen, um damit

Pfadverluste und Shadow Fading (Variation des Signalpegels aufgrund von Abschattung) zu verfolgen.

Die Ergebnisse der genannten Arbeiten stehen zwar nicht im direkten Zusammenhang mit der Erfassung der Immission oder der elektrischen Feldstärke, allerdings beziehen sie sich auf die gleichen Messgrößen, die für ein HF-Messnetzwerk zu nutzen sind. Auch die Auswertungsmethoden liefern nützliche Anknüpfungspunkte für die weiteren Arbeiten. Eine wesentliche Neuerung im vorliegenden Projekt ist, dass der Zusammenhang zwischen den Signalstärkeindikatoren und der elektrischen Feldstärke eingehend untersucht wurde. Hierzu lagen bislang keine verwertbaren Arbeiten vor.

2.3.3.7 Standortbestimmung aus Radio Maps

Die Standortbestimmung von mobilen Endgeräten kann außer aus satellitengestützten Systemen auch mithilfe der gesichteten Mobilfunk- und WLAN-Netze und deren Signalstärken erfolgen. Hierfür werden sogenannte Radio Maps bzw. WiFi Maps durch spezielle Messungen oder durch Crowdsourcing erzeugt. Durch sogenanntes Fingerprinting erfolgt ein Abgleich mit in einer Datenbank abgelegten Messungen der Empfangsstärken mit zugehöriger Standortinformation. Der Standort wird aus den am besten übereinstimmenden „Fingerabdrücken“ bestimmt.

Hier kommen zum Teil auch Interpolationstechniken zum Einsatz, welche aber gegenüber den bereits im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen keine neuen Erkenntnisse für das Projekt liefern. Eine nützliche Arbeit ist in [97] zu finden. Es wird ein mehrdimensionaler Skalierungsalgorithmus vorgeschlagen, um die Unterschiede der RSRP-Messungen verschiedener Geräte zu eliminieren, indem die relativen RSRP-Differenzen eines jeden Paares von Endgeräten analysiert werden. Außerdem wird Mustererkennung genutzt, um die Endgerätebewegung für den Abgleich bzw. die Zentrierung der Fingerabdrücke zu klassifizieren. Die Positionierungsgenauigkeit konnte hierdurch verbessert werden. Auch wenn das Ziel ein anderes ist, stellen die genutzten Methoden potentiell einen interessanten Ansatz für die Verarbeitung der Crowdsourcingdaten eines HF-Messnetzwerks dar.

2.4 Weitere Aspekte

2.4.1 Datenschutz

Wann immer und zu welchem Zweck auch Daten erhoben werden, spielt das Thema Datenschutz eine Rolle und so auch im Zusammenhang mit einem Messnetzwerk auf der Basis von Smartphones. Neben Daten über die Messung des Empfängers und Eigenschaften des Endgeräts sind vor allem die für eine Zuordnung der Exposition notwendigen Standortdaten äußerst sensible Informationen. Diese müssen daher durch geeignete Maßnahmen vor unbefugtem Zugriff und Missbrauch geschützt werden. Betreiber einer entsprechenden Infrastruktur müssen daher technische Schutzmechanismen vorsehen dies zu unterbinden.

Grundsätzlich ist das Erheben von Standortdaten, die auf ein bestimmtes Gerät zurückgeführt werden könnten ein Sicherheitsrisiko im Falle von Missbrauch. Daher werden die von Apps erhobenen Daten in der Regel zumindest in gewisser Weise anonymisiert, damit diese nicht

mehr direkt auf einen bestimmten Nutzer zurückgeführt werden können. Dies geschieht zum Beispiel durch Pseudonyme (Identifizierer/Token), die einmalig für das Gerät in der App generiert werden, aber ansonsten keine Verbindung zu dem Gerät besitzen. Nach der Deinstallation der App würde dieses eindeutige Token auch auf der Endgeräteseite nicht mehr existieren. Problematisch bleibt, dass auch Informationen erhoben werden, die das Gerät betreffen und den Nutzerkreis einschränken können (Marke, Modell, Betriebssystemversion, installierte Apps etc.). Es ist bereits mehrfach demonstriert worden, dass bereits aus wenigen Informationen wieder auf einen bestimmten Nutzer zurückgeschlossen werden kann [98]. Dies ist jedoch ein grundsätzliches Problem und kein spezifisches Problem, das in der Natur eines Messnetzwerks liegen würde.

Grundsätzlich ist unbefugter Zugriff auf die Daten unter allen Umständen zu vermeiden, denn Standortdaten, die sich auf ein einzelnes Gerät zurückführen lassen, ermöglichen das Erstellen von Bewegungsprofilen. Für ein Messnetzwerk ist eine Identifizierung eines bestimmten Geräts nicht unbedingt erforderlich. Wichtig ist vor allem die Unterscheidung nach dem Smartphone-Modell, um ggf. einen geeigneten Umrechnungsfaktor anzuwenden. Die Identifizierbarkeit wäre nur erforderlich, wenn man beispielsweise fehlerhafte Geräte erkennen will, um diese von der Auswertung auszuschließen. Außerdem wäre in dem Fall auch eine Art Kalibrierung eines einzelnen Geräts aus dem Pool der Messdaten möglich.

Das Problem des Datenschutzes kann zumindest von rechtlicher Seite als ein prinzipiell gelöstes Problem angesehen werden, da in Form entsprechender Nutzungsbedingungen und Datenschutzerklärungen rechtssichere Randbedingungen für die Erfassung- und Verarbeitung der Daten vorliegen. In den Datenschutzerklärungen finden sich in diesen Fällen Hinweise wie, dass Daten zur Erforschung von Mobilfunknetzen erhoben werden und an die entsprechenden Firmen weitergegeben werden [99, 100]. Nach der Installation einer App mit einer derartigen Hintergrundfunktionalität wird der Benutzer, um die Zustimmung zu den Bedingungen gebeten, um die App nutzen zu können.

Auf Basis der heutigen rechtlichen Rahmenbedingungen und technischen Möglichkeiten zum Datenschutz liegen keine offensichtlichen Hinderungsgründe für eine Umsetzung eines crowdsourcingbasierten Expositionsmonitorings vor. Allerdings weist eine Veröffentlichung aus dem Jahr 2018 [101] darauf hin, dass es im Zusammenhang mit Crowdsourcing-Plattformen Forschungsbedarf gibt, um Lücken hinsichtlich der Privatsphäre zu schließen. Eine weitere Studie [102] hat mehrere Crowdsourcing-Ansätze hinsichtlich der Informationssicherheit der Nutzer vor dem Hintergrund der Datenschutzgrundverordnung analysiert und Vorschläge für Technologien zur Verbesserung der Privatsphäre vorgestellt und diskutiert. Weitere Studien befassen sich mit Methoden, wie sich bei Crowdsourcing der Datenschutz verbessern lässt [103–105].

2.4.2 Datenbasis zur Immissionsabschätzung

2.4.2.1 Anforderungen an die Datenbasis

An die auf Crowdsourcing basierenden Datenbasen stellen sich die im Folgenden beschriebenen Anforderungen, um Immissionsabschätzungen grundsätzlich ermöglichen zu können. Die Datenbasis muss hierzu aus einzelnen Messdatensätzen bestehen, die für einen bestimmten

Ort zu einer bestimmten Zeit einen Indikator für die Immissionshöhe und weitere Informationen zur Zuordnung der Immission zu einem Funkdienst und einer Funkzelle enthalten. Konkret muss jeder Datensatz mindestens die folgenden Einträge umfassen:

- Standort des Endgeräts zum Zeitpunkt der Messung in Geokoordinaten
- Zeitstempel des Zeitpunkts der Erfassung des Datensatzes
- Signalstärkeindikator des verbundenen Funkdienstes (RSRP, RSCP bzw. RSSI)
- Funkdienst & Netzbetreiber der verbundenen Funkzelle
- Cell Identity der verbundenen Funkzelle

Weitere Informationen sind jedoch nötig, um die Immission genauer abschätzen zu können. Dazu gehören:

- Kanalnummer bzw. Frequenzband der verbundenen Funkzelle
- Kanalbandbreite der verbundenen Funkzelle (bei LTE)
- Hersteller & Modell des Endgeräts

Die Kanalnummer bzw. das Frequenzband der verbundenen Funkzelle wird benötigt, um die Immission korrekt den entsprechenden Frequenzen zuzuordnen, auf denen sie vorherrscht, und einen Abgleich mit den frequenzabhängigen Grenzwerten zu ermöglichen. Die Kanalbandbreite ist bei LTE variabel und wirkt sich auf die Extrapolation zur Maximalimmission auf Basis des Referenzsignals aus. Sie sollte daher auch bekannt sein. Die Informationen zum Kanal sind jedoch in der Regel vergleichsweise statisch und könnten daher auch aus anderen Quellen zur Auswertung der Messdatensätze hinzugezogen werden.

Der Hersteller und das Modell des Endgeräts sind dafür relevant, um endgerätespezifische Umrechnungsfaktoren von Signalstärkewerten zur Feldstärke anwenden zu können. Ist dies nicht bekannt, so kann nur ein generischer, mittlerer Umrechnungsfaktor unter Vergrößerung der Unsicherheit bei der Auswertung genutzt werden.

Neben den Anforderungen an die Informationen in jedem Datensatz gibt es weitere Erfordernisse hinsichtlich des Umfangs und der Verteilung der Datensätze. Um eine Expositionsabschätzung des gesamten Mobilfunk-Downlinks realisieren zu können, muss die Datenbasis Daten zu allen verbreiteten Mobilfunkdiensten beinhalten und alle genutzten Frequenzbänder abdecken. Weiterhin müssen die Messdaten über die zu untersuchende Fläche verteilt sein, wobei es wichtig ist, dass es benachbarte Messwerte von verschiedenen Geräten zu derselben Funkzelle gibt, um diese gemeinsam auswerten zu können. Damit die Gesamtexposition für einen Ort innerhalb des Untersuchungsgebiets bestimmt werden kann, müssen in der Umgebung außerdem von allen an diesem Ort vorherrschenden Funkzellen aller Funkdienste genügend Messwerte für eine Auswertung vorliegen. Idealerweise sollte die Anzahl der Messwerte der Datenbasis möglichst groß sein.

2.4.2.2 *Bestehende Datenbanken*

Eine Recherche sollte einen Überblick darüber verschaffen, ob bereits öffentlich verfügbare Datenbanken existieren, die für ein Messnetzwerk verwertbare Informationen vorhalten. Dies

können neben Signalstärke-Daten auch Informationen über Mobilfunkbasisstationen sein, die die Auswertung der Messdaten unterstützen könnten.

Die folgenden Datenquellen konnten hierbei gefunden werden:

- **OpenCellID**, <https://opencellid.org/>
Bei OpenCellID handelt es sich um eine Datenbank, die weltweit Informationen über Basisstationen vorhält. Neben einer Zuordnung zum Netzbetreiber anhand von MNC und MCC und Unterscheidung mittels der Cell-IDs wird ein aus Smartphone-Messdaten geschätzter Standort bereitgestellt. Die Daten können von Nutzern über verschiedene Smartphone-Apps bereitgestellt werden. Auch Daten der Empfangsstärke können gesammelt und hochgeladen werden. Über die bereitgestellten Zugriffsmöglichkeiten sind jedoch nur die Basisinformationen der Funkzellen abrufbar und die Standorte in einer Karte einsehbar. Insgesamt stehen nur grundlegende Informationen bereit, die durch ein Messnetzwerk selbst erfasst werden können, aber keine direkt für die Immissionsabschätzung zu verwertenden Messdaten. Von der Infrastruktur her ist der Ansatz jedoch interessant und könnte hierfür genutzt werden, sofern einige Anpassungen vorgenommen würden.
- **CellIDInfo**, <https://cell-id.info/>
Bei dieser Datenbank handelt es sich um ein Projekt, das Basisstationsinformationen über eigene Apps sammelt. Die Verbreitung und der Datenumfang scheinen allerdings gering zu sein. Außer Standortinformationen zur Basisstationen gibt es keine Information über die Empfangsleistungen, sodass dies keine Datenquelle für Expositionsabschätzungen darstellt.
- **CellMapper**, <https://www.cellmapper.net/>
Diese Datenbank ermöglicht die Visualisierung von Basisstationsstandorten mit ihren aus Smartphone-Messdaten abgeschätzten Abdeckungsbereichen. Die Messdaten werden über eine eigene App, die auch Bestandteil der App-Suche in Abschnitt 2.2.5 war, gesammelt. Auch die Messdaten der Empfangsfeldstärke können erfasst, hochgeladen und angezeigt werden. Damit lassen sich Bereiche mit hohen und niedrigen Empfangspegeln erkennen. Allerdings ist der Datenbestand insgesamt eher niedrig und es liegen für einen Standort nur wenige Messwerte vor. Den Statistiken auf der Internetseite ist zu entnehmen, dass seit Bestehen der Datenbank in 2015 etwa 1,16 Milliarden einzelne Messdatensätze bestehend aus Standortdaten, Signalstärke und Informationen zur Funkzelle erfasst wurden. Die Infrastruktur und Visualisierungsmöglichkeiten könnten eine nützliche Basis für ein Messnetzwerk darstellen. Aufgrund des unzureichenden Datenumfangs ist eine Nutzung für Immissionssabschätzungen im derzeitigen Zustand nicht sinnvoll. Außerdem lassen sich die Messdaten der Empfangsstärke nicht als Rohdaten für eine Weiterverarbeitung abrufen.
- **netBravo**, <http://netbravo.jrc.ec.europa.eu/>
NetBravo ist ein von der EU-Kommission initiiertes Crowdsourcing-Projekt und bereitgestellte Plattform, um Daten über die Mobilfunkabdeckung, WLAN-Kanalbelegung und Testergebnisse von Breitband- und Netzneutralitätstests zu sammeln und öffentlich bereitzustellen. Es werden Signalstärken und die Position sowie der Zeitpunkt der

Messung erfasst. Damit fehlen wesentliche Informationen, die zur detaillierten Auswertung erforderlich wären. Außerdem ist der Datenumfang auf die Fläche bezogen eher gering (nur etwa 2,5 Millionen Datensätze pro Monat in ganz Europa).

- **RTR-Netztest**, <https://www.netztest.at/de/Opedata>
RTR-Netztest ist eine Datenbank der österreichischen Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH und sammelt Informationen über Basisstationen inklusive genutztem Frequenzkanal und Standort. Außerdem werden Messdaten von Signalstärkeindikatoren gesammelt, allerdings nur für LTE. Die Messung erfolgt nur bei expliziten Netztest durch den Nutzer. Der Schwerpunkt der Datensätze liegt in Österreich und der Umfang ist daher in Deutschland mit nur etwa 12.000 Messungen pro Jahr sehr gering.
- **Funkloch-App der Bundesnetzagentur**, <https://breitbandmessung.de/funkloecher-erfassen>
Im Auftrag der Bundesnetzagentur wurde die sogenannte Funkloch-App entwickelt, mit deren Hilfe die Netzverfügbarkeit erfasst und Orte, an denen kein Mobilfunkempfang besteht, gemeldet werden können. Laut der Beschreibung der App [106] werden keine Daten zur Signalstärke sondern ausschließlich zur Datenübertragungsrate festgehalten. Damit liegen für ein Messnetzwerk keine verwertbaren Daten vor.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass keine der öffentlich verfügbaren Datenbanken bislang die Anforderungen für eine Immissionsabschätzung erfüllt. Allerdings könnten mehrere der genannten Plattformen prinzipiell für ein Messnetzwerk angepasst und ausgebaut werden. Daher bleibt momentan nur der Rückgriff auf gesammelte Daten kommerzieller Anbieter, die die Funktionalität der Datensammlung als Hintergrundprozess in Apps integrieren, die für den Nutzer eigentlich andere Zwecke erfüllen.

2.4.3 Mean Effective Gain & Nutzereinfluss

Der Antennenfaktor, der die Umwandlung der an der Empfangsantenne des Endgeräts eintreffenden elektrische Feldstärke in eine Spannung und damit Leistung am Antennenfußpunkt der Antenne beschreibt, ist einerseits richtungsabhängig und andererseits vom Benutzer und der Umgebung des Endgeräts beeinflusst. Daher ist die herkömmliche Definition des Antennengewinns nicht ausreichend zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit einer Antenne, denn die Orientierung relativ zur Richtung und Polarisierung des einfallenden Feldes ist im Allgemeinen unbekannt. Hinzu kommt die zufallsartige Mehrwegeausbreitung aufgrund von Reflexion, Beugung und Streuung, durch die das gleiche Signal aus mehreren unterschiedlichen Richtungen mit unterschiedlicher Polarisierung bei der Antenne ankommt.

Um die Übertragung über einen Funkkanal dennoch möglichst allgemein beschreiben zu können, existiert in der Literatur der Begriff des „Mean Effective Gain“, der zum Ziel hat, einen im Mittel gültigen Wert für den Antennengewinn anzusetzen. Dies kann auch Einflüsse durch Abschattung durch den Nutzer einschließen.

In der Literatur finden sich verschiedene Veröffentlichungen, die sich mit der mathematischen Modellierung sowie Messreihen zur Abschätzung des Mean Effective Gain befassen. Die Bestimmung des Mean Effective Gains kann entweder messtechnisch durch umfangreiche Mes-

sungen in der interessierenden Ausbreitungsumgebung erfolgen oder mittels eines Feldsimulators, der eine künstliche Ausbreitungsumgebung in einer geeigneten Messkammer nachahmen kann. Dies setzt jedoch voraus, dass die Umgebung geeignet modelliert wird. Ähnliches gilt für eine theoretische Bestimmung des Mean Effective Gain.

In [107] wird der Begriff Mean Effective Gain erstmals umfassend definiert und eine theoretische Methode zu dessen Analyse vorgestellt. Dort wird er als das Verhältnis der mittleren empfangenen Leistung einer Antenne zur gesamten mittleren einfallenden Leistung in horizontaler und vertikaler Polarisation entlang einer zufälligen Bewegungsbahn in einer bestimmten Ausbreitungsumgebung beschrieben. Zur rechnerischen Bestimmung wird demnach das vollständige 3D-Antennendiagramm sowie die statistische Verteilung der Einfallswinkel der Wellen sowie die Leistungsverteilung auf die beiden Polarisationsebenen benötigt. Sofern dauerhaft nur aus einer Richtung ein Signal einfällt und dies auch nur in einer einzigen Polarisationsebene, wie im Falle von direkter Sichtverbindung, entspricht der Mean Effective Gain dem Antennengewinn unter dem Winkel und dieser Polarisation. Entlang des Azimutwinkels in der Horizontalebene kann bei zufälliger Bewegung und Orientierung des Nutzers angenommen werden, dass die Wellen im Mittel aus unterschiedlichen Richtungen mit gleicher Wahrscheinlichkeit einfallen. Für die Elevation hingegen ist eine derartige vereinfachende Annahme nicht begründbar. Allerdings gehen einige Modelle davon aus, dass die Energie in der horizontalen Ebene konzentriert ist. In [107] wird die Leistungsverteilung gaußverteilt um einen mittleren Elevationswinkel angenommen, was sich auch in den Messungen entlang zweier Teststrecken in Tokio so bestätigt. Weiterhin wird anhand eines Halbwellendipols gezeigt, dass sich der Mean Effective Gain für unterschiedliche Neigungen des Dipols aus der Vertikalachse unterscheidet. Hier zeigt sich ein grundsätzliches Problem der praktischen Anwendbarkeit bei Smartphones der in dieser Veröffentlichung angestellten Untersuchungen, denn die Neigung der Antenne wird bezogen zur Vertikalachse entlang der horizontalen Bewegungsbahn prinzipiell als konstant angenommen. Dies ist bei einem bewegten Smartphone so jedoch keine realistische Annahme. Stattdessen kann sich die Orientierung je nach Nutzungssituation ändern. Dies wird neben anderen Aspekten in [108] thematisiert und die Beschreibung des Mean Effective Gain um eine Mittelung über die Orientierung der Antenne erweitert. [109] geht speziell im Zusammenhang mit dem Mean Effective Gain besonders auf die Verteilung der Einfallswinkel ein. Im Gegensatz zu [107] ergibt sich hier für Messungen im Stadtkern von Helsinki für die Verteilung der Elevationswinkel eine zweiseitige Exponentialfunktion anstelle der Gaußverteilung. Bei der Anwendung der ermittelten Daten auf mehrere typische Endgeräteantennen variierte der Mean Effective Gain von ungefähr -5 dBi im freien Raum bis unter -11 dBi neben einem Kopfmodell. Damit liegt der Wert deutlich unterhalb des Antennengewinns von 0 dBi, der laut dieser Veröffentlichung typischerweise bei der Auslegung von Mobilfunksystemen angesetzt wird. Ein weiteres Fazit dieser Veröffentlichung ist, dass die Unterschiede zwischen verschiedenen Ausbreitungsumgebungen bei den meisten Antennen weniger Auswirkungen auf den Mean Effective Gain haben als die Unterschiede zwischen verschiedenen Antennen.

In [110] wird der Mean Effective Gain im Zusammenhang mit Mikrozellen – damit sind Kleinzellen (oft auch als „Small Cells“ bezeichnet) gemeint, deren Basisstationen unterhalb der Dachebene installiert sind – und Sichtverbindung zur Basisstation in Tokyo untersucht. Der wesentliche Unterschied zu den vorgenannten Veröffentlichungen ist, dass hier vor allem die Sichtverbindung betrachtet wird, was wiederum völlig andere Verteilungen der einfallenden

Leistung in Azimut (gauß- anstatt gleichverteilt) und Elevation (stärkere Konzentration in der Horizontalebene) bedeutet. Für unterschiedliche Bedingungen reichten die Werte für die mittlere Abweichung zwischen berechnetem und gemessenen Mean Effective Gain von 2,1 dB bis 4,5 dB. Aussagen über die allgemeingültige Höhe des Mean Effective Gain lassen sich in dieser Studie nicht sinnvoll entnehmen, da die Werte zwar entlang der untersuchten Strecke, aber für eine feste Orientierung der Antenne zur Basisstation gemessen und aufgeführt wurden. Eine andere Studie [111] befasst sich mit der Kombination von zwei Antennen unterschiedlichen Typs zur Ausnutzung der Diversität und der Auswirkung unterschiedlicher Designparameter und verschiedenen Wellenausbreitungsbedingungen. Die Betrachtung ist auch insofern interessant, als dass die Nutzung mehrerer Empfangsantennen zur Ausnutzung der Diversität in heutigen Endgeräten Standard ist. Dadurch soll unter möglichst vielen Empfangssituationen ein guter Empfang gewährleistet werden, indem die Antennen unter möglichst unterschiedliche Empfangsbedingungen (Einfallrichtung, Polarisation) jeweils ihre beste Leistung erbringen. Die beiden untersuchten Antennen erzielen maximale Mean Effective Gains von -3,5 dBd und -1,3 dBd. Für ein typisches Leistungsverhältnis der Polarisations Ebenen zeigt die Studie außerdem, dass die Werte des Mean Effective Gain um 3 dB bis 5 dB bei den untersuchten Antennen variieren, wenn sie aus der Vertikal- in die Horizontalebene gedreht werden [111].

Eine Untersuchung zu den Verlusten durch den Nutzer (Body Loss) beim Mean Effective Gain wurde in [112] mit zwölf Testpersonen an sieben Endgeräten in zwei Frequenzbändern und mit zwei Basisstationen durchgeführt. Der Mean Effective Gain der verschiedenen Geräte unterscheidet sich im freien Raum um mehrere dB und liegt in manchen Fällen bei bis zu etwa 8 dB. Für den mittleren Body Loss ergibt sich ein Bereich von 0 bis 15 dB über alle Messungen, wobei die Werte mehrheitlich unterhalb von 6 dB liegen. Außerdem wird gezeigt, dass bei Normalisierung mit den Mittelwerten und Standardabweichungen der jeweiligen Messungen sich über alle Messungen hinweg annähernd eine Gaußverteilung für den Body Loss ergibt.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass es zwar diverse Untersuchungen zum Mean Effective Gain gegeben hat, diese bislang jedoch weder ein allgemeingültig auf Smartphones anwendbares Modell geliefert haben noch allgemein übertragbare Zahlenwerte ermittelt haben, die sich unmittelbar nutzen ließen. Daher wurden im Rahmen der vorliegenden Studie entsprechende Untersuchungen vorgenommen, um realistische Wertebereiche für die Umrechnung von Signalstärkewerten zur Feldstärke zu erhalten und eine Abschätzung der zu erwartenden Schwankungsbreite vorzunehmen. Außerdem sind die meisten Forschungsaktivitäten bereits weit über 10 Jahre alt, sodass die konkreten Eigenschaften heutiger Smartphone-Antennen und der heutige Aufbau der Geräte nicht zwangsläufig durch diese Forschungsergebnisse abgedeckt sind.

Neben dem Mean Effective Gain gibt es weitere Kenngrößen, um die Leistungsfähigkeit von Antennen zu beschreiben. Eine dieser Messgrößen ist die Total Isotropic Sensitivity (TIS). Eine sehr umfangreiche Messreihe, die sich mit der Empfängerempfindlichkeit und deren Abhängigkeit vom Nutzereinfluss aufgrund von der Haltung des Smartphones in der linken oder rechten Hand untersucht hat, findet sich in [113–117]. Die von der irischen Commission for Communications Regulation durchgeführte Messreihe wird regelmäßig im Abstand weniger Jahre an aktuellen, verbreiteten Smartphone-Modellen wiederholt. Die Total Isotropic Sensitivity hängt von der Antenne und dem Empfänger ab und ist ein Maß für die mittlere Empfindlichkeit

über die gesamte dreidimensionale Sphäre gemittelt. Die Sendeleistung einer emulierten Basisstation wird dafür soweit abgesenkt, dass gerade noch eine Verbindung hergestellt werden kann. Je niedriger der bestimmte Wert ausfällt, desto empfindlicher ist das Gerät. Die TIS stellt leider nicht direkt einen Umrechnungsfaktor zu Feldstärkewerten dar, dennoch liefern die Messwerte interessante Aussagen. So ergibt sich Beispiel ein nur leicht unterschiedliches Ergebnis zwischen beiden Händen über alle Frequenzbänder hinweg. Die Unterschiede zwischen der Empfindlichkeit verschiedener Geräte wiederum fallen in Abhängigkeit des Frequenzbands wiederum größer aus. Die Werte unterscheiden sich um etwa 6–10 dB.

Einen weiteren interessanten Anhaltspunkt liefern Untersuchungen zum Einfluss durch den Nutzer bei Exposimetern, da Smartphones je nach Situation vergleichbar wie am Körper getragenen Exposimetern beeinflusst werden können. Allerdings unterscheiden sich Exposimeter durch ihre in der Regel bessere Isotropie von Smartphones. Der Nutzereinfluss resultiert aus Abschattung, Reflektion und Absorption der elektrischen Felder durch den Körper des Nutzers. Diese Mechanismen hängen stark von der Frequenz und der Polarisation ab. Eine umfangreiche Übersichtsarbeit über Unsicherheiten bei Messreihen mit Exposimetern ist in [118] zu finden. In den zusammengestellten Veröffentlichungen wurde eine maximale Dämpfung von 30 dB für vertikal polarisierte Wellen festgestellt. Der größte Wertebereich des Nutzereinflusses wurde bei Messungen eines UMTS-Signals im Downlink bei vertikaler Polarisation gefunden und reichte von -29 dB bis 5,5 dB, bei einem Mittelwert von -4,0 dB und einer Standardabweichung von 10,7 dB. Bei horizontaler Polarisation reichten die Werte von -17 dB bis 4 dB. Die kleinste Variation wurde bei vertikal polarisierten UKW-Signalen von -12 dB bis -4 dB ermittelt. Weiterhin wird von Studien berichtet, in denen unter der Annahme, dass im Mittel alle Einfallswinkel zwischen Exposimeter und Signalquelle gleichwahrscheinlich sind und auch die Polarisation gleichverteilt ist, ein frequenzabhängiger Korrekturfaktor für das elektrische Feld im Bereich von 1 bis 1,6 ermittelt wurde, um die mittlere Unterschätzung durch den Nutzereinfluss auszugleichen. Allerdings wird eingeschränkt, dass die Beschreibung des Nutzereinflusses durch einen einzigen Korrekturfaktor in alltäglichen Situationen schwierig ist und es hierdurch sowohl zu Über- als auch Unterschätzungen kommt.

In [118] wird außerdem über Veröffentlichungen berichtet, die zeigen, dass das gleichzeitige Tragen mehrerer Exposimeter und die Mittelung über deren Messergebnisse zu einer geringeren Unterschätzung und einer geringeren Unsicherheit als beim Einsatz nur eines Exposimeters führen kann. Auch wenn in den meisten Fällen nicht mehrere Smartphones am Körper getragen werden, sind diese Ergebnisse ein Indiz dafür, dass auch bei einem Messnetzwerk eine Verringerung des Nutzereinflusses durch mehrere Messungen, die potentiell von unterschiedlichen Nutzern in unterschiedlichen Nutzungssituationen aufgezeichnet wurden, erzielt werden kann.

2.5 Zusammenfassung & Fazit

Die vorliegende Aufarbeitung des relevanten Standes von Wissenschaft und Technik hat wichtige Aspekte im Hinblick auf die Umsetzung eines crowdsourcingbasierten Immissionsmonitorings mithilfe von Smartphones, wie die in den Mobilfunkstandards vorgesehenen Messungen zur Beurteilung der Signalstärke und deren Verfügbarkeit innerhalb des Smartphone-Betriebssystems Android, adressiert. Weiterhin wurden die bestehenden Arbeiten des Auftragnehmers

sowie anderer Stellen vorgestellt und die sich daraus ergebenden Konsequenzen für die Machbarkeit eines HF-Messnetzwerks diskutiert.

Vor diesem Hintergrund kann festgehalten werden, dass in den verbreiteten Mobilfunkstandards der zweiten bis vierten Generation Messparameter vorhanden sind, die aufgrund ihrer Definition einen starken Zusammenhang mit der Immission des Mobilfunk-Downlinks aufweisen. Dies ist eine Grundvoraussetzung für die Erlangung von Informationen über die Höhe der Immission. Eine weitere wichtige Voraussetzung ist die Möglichkeit, die vom Modem des Endgeräts gemessenen Signalstärkeindikatoren innerhalb des Smartphone-Betriebssystems auslesen und speichern zu können. In Abschnitt 2.1 konnte gezeigt werden, dass bis auf einzelne Ausnahmen (z.B. Anzahl der Verkehrskanäle bei GSM oder Anzahl der genutzten Antennen-Ports bei LTE) die relevanten Informationen für eine Immissionsabschätzung abgerufen werden können, wenn auch zum Teil erst in neueren Betriebssystemversionen. Damit kann diese Voraussetzung ebenfalls als erfüllt angesehen werden.

Der Überblick über bestehende Arbeiten macht weiterhin deutlich, dass ein klarer Zusammenhang zwischen den Messgrößen der Smartphones und der Feldstärke besteht, sofern diese korrekt interpretiert werden. Dennoch ist es eine wichtige Aufgabe, die Unsicherheiten, die sich durch Nutzereinflüsse und die Richtungsabhängigkeit des Empfangs der Smartphones ergeben, im Mittel abzuschätzen, um eine Unterschätzung der Immission zu vermeiden. Erste Ansätze zur Lösung wurden bereits in der Literatur durch entsprechende Extrapolationsfaktoren gezeigt. Ein offener Punkt ist der Effekt, der durch die Vergrößerung der Datenbasis durch Crowdsourcing erzielt werden kann. Dies ist aus der Literatur nicht zu entnehmen.

Aufgrund der Erkenntnisse der Literaturstudie ergeben sich daher keine ersichtlichen Hinderungsgründe, die eine Umsetzbarkeit eines Messnetzwerks grundsätzlich ausschließen würden. Vielmehr zeigt sich, dass die Voraussetzungen prinzipiell gegeben sind und der Ansatz Potenzial besitzt. Die Literaturstudie hat allerdings auch gezeigt, dass die Fragestellung der Machbarkeit bisher nicht ausreichend beantwortet wurde. Zwei wesentliche Aspekte wurden daher im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie untersucht, die bislang nicht zufriedenstellend in der Literaturlandschaft abgebildet waren. Zum einen wurde der Zusammenhang zwischen Signalstärkeindikatoren und elektrischer Feldstärke anhand von Messungen eingehend untersucht, zum anderen wurde anhand zweier unter realistischen Bedingungen erhobenen Crowdsourcingdatenpaketen der Einfluss der Vergrößerung der Datenbasis durch viele Smartphones praktisch analysiert.

3 Untersuchung der Messeigenschaften von Smartphones

In diesem Kapitel geht es um die mit Smartphones erzielbare Feldstärkemessgenauigkeit bei der Erfassung von Signalstärkeindikatoren. Außerdem werden Einflussfaktoren, die die Genauigkeit beeinträchtigen können, untersucht und deren Auswirkungen quantifiziert. Hierfür werden in einem ersten Schritt die physikalischen Eigenschaften der Messwertaufnahme und ihre Auswirkungen auf die Immissionsmessung betrachtet, bevor im Weiteren die Bestimmung von Umrechnungsfaktoren von Smartphone-Messwerten zu Feldstärkewerten im Vordergrund steht.

3.1 Vorstellung der für die Messungen verwendeten App „CellViewer“

Wie bereits in Abschnitt 2.2.6 erwähnt, verfügt der Projektnehmer über eine eigens entwickelte Android-App, um Signalstärkemesswerte von Smartphones aufzeichnen zu können. Sie trägt den Arbeitstitel „CellViewer“. Zur effizienten Durchführung der für die Studie vorgesehenen Messungen, wurde die App für diese Aufgabe optimiert. Abbildung 3-1 zeigt Bildschirmfotos der verschiedenen Ansichten der Anwendung.

Folgende wesentliche Funktionen weist die Smartphone-Anwendung auf:

- Erfassung von Signalstärkeindikatoren: Es werden sämtliche verfügbaren Signalstärkeindikatoren und Informationen zu den erfassten Funkzellen ausgelesen und gespeichert. Die wichtigsten Parameter werden in der Hauptansicht der App als Zahlenwert angezeigt, sowie als Graph mit dem Zeitverlauf der Signalstärke.
- Erfassung der Modemzeitstempel: Die Informationen zur Funkzelle werden im Android-System mit einem Zeitstempel versehen, der angibt, wann diese Information – also Signalstärkemessung inkl. der Parameter zu Frequenz und Zell-ID – aus dem Modem erhalten wurde. Diese Zeitstempel werden auch aufgezeichnet, um in Verbindung mit dem Zeitstempel seit Systemstart das Alter der Information sowie die Aktualisierungsrate ermitteln zu können. Der Auslesemechanismus der App ruft in regelmäßigen Abständen (standardmäßig alle 0,5 Sekunden) die Informationen zu den Funkzellen aus. Durch den Modemzeitstempel kann unterschieden werden, ob die ausgelesene Information neu oder schon bekannt ist. Für die Nutzung ist nur eine neue aktualisierte Information aus dem Modem relevant.
- Erfassung der Nachbarzellen: Die Smartphone-Anwendung konnte so erweitert werden, dass sie die Messungen der Nachbarzellen zusätzlich erfasst. Die Funktion war jedoch erst im Laufe der Bearbeitung des Projekts verfügbar, sodass sie nicht von Anfang an genutzt werden konnte. Daher wurden diese Informationen nur bei einem Teil der Messungen erfasst und auch nur teilweise, wo es sinnvoll erschien, in den Auswertungen mit einbezogen. An entsprechenden Stellen wird auf die Nutzung der Nachbarzellmessungen hingewiesen.

- Speicherung der Ergebnisse: Die gesammelten Messdaten werden bei jedem Auslesevorgang in einer CSV-Datei im ASCII-Format zeilenweise gespeichert. Werden auch Nachbarzellen erfasst, wird für jede Zelle eine eigene Zeile geschrieben. Insgesamt werden knapp über 100 Einzelparameter erfasst, wobei jeweils nur die Einträge für denjenigen Funkdienst belegt sind, die für diesen relevant sind. Die Messdaten können direkt aus der App in die Cloud hochgeladen werden oder alternativ über die USB-Schnittstelle auf den PC zur Auswertung geladen werden.
- Automatische Benennung von Messdateien mit dem zugehörigen Messpunkt: Zur erleichterten und effizienteren Durchführung der Messungen unter Feldbedingungen wurde die Benennung der Messdateien automatisiert. Anhand des Standorts wird die jeweilige Messpunktnummer zugeordnet. Weiterhin werden neben dem Zeitstempel der gemessene Funkstandard und Netzbetreiber zum Zwecke der späteren Sortierung in den Dateinamen eingefügt.
- Vorkonfigurierbare Knöpfe zur Benennung von Messungen: Um die Ausrichtungsmessungen sowie die Messungen zum Nutzereinfluss effizient durchführen zu können, wurde die Anwendung derart angepasst, dass beim Starten einer Messung aus einer Liste vorkonfigurierter Bezeichnungen gewählt werden kann, damit die jeweilige Messung eindeutig einer Ausrichtung etc. zugeordnet werden kann.
- Timer-Funktion: Die Anwendung wurde um eine Timer-Funktion ergänzt, die es erlaubt eine Aufzeichnung von Messdaten für eine definierte Dauer laufen zu lassen und mit einer vorgegebenen Verzögerung zu starten, um eine Beeinflussung der Messung durch die Hand der bedienenden Person zu vermeiden. Damit auch dann, wenn das Display nicht eingesehen werden kann, die Zeitpunkte von Start und Stopp der Messung bekannt sind, kann jeweils ein akustisches Signal ausgegeben werden.
- Liste mit Wechseln der Funkzelle: In einigen Situationen kann es relevant sein zu wissen, ob ein Wechsel der verbundenen Funkzelle aufgetreten ist. Daher wurde eine Liste hinzugefügt, die sämtliche Zellwechsel seit dem Start der Anwendung bzw. Start der letzten Messung aufführt. Außerdem kann bei Zellwechseln auch ein akustisches Signal ausgegeben werden, damit diese sofort bemerkt werden können.

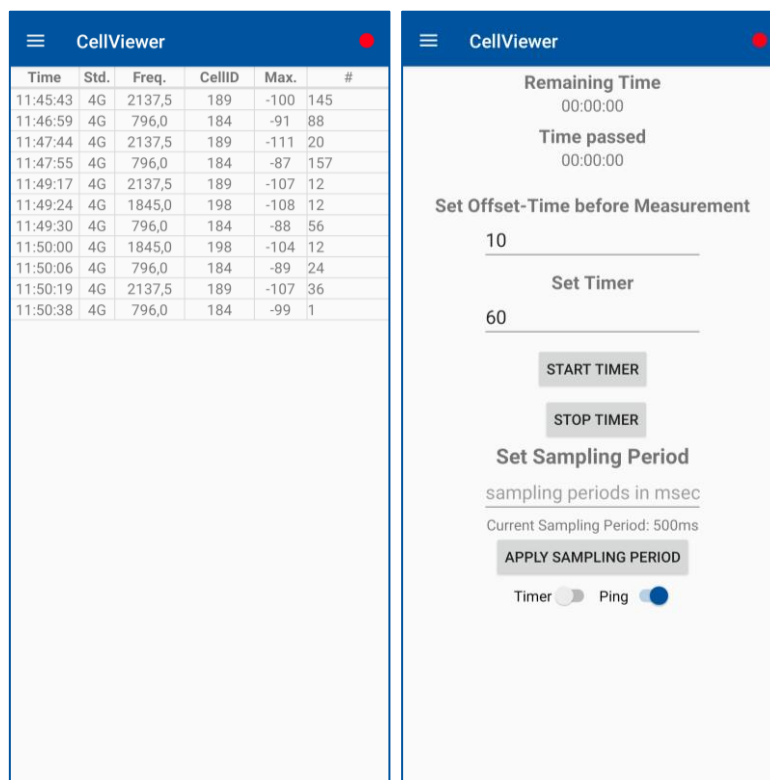
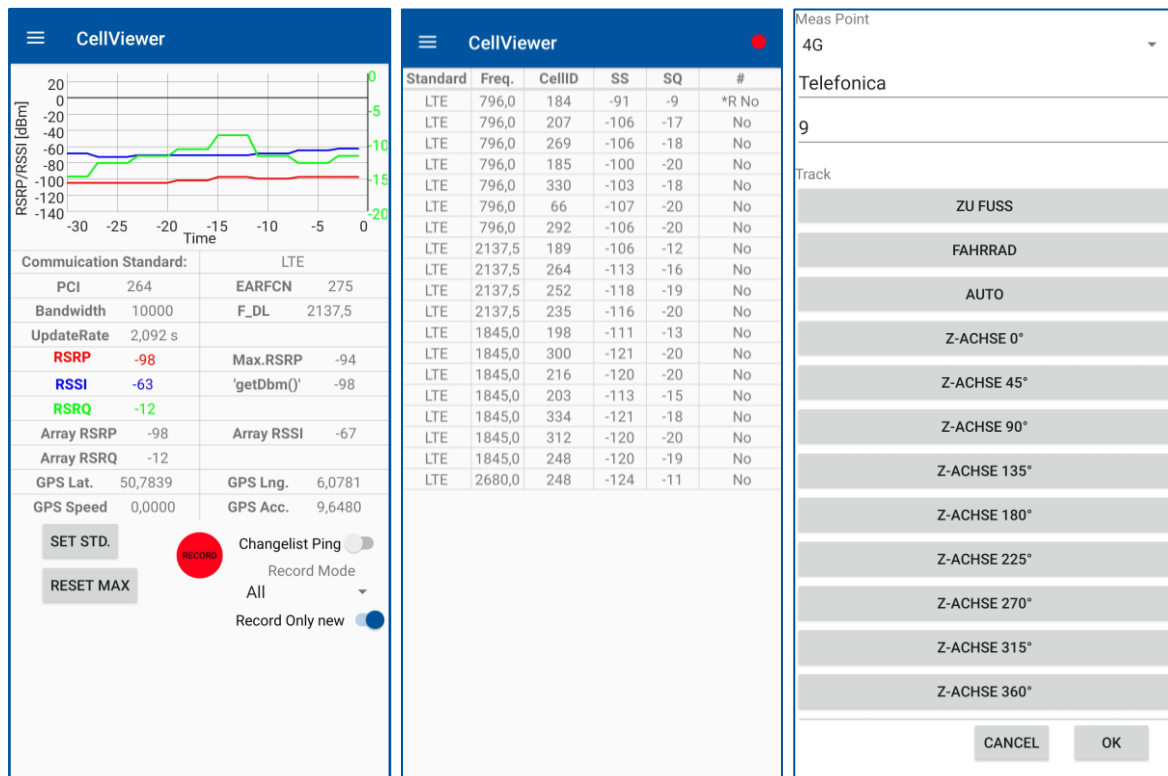


Abbildung 3-1 Ansichten der weiterentwickelten Messanwendung.
 Oben links: Ansicht der aktuellen Informationen zur verbundenen Funkzelle.
 Oben Mitte: Ansicht der Nachbarzellmessungen.
 Oben rechts: Ansicht beim Starten einer Messung mit automatischer Benennung (oben) bzw. Auswahlmöglichkeit vorkonfigurierter Messsituationen
 Unten links: Ansicht der aufgetretenen Wechsel der Funkzelle
 Unten rechts: Ansicht der Timer-Funktion

3.2 Untersuchte Smartphones

Im Folgenden wird die Auswahl der für die Messungen verwendeten Smartphones vorgestellt.

3.2.1 Auswahlkriterien der für die Messungen verwendeten Endgeräte

Aufgrund der immensen Anzahl verschiedener am Markt verfügbarer Smartphones kann nur ein kleiner Ausschnitt in den nachfolgenden Untersuchungen berücksichtigt werden. Die untersuchten Endgeräte wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Abdeckung verschiedener Hersteller.
- Spitzenmodelle und einfachere Modelle
- Sehr aktuelle bis etwas ältere Modelle
- Verfügbarkeit der Geräte

Um die Kosten des Projekts sowohl hinsichtlich der Anschaffungskosten von Geräten als auch der Kosten des Beschaffungsaufwands gering zu halten, wurde für die Untersuchungen überwiegend auf Geräte der Mitarbeiter des Instituts zurückgegriffen. Da viele Geräte nur einmalig benötigt wurden, wäre eine Anschaffung nicht sinnvoll gewesen. Durch wechselnde Verfügbarkeiten der Geräte unterscheidet sich jedoch teilweise die Zusammensetzung der Geräteauswahl bei einzelnen Messungen. Da die Auswahlkriterien dennoch stets erfüllt sind, stellt dies hinsichtlich der Gesamtaussagekraft der Ergebnisse keine Einschränkung dar.

3.2.2 Übersicht über die untersuchten Smartphones

Tabelle 3-1 zeigt sämtliche 40 Smartphones, die bei Messungen zum Einsatz kamen. Neben der Herstellerbezeichnung für das jeweilige Modell wird auch der Type Allocation Code, der zur Identifizierung eines Endgerätetyps dient, der Chipsatz des Endgeräts sowie das Veröffentlichungsdatum aufgeführt.

Bei dem Gerät Samsung Galaxy S8 handelt es sich um ein mit der Software QualiPoc von Rohde & Schwarz ausgestattetes Gerät, was auch eine spezielle Firmware beinhaltet. Es ist nicht auszuschließen, dass sich das Verhalten dieses Geräts vom üblichen Verhalten dieses Modells ohne diese Manipulation unterscheidet.

Hersteller	Modellbezeichnung	Modellnummer	TAC	Chipsatz	Veröffentlichungsdatum
Fairphone	3	3	35781109	Qualcomm Snapdragon 632	2019
Google	Nexus 5	D821	35824005	Qualcomm Snapdragon S800 MSM8974	2013
Google	Pixel 3	-	99001200	Qualcomm Snapdragon 845	2018
Google	Pixel 4	-	35293210	Qualcomm Snapdragon 855	2019
Google	Pixel 4a 5G	-	35876110	Qualcomm Snapdragon 730G	Mai 2020
Honor	7X	BND-L21	86889303	Huawei HiSilicon KIRIN 659	Dezember 2017
Huawei	P10	VTR-L09	86278903	HiSilicon Kirin 960	Februar 2017
Huawei	P10	VTR-L09	86554503	HiSilicon Kirin 960	Februar 2017
Huawei	P20 Lite	ANE-LX1	86546404	Huawei HiSilicon KIRIN 659	2018
Huawei	P30 Pro	VOG-L29	86094504	Huawei HiSilicon KIRIN 980	März 2018
Lenovo	Vibe K6 Note	-	86157603	Qualcomm MSM8937 Snapdragon 430	2016
LG	G5	H850	35765707	Snapdragon 820	Februar 2016
Mi/Xiaomi	Redmi 4A	2016117	86540803	Qualcomm Snapdragon 425 MSM8917	2017
Motorola	Moto G4 Play	XT1602	35414407	Qualcomm Snapdragon 410 MSM8916	August 2016
Motorola	Moto G5 Plus	-	35185908	Qualcomm Snapdragon 625 MSM8953	2017
Motorola	One	-	35554109	Qualcomm Snapdragon 625 MSM8953	2018
Nokia	8	TA-1004	35602708	Qualcomm Snapdragon 835 MSM8998	2017
OnePlus	6	-	86929503	Qualcomm Snapdragon 845	2018
OnePlus	6	-	86929503	Qualcomm Snapdragon 845	2018
OnePlus	6	-	86929503	Qualcomm Snapdragon 845	2018
OnePlus	6T	-	86624104	Qualcomm Snapdragon 845	2018

Hersteller	Modellbezeichnung	Modellnummer	TAC	Chipsatz	Veröffentlichungsdatum
OnePlus	OnePlus Nord	N10 5G	86795804	Qualcomm Snapdragon 690 5G	August 2020
Samsung	Galaxy A1	SM-A515F	35319456	Samsung Exynos 7 Octa 9611	Dezember 2019
Samsung	Galaxy A3	SM-A320FL	35975108	Samsung Exynos 7870	2017
Samsung	Galaxy A3	SM-A320FL	35975108	Samsung Exynos 7870	2017
Samsung	Galaxy A41	SM-A415F	35414611	MediaTek Helio P65 (MT6768)	April 2020
Samsung	Galaxy S 6	SM-G920F	85431408	Samsung Exynos 7 Octa 7420	2015
Samsung	Galaxy S20 Ultra 5G SD865	SM-G988B	35182811	Qualcomm Snapdragon 865	2020
Samsung	Galaxy S20 Ultra 5G SD865	SM-G988B	35182811	Qualcomm Snapdragon 865	2020
Samsung	Galaxy S4	GT-I9515	35584706	Samsung Exynos 5 Octa 5410	2013
Samsung	Galaxy S4	GT-I9515	35676106	Samsung Exynos 5 Octa 5410	2013
Samsung	Galaxy S6 Edge+	SM-G925F	35642007	Exynos 7420	2015
Samsung	Galaxy S7 Edge	SM-G935F	35733007	Samsung Exynos 8 Octa 8890	Februar 2016
Samsung	Galaxy S8	SM-G950F	35462609	Samsung Exynos 9 Octa 8895	2017
Sony	Xperia XZ1 Compact	-	35835408	Qualcomm Snapdragon 835 MSM8998	2017
Sony	Xperia Z5 Compact	E5823	35428207	Qualcomm MSM8994	2015
WileyFox	Storm	-	35444807	Qualcomm Snapdragon 615 MSM8939	2015
Xiaomi	Redmi Note 7	M1901F7G	86264304	Qualcomm Snapdragon 660 MSM8976 Plus	Januar 2019
Xiaomi	Redmi Note 8 Pro	M1906G7G	86890904	Mediatek Helio G90T	August 2019
ZTE	Axion 7	A2017	86095203	Qualcomm Snapdragon 820 MSM8996	2017

Tabelle 3-1 Liste der untersuchten Smartphones

3.3 Untersuchung der physikalischen Eigenschaften der Messwertaufnahme und Auswirkungen auf die Immissionsmessung

In diesem ersten messtechnischen Untersuchungsschritt werden die relevanten Eigenschaften der Messwertaufnahme bei den Signalstärkeindikatoren der verschiedenen Mobilfunkstandards analysiert. Hiermit sind Eigenschaften wie die Mittelung der Messwerte, Änderungsraten bzw. -geschwindigkeiten bei plötzlichen Signalpegeländerungen sowie die Frequenzbandbreite, über die die Messung erfolgt, gemeint. Weiterhin umfasst dies die Wertebereiche und Limits, die die Pegel tatsächlich erreichen. Darüber hinaus wird getestet inwieweit ein Übersprechen von anderen Bändern und anderen HF-Quellen Auswirkungen haben. Diese Tests werden an insgesamt fünf Geräten für die relevanten Signalstärkeindikatoren der einzelnen Funkdienste entsprechend der jeweiligen Anforderung unter Feld- oder Laborbedingungen durchgeführt.

Aufgrund des Umfangs der Messungen werden in diesem Bericht jeweils nur repräsentative Ausschnitte aus den Messergebnissen in den Abbildungen gezeigt.

3.3.1 Signalpegeländerungen

3.3.1.1 Ziel der Untersuchung

Ein wichtiger Aspekt für die Brauchbarkeit der Smartphone-Messungen ist die Geschwindigkeit, mit der die ausgegebene Signalstärke an eine neue Empfangssituation und damit auch an Änderungen in der Immissionssituation angepasst wird. Insbesondere bei Fortbewegung ist es wichtig, dass der Wert ausreichend schnell aktualisiert wird, damit am jeweiligen Standort ein korrekter Bezug zur Feldstärke besteht. Das Ziel der folgenden Untersuchung ist daher die Ermittlung der Zeitdauer bei abrupten Änderungen des Signalpegels, bis der vom Smartphone gemessene Signalpegel einen neuen konstanten Wert erreicht. Außerdem soll der Verlauf der Änderung sichtbar gemacht werden.

3.3.1.2 Durchführung

Das Smartphone wird in eine Metalldose gelegt, die mit einem Deckel schnell verschlossen und geöffnet werden kann. Dadurch können plötzliche Signalpegeländerungen am Smartphone erzeugt werden. Die Durchführung erfolgt im realen Mobilfunknetz der drei deutschen Netzbetreiber, da die Konfiguration vonseiten der Basisstation prinzipiell Einfluss auf diese Parameter nehmen könnte. Der vom Smartphone gemessene Signalstärkeverlauf des jeweiligen Referenzsignals (RSRP, RSCP, RSSI) wird parallel aufgezeichnet und anschließend hinsichtlich der Dauer bis zum Eintreten einer Signalstärkeänderung und Erreichen des neuen Zielwerts ausgewertet. Auch der Verlauf der Wertänderung und die auftretenden Stufen werden betrachtet. Daraus soll die Häufigkeit der Aktualisierung des Messwertes abgeleitet werden. Weitere Einflussfaktoren auf die Änderungsraten der Messwerte können im Android-Betriebssystem und der herstellerspezifischen Software-Schnittstelle zum Modem liegen. Der herstellerspezifische Einfluss wird durch die Einbeziehung von Endgeräten unterschiedlicher

Hersteller berücksichtigt. Der Einfluss des Betriebssystems und dessen Methoden zum Energiesparen auf die Aktualisierungshäufigkeit werden dadurch berücksichtigt, dass die Untersuchung sowohl bei ein- als auch ausgeschalteten Display wiederholt wird. Es werden die Modeminformationen der verbundenen Funkzelle aus der CellInfo-Klasse und, soweit verfügbar, auch der Wert aus der SignalStrength-Klasse ausgewertet (vgl. Abschnitt 2.2.4). Für diese Untersuchung wird die App derart eingestellt, dass sie möglichst häufig die Modeminformationen abfragt. Abhängig vom Endgerät lag die Ausleserate bei sieben bis neun Auslesevorgängen pro Minute.

Um zu vermeiden, dass die Sprünge des Signalpegels zu ständigen Zellwechseln führen, wurden die Messungen an Orten durchgeführt, an denen eine hohe Signalstärke vorherrscht, die derart dominant ist, dass auch bei einem plötzlichen Absturz des Signalpegels kein Zellwechsel erfolgt, da keine bessere Alternative vorhanden ist.

Eine einzelne Messung wurde über eine Zeitdauer von zweieinhalb Minuten durchgeführt, wobei nach jeweils 30 Sekunden zwischen geöffnetem und geschlossenem Zustand der Dose gewechselt wurde. Insgesamt ergibt sich damit die Abfolge: geöffnet – geschlossen – geöffnet – geschlossen – geöffnet. Die Zeitpunkte zum Öffnen und Schließen wurden mithilfe einer Intervallstoppuhr ermittelt. Diese wurde beim Beginn der Aufzeichnung der Messdaten auf dem Smartphone händisch gestartet. Um den Nutzereinfluss beim Starten der Messung zu verringern, startete die Messung erst 10 Sekunden nach der Aktivierung.

Die zeitliche Genauigkeit mit der die Dose geöffnet und geschlossen werden kann, wird auf etwa ± 1 s eingeschätzt. Es wurde so weit wie möglich versucht Einflüsse durch die ausführende Person zu vermeiden, indem die Person sich zwischen den Öffnungs- und Schließvorgängen von der Dose entfernt. Allerdings sind unmittelbar vor und nach dem Öffnen Einflüsse durch die Hand der Person unvermeidlich. In einzelnen Fällen sind diese Auswirkungen geringfügig in den Messergebnissen zu erkennen. Sie fallen jedoch klein gegenüber den erzeugten Pegelsprüngen aus.

Insgesamt lassen sich die folgenden potenziellen Fehlerquellen identifizieren:

- Zeitlicher Versatz durch verspätetes Starten der Intervallstoppuhr
- Zeitlicher Versatz beim Öffnen/Schließen der Dose
- Änderung des Empfangs des Smartphones durch geringfügiges Verrutschen in der Dose bzw. geringfügige Änderung der Orientierung/Lage der Dose durch die Öffnungs- und Schließvorgänge
- Abschirmung durch die ausführende Person, insbesondere die Hand unmittelbar vor und nach dem Öffnen der Dose
- Fluktuationen der vorherrschenden Signalstärke durch Passanten und in der Umgebung vorbeifahrende Fahrzeuge
- Lage des Aktualisierungszeitpunktes der Modeminformationen in Bezug auf die Öffnung/Schließung der Dose

Für die Untersuchung wurden die folgenden Smartphones ausgewählt:

- Motorola Moto G5 Plus
- Nokia 8

- OnePlus 6
- Samsung Galaxy S8
- Samsung Galaxy S 20 Ultra 5G
- Sony Xperia Z5 Compact

Alle diese Untersuchungen erfolgten derart, dass die Einstellungen zur Optimierung der Akkulaufzeit des Smartphones für die Messanwendung deaktiviert wurden. Andernfalls kann die Anwendung bei ausgeschaltetem Display je nach Energiesparstrategie des Herstellers entweder unmittelbar oder kurze Zeit nach ausschalten des Displays in der Ausführung unterbrochen oder ganz beendet werden.

3.3.1.3 Ergebnisse

Die Abbildungen 3-2 bis 3-4 zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung exemplarisch für das Smartphone „OnePlus 6“ in den drei deutschen Mobilfunknetzen, während die Abbildungen 3-5 bis 3-7 die Ergebnisse für das Smartphone „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ darstellen. Die Abbildungen sind wie folgt aufgebaut:

- Die jeweils linken Teilbilder zeigen den Signalverlauf bei eingeschaltetem Display, wohingegen die rechten Teilbilder den Verlauf für den Fall des ausgeschalteten Displays wiedergeben.
- Innerhalb der Teilbilder gibt der obere Graph jeweils den erfassten Signalstärkeverlauf an, während der untere Graph das Alter der Modeminformationen der CellInfo-Klasse darstellt.
- Der Werteverlauf der CellInfo-Klasse wird durch eine blaue Kurve repräsentiert und für die SignalStrength-Klasse in orange.
- Rote vertikale Linien markieren den Zeitpunkt des Beginns der Abschirmung durch das Schließen der Dose. Die grünen vertikalen Linien kennzeichnen den Zeitpunkt der Aufhebung der Abschirmung durch Öffnen der Metalldose.
- Gestrichelte vertikale Linien markieren Stellen, an denen ein Zellwechsel stattfand.

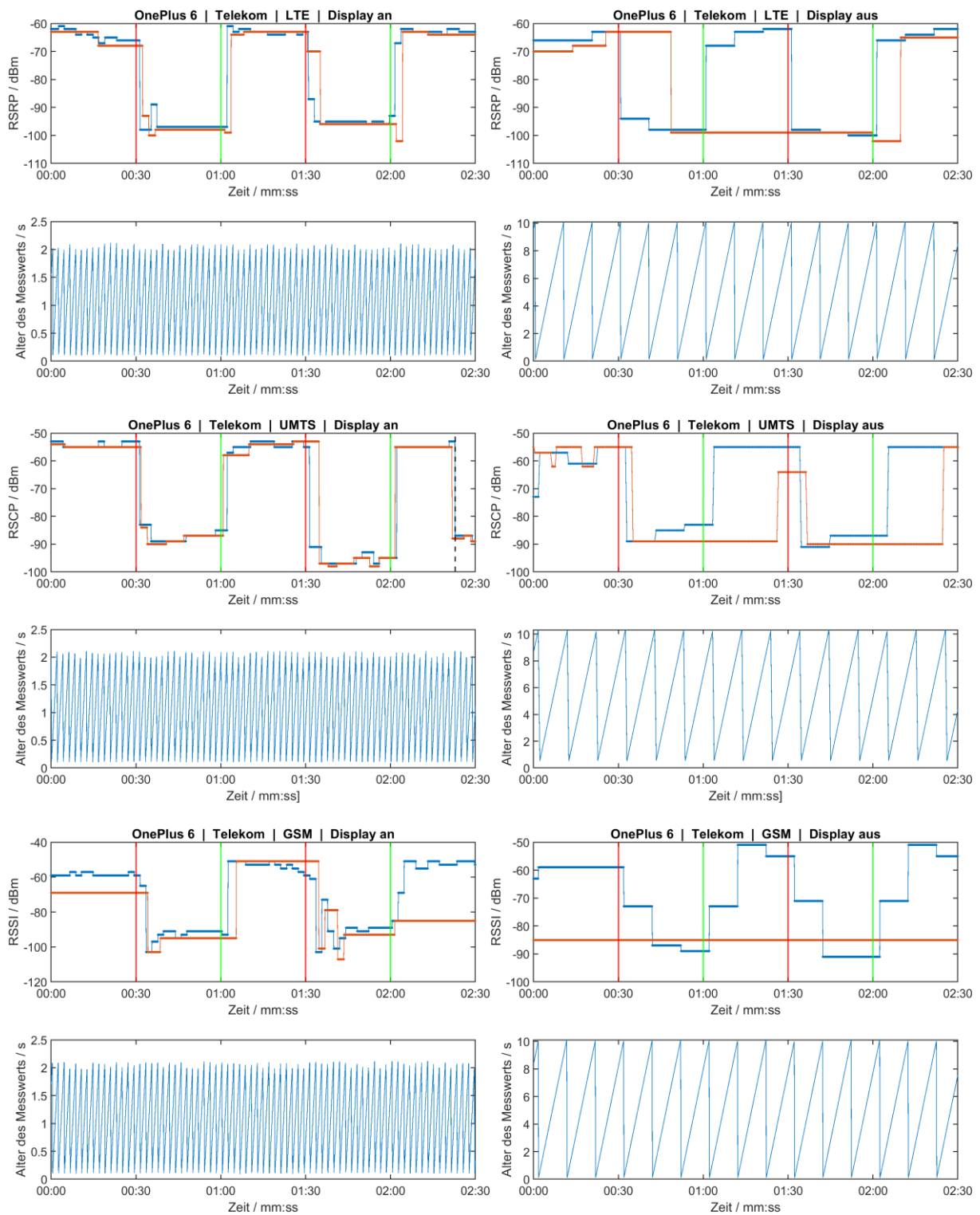


Abbildung 3-2 Verlauf der Signalstärke bei Signalpegelsprüngen am Beispiel des Smartphones „OnePlus 6“ im Telekom-Netz (Blaue Signalpegel: CellInfo-Klasse, Rote Signalpegel: SignalStrength-Klasse)

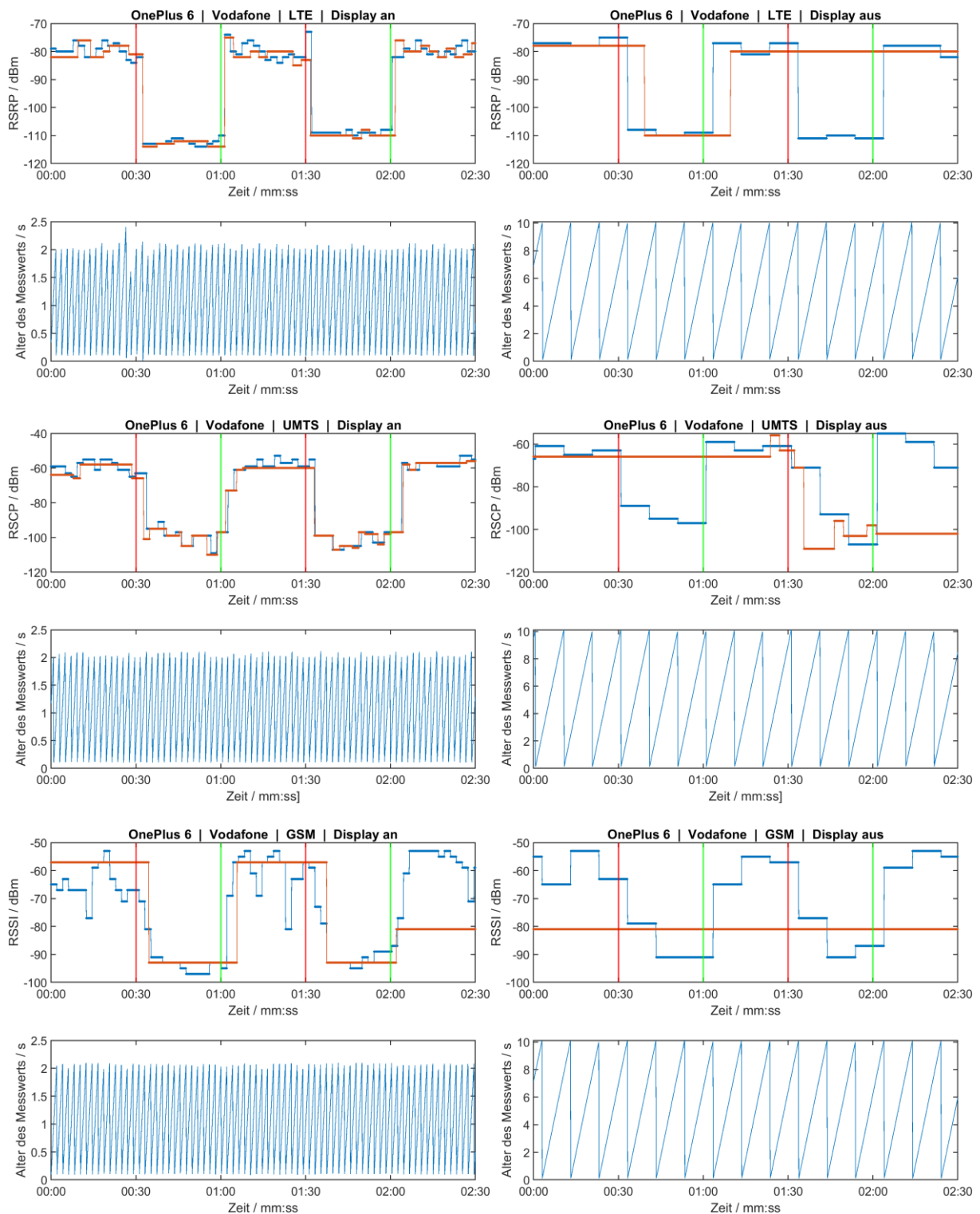


Abbildung 3-3 Verlauf der Signalstärke bei Signalpegelsprüngen am Beispiel des Smartphones „OnePlus 6“ im Vodafone-Netz (Blaue Signalpegel: CellInfo-Klasse, Rote Signalpegel: SignalStrength-Klasse)

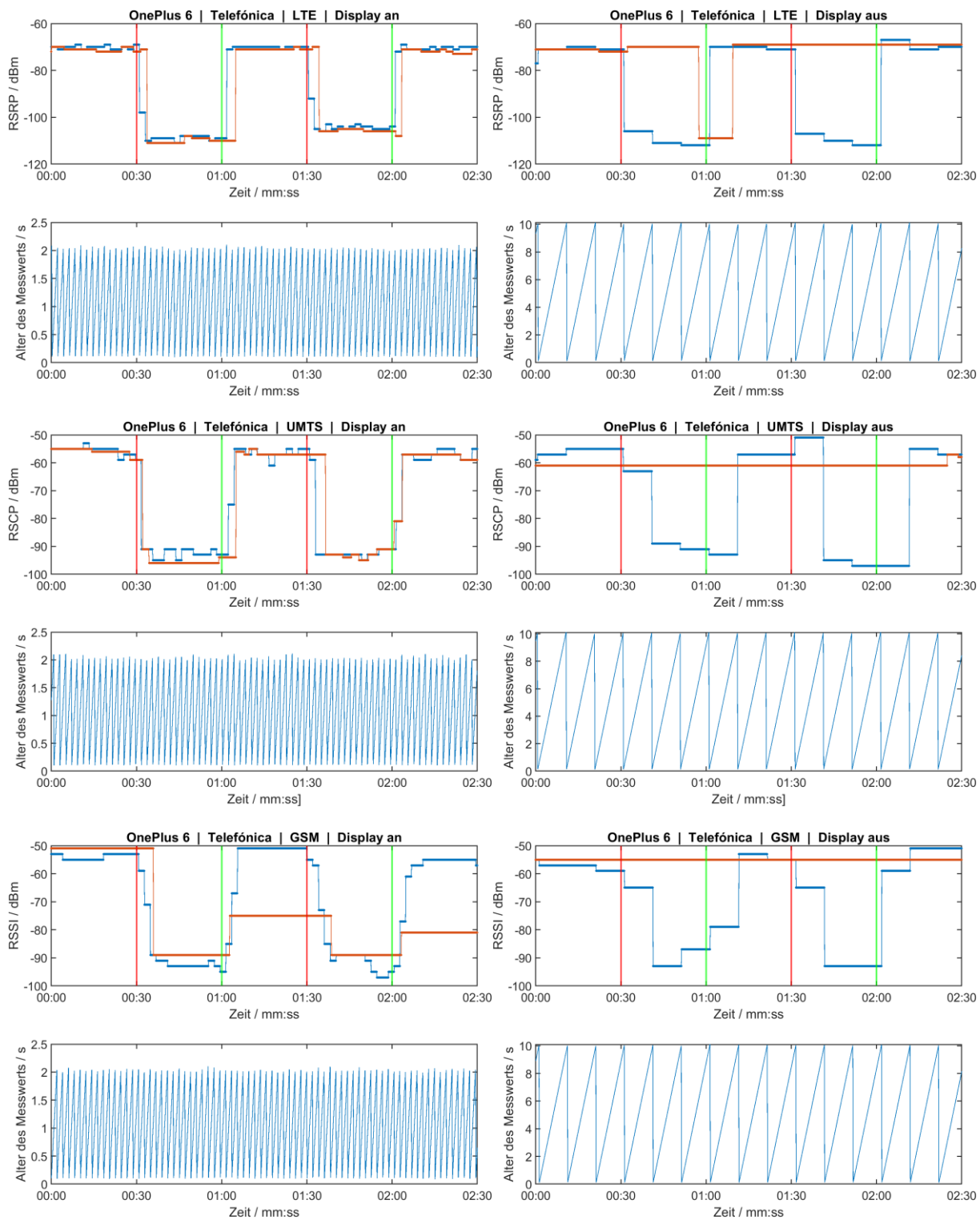


Abbildung 3-4 Verlauf der Signalstärke bei Signalpegelsprüngen am Beispiel des Smartphones „OnePlus 6“ im Telefónica-Netz (Blaue Signalpegel: CellInfo-Klasse, Rote Signalpegel: SignalStrength-Klasse)

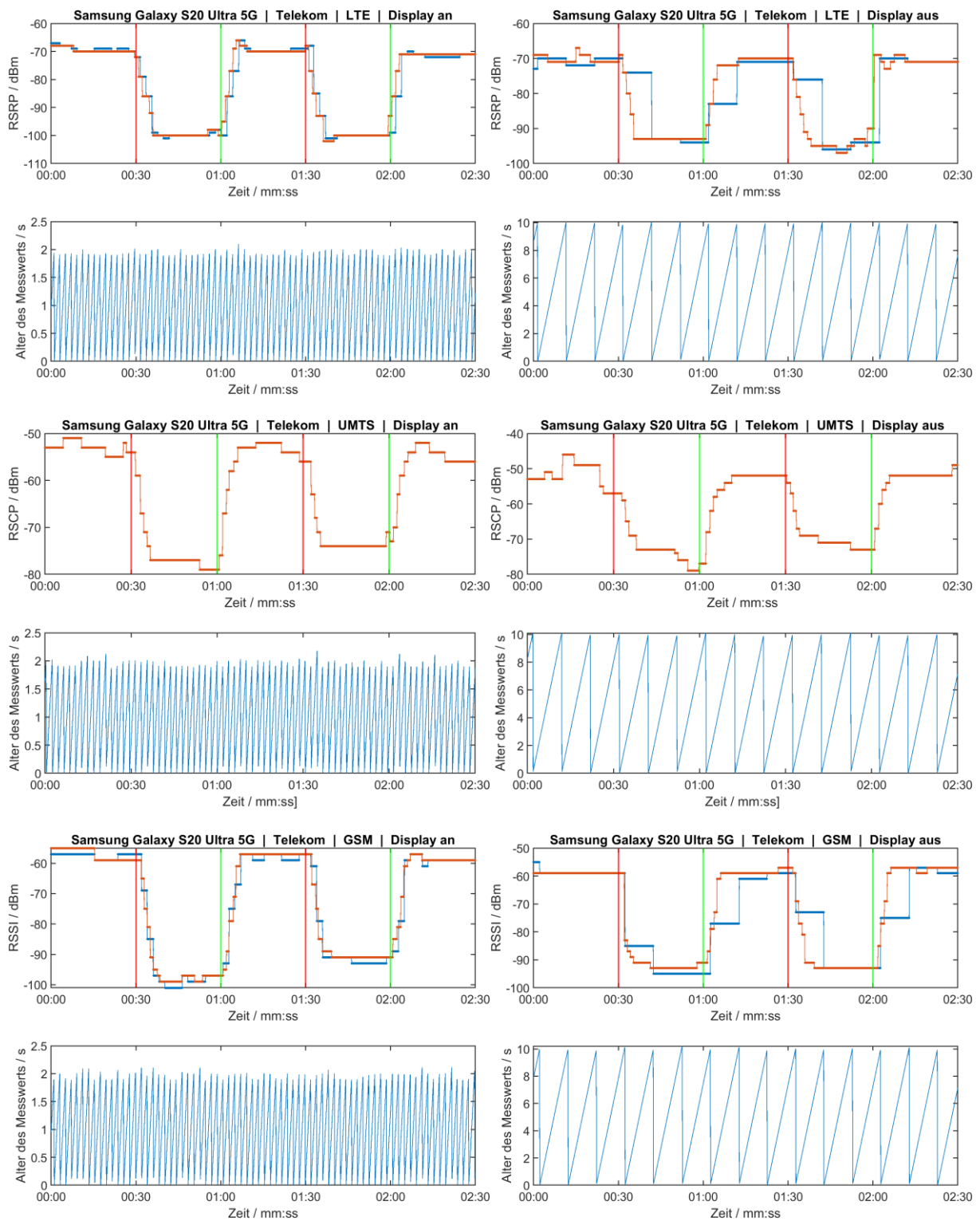


Abbildung 3-5 Verlauf der Signalstärke bei Signalpegelsprüngen am Beispiel des Smartphones „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ im Telekom-Netz (Blaue Signalpegel: CellInfo-Klasse, Rote Signalpegel: SignalStrength-Klasse)

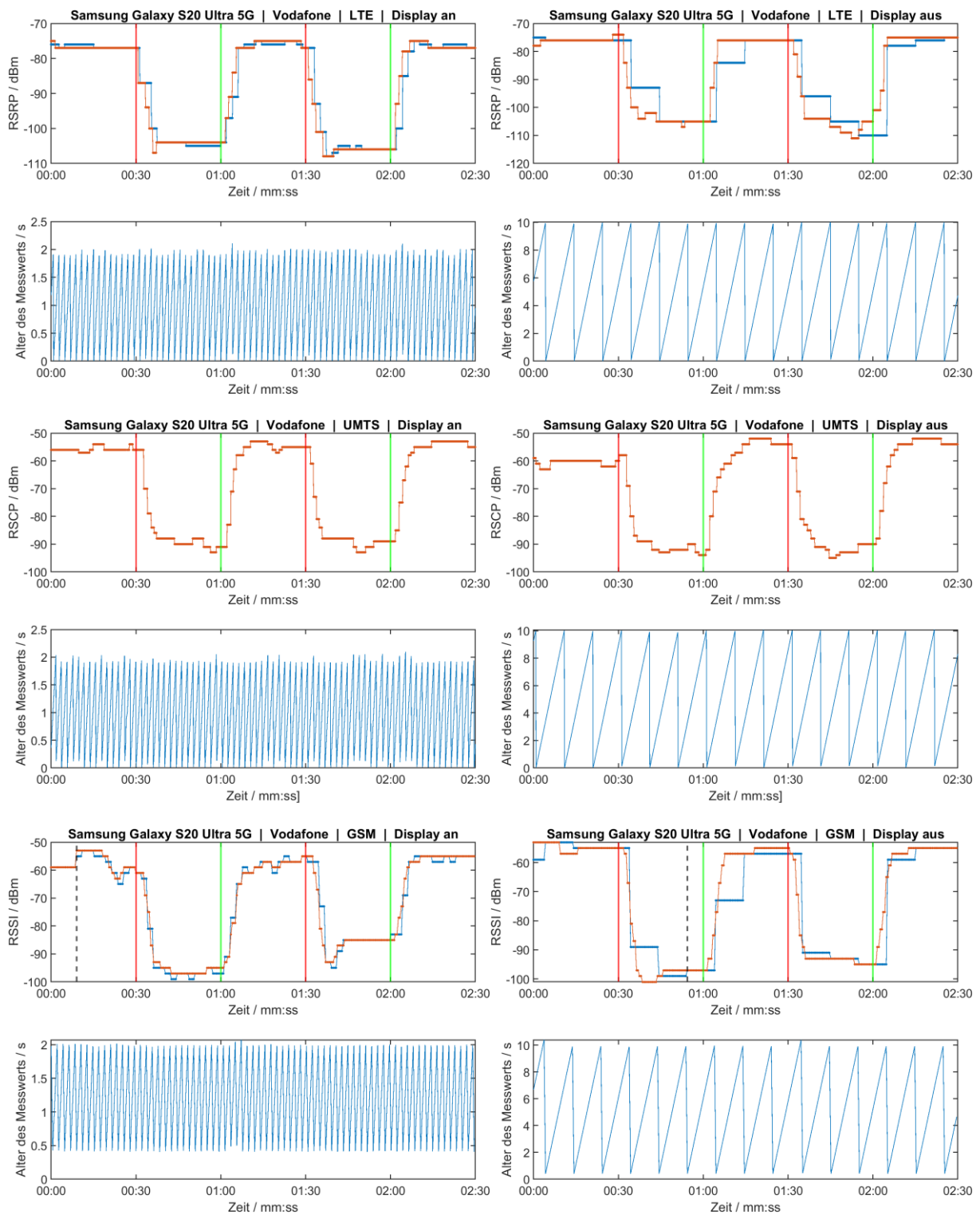


Abbildung 3-6 Verlauf der Signalstärke bei Signalpegelsprüngen am Beispiel des Smartphones „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ im Vodafone-Netz (Blaue Signalpegel: CellInfo-Klasse, Rote Signalpegel: SignalStrength-Klasse)

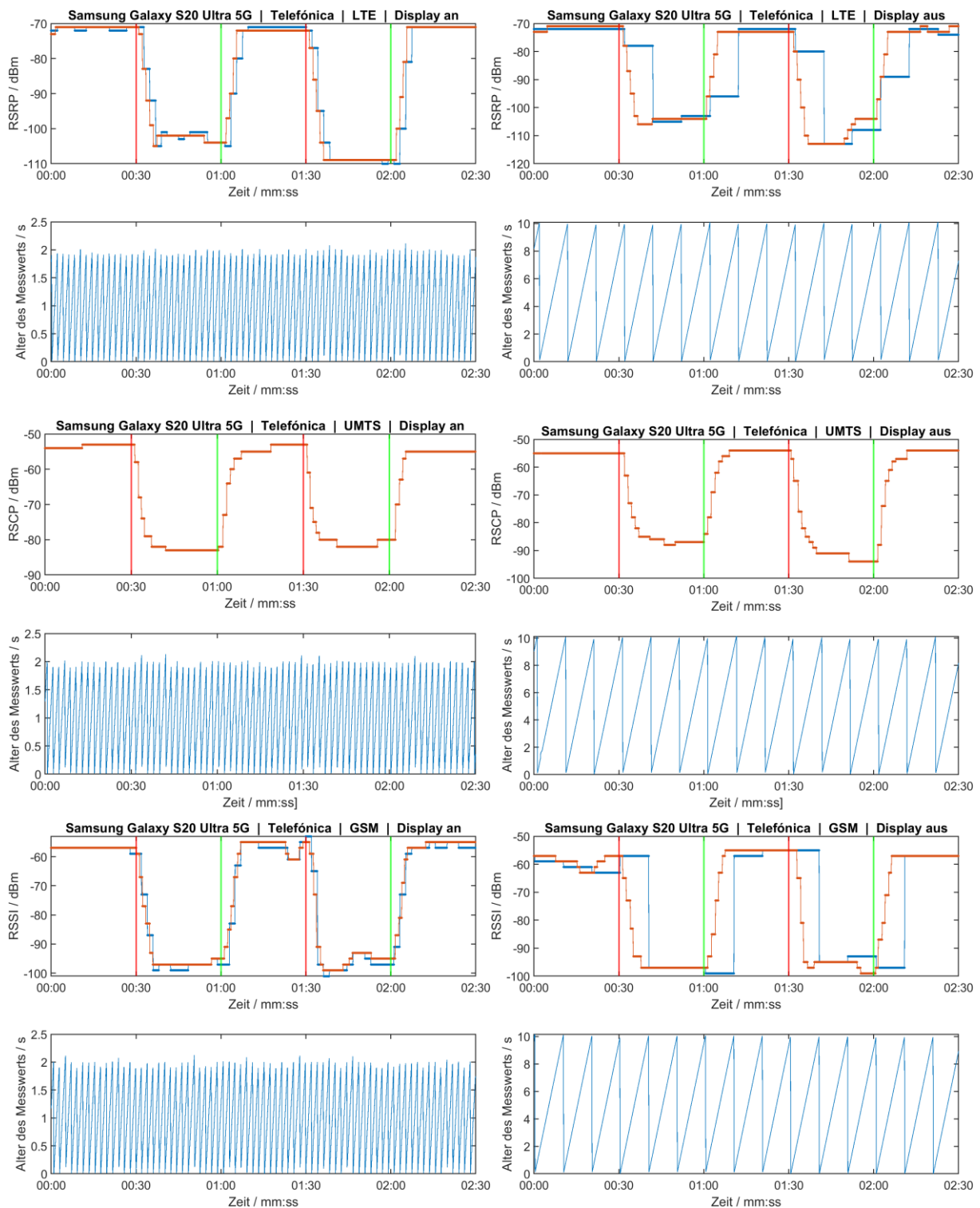


Abbildung 3-7 Verlauf der Signalstärke bei Signalpegel sprüngen am Beispiel des Smartphones „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ im Telefónica-Netz (Blaue Signalpegel: CellInfo-Klasse, Rote Signalpegel: SignalStrength-Klasse)

Anmerkung zum Smartphone „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“: Seit der Betriebssystemaktualisierung von Android-Version 10 auf Version 11 wird bei UMTS als Signalpegel über die CellInfo-Klasse nur noch ein konstanter Wert von -24 dBm ausgegeben. Die Untersuchungen wurden jedoch erst nach der Aktualisierung ausgeführt. Daher ist für UMTS nur das Ergebnis der SignalStrength-Klasse aufgeführt.

3.3.1.4 Erkenntnisse

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Messergebnissen insgesamt ableiten:

- Änderungen an den Messwerten der CellInfo-Klasse treten unabhängig vom Displayzustand immer mit der nächsten Aktualisierung der Modeminformationen ein. Diese sind in allen Fällen bei eingeschaltetem Display spätestens nach 8 Sekunden abgeschlossen. Meist liegt die Zeit deutlich darunter. In einigen Fällen wird bereits nach einem Schritt der Zielwert erreicht. Meist gibt es zwei Sprünge bevor der Zielwert angenommen wird. Bei GSM dauert es in der Regel länger, bis der endgültige Wert erreicht wird (7-8 s). Bei LTE und UMTS liegt die Zeit außer bei den untersuchten Samsung-Geräten deutlich darunter (2-4 s).
- Die Zeit bis zum Einsetzen der Änderung und zum Erreichen des Zielwerts nach der Änderung des Pegels hängt von der zeitlichen Lage des Öffnens/Schließens der Dose innerhalb des Zeitintervalls zwischen zwei Aktualisierungen des Modemwerts ab. Liegt die Abschirmung unmittelbar nach der letzten Aktualisierung, dann setzt die Änderung frühestens nach Ablauf der Aktualisierungsperiode ein.
- Manche Geräte zeigen keine Unterschiede zwischen dem Verhalten der CellInfo-Klasse bei ein- und ausgeschaltetem Bildschirm. Bei einem Teil der Geräte ändert sich jedoch die Aktualisierungsdauer der Modeminformationen, sodass es zu größeren Verzögerungen beim Erreichen des Endwertes kommen kann. Hierbei ist zu beachten, dass sich die modeminterne Anpassung des Signalpegels nicht zu verändern scheint, sondern lediglich die Häufigkeit, mit der der im Modem aktuell vorliegende Wert über die API ausgegeben wird. Beim Vergleich der frisch aktualisierten Signalpegel jeweils von ausgeschaltetem Display und eingeschaltetem Display wird ersichtlich, dass sie relativ zu den Zeitpunkten der Abschirmung bzw. Aufhebung der Abschirmung übereinstimmen. Einzig der Signalverlauf wird weniger detailliert nachverfolgt. Der Endwert wird nur dadurch später erreicht, dass er aufgrund der längeren Dauer bis zur nächsten Aktualisierung später sichtbar wird. Zum Zeitpunkt des Auslesens entspricht der erhaltene Wert also offenbar immer demjenigen, den das Modem zu diesem Zeitpunkt ermittelt hat.
- Die Aktualisierungszeitpunkte der SignalStrength-Klasse sind nicht mit denen der CellInfo-Klasse identisch.
- Die CellInfo-Klasse und SignalStrength-Klasse zeigen abhängig vom Smartphone-Modell bzw. Hersteller unterschiedliches Änderungsverhalten. So wurde bei den beiden Samsung-Modellen festgestellt, dass die SignalStrength-Werte mehrere kleine Pegelsprünge zum Erreichen des Endwertes ausführen, während die übrigen Geräte meist nur einen einzigen Sprung zeigten. Nur die Samsung-Geräte liefern noch aktuelle Werte über die SignalStrength-Klasse bei ausgeschaltetem Display. Bei allen anderen bleibt der Wert bei ausgeschaltetem Display stehen und wird allenfalls vereinzelt geändert.

- Es konnten keine Unterschiede zwischen den Ergebnissen in den verschiedenen Mobilfunknetzen der drei Netzbetreiber in Deutschland festgestellt werden. Herstellerspezifische bzw. von der Version des Betriebssystems abhängige Unterschiede konnten hingegen beobachtet werden.
- Ein systematischer Unterschied zwischen der Zeit zum Erreichen des Endwerts beim Abschirmen bzw. Aufheben der Abschirmung konnte bei keinem Gerät beobachtet werden.
- Bei GSM und UMTS lässt sich zum Teil beobachten, dass der gemessene Signalverlauf bei Änderung des vorherrschenden Signalpegels am Smartphone zunächst steil ansteigt/abfällt und dann in kleineren Schritten bis zum Endwert läuft.
- Auch wenn die Aktualisierungsrate der Modeminformationen bei ausgeschaltetem Display geringer wird, bleibt die Änderungsgeschwindigkeit der Signalstärke innerhalb des Modems gleich. Es ändern sich nur die Häufigkeit, mit der der Wert im Android-System aktualisiert wird.

Es sollte beachtet werden, dass die erzeugte Form von Signalpegelsprüngen einer Extremsituation entspricht, die bei alltäglicher Smartphone-Nutzung derart nicht auftritt. Auch in den Fällen, in denen in Alltagssituationen ein Smartphone abgeschirmt wird, ist die Dämpfung geringer und tritt verhältnismäßig langsamer ein (z.B. Betreten eines Gebäudes, Durchfahren eines Tunnels). Daher ist die Anpassungsgeschwindigkeit an neue Signalpegel für den vorgesehenen Einsatzzweck zur Erfassung der Signalstärke zur Immissionsabschätzung prinzipiell ausreichend. Bei schneller Fortbewegung (z.B. im Auto) könnte die Trägheit jedoch kurzzeitige Signalschwankungen unkenntlich machen. Da die Bewegungsgeschwindigkeit allerdings aus der GPS-Information ermittelt werden kann, können Messungen mit zu hoher Geschwindigkeit von einer Auswertung ausgeschlossen werden.

Aufgrund der gemachten Beobachtungen sollte der Wert der SignalStrength-Klasse nur dort verwendet werden, wo über die CellInfo-Klasse kein sinnvoller Wert erhalten werden kann.

3.3.2 Aktualisierungsrate der Signalstärkewerte

3.3.2.1 Ziel der Untersuchung

Wie bei den Untersuchungen des Verhaltens bei Signalpegelsprüngen bereits ersichtlich wurde, kann sich die Aktualisierungsrate der Modeminformationen abhängig vom Displayzustand des Endgeräts unterscheiden. Bei ausgeschaltetem Display vergrößert sich demnach der Abstand zwischen zwei Aktualisierungen bei einigen Geräten deutlich. Dies wurde in gleicher Weise auch beim Aufbau einer WLAN-Verbindung festgestellt. Die Aktualisierungsrate der Messwerte aus dem Modem ist jedoch relevant, um zu wissen, wie häufig ein Messwert für ein Monitoringsystem maximal gesammelt werden kann. Daher wird im Folgenden ein systematischer Überblick über die Aktualisierungsrate zusammengestellt.

3.3.2.2 Durchführung

Die für die Untersuchungen des Verhaltens bei Signalpegelsprüngen aufgezeichneten Messdaten wurden hinsichtlich der Zeitabstände der Aktualisierung der Informationen aus dem Modem ausgewertet. Dazu werden die Zeitabstände zwischen den Zeitstempeln der Modemmesswerte betrachtet. Dabei wird für die einzelnen Mobilfunkdienste bei den unterschiedlichen Displayzuständen und Mobilfunknetzen jeweils ein eigener Wert ermittelt.

3.3.2.3 Ergebnisse

Tabelle 3-2 führt die mittleren Zeitdauern zwischen den Aktualisierungen der Modeminformationen auf.

Smartphone	Mobilfunknetz	Displayzustand	LTE	UMTS	GSM
Motorola Moto G5 Plus	Telekom	an	2,09	2,09	2,11
		aus	2,08	2,07	2,06
	Vodafone	an	2,10	2,10	2,09
		aus	2,06	2,06	2,07
	Telefónica	an	2,08	2,06	2,09
		aus	2,07	2,09	2,07
Nokia 8	Telekom	an	1,85	2,06	2,07
		aus	2,07	2,11	2,10
	Vodafone	an	2,16	2,14	-
		aus	2,16	2,15	-
	Telefónica	an	2,17	2,15	2,15
		aus	2,16	2,14	2,15
OnePlus 6	Telekom	an	2,05	2,07	2,07
		aus	10,07	10,29	10,05
	Vodafone	an	2,05	2,05	2,08
		aus	10,05	10,07	10,08
	Telefónica	an	2,05	2,05	2,05
		aus	10,07	10,07	10,05
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G	Telekom	an	2,05	2,05	2,06
		aus	10,06	10,07	10,05
	Vodafone	an	2,06	2,03	2,10
		aus	10,07	10,06	10,11
	Telefónica	an	2,05	2,07	2,07
		aus	10,06	10,06	10,06

Smartphone	Mobilfunknetz	Display-zustand	LTE	UMTS	GSM
Samsung Galaxy S8	Telekom	an	2,01	2,04	-
		aus	2,03	2,01	-
	Vodafone	an	2,07	2,08	-
		aus	2,09	2,09	-
	Telefónica	an	2,08	2,09	-
		aus	2,05	2,10	-
Sony Xperia Z5 Compact	Telekom	an	2,07	2,06	2,07
		aus	2,10	2,09	2,07
	Vodafone	an	2,08	2,05	2,09
		aus	2,11	2,10	2,07
	Telefónica	an	2,09	2,22	2,07
		aus	2,07	2,22	2,08

Tabelle 3-2 Mittlere Zeitdauer zwischen den Aktualisierungen der Modeminformationen in Sekunden

Anmerkungen:

- Beim Smartphone „Nokia 8“ war es im Vodafone-Netz nicht möglich die Netzwerkgeneration auf GSM zu beschränken.
- Beim Smartphone „Samsung Galaxy S8“ wurde bei GSM permanent ein Signalpegel von -51 dBm ausgegeben. Daher wurde für diesen Standard keine Messung ausgeführt.

3.3.2.4 Erkenntnisse

Über alle Geräte und Hersteller hinweg beträgt die typische Dauer zwischen zwei Aktualisierungen der Modeminformationen ca. 2,1 Sekunden, während das Display eingeschaltet ist. Bei manchen Geräten vergrößert sich dieser Zeitabstand bei ausgeschaltetem Display auf etwa 10 bis 10,5 Sekunden. Das gleiche gilt, sobald eine WLAN-Verbindung aufgebaut wird. Diese Änderungen traten in allen beobachteten Fällen immer unmittelbar mit Änderung des Display-/WLAN-Zustands ein. Zwischen den einzelnen Aktualisierungen schwanken die Zeitdauern in der Größenordnung von Zehntelsekunden. Die Frage, ob dies hardwareseitig bedingt oder vom Betriebssystem Android bestimmt ist, kann nicht beantwortet werden, spielt jedoch auch keine relevante Rolle.

Diese Aktualisierungsrate kann durch eine auslesende App nicht beeinflusst werden. Sie ist außerdem scheinbar unabhängig vom Netzbetreiber und dem genutzten Funkdienst.

Durch Berücksichtigung des Modemzeitstempels ist es unter allen Umständen möglich immer nur dann neue Messwerte aufzuzeichnen, wenn tatsächlich aktualisierte Informationen aus dem Modem bereitstehen. Dadurch kann die mehrfache Berücksichtigung der gleichen und damit in der Zwischenzeit womöglich veralteten Information vermieden werden.

Qualitativ konnte festgestellt werden, dass neue Modeminformationen auch immer mit einem neuen Messwert für die primäre Funkzelle verbunden sind, da sich bei Änderungen der Signalbedingungen die erhaltenen Werte auch immer unterscheiden. Bei den Signalstärken von Nachbarzellen konnte jedoch beobachtet werden, dass diese auch über mehrere Aktualisierungen der Modeminformationen hinweg identisch bleiben können, selbst wenn dies aufgrund der zu erwartenden Signalpegeländerungen bei Fortbewegung oder anderen Änderungen in der Umgebung nicht plausibel ist. Damit derartige überholte Nachbarzellmessungen nicht verfälschend in Auswertungen einbezogen werden, sollten Messungen der gleichen Funkzelle, bei denen in aufeinanderfolgenden Auslesevorgängen dieselben Werte erhalten werden aussortiert werden, da sie eine veraltete Information darstellen.

3.3.3 Messbandbreite bei LTE

3.3.3.1 Ziel der Untersuchung

Bei LTE kann die Messbandbreite für RSSI-Messungen von der Basisstation beeinflusst werden (vgl. Abschnitt 2.1.1.2). Durch diese Untersuchungen soll festgestellt werden, welche Messbandbreiten von den Netzbetreibern genutzt werden. Dies stellt jedoch nur ein Beispiel für die genutzte Konfiguration am Untersuchungsort dar. Konfigurationen an anderen Orten können sich unterscheiden. Es sei an dieser Stelle noch einmal auf die Bedeutung der Begriffe verwiesen:

- **Kanalbandbreite:** Nominelle LTE-Kanalbandbreite, die im Spektrum für einen Frequenzkanal vorgesehen ist. In diese Bandbreite darf kein benachbarter Kanal hineinragen, um Funktionsstörungen zu vermeiden.
- **Signalbandbreite:** Bandbreite, die von dem LTE-Signal tatsächlich belegt wird. Sie beträgt stets 90% der Kanalbandbreite.
- **Messbandbreite:** Bandbreite, über die die Messungen zur Signalstärke und -qualität ausgeführt werden. Sie kann maximal der Signalbandbreite entsprechen. Es ist jedoch möglich, dass die Basisstation eine geringere Messbandbreite vorgibt.

3.3.3.2 Durchführung

Da es sich um eine Eigenschaft handelt, die vom Netzbetreiber festgelegt wird, wurde die Untersuchung in den realen Mobilfunknetzen der drei deutschen Netzbetreiber durchgeführt.

Die Messbandbreite kann nur indirekt bestimmt werden, weil die Signalstärkeindikatoren (RSRP, RSSI) nur auf den Kanal bezogen angegeben werden, aber keine Frequenzauflösung vorsehen. Daher wird ein Sinussignal verwendet, dessen Frequenz über die Kanalbandbreite von der unteren zur oberen den Kanal begrenzenden Frequenz variiert wird. Befindet sich das Signal innerhalb der Messbandbreite, verändern sich die Messwerte entsprechend.

Um Änderungen angemessen verfolgen zu können, wurde die Sweep-Geschwindigkeit derart gewählt, dass die Verweildauer in jedem LTE-Unterträger von 15 kHz jeweils der Aktualisierungsrate der Modeminformationen im Android-System von 2,1 s entsprach. Die ausgeführten Einzelschritte der Frequenz des Sinussignals betragen 70 Hz/10 ms.

Es wurde sichergestellt, dass der Pegel des ausgesendeten Sinussignals derart gering ist, dass außerhalb der Laborumgebung keine Beeinträchtigung des Mobilfunkverkehrs auftreten konnte. Dies wurde mittels Feldstärkemessungen und Smartphones verifiziert. Das Signal konnte in anderen Räumen nicht mehr detektiert werden und keine Beeinflussung der Smartphones festgestellt werden.

Den Messaufbau ist in Abbildung 3-8 gezeigt. Im Vordergrund ist das Smartphone auf einer elektrisch neutralen Schaumstoffunterlage auf dem Tisch zu sehen. Der Signalgenerator (Rohde & Schwarz SMATE 200A) mit der angeschlossenen Antenne SH800 von Satimo befindet sich im linken oberen Teil des Bildes. Die Antenne ist direkt auf das Smartphone gerichtet und befindet sich in etwa 1,6 m Abstand von diesem.

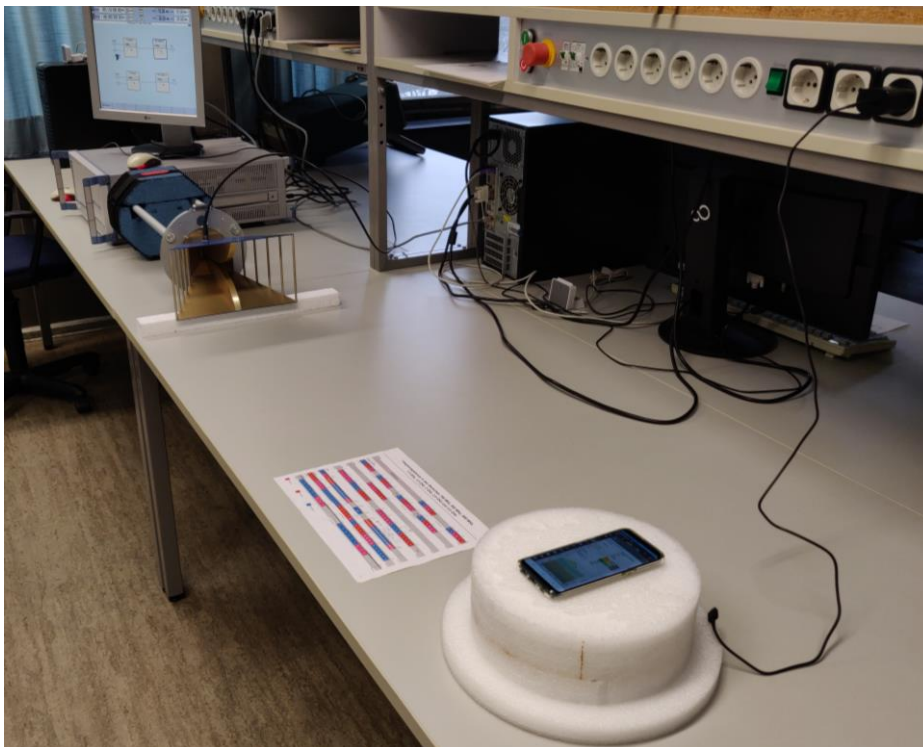


Abbildung 3-8 Messaufbau zur Ermittlung der Messbandbreite bei LTE

Bei herkömmlichen Smartphones ist es nicht möglich den Frequenzkanal aus mehreren vorhandenen Kanälen auszuwählen. Stattdessen wechselt das Smartphone in diejenige Funkzelle und denjenigen Kanal, der aufgrund der vorliegenden Signalstärke und -qualität aufgrund der Zellauswahlkriterien des Netzbetreibers zu nutzen ist. Nur bei softwareseitig angepassten Smartphones wie dem QualiPoc von Rohde & Schwarz kann der Wechsel in bestimmte Funkzellen und Kanäle innerhalb gewisser Grenzen erzwungen werden. Daher konnten alle vor Ort genutzten Frequenzkanäle ausschließlich mit dem QualiPoc-Smartphone getestet werden, da die anderen Geräte nur in bestimmte bevorzugte Kanäle wechseln.

Ein weiterer Aspekt ist, dass durch das störende Sinussignal die vom Smartphone gemessene Signalqualität verschlechtert wird. Dadurch werden die Smartphones üblicherweise veranlasst den Kanal zu wechseln. Das Beibehalten des Frequenzkanals kann wiederum nur mit dem QualiPoc-Smartphone erwirkt werden. Daher machte ein variieren des Sinussignals über die gesamte Kanalbandbreite nur bei diesem Sinn, sodass auch nur für dieses Smartphone entsprechende Signalverläufe aufgezeichnet wurden und in den Ergebnissen aufgeführt sind. Bei

den anderen Smartphones wurden nur die Frequenzen ermittelt und tabellarische festgehalten, bei denen ein Zellwechsel stattfand, wenn das Sinussignal über die Kanalbandbreite variiert wurde. Die Frequenz wurde anstatt mit einem automatischen kontinuierlichen Sweep händisch verändert.

Der Pegel des Sinussignals wurde so gewählt, dass ein deutlicher Signalsprung des RSSI-Werts erkennbar wird, gleichzeitig aber die Verbindung mit der Funkzelle noch aufrechterhalten werden kann.

3.3.3.3 Ergebnisse

Wie bei der Versuchsdurchführung erläutert, beziehen sich die Messwerte für RSSI und RSRP immer auf die gesamte Messbandbreite. Um den Einfluss des über die Kanalbandbreite frequenzvariierten Sinussignals der jeweils aktuellen Frequenz zuordnen zu können, wurde die Messaufzeichnung auf dem QualiPoc-Smartphone und der Start des Frequenz-Sweeps synchronisiert. Aus der Sweep-Geschwindigkeit des Signalgenerators lässt sich zusammen mit dem Zeitstempel der Smartphone-Messungen jede Messung der zum Zeitpunkt der Messung vorliegenden Frequenz des Sinussignals zuordnen.

Das heißt, dass die in den folgenden Abbildungen 3-9 bis 3-11 gezeigte Frequenzachse einer Zeitachse entspricht, der die entsprechende Frequenz des zum Zeitpunkt der Messung vorherrschenden Sinussignals zugeordnet wurde. Es wird jeweils der Verlauf der Messsignale der QualiPoc-Software sowie zum Vergleich der mit der am IHF entwickelten App „CellViewer“ gemessene Verlauf gezeigt. Die drei Abbildungen stellen jeweils die Ergebnisse für einen Netzbetreiber in allen am Untersuchungsort verfügbaren Frequenzkanälen dar.

Die Messbandbreite lässt sich aus den Bildern anhand des Bereichs, in dem der RSSI-Wert ansteigt bzw. in dem der RSRQ-Wert absinkt entnehmen. In der CellViewer-App kann der RSSI-Wert beim QualiPoc-Smartphone nicht bekommen werden, weil der Wert bei diesem Smartphone nicht über die Android-API ausgegeben wird.

Folgende Beobachtungen lassen sich bei den dargestellten Messergebnissen machen:

- Die Ergebnisse der CellViewer-App stimmen mit denen der QualiPoc-Messsoftware bis auf geringfügige Abweichungen überein.
- Sobald das Sinussignal innerhalb der Messbandbreite liegt, steigt der RSSI-Messwert sprunghaft an und fällt wieder ab, sobald es wieder außerhalb liegt.
- Der RSRQ-Wert fällt umgekehrt ab, solange das Sinussignal in der Messbandbreite liegt, weil die Signalqualität beeinträchtigt wird.
- Die Signale werden innerhalb der Messbandbreite durchgehend vom Sinussignal beeinflusst.
- Auch RSRP wird durch das Sinussignal beeinflusst. Dies ist überall dort der Fall, wo der Signalpegel des Sinussignals so hoch war, dass RSSI über mehr als etwa 10 dB angehoben wurde.

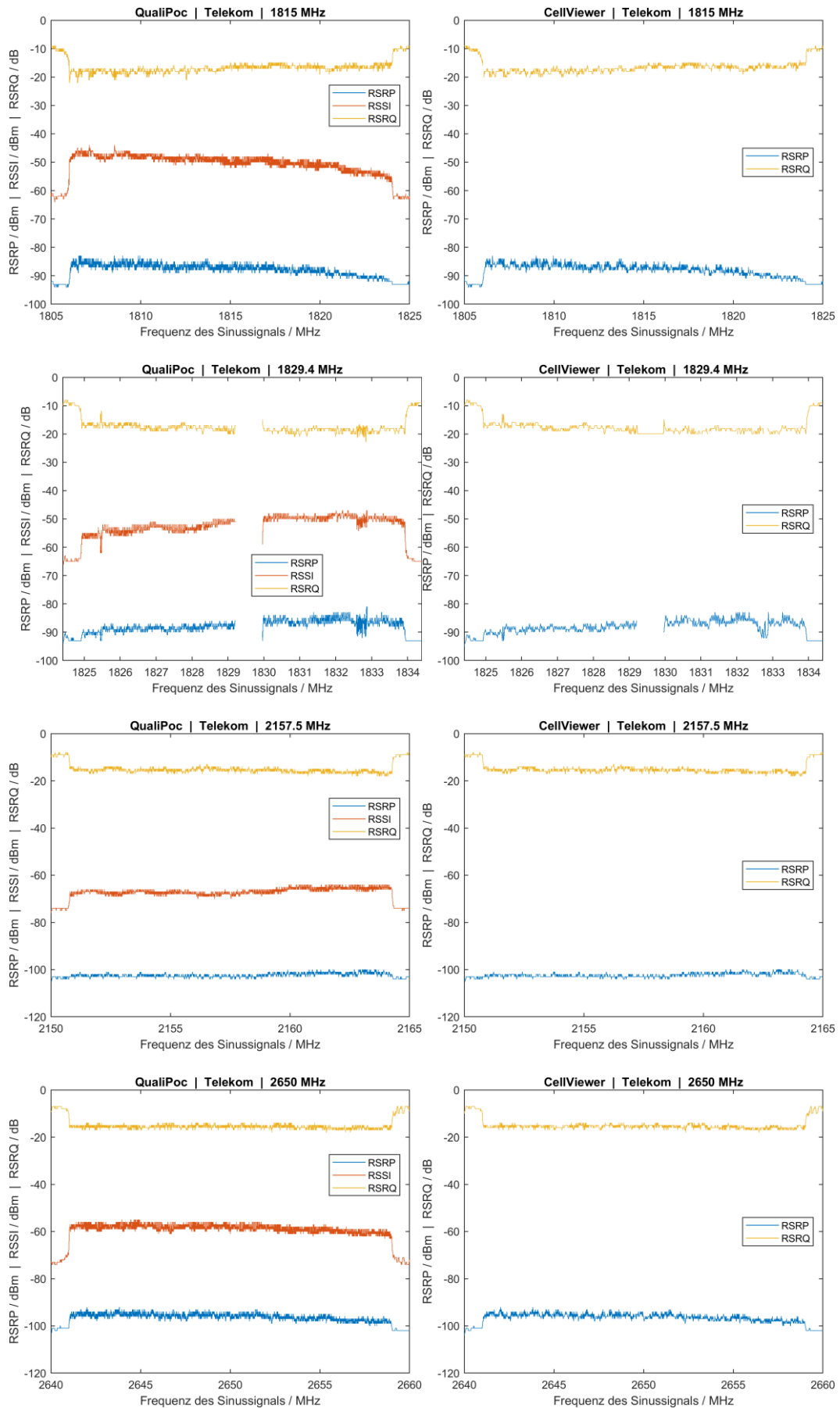


Abbildung 3-9 Verläufe der Signalstärkeindikatoren des Samsung Galaxy S8 mit QualiPoc Android bei Ermittlung der Messbandbreite im Telekom-Netz (Links: Werte aus QualiPoc Android, Rechts: Werte aus der App „CellViewer“)

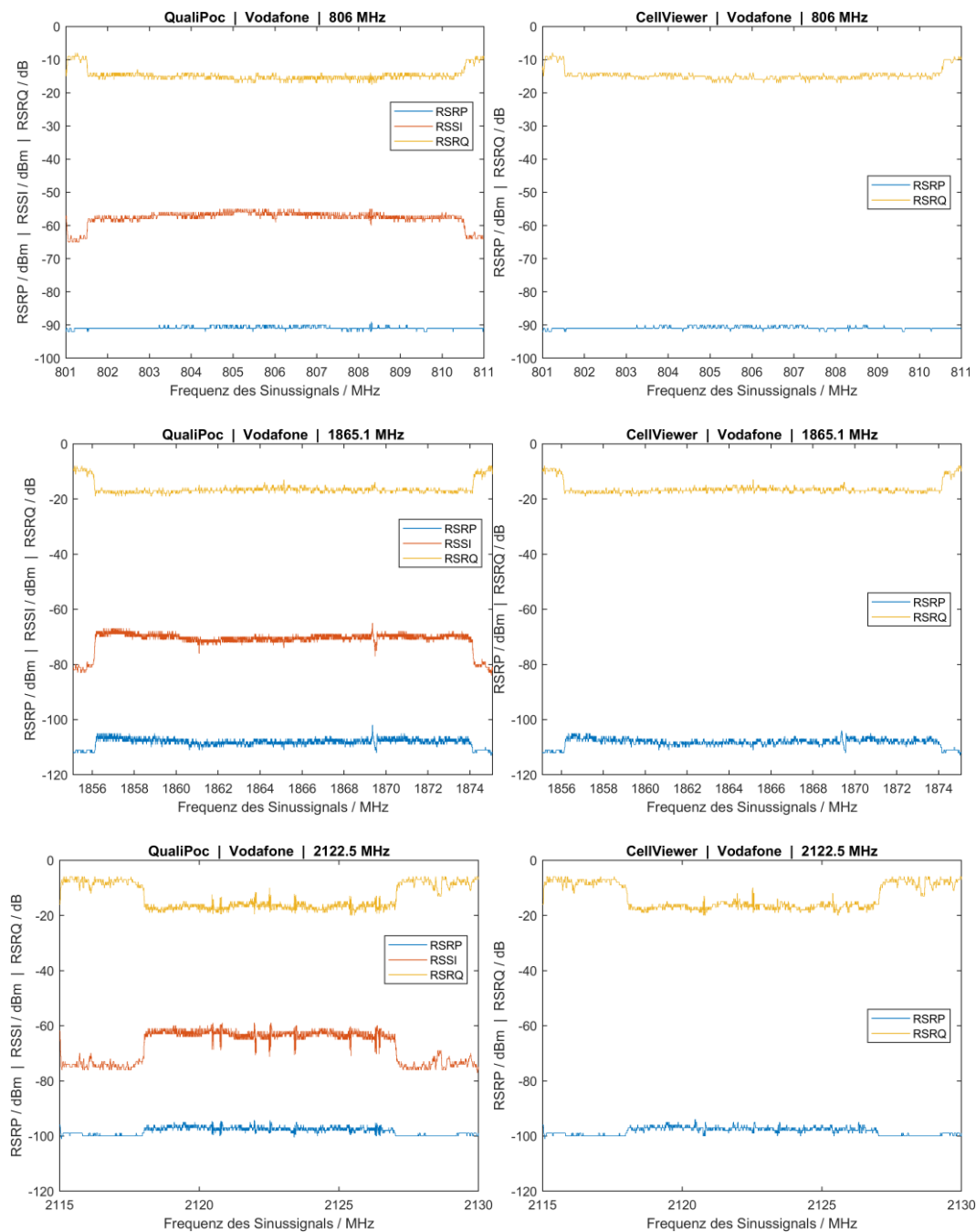


Abbildung 3-10 Verläufe der Signalstärkeindikatoren des Samsung Galaxy S8 mit QualiPoc Android bei Ermittlung der Messbandbreite im Vodafone-Netz (Links: Werte aus QualiPoc Android, Rechts: Werte aus der App „CellViewer“)

- Die erkennbare unterschiedliche Dichte der Messwerte entlang der Frequenzachse resultiert aus der Tatsache, dass die unterschiedlichen Kanalbandbreiten verschiedene Messdauern mit unterschiedlich vielen Messwerten aufweisen, die stets auf die gleiche Breite gestreckt dargestellt sind.

Anmerkung: Die Signallücke in der Mitte des Kanals bei Telekom auf der Frequenz 1829,4 MHz resultiert daraus, dass in diesem Fall aufgrund der Störung des in diesem Bereich befindlichen Synchronisierungssignals die Verbindung mit der Funkzelle vorübergehend nicht mehr aufrechterhalten werden konnte.

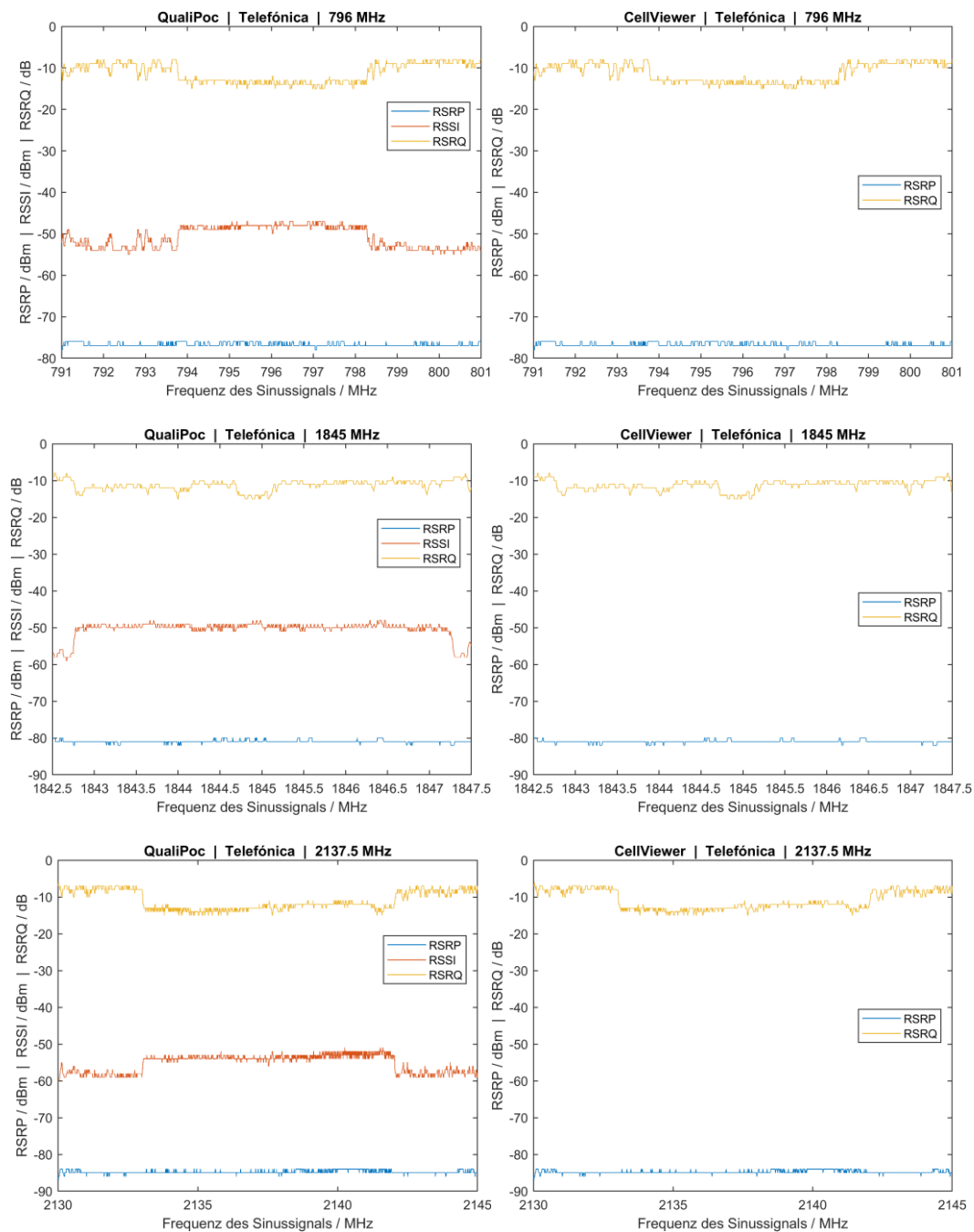


Abbildung 3-11 Verläufe der Signalstärkeindikatoren des Samsung Galaxy S8 mit QualiPoc Android bei Ermittlung der Messbandbreite im Telefónica-Netz (Links: Werte aus QualiPoc Android, Rechts: Werte aus der App „CellViewer“)

Die sich aus den Abbildungen 3-9 bis 3-11 ergebenden Messbandbreiten sind für sämtliche untersuchten Funkkanäle in Tabelle 3-3 zusammengefasst. Diejenigen Einträge, bei denen die Messbandbreite von der Signalbandbreite abweicht, sind grau hinterlegt.

Netz	Kanalfrequenz	Kanalbandbreite	Signalbandbreite	Messbandbreite
Telekom	1815 MHz	20 MHz	18 MHz	18 MHz
	1829,4 MHz	10 MHz	9 MHz	9 MHz
	2157,5 MHz	15 MHz	13,5 MHz	13,5 MHz
	2650 MHz	20 MHz	18 MHz	18 MHz
Vodafone	806 MHz	10 MHz	9 MHz	9 MHz
	1865,1 MHz	20 MHz	18 MHz	18 MHz
	2122,5 MHz	15 MHz	13,5 MHz	9 MHz
Telefónica	796 MHz	10 MHz	9 MHz	4,5 MHz
	1845 MHz	5 MHz	4,5 MHz	4,5 MHz
	2137,5 MHz	15 MHz	13,5 MHz	9 MHz

Tabelle 3-3 Übersicht über die mit dem QualiPoc-Smartphone ermittelten Messbandbreiten auf den verschiedenen LTE-Kanälen der drei Netzbetreiber

In Tabelle 3-4 sind für jedes untersuchte Smartphone die Kanäle mit einem Haken markiert, für die es möglich war das Smartphone dort einzubuchen und die Messbandbreite zu ermitteln. In allen Fällen stimmten die festgestellten Messbandbreiten mit denen des QualiPoc-Smartphones überein. Die Kanäle, bei denen die Messbandbreite kleiner ist als die Signalbandbreite, sind erneut grau hinterlegt.

Netz	Kanalfrequenz	Motorola Moto G5	Nokia 8	OnePlus 6	Samsung Galaxy S20 Ultra 5G	Sony Xperia Z5 Compact
Telekom	1815 MHz	✓	✓	✓	✓	✓
	1829,4 MHz					
	2157,5 MHz					✓
	2650 MHz	✓	✓	✓	✓	✓
Vodafone	806 MHz					
	1865,1 MHz	✓	✓	✓	✓	✓
	2122,5 MHz	✓	✓	✓	✓	✓
Telefónica	796 MHz					
	1845 MHz	✓	✓	✓	✓	✓
	2137,5 MHz	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 3-4 Übersicht über die Kanäle, für die die Messbandbreite mit herkömmlichen Smartphones überprüft werden konnte. (Haken markieren Kanäle, die mit dem entsprechenden Smartphone überprüft werden konnten, weil das Gerät in die entsprechende Funkzelle eingebucht werden konnte.)

3.3.3.4 Erkenntnisse

Die Möglichkeit von der Kanalbandbreite abweichende Messbandbreiten bei LTE-Kanälen zu verwenden, wird in den deutschen Mobilfunknetzen offensichtlich stellenweise genutzt. Es werden bei Vodafone und Telefónica teilweise Messbandbreiten genutzt, die kleiner als die

Signalbandbreite sind. Diese entsprechen im Falle des 10 MHz breiten Kanals bei 796 MHz der halben Signalbandbreite und im Band 2100 MHz mit einer Kanalbandbreite von 15 MHz $\frac{2}{3}$ der Signalbandbreite. In beiden Fällen gibt es Beispiele anderer Betreiberkonfigurationen im gleichen Frequenzband und der gleichen Kanalbandbreite, wo die volle Signalbandbreite als Messbandbreite genutzt wird. Dementsprechend lässt sich festhalten, dass es keine allgemeingültige Handhabung aller Netzbetreiber gibt. Welche möglicherweise technischen Gründe für die Festlegung der Messbandbreite sprechen, ist nicht bekannt.

Diese Erkenntnis ist ausschließlich bei Nutzung von RSSI als Maß der Zellauslastung zum Zwecke der Abschätzung der Momentanmission von Belang und muss dort entsprechend berücksichtigt werden. Die auslastungsunabhängige Messung von RSRP wird davon unter der Annahme, dass die Leistung der Ressourcenelemente des Referenzsignals konstant über die Signalbandbreite ist, nicht beeinflusst.

3.3.4 Übersprechen

3.3.4.1 Ziel der Untersuchung

Ziel der Untersuchung des Verhaltens bei Übersprechen ist zu ermitteln, ob durch starke benachbarte Signale oder Signale, die in die Messbandbreite fallen, die Messung der Signalstärkeindikatoren beeinflusst werden kann.

3.3.4.2 Durchführung

Die Untersuchung der Frequenzselektivität und die Auswirkungen von Übersprechen aus anderen Bändern und anderen HF-Quellen wird unter Laborbedingungen mit einem Basisstationssimulator untersucht. Da hierfür starke Störsignale ausgesendet werden müssen, kommt eine Untersuchung nur in einer geschirmten Kammer infrage.

Bei bestehender Verbindung mit dem Simulator, wird mithilfe eines Signalgenerators ein starkes schmalbandiges Störsignal in der Nachbarschaft und innerhalb des verbundenen Frequenzkanals ausgesendet. Die Frequenz des Störsignals wird derart in Schritten von 5 kHz variiert, dass es nacheinander die Frequenzen ab der Kanalgrenze und innerhalb der Messbandbreite abdeckt. Dabei wird beobachtet, ob sich die Messwerte der Signalstärkeindikatoren (RSRP, RSCP, RSSI) verändern. Die zu untersuchenden Frequenzkanäle wurden an den Rand des jeweiligen Frequenzbands gelegt, da hier zum Teil weitere Funkdienste benachbart sein können.

Die Smartphones wurden für diese Messungen in aufrechter Position mit der Rückseite zur Sendeantenne positioniert.

Der Messaufbau entspricht im Wesentlichen demjenigen für die Bestimmung des Umrechnungsfaktors, der in Abschnitt 3.4.1 eingehender erläutert wird. Im vorliegenden Fall wird das Störsignal über die Hornantenne ausgesendet und der Up- und Downlink der Mobilfunkverbindung über die unten links befindliche Mobilfunkantenne abgewickelt (siehe Abbildung 3-12). Die Sendeantenne befand sich in vertikaler Polarisation für das E-Feld, obwohl das Bild horizontale Polarisation zeigt.

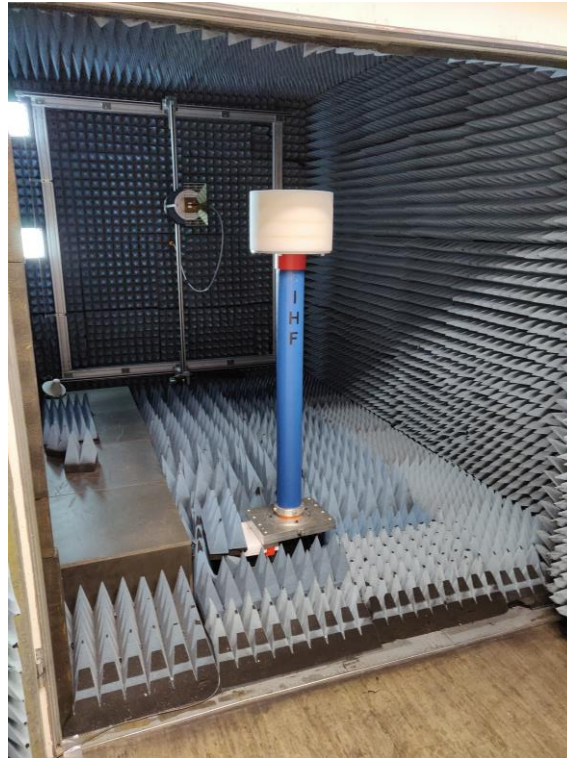


Abbildung 3-12 Messaufbau zur Untersuchung des Übersprechens.

Die Untersuchung wurde für folgende Endgeräte ausgeführt:

- Fairphone 3
- Honor 7X
- LG G5
- OnePlus 6
- Samsung Galaxy S8
- Samsung Galaxy S20 Ultra 5G

3.3.4.3 Ergebnisse

In Abbildung 3-13 werden stellvertretend die Ergebnisse für das Smartphone „Honor 7X“ präsentiert, da sie den Standardfall repräsentieren. Dargestellt wird der Verlauf des jeweiligen Signalstärkeindikators über die Frequenz des Störsignals. Die roten vertikalen Geraden markieren die jeweilige Signalbandbreite des Mobilfunkkanals. Die Messergebnisse sind unbeeinflusst, solange das Störsignal außerhalb der Signalbandbreite liegt. Innerhalb der Signalbandbreite bleiben die Messergebnisse bei LTE und UMTS in vielen Fällen ebenfalls unbeeinflusst oder zeigen minimale Schwankungen. Die RSSI-Messungen von GSM werden durch das Störsignal beeinflusst, sobald es innerhalb der Messbandbreite liegt. Der Signalpegel zeichnet in diesem Bereich die Form des Empfangsfilters nach. Dies entspricht der Erwartung, da diese Messung die gesamte Leistung innerhalb der Messbandbreite umfasst.

Abbildung 3-14 führt Beispiele auf, bei denen auch bei LTE eine Beeinflussung durch das Störsignal erkennbar wird. Beim OnePlus 6 sind in drei LTE-Bändern deutliche Abweichungen abhängig von der Frequenz des Störsignals sowohl nach oben als auch unten aufgetreten. Diese sind vermutlich das Resultat eines Übersteuerens des Empfängers. Auch beim Samsung Galaxy S8 treten vor allem im 1800 MHz-Band deutliche Abweichungen auf. Beim LG G5 tritt außerdem im 1800 MHz-Band eine dauerhafte Veränderung des gemessenen Signalpegels ein. Dies könnte an einem Umschaltprozess im Empfänger des Endgeräts begründet sein, um

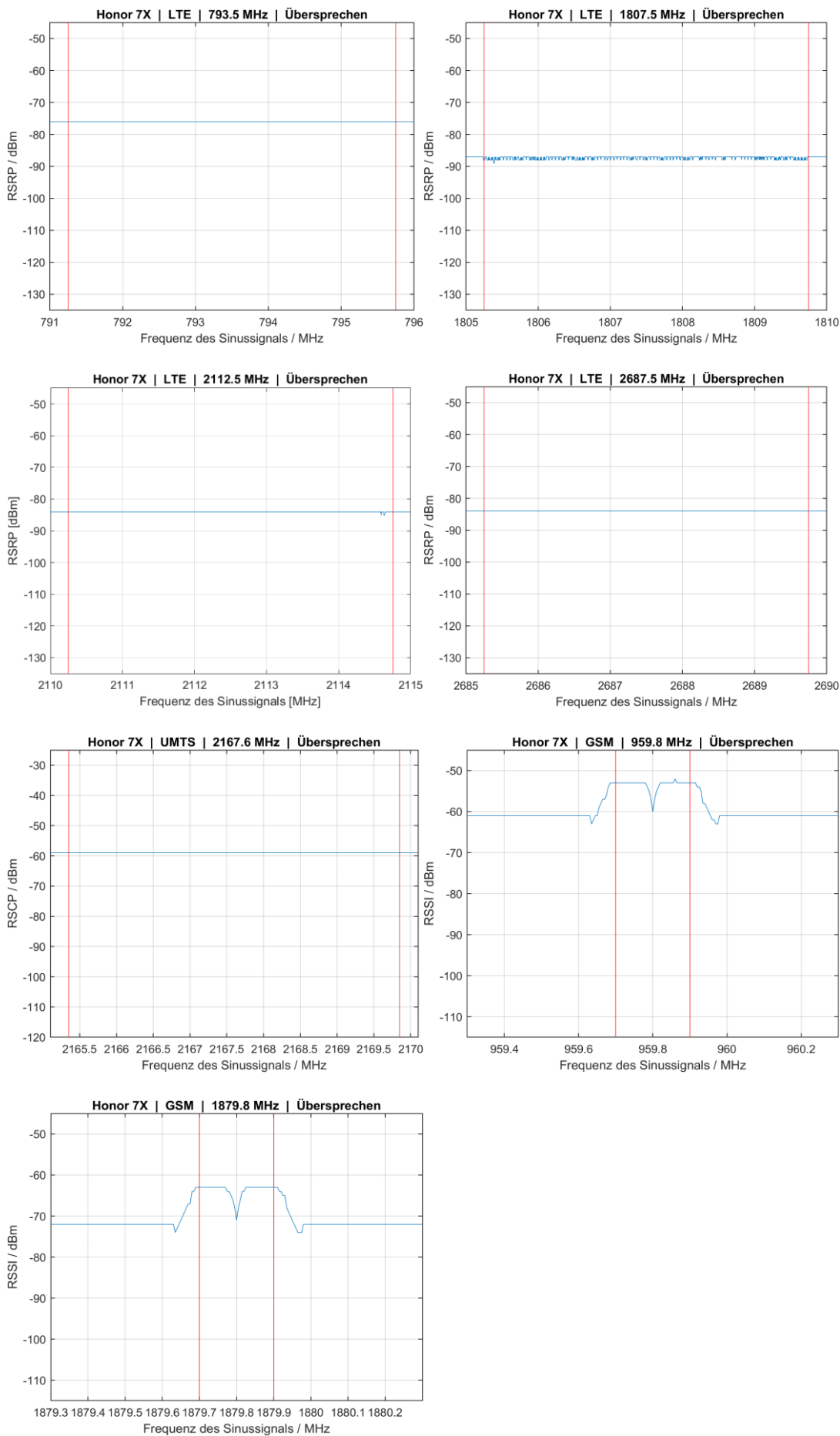


Abbildung 3-13 Ergebnisse der Messungen zum Übersprechen für das Smartphone „Honor 7X“

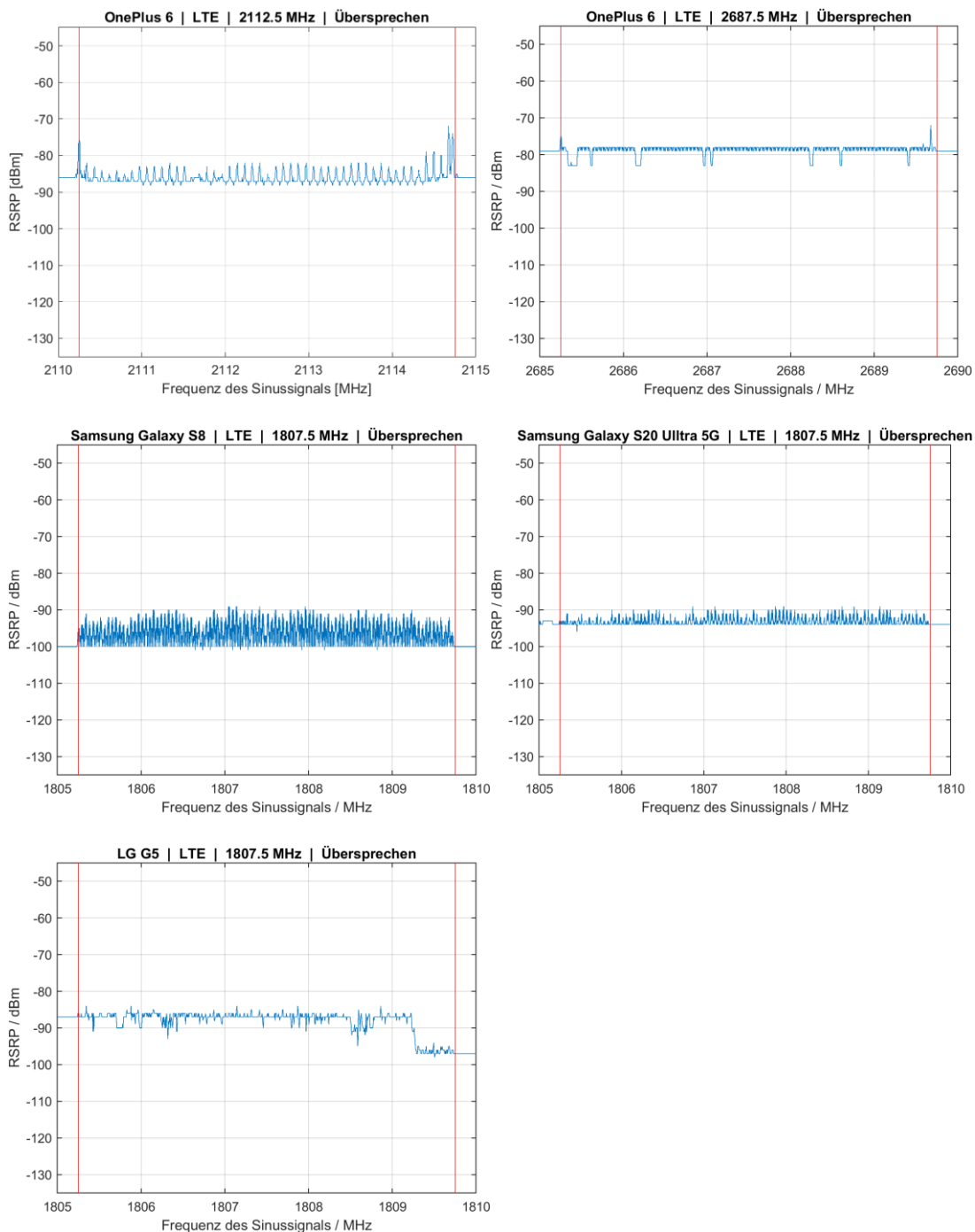


Abbildung 3-14 Beispiele von Ergebnissen der Messungen zum Übersprechen mit erkennbaren Auswirkungen durch das Störsignal

sich an die empfangene Leistung anzupassen. Ähnliche Beobachtungen wurden bei Untersuchungen zur Linearität der Signalstärkemessung in Abschnitt 3.4.1.2 gemacht. Weitere Erläuterungen finden sich dort.

3.3.4.4 Erkenntnisse

Es hat sich gezeigt, dass die Messungen in allen Fällen unbeeinflusst bleiben, solange Störsignale außerhalb der Messbandbreite liegen. Auch wenn innerhalb der Messbandbreite Störungen aufgetreten sind, stellt dies für ein HF-Messnetzwerk keine Beeinträchtigung dar. Derartige Störungen innerhalb der Signalbandbreite treten unter normalen Umständen nicht auf.

Andere Funkdienste dürfen in diesen Bereichen keine nennenswerten Störsignale aussenden, da sie ansonsten den Mobilfunk stören würden.

3.3.5 Wertebereiche und Limits

3.3.5.1 Ziel der Untersuchung

Das Ziel dieser Untersuchung ist es zu ermitteln, welche Werte die Signalstärkeindikatoren sowohl am oberen als auch unteren Ende des Wertebereichs tatsächlich erreichen können.

3.3.5.2 Durchführung

Die Wertebereiche und Limits, die die Messwerte tatsächlich maximal erreichen, können gezielt nur unter Laborbedingungen bestimmt werden, da die hierfür nötigen Extremwerte der Signalstärke nach oben und unten unter normalen Umständen nicht kontrolliert hergestellt werden können. Hierfür kommt ein Basisstationssimulator in einer geschirmten Messkammer zum Einsatz, der es Endgeräten erlaubt sich wie mit einer gewöhnliche Mobilfunkzelle zu verbinden und Messungen der ausgesendeten Signalstärkeindikatoren vorzunehmen. Um eine Signalstärke zu erzeugen, die hoch genug ist, um die Maximalwerte zu erreichen, wird zusätzlich ein geeigneter Verstärker eingesetzt und der Abstand zur Sendeantenne gegenüber dem für die übrigen Messungen genutzten Aufbau verringert. Das Endgerät wird aufrechtstehend mit der Rückseite in Richtung der Sendeantenne orientiert ausgerichtet (siehe Abbildung 3-15). Da der Einfluss der Orientierung separat in Abschnitt 3.4 untersucht wird, ergibt sich aus der festen Platzierung kein Nachteil.

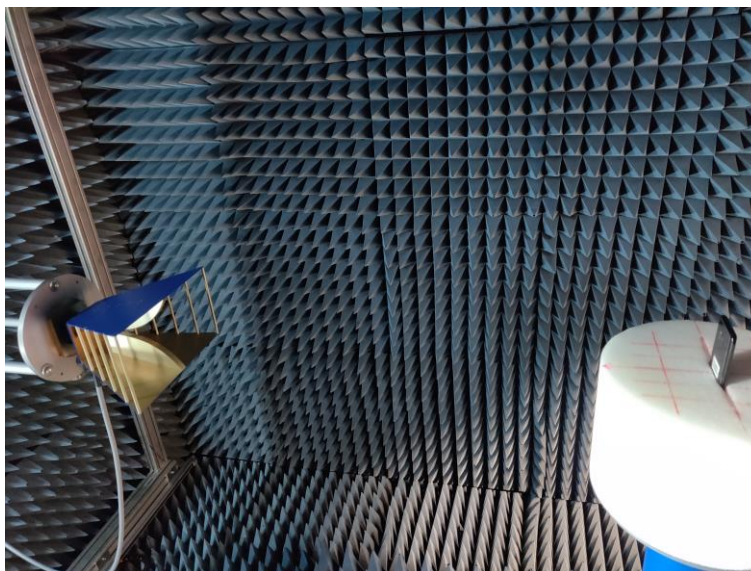


Abbildung 3-15 Messanordnung zur Untersuchung der Wertebereiche und Limits

Die Messung beginnt nach hergestellter Verbindung beim höchsten Signalpegel. Der Signalpegel wird in 1 dB-Schritten verringert und jeweils ein Messwert aufgezeichnet, bis die Mobilfunkverbindung nicht mehr aufrechterhalten werden kann. Anschließend wird der Signalpegel wieder so hoch eingestellt, dass wieder eine neue Verbindung aufgebaut werden kann. Dann

wird ausgehend vom letzten Signalpegel, bei dem noch eine Verbindung möglich war, die Signalstärke wieder in Schritten bis zum maximalen Pegel angehoben. Auf diese Weise kann das Verhalten in beiden Richtungen betrachtet werden.

Die Untersuchung wurde für folgende Endgeräte ausgeführt:

- Fairphone 3
- Honor 7X
- Lenovo Vibe K6 Note
- LG G5
- Motorola Moto G4 Play
- OnePlus 6
- Samsung Galaxy A3
- Samsung Galaxy S6 edge+
- Samsung Galaxy S7 edge
- Samsung Galaxy S8
- Samsung Galaxy S20 Ultra 5G – 1 & 2
- Wileyfox Storm

3.3.5.3 Ergebnisse

Stellvertretend für alle Smartphones werden wieder die Ergebnisse für das Smartphone „Honor 7X“ in Abbildung 3-16 vorgestellt. Für jede Messung ist der gemessene Signalstärkeindikator über dem am Basisstationssimulator eingestellten Ausgangspegel aufgetragen. Dadurch, dass der Signalpegel zunächst schrittweise reduziert und anschließend wieder angehoben wird, ergeben sich bei Abweichungen teilweise nebeneinanderliegende Kurven der gleichen Frequenz. Beim Honor 7X sind diese nur minimal und unterscheiden sich offenbar nur um eine Quantisierungsstufe. Bei anderen Endgeräten treten teilweise auch größere Abweichungen bzw. Sprünge im linearen Signalverlauf auf. Darauf wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen, da dies in Abschnitt 3.4.1.2 genauer analysiert wird.

Die Verschiebung der Signalpegelverläufe bei verschiedenen Frequenzen, sind in diesem Fall nicht unbedingt in erster Linie auf die Eigenschaften des Endgerätes zurückzuführen. Da direkt mit dem Ausgangspegel des Signalgenerators verglichen wird, spielen frequenzabhängige Unterschiede des Messaufbaus (Antennengewinn, Verstärkung des Verstärkers) eine Rolle. Dies ist für die Zielsetzung der Untersuchung jedoch nicht von Belang.

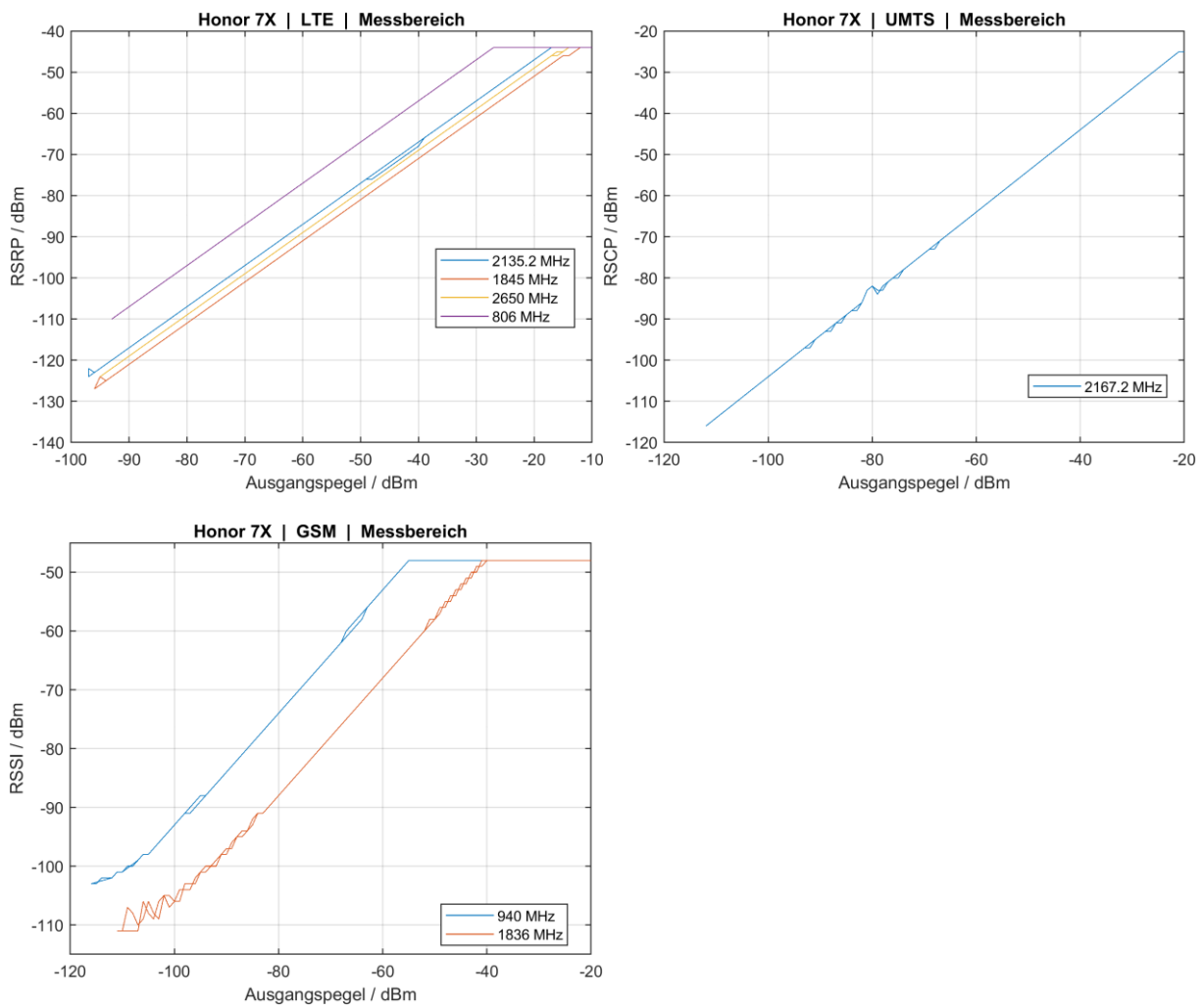


Abbildung 3-16 Signalstärkemesswerte bei Variation des vorliegenden Signalpegels für das Smartphone „Honor 7X“

3.3.5.4 Erkenntnisse

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus den Messergebnissen ableiten:

- Wird das Maximum des Wertebereichs der Signalstärkeskala erreicht, das an die Basisstation gemeldet werden kann, bleiben die Messwerte konstant auf dem höchsten Wert stehen.
- Bei LTE und UMTS verläuft die Signalstärke bei Verringerung des vorherrschenden Signalpegels linear, bis die Verbindung abreißt. Das untere Ende der Skala, die an die Basisstation mitgeteilt werden kann, wird gar nicht erreicht, da die Verbindung bereits vor Erreichen dieses Werts nicht mehr aufrechterhalten werden kann.
- Bei GSM hingegen sinkt der Signalstärkemesswert vor dem Abreißen der Verbindung langsamer ab. Zum Teil wird der niedrigste mögliche Messwert erreicht. Dieser bleibt dann gleich, bis die Verbindung abreißt.

3.4 Untersuchungen zur Bestimmung eines Umrechnungsfaktors von Signalstärke- zu Feldstärkewerten

Eine zentrale Fragestellung für die beabsichtigte Nutzung von Smartphone-Messwerten zur Immissionsabschätzung ist die Umrechnung von den aufgezeichneten Metriken in Feldstärkewerte. Bei den von Smartphones gemessenen Parametern handelt es sich um Pegel, also den Logarithmus des Verhältnisses einer Leistung zu einem festen Bezugswert. Der Bezugspunkt dieser Leistungsmessungen ist laut Definition der Standards jeweils der Antennenanschluss (vgl. Kapitel 2.1). Ein Rückschluss auf die ursächliche Feldstärke, die an der Antenne vorgelegen hat, ist nicht direkt möglich, da der Antennenfaktor im Allgemeinen unbekannt ist. Für die Funktionalität des Mobilfunkendgeräts ist die Kenntnis der Feldstärke ohnehin unerheblich, da die Leistungswerte zur Bewertung der Empfangssituation und zum Vergleich mehrerer Funkzellen untereinander ausreichen. Aus diesem Grund soll in diesem Arbeitsschritt der Umrechnungsfaktor für mehrere Smartphones bestimmt werden und die Variation über Modelle und Hersteller ermittelt werden.

Unter dem Umrechnungsfaktor wird im weiteren Verlauf der in Gleichung 3-1 formulierte Zusammenhang verstanden. Er ergibt sich aus der Differenz des vom Smartphone gemessenen Signalpegels und dem Pegel der elektrischen Feldstärke (in Dezibel).

$$K(\text{re } 10^{-9} \Omega/\text{m}^2) = L_E(\text{re } 1\mu\text{V}/\text{m}) - L_P(\text{re } 1\text{mW}) \quad 3-1$$

Mit

- K Umrechnungsfaktor von Signalpegel zur elektrischen Feldstärke des Referenzsignals in dB ($10^{-9} \Omega/\text{m}^2$)
- L_E Elektrische Feldstärke des Referenzsignals in dB ($\mu\text{V}/\text{m}$)
- L_P Am Antennenanschluss des Smartphones gemessener Signalpegel des jeweiligen Referenzsignals in dBm

3.4.1 Untersuchungen unter Laborbedingungen

Damit Messungen bei definierten Bedingungen in größerer Anzahl ausgeführt werden können, werden Untersuchungen im Labor durchgeführt. Hierfür wird ein geeigneter Messaufbau eingerichtet und kalibriert. Anschließend wird für die 40 Smartphones aus Tabelle 3-1 der Zusammenhang von Signalstärkeindikator und Feldstärke untersucht.

3.4.1.1 Allgemeine Beschreibung des Messaufbaus

Der grundlegende Messaufbau, wie er für sämtliche unter Laborbedingungen durchgeführten Messungen verwendet wurde, wird nachfolgend beschrieben. Abwandlungen gegenüber dem hier beschriebenen Grundaufbau werden bei den entsprechenden Messungen kenntlich gemacht.

3.4.1.1.1 Basisstationssimulator Anritsu MT8821C

Das zentrale Gerät zur Durchführung der Messungen war ein Basisstationssimulator der Firma Anritsu mit der Modellbezeichnung MT8821C. Dieses Gerät ist imstande standardkonforme

Mobilfunksignale für LTE, UMTS und GSM auszusenden und zu empfangen, um auf diese Weise wie eine Mobilfunkbasisstation mit einem Endgerät zu kommunizieren. In das Endgerät ist eine spezielle SIM-Karte einzulegen, damit eine Verbindung möglich ist. Der Signalpegel lässt sich über einen weiten Pegelbereich variieren. Allerdings ist die Leistung nach oben begrenzt, da der Einsatzzweck des Geräts vor allem auch zur Testung auf Chipebene liegt. Im vorliegenden Fall werden jedoch Tests über die Luftschnittstelle („Over the Air“) ausgeführt, sodass der Signalpegel bis zum Eintreffen beim Endgerät deutlich gedämpft wird. Dadurch liegt der mit dem maximalen Ausgangssignalpegel des Basisstationssimulators erreichbare Empfangspegel bei den Endgeräten deutlich unterhalb der oberen Grenze des Wertebereichs der Signalstärkeindikatoren. Dies ist jedoch nur bei der Untersuchung der Wertebereiche und Limits problematisch. Für diesen Test wurde daher ein HF-Verstärker zwischengeschaltet, um den Signalpegel anzuheben. Da ein solcher Verstärker die Signalqualität und damit die Verbindungsqualität verschlechtern kann, wurde bei den übrigen Messungen auf die Verwendung des Verstärkers verzichtet. Für den Signalweg im Downlink und Uplink wurden zwei getrennte Antennen verwendet, da durch diese Trennung eine höhere Ausgangsleistung verwendet werden konnte.

Die von den Smartphones gemessenen Signalstärkeindikatoren können vom Basisstationssimulator wie auch von einer Basisstation angefordert und abgerufen werden. Für alle mit dem Basisstationssimulator ausgeführten Messungen wird diese Möglichkeit genutzt und die Messergebnisse nicht über die Messanwendung auf dem Smartphone aufgezeichnet, da nur auf diese Weise eine Synchronisierung des gesamten Messablaufs und eine effiziente Durchführung möglich ist. Die Anforderung der Messwerte erfolgt derart, dass nach Anpassung der Messbedingungen (Signalpegel, Ausrichtung des Smartphones) der Messwert zurückgesetzt wird und auf ein neues Ergebnis gewartet wird. Bei UMTS und GSM wird dieser Vorgang noch einmal wiederholt, da wegen einer zeitlichen Mittelung der Messwert auch beim ersten neuen Messwert noch von vorhergehenden Messeinstellungen beeinflusst sein könnte. Dieses Vorgehen entspricht den Empfehlungen des Herstellers des Basisstationssimulators.

3.4.1.1.2 Messkammer

Die Labormessungen wurden in einer Messkammer, die üblicherweise für planare Nahfeldmessungen verwendet wird, durchgeführt. Sie ist an Decken und Wänden mit Absorbern ausgekleidet, um Reflexionen von elektromagnetischen Wellen zu vermeiden. Sie ist außerdem durch metallisierte Wände nach außen geschirmt.

An der Rückwand der Messkammer befindet sich eine für die planare Abtastung des Nahfelds von Antennen nutzbare Halterung, die über zwei Linearachsen verfahren werden kann. Im hier vorgenommenen Messaufbau befindet sich die Sendeantenne an dieser Halterung stets an konstanter Position. Um die Montage der Antenne für die jeweils zu messende Polarisationsausrichtung vornehmen zu können, wurde die Antenne zum links befindlichen Laufsteg verfahren. Die Antenne wird abgeschraubt und die Polarisation gedreht. Die Montage mittels Standard-Flansch gewährleistet eine wiederholgenaue Ausrichtung. Für die Smartphone-Messungen wird die Sendeantenne genau auf die gleiche Höhe gefahren, in der sich die Smartphones auf dem Positioniersystem befinden.

Zusätzlich verfügt die Messkammer über ein Positioniersystem für die zu testende Antenne, wo in diesem Fall die Smartphones platziert werden. Dieser Positionierer kann um die vertikale

Achse rotieren und wird für die Ausrichtung der Smartphones genutzt. Die Wiederholgenauigkeit der Linearachsen beträgt $\pm 0,2$ mm und die Rotationsachse weist eine Winkelgenauigkeit von $0,16^\circ$ auf. Die Positionier- und Wiederholgenauigkeit der Anlage liegt ist für die hier gemachten Untersuchungen mehr als ausreichend. Der größte Positionierfehler ergibt sich durch die Positionierung des Smartphones in und auf der Schaumstoffhalterung. Aber auch diese Ungenauigkeit beeinträchtigt in keiner Weise die Aussagekraft und Verwertbarkeit der Ergebnisse. Der Abstand des Positionierers zur Sendeantenne an der Rückwand der Kammer kann variiert werden, indem er manuell auf einer Schiene verfahren wird. Der Abstand wurde so gewählt, dass für die durchzuführenden Messungen von Fernfeldbedingungen ausgegangen werden kann (laut CTIA [119]). Er betrug von der Vorderkante der Sendeantenne bis zum Mittelpunkt des Positioniersystems 1,76 m.

Abbildung 3-17 zeigt den Messaufbau innerhalb der Messkammer. Im Vordergrund ist das Positioniersystem mit der Schaumstoffhalterung für die Smartphones zu sehen. Hinten in der Mitte der Rückwand befindet sich die Sendeantenne (hier in horizontaler Ausrichtung der Polarisation des E-Feldes). Die Empfangsantenne für den Uplink ist hinten unten links zu sehen. Am linken Rand befindet sich außerdem der reflexionsarme Laufsteg.

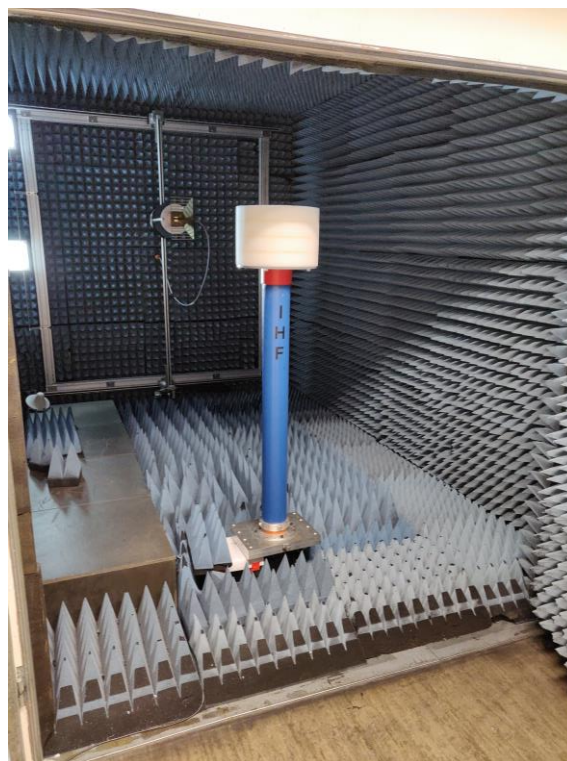


Abbildung 3-17 Blick in die für die Labormessungen genutzte Messkammer.

3.4.1.1.3 Automatisierung der Messungen

Um die Messungen in der Zahl und dem Umfang überhaupt bewältigen zu können, wurde der Messablauf so weit wie möglich automatisiert. Dafür wurden in MATLAB entsprechende Ansteuerungsklassen aller zu steuernden Geräte entwickelt und auf die Bedürfnisse der Messaufgabe zugeschnitten. Für die einzelnen Messungen wurden Skripte implementiert, die den Ablauf mithilfe der geschaffenen Schnittstellen umsetzen. Konkret sieht der grundsätzliche Ablauf so aus, dass zunächst die verwendeten Geräte auf die notwendigen Grundeinstellungen vorkonfiguriert werden. Nachdem das zu untersuchende Endgerät in die entsprechende

Position gebracht wurde und die Sendeantenne in der geforderten Polarisierung montiert wurde, stellt das Skript jeweils die einzelnen Messparameter (Frequenzen, Signalpegel, Ausrichtung des Positionierers) nacheinander auf die zu testenden Werte ein und fragt anschließend das Messergebnis ab. So wird verfahren, bis sämtliche zu prüfenden Konstellationen abgearbeitet sind. Wenn für die Messung erforderlich, hält das Messskript zwischendurch an und fordert dazu auf die Polarisierung der Sendeantenne bzw. die Drehachse des Smartphones zu wechseln, da diese Anpassungen nicht automatisch vorgenommen werden können. Nach entsprechendem Umbau und Bestätigung wird die Messung fortgesetzt.

Die abgefragten Messdaten werden zusammen mit den bei der Messung vorliegenden Parametern tabellarisch zwischengespeichert und am Ende der Messung abgespeichert.

3.4.1.1.4 Antennen

Für die Messungen kamen folgende Antennen zum Einsatz:

- **SH 800 von Satimo:** Zum Aussenden der Mobilfunksignale, die eine definierte Feldverteilung und Orientierung aufweisen sollen, wurde die breitbandige Hornantenne des Typs SH 800 von Satimo verwendet (siehe Abbildung 3-18). Sie ist für den Frequenzbereich von 800 MHz bis 12 GHz geeignet und verfügt über eine hohe Polarisationsreinheit. Sie behält über die gesamte Betriebsbandbreite eine wohldefinierte, glatte Abstrahlcharakteristik in Richtung der Zielachse und ist damit für diese Messaufgabe bestens geeignet. Die Antenne ist auf einem Metallkäfig montiert, der mittels eines Flansches die exakte und wiederholgenaue Montage der Antenne in Messanlagen ermöglicht.



Abbildung 3-18 Für die Labormessungen verwendet Antenne SH 800 von Satimo

- **Mexikanerhut-Antenne für die Mobilfunk-Indoor-Versorgung:** Zum Empfang der Signale der Smartphones durch den Basisstationssimulator kommt eine oft als Mexikanerhut-Antenne bezeichnete Antenne aus dem Bereich der Mobilfunk-Indoor-Versorgung zum Einsatz. Da es hierbei keine besonderen Anforderungen an die Richtcharakteristik der Antenne gibt, ist diese Antenne zu diesem Zweck ausreichend.

3.4.1.1.5 Halterung für Smartphones

Um die Smartphones auf dem Positioniersystem in der Messkammer platzieren zu können, wurde ein Schaumstoffzylinder aus elektrisch neutralem Material gefertigt. Dieser kann auf einem speziell für diesen Zweck gebauten Kunststoffteller montiert werden. Der Schaumstoffzylinder verfügt über einen Schlitz, sodass die Smartphones für die drei zu messenden Rotationsachsen liegend, aufrechtstehend und auf der Seite stehend/liegend positioniert werden können. Zur Unterstützung der Platzierung wurden Hilfslinien auf der Oberseite des Schaumstoffzylinders aufgebracht. Die Einstecktiefe in den Schlitz und die rechtwinklige Ausrichtung wurde mittels Geodreieck abgemessen.

Es wurde diese Form der Halterung gewählt, da sie für unterschiedliche Smartphone-Größen geeignet ist und eine zügige und verlässliche Platzierung in den verschiedenen Orientierungen erlaubt. Abbildung 3-19 zeigt die Halterung mit den Markierungen auf dem Positioniersystem.

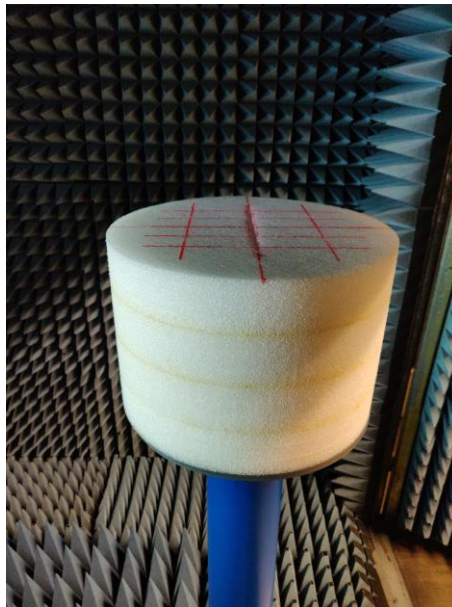


Abbildung 3-19 Schaumstoffhalterung zur Positionierung der Smartphones in der Messkammer

3.4.1.1.6 Bezeichnung der Smartphone-Achsen

Die Bezeichnungen der Smartphone-Achsen ist in Abbildung 3-20 dargestellt. Sie entspricht der gängigen Achsenbezeichnung, wie sie auch bei den Smartphone-Sensoren Verwendung findet. Bei den in der weiteren Dokumentation genutzten Bezeichnung der Ausrichtung der Smartphones ist mit der Achsausrichtung gemeint, dass die jeweilige Achse der Rotationsachse des Positioniersystems entspricht und somit der Vertikalachse. Dabei zeigt der Pfeil der Achse nach oben.

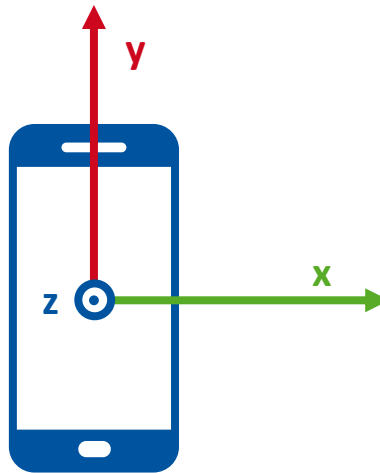


Abbildung 3-20 Bezeichnung der Achsen eines Smartphones

3.4.1.1.7 Auswahl der Kanalfrequenzen

Die Kanalfrequenzen wurden derart ausgewählt, dass sie stets mit einer zum Zeitpunkt der Messungen von einem der Netzbetreiber genutzten Kanalfrequenz übereinstimmen. Dabei wurde die Auswahl über die Mobilfunkgenerationen hinweg so gestaltet, dass alle Netzbetreiber ungefähr gleichmäßig vertreten sind. Bei LTE wurde bei der überwiegenden Anzahl der Smartphones sämtliche genutzten LTE-Kanalfrequenzen aller Netzbetreiber gemessen. Da die Abschaltung von UMTS in Deutschland absehbar war, wurde hierfür kein zusätzlicher Aufwand getrieben. Bei GSM sind die Kanalfrequenzen so vielfältig, dass Kanalfrequenzen im für GSM genutzten Frequenzbereich fest ausgewählt wurden.

3.4.1.1.8 Kalibrierung des Messaufbaus

Um einen Umrechnungsfaktor von den Signalstärkemesswerten der Smartphones abzuleiten zu können, ist es erforderlich die vorliegende elektrische Feldstärke der Mobilfunkreferenzsignale zu kennen. Diese wurde daher für alle gemessenen Funkstandards und -frequenzen vor Beginn der Messungen ermittelt.

Für die Messung der elektrischen Feldstärke kam das Feldstärkemessgerät SRM-3006 von Narda zum Einsatz. Für LTE und UMTS wurden die entsprechenden code-selektiven Messoptionen genutzt, um den gleichen Signalanteil aus dem Mobilfunksignal zu extrahieren, der auch von den Smartphones zur Bestimmung der Signalstärke genutzt wird. Bei GSM wird der Messmodus „Level Recorder“ verwendet, um die Signalleistung auf dem BCCH-Kanal zu bestimmen.

Die Messung wird an insgesamt 17 Punkten im Bereich, in dem sich die Smartphones später befinden ausgeführt. Auf zwei zum Boden parallelen Ebenen mit einem Abstand von 20 cm liegen jeweils acht Punkte auf einer Kreisbahn. Auf dem Mittelpunkt zwischen den beiden Ebenen, der gleichzeitig der Mittelpunkt ist, um den die Smartphone-Orientierungen gedreht werden, liegt der letzte Punkt.

In dem Drehteller, auf dem der Schaumstoffzylinder montiert wird, wurden Öffnungen vorgesehen, durch die der Arm der Messsonde des SRM-3006 hindurchgeführt werden kann (siehe Abbildung 3-21). Die Sonde wird jeweils in der passenden Höhe der Ebenen montiert. Die acht auf einer Ebene werden dann durch Rotation des Drehtellers nacheinander angefahren. Das

SRM-3006 wird über das USB-Kabel ferngesteuert, um die passenden Messmodi einzustellen und die Messergebnisse abzufragen. Die zu messenden Konfigurationen werden zuvor am Basisstationssimulator ebenfalls automatisiert eingestellt.

Die verwendete 3-achsige Messsonde des SRM-3006 ermöglicht nahezu isotrope Feldstärkemessungen. Da sich bei Vorabtests allerdings gezeigt hat, dass sich die Polarisation und Ausrichtung der Sonde im Labor auf die Messergebnisse auswirken, wurden die Messungen für beide Polarisationen der Sendeantenne sowie jeweils für vier um 90° um die Vertikalachse gedrehte Ausrichtungen der Messsonde an jedem der Messpunkte ausgeführt, um diese Effekte weitgehend zu kompensieren. Der Grund dafür dürfte darin liegen, dass die Messsonde für den Einsatz in typischen Umgebungen mit Mehrwegeausbreitung konzipiert ist. Bei einem Signaleinfall mit nur einer Polarisation und nur einer Einfallsrichtung kommen die technischen Grenzen einer angenäherten isotropen Messung jedoch voll zum Tragen. Dass diese Abweichungen nicht durch eine unzureichende Dämpfung der Reflexionen in der Messkammer und daraus resultierenden stehenden Wellen verursacht werden, konnte dadurch ausgeschlossen werden, dass bei Probemessungen auch in einem anderen Abstand zur Sendeantenne gemessen worden ist. Das erhaltene Messergebnis änderte sich nur in der Art, wie es bei entsprechender Änderung des Abstands zur Sendeantenne zu erwarten war. Wären stehende Wellen in der Messkammer aufgetreten, hätten sich durch die Verschiebung des Messorts deutliche Pegeländerungen ergeben müssen.



Abbildung 3-21 In Messkammer montierte Messsonde zur Ermittlung der elektrischen Feldstärke am Messort der Smartphones

Links: Montiert für den Mittelpunkt

Rechts: Montiert an Außenposition zum Anfahren der 8 Punkte der unteren Ebene

Aus sämtlichen Messungen wird für jeden Kanal ein Mittelwert gebildet, der als Feldstärke am Ort des Smartphones für die weiteren Untersuchungen angenommen wird. Die aus diesen Messdaten gemittelten Feldstärken wurden außerdem mit theoretisch berechneten Werten

aus den technischen Daten der verwendeten Komponenten verglichen und es zeigte sich, dass diese insgesamt gut übereinstimmten. Die tatsächlichen Messwerte unterschritten die theoretisch ermittelten Werte um 2,5 bis 3 dB, was auf Dämpfungseffekte, die nicht ausreichend durch alle technischen Daten berücksichtigt sein könnten, sowie von den verwendeten Geräten herrühren könnte.

3.4.1.2 *Linearität der Signalstärkemessung*

3.4.1.2.1 Ziel der Untersuchung

Ziel dieser Untersuchung ist es, bei jedem der untersuchten Smartphones eine Überprüfung der Linearität der Signalstärkemessung vorzunehmen. Das Verhalten am Rande des Wertebereichs wurde nur für einen Teil der Smartphones untersucht. Die Ergebnisse wurden bereits in Abschnitt 3.3.5 gezeigt.

3.4.1.2.2 Durchführung

Der grundlegende Messaufbau entspricht dem in Abschnitt 3.4.1.1 beschriebenen.

Nachdem das Smartphone eine Verbindung mit dem Basisstationssimulator hergestellt hat, wird der Signalpegel ausgehend vom maximal möglichen Ausgangspegel in 1 dB-Schritten verringert und jeweils ein neuer Messwert abgerufen. Dies wird fortgesetzt, bis die Verbindung zum Smartphone abreißt.

Die Messung wurde für jede der Achsen des Smartphones und bei beiden Polarisationsausrichtungen der Sendeantenne ausgeführt. Dabei war grundsätzlich die Rückseite des Smartphones in Richtung der Sendeantenne orientiert. Damit ergibt es sich, dass durch die Drehung der Polarisation und der Smartphone-Achse die Kombinationen „vertikale Polarisation, y-Achse“ und „horizontale Polarisation, x-Achse“ bzw. „vertikale Polarisation, x-Achse“ und „horizontale Polarisation, y-Achse“ prinzipiell redundant sind.

3.4.1.2.3 Ergebnisse

Stellvertretend für die 40 gemessenen Smartphones werden in den Abbildungen 3-22 und 3-23 die repräsentativen Ergebnisse für die Smartphones „Google Pixel 4“ sowie „OnePlus 6“ gezeigt. Für jedes gemessene Frequenzband ist ein eigenes Diagramm enthalten. Auf der x-Achse befindet sich die bei der Messung vorliegende elektrische Feldstärke des Referenzsignals des jeweiligen Funkstandards. Auf der y-Achse ist der vom Smartphone gemessene Signalstärkewert abgetragen.

Den Abbildungen ist zu entnehmen, dass für die meisten Konstellationen bei Änderung des vorliegenden Feldstärkepegels des Referenzsignals ein linearer oder zumindest annähernd linearer Zusammenhang mit dem vom Smartphone gemessenen Signalpegel besteht. Die zu beobachtenden kleinen Abweichungen entlang der ansonsten gerade verlaufenden Kurven können durch einen Signalpegel, der nah an der Grenze zwischen zwei Quantisierungsstufen (1 dB-Schritte) liegt, hervorgerufen werden. Bereits minimale Unterschiede bei den einzelnen Messergebnissen können dann dazu führen, dass die nächste Quantisierungsstufe erreicht wird oder nicht. Manche Smartphones zeigen jedoch größere Abweichungen von einem geraden Verlauf, der nicht mehr allein mit der Quantisierung zu erklären ist. Innerhalb des ansons-

ten linearen Verlaufs gibt es in diesen Fällen einen Sprung und die Kurve wird auf einer parallelen Geraden fortgesetzt. Vermutlich ergibt sich dieser Sprung durch einen Umschaltvorgang innerhalb des Empfängers des Smartphones, der abhängig vom Signalpegel die Eingangsempfindlichkeit anpasst. Durch eine fehlerhafte Kalibrierung der unterschiedlichen Eingangsschwächungen, könnte es zu dieser Unstetigkeit in den Kurvenverläufen kommen. Dass der Sprung nur in bestimmten Ausrichtungen auftritt, könnte auch mit den mehreren vorhandenen Empfangszweigen der Endgeräte und deren Zusammenspiel zusammenhängen.

Bei den Messungen zu Wertebereichen und Limits (vgl. Abschnitt 3.3.5), wo der Signalpegel in beide Richtungen variiert wurde, konnte mehrfach beobachtet werden, dass der Sprung Hystereseverhalten aufweist, da er sich abhängig von der Änderungsrichtung des Signalpegels an unterschiedlichen Stellen vollzieht und zwar so, dass er mit Verzögerung auftritt. Abbildung 3-24 zeigt dies an einem Beispiel für das OnePlus 6.

Allerdings kann für GSM beim OnePlus 6 im unteren Signalpegelbereich zum Teil ein Zickzack-Verlauf beobachtet werden. Dieser ist ebenfalls das Resultat des beobachteten sprunghaften Verhaltens. Allerdings scheint es hier anstelle eines einmaligen Umschaltens immer wieder zu einem Umschalten zwischen den beiden Zuständen des Empfängers zu kommen.

Die Kurven der verschiedenen Orientierungen des Smartphones und der beiden Polarisationsrichtungen der Sendeantenne sind teilweise deutlich zueinander verschoben. Dies resultiert aus der Polarisations- und Richtungsabhängigkeit des Empfangs der Smartphones, wie er in Abschnitt 3.4.1.3 genauer dargestellt wird.

Bei LTE kommt es beim höchsten Feldstärkepegel bei einigen Kurven in unterschiedlichem Ausmaß zu einem Knick, obwohl nicht der maximal messbare Wert erreicht ist. Dies ist vermutlich ein Resultat des Messablaufs. Die Messungen der Linearität und der Ausrichtungsabhängigkeit wurden für die Kanäle nacheinander ausgeführt, wobei der Signalpegel bei der Messung der Ausrichtungsabhängigkeit um 10 dB niedriger als der maximale Ausgangspegel war. Vermutlich wäre auch bei LTE trotz anderslautender Empfehlung vom Hersteller des Basisstationssimulators Anritsu ein mindestens zweifaches Zurücksetzen der Messwerte erforderlich gewesen, um einen Einfluss von vorhergehenden Messeinstellungen vollständig auszuschließen. Da die Änderung des Signalpegels bei den übrigen Messungen kleinschrittig erfolgt, ist der weitere Einfluss auf den Rest der Ergebnisse als gering einzuschätzen. Da bei der Messung der Wertebereiche und Limits dieses Verhalten auch bei den gleichen Smartphones nicht beobachtet wurde, kann mit sehr hoher Sicherheit ausgeschlossen werden, dass es sich um eine Eigenschaft der Smartphone-Messung handelt.

Die Beobachtungen zwischen den einzelnen Mobilfunkstandards unterscheiden sich nicht grundlegend voneinander, sondern zeigen ein sehr ähnliches Verhalten.

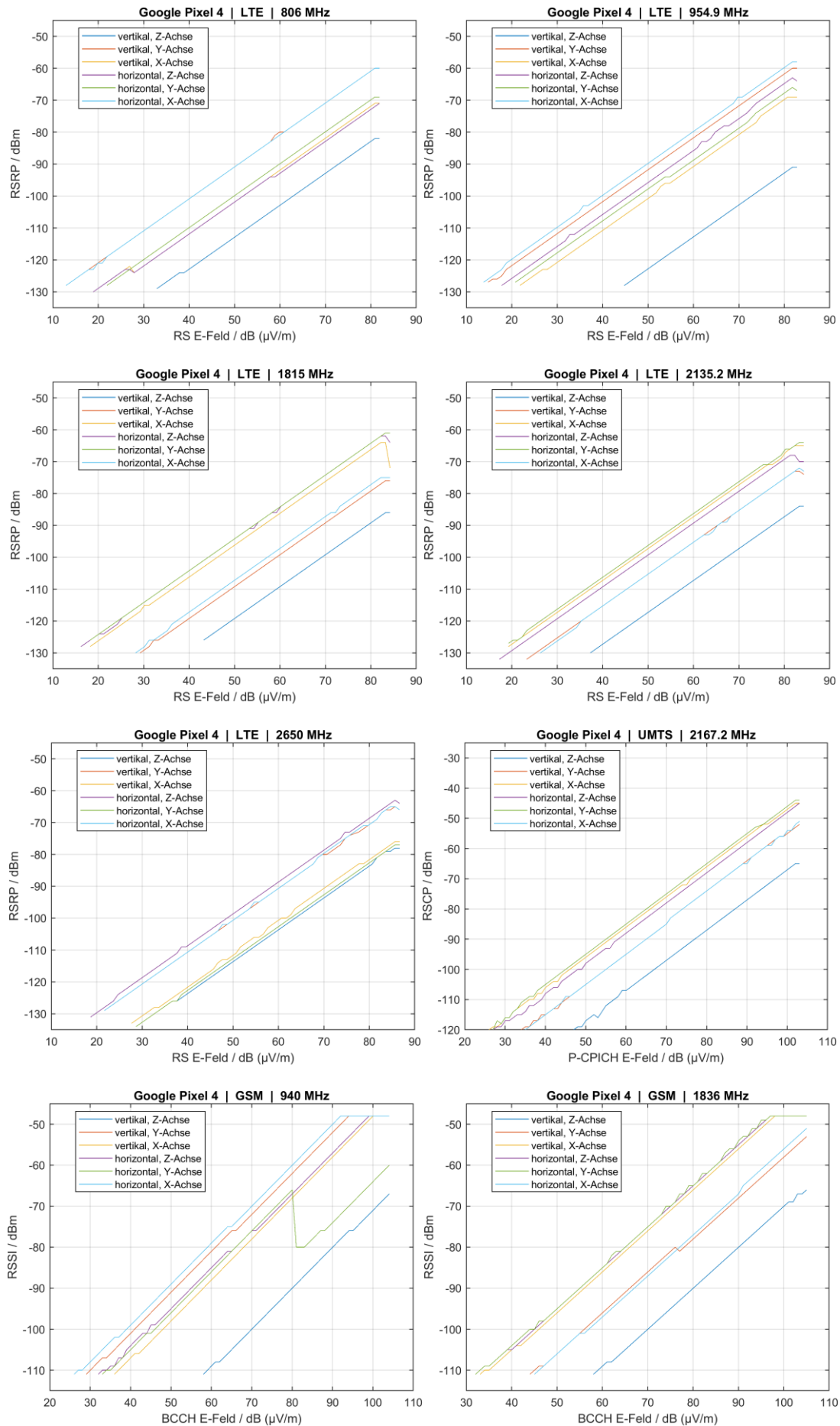


Abbildung 3-22 Ergebnisse der Messungen zur Linearität für das Smartphone „Google Pixel 4a“

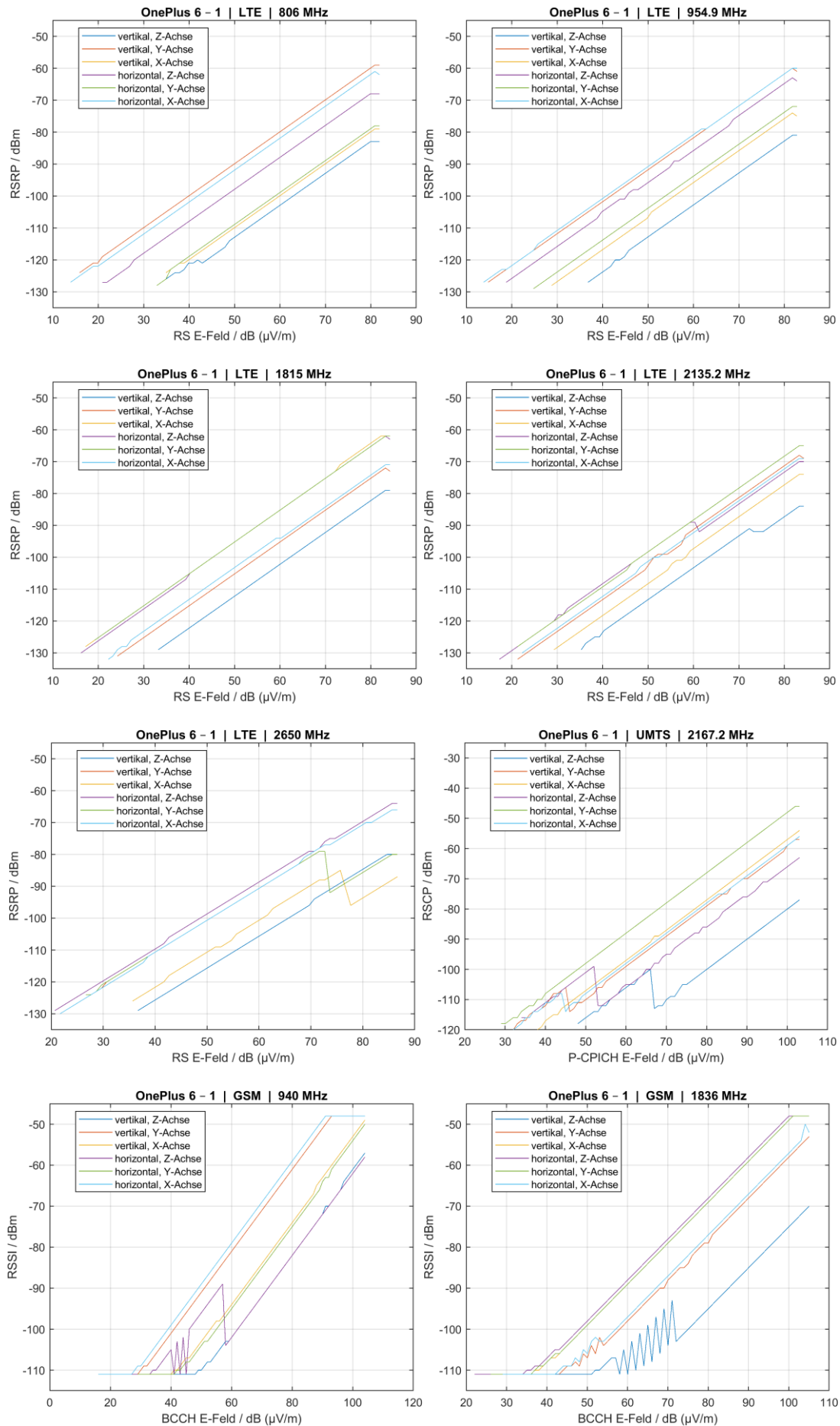


Abbildung 3-23 Ergebnisse der Messungen zur Linearität für das Smartphone „OnePlus 6“

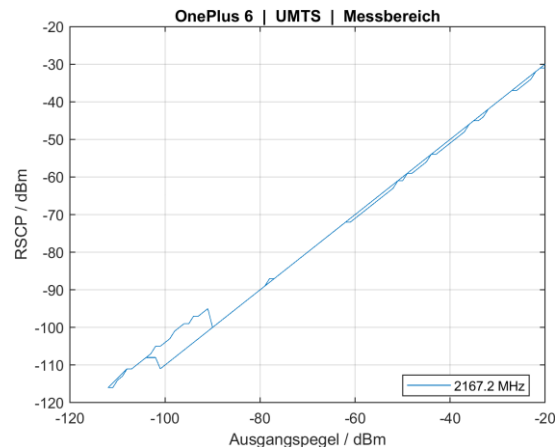


Abbildung 3-24 Beispiel für hysteretisches Verhalten bei Sprüngen im linearen Verlauf der Signalpegelmessung

3.4.1.2.4 Erkenntnisse

Die Untersuchungen zur Linearität der Signalstärkemessung der Smartphones haben gezeigt, dass in den meisten Fällen ein linearer Zusammenhang zwischen der vorliegenden Feldstärke des Referenzsignals und der vom Smartphone gemessenen Signalstärke besteht. Eine Veränderung des Feldstärkepegels um 1 dB führt demnach auch zu einer Anpassung des vom Smartphone gemessenen Signalpegels um 1 dB. Abweichungen sind in diesen Fällen minimal und ergeben sich aus Messwerten, die nahe an der Grenze zwischen zwei Quantisierungsstufen liegen.

Allerdings gibt es auch Fälle, in denen es zu größeren Sprüngen im ansonsten linearen Signalverlauf kommt. Sie liegen teilweise bei über 10 dB. Sie besitzen das Potential die Genauigkeit der Signalstärkemessung zu beeinträchtigen und sind nachteilig für die beabsichtigte Nutzung für ein HF-Messnetzwerk. Die Tatsache, dass diese Sprünge nur in bestimmten Ausrichtungen des Smartphones beobachtet wurden, relativiert die zu erwartenden Auswirkungen jedoch wieder. In einer realen Ausbreitungsumgebung trifft das Signal aufgrund von Mehrwegeausbreitung nicht wie in diesem Labormessaufbau aus nur einer sondern aus vielen Richtungen beim Endgerät ein. Dadurch könnte dieser Effekt abgeschwächt oder ganz aufgehoben werden.

3.4.1.3 *Richtungsabhängigkeit der Signalstärkemessung*

3.4.1.3.1 Ziel der Untersuchung

Ziel der Untersuchung ist es die Richtungsabhängigkeit des Empfangs der Smartphones bei der Messung der Signalstärkeindikatoren zu analysieren und typische Schwankungsbreiten sichtbar zu machen.

3.4.1.3.2 Durchführung

Der grundlegende Messaufbau entspricht dem in Abschnitt 3.4.1.1 beschriebenen.

Die Smartphones werden nacheinander mithilfe des Positioniersystems der Messkammer um ihre drei Hauptachsen (gemäß Abschnitt 3.4.1.1.6) in 5°-Schritten gedreht. Nach vollständiger Drehung wird auf den nächsten zu messenden Funkkanal bzw. -dienst gewechselt, bis alle gemessen wurden. Dies wird für beide Polarisationsausrichtungen der Sendeantenne und bei

konstantem Ausgangspegel des Basisstationssimulators ausgeführt. Für jede Position wird ein Messwert aufgezeichnet und gespeichert.

3.4.1.3.3 Ergebnisse

Wie bei der Untersuchung zur Linearität der Signalstärkemessung werden exemplarisch die Ergebnisse der beiden Smartphones „Google Pixel 4“ und „OnePlus 6“ in den Abbildungen 3-25 bis 3-28 gezeigt. Für die untersuchten Funkdienste werden darin für jedes gemessene Frequenzband zwei Diagramme nebeneinander dargestellt, die prinzipiell die gleiche Information in zwei unterschiedlichen Darstellungsformen liefern. Das linke Diagramm zeigt die Richtungsabhängigkeit in kartesischen Koordinaten, wobei auf der x-Achse die Winkel der Ausrichtung und auf der y-Achse der Signalstärkemesswert des Smartphones abgetragen ist. Das rechte Diagramm zeigt dies noch einmal in einem Polarkoordinatensystem.

Es wird eine deutliche Richtungsabhängigkeit des gemessenen Signalpegels bei Veränderung der Ausrichtung zur Sendeantenne erkennbar. Auch die zwei Polarisationsrichtungen der Sendeantenne führen zu deutlich unterschiedlichen Ergebnissen. Das grundsätzliche Bild sieht für alle Smartphones, alle Funkstandards und Frequenzbänder ähnlich aus. Meist gibt es bei einer bestimmten Achse (oft z-Achse) einen relativ flachen Verlauf, der aber für die horizontale und vertikale Polarisationsausrichtung der Sendeantenne auf einem deutlich unterschiedlichen Pegel liegt. Bei den übrigen Achsen gibt es meist eine Polarisation, die tiefere Einzüge im Kurvenverlauf (häufig zwei) zeigt, während die andere Polarisation ebenfalls eher flach verläuft. Die Ausprägungen sind im Einzelnen durchaus unterschiedlich. Die Tiefe kann insbesondere bei sehr schmalen Einzügen möglicherweise größer sein, als sie bei der Messung erfasst wurde, da durch die begrenzte Winkelauflösung die Nullstelle der Richtcharakteristik der Antenne nicht notwendigerweise exakt getroffen wird. Die beobachteten gesamten Schwankungsbreiten über alle gemessenen Konstellationen betragen bei den Smartphones typischerweise 30–40 dB und in einzelnen Fällen auch bis zu 50 dB. Die tatsächliche Schwankungsbreite könnte noch größer ausfallen, da die hier gemessenen drei Schnitte durch die Empfangscharakteristik des Smartphones nur einen Ausschnitt der Gesamtcharakteristik darstellen. Innerhalb des gleichen Frequenzbands sind die Kurvenverläufe eines Smartphones meist sehr ähnlich. Zwischen den Frequenzbändern und auch den Funkstandards finden sich auch größere Unterschiede.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde auch ein Vergleich der Ergebnisse von mehreren Smartphones des gleichen Modells vorgenommen. Von insgesamt drei Smartphone-Modellen waren zwei Endgeräte vertreten und von einem Smartphone-Modell drei Endgeräte.

Anhand des Smartphone-Modells „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ wird in den Abbildungen 3-29 und 3-30 einmal der Fall guter Übereinstimmung und einmal der Fall von deutlichen Unterschieden demonstriert. Auf der linken Seite der Abbildung sind jeweils die Ergebnisse der Messung zur Linearität und Richtungsabhängigkeit des einen Geräts den entsprechenden Ergebnissen des zweiten Geräts auf der rechten Seite gegenübergestellt. In Abbildung 3-29 sind zwar Unterschiede erkennbar aber insgesamt fallen diese geringfügig aus. Demgegenüber sind in Abbildung 3-30 deutliche Abweichungen zwischen den Ergebnissen der beiden Smartphones zu erkennen. Hier sind bereits bei den linearen Signalpegelverläufen Verschiebungen der korrespondierenden Kurven zueinander zu erkennen. Außerdem zeigt sich bei nach oben

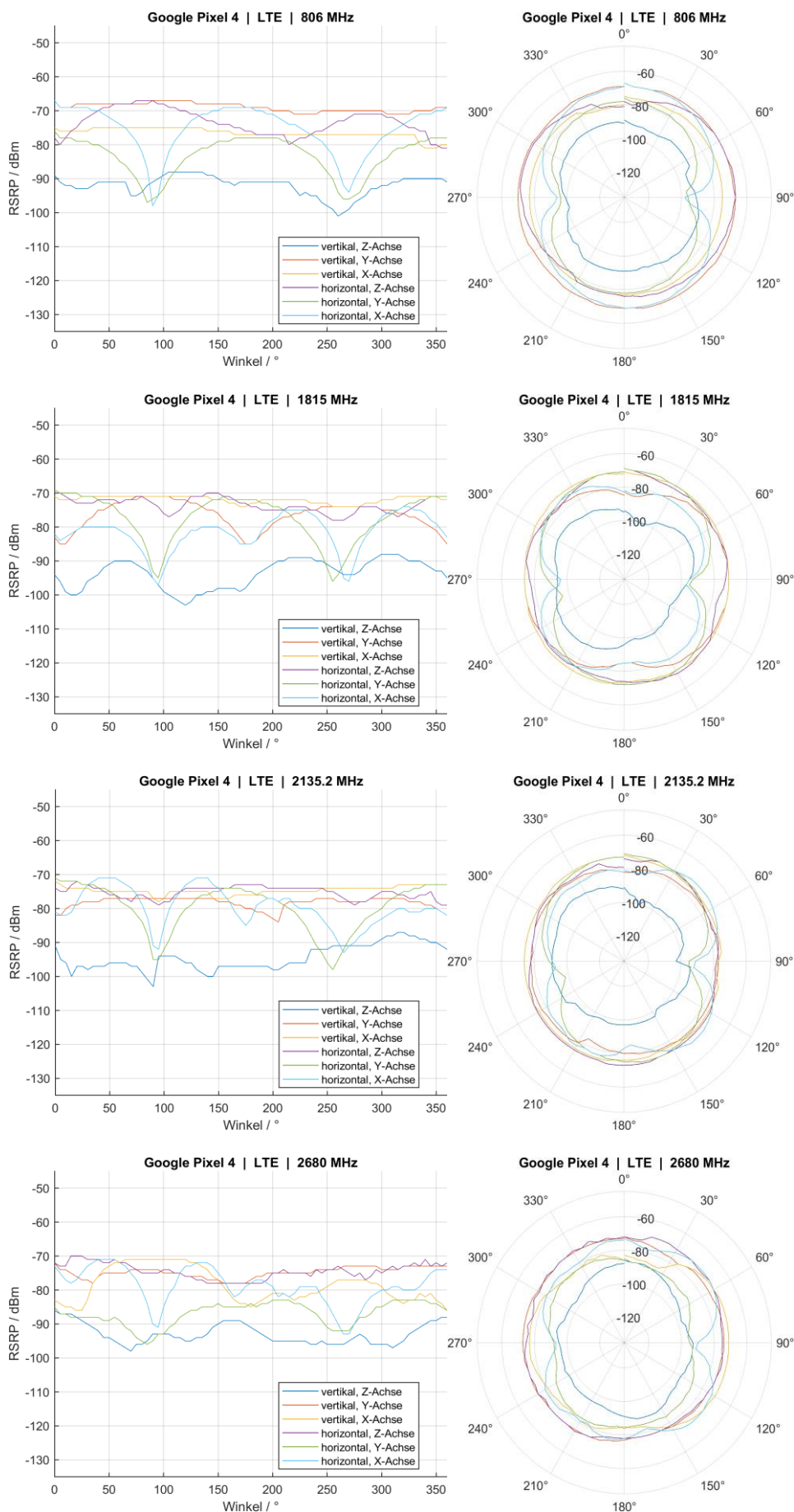


Abbildung 3-25 Ergebnisse der Messungen zur Richtungsabhängigkeit für das Smartphone „Google Pixel 4a“ bei LTE

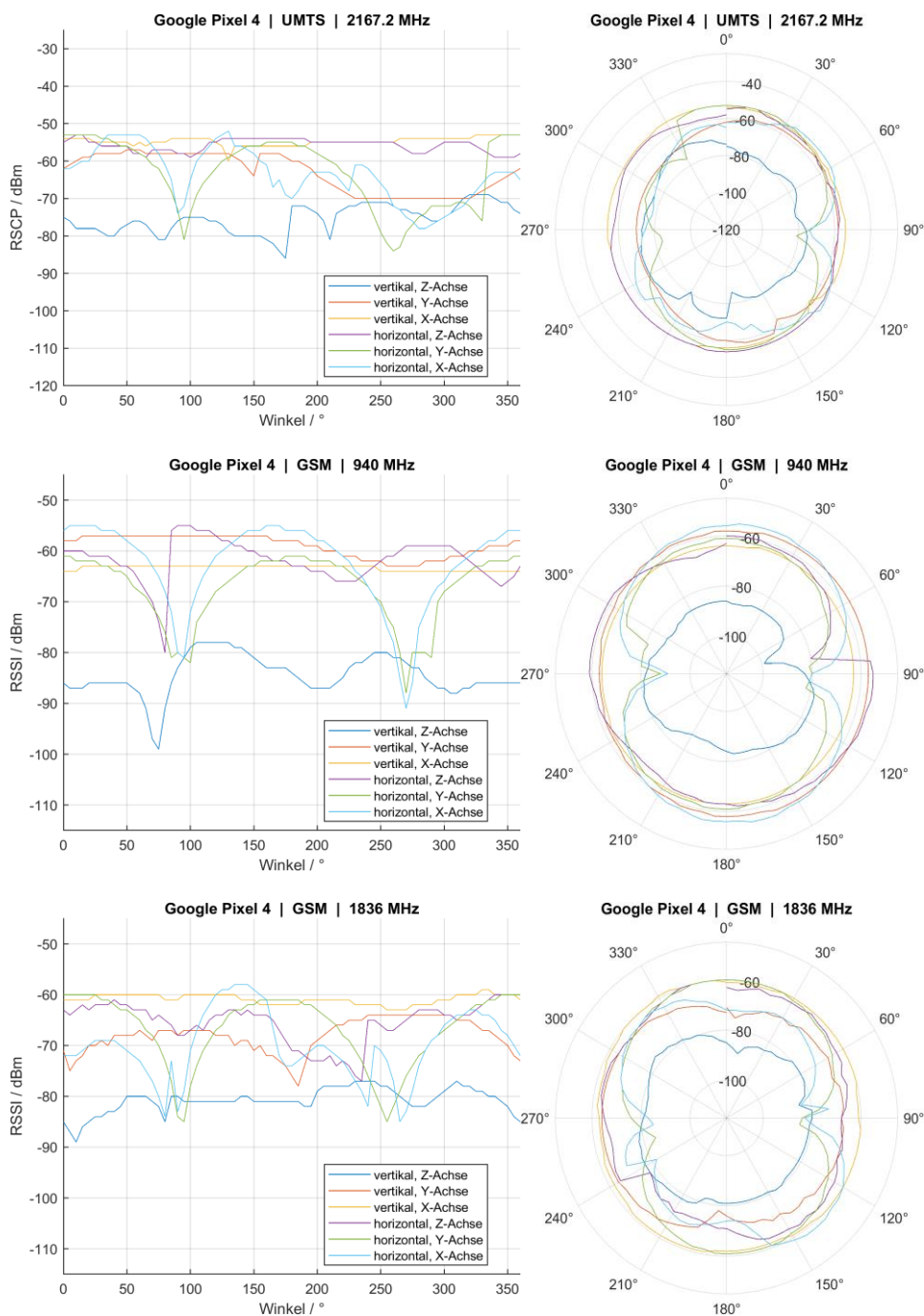


Abbildung 3-26 Ergebnisse der Messungen zur Richtungsabhängigkeit für das Smartphone „Google Pixel 4a“ bei UMTS und GSM

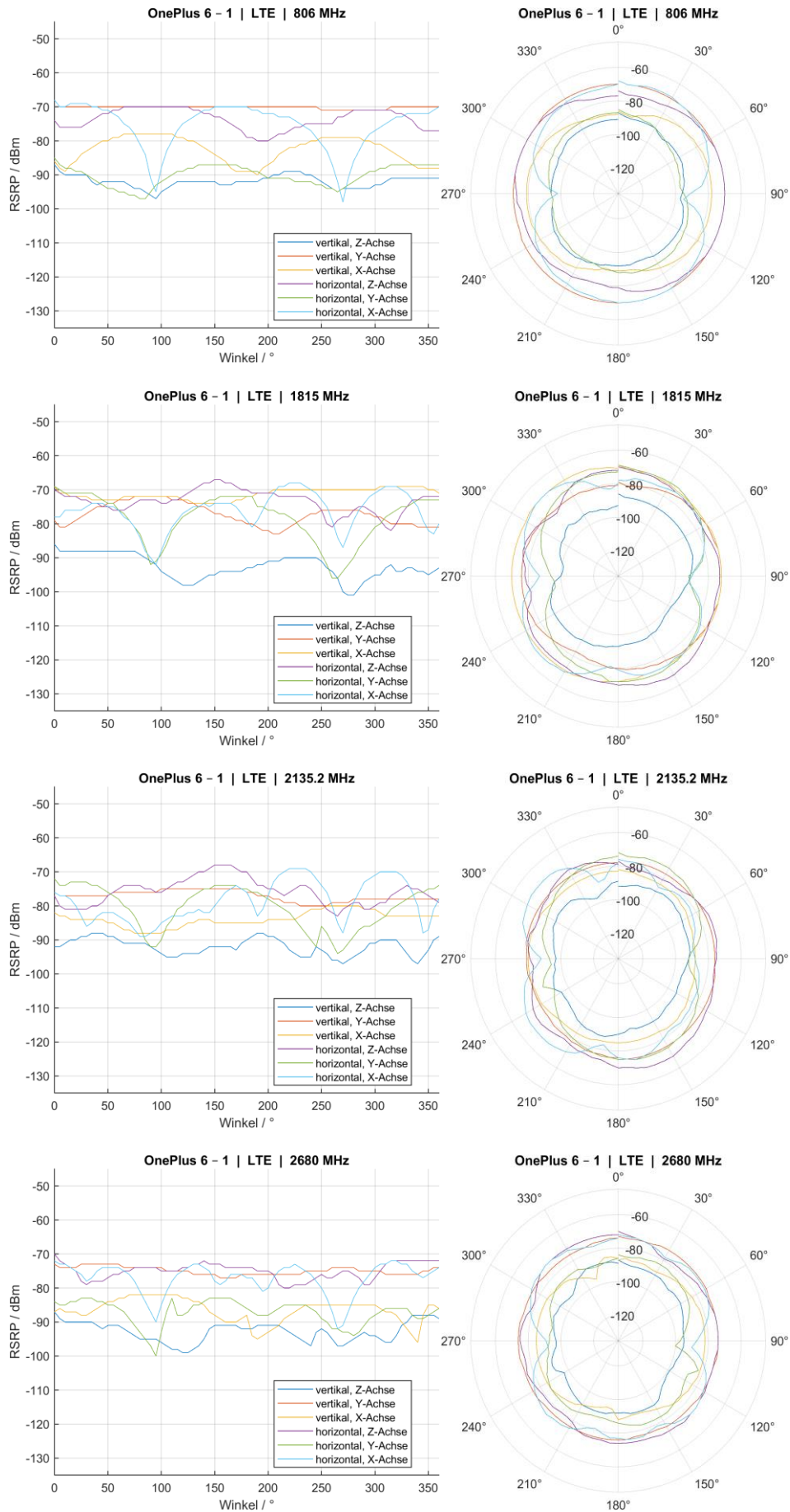


Abbildung 3-27 Ergebnisse der Messungen zur Richtungsabhängigkeit für das Smartphone „OnePlus 6“ bei LTE

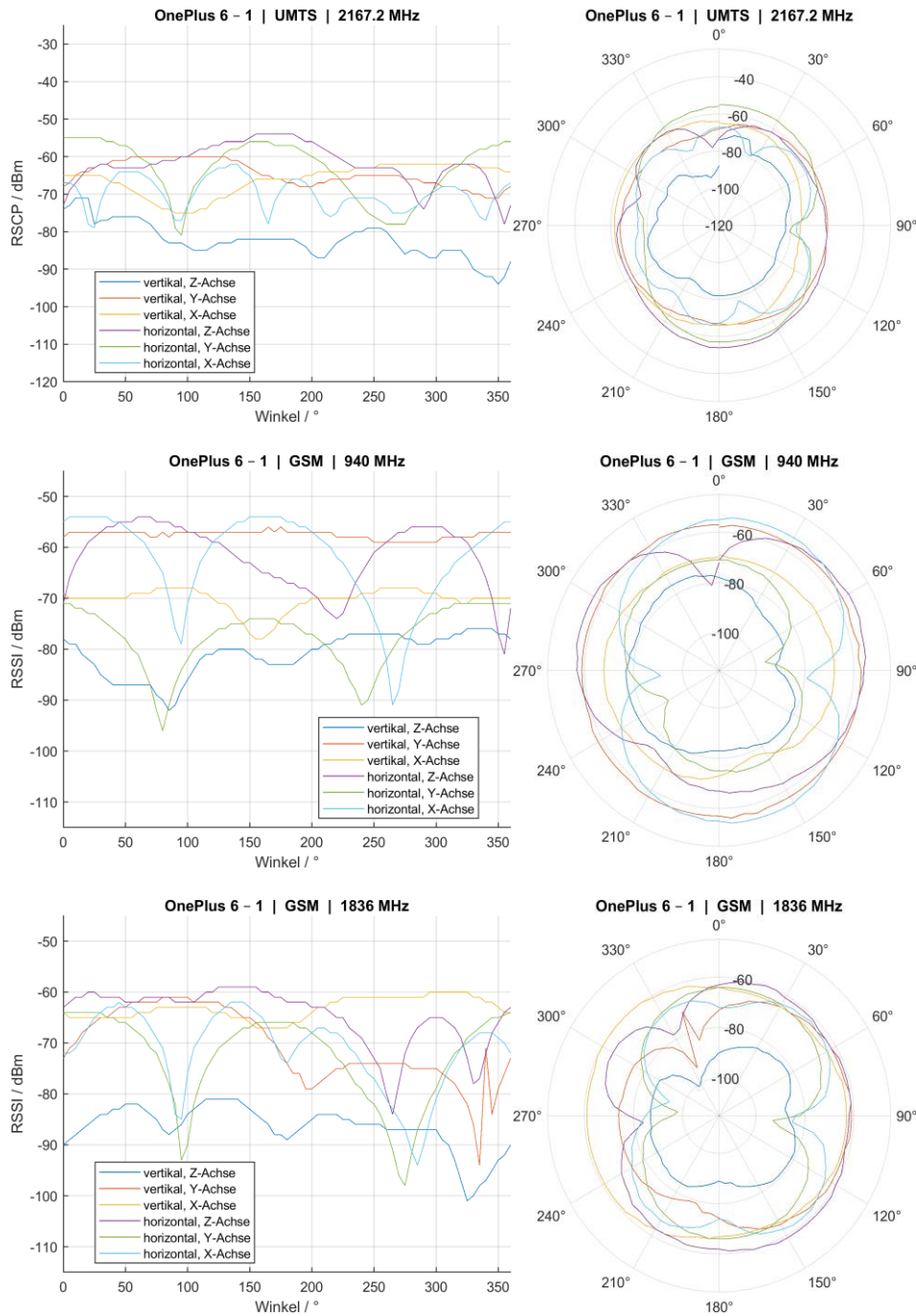


Abbildung 3-28 Ergebnisse der Messungen zur Richtungsabhängigkeit für das Smartphone „OnePlus 6“ bei UMTS und GSM

gerichteter Z-Achse und vertikaler Polarisation bei einem Gerät ein deutlicher Signalpegelsprung, der bei dem anderen nicht auftritt. Die kleineren Signalpegelsprünge bei nach oben ausgerichteter X-Achse für horizontale Polarisation bzw. nach oben gerichteter Y-Achse für vertikale Polarisation treten außerdem bei etwa 10 dB unterschiedlichem Pegel des Referenzsignals auf. Auch bei den Rotationsmessungen sind einerseits deutliche Verschiebungen der korrespondierenden Kurven zueinander zu erkennen und andererseits auch Abweichungen im Verlauf der Kurven. Besonders hervorzuheben ist in den linken Diagrammen der Ausrichtungsmessungen, dass sich hier der Sprung im linearen Verlauf der Kurve für die nach oben gerichtete Z-Achse bei vertikaler Polarisation in vergleichbarer Weise für den Bereich zwischen etwa

110° und 175° finden lässt. Aufgrund dieser Beobachtung und den bereits beschriebenen Verschiebungen von Kurven zueinander, ist es denkbar, dass auch dies das Resultat von unterschiedlichen Abstimmungszuständen der Empfänger ist und diese lediglich während der Messungen keine Umschaltung vorgenommen haben.

Die Beobachtungen bei den weiteren Geräten ähneln den gezeigten Ergebnissen und werden an dieser Stelle deshalb nicht einzeln aufgeführt.

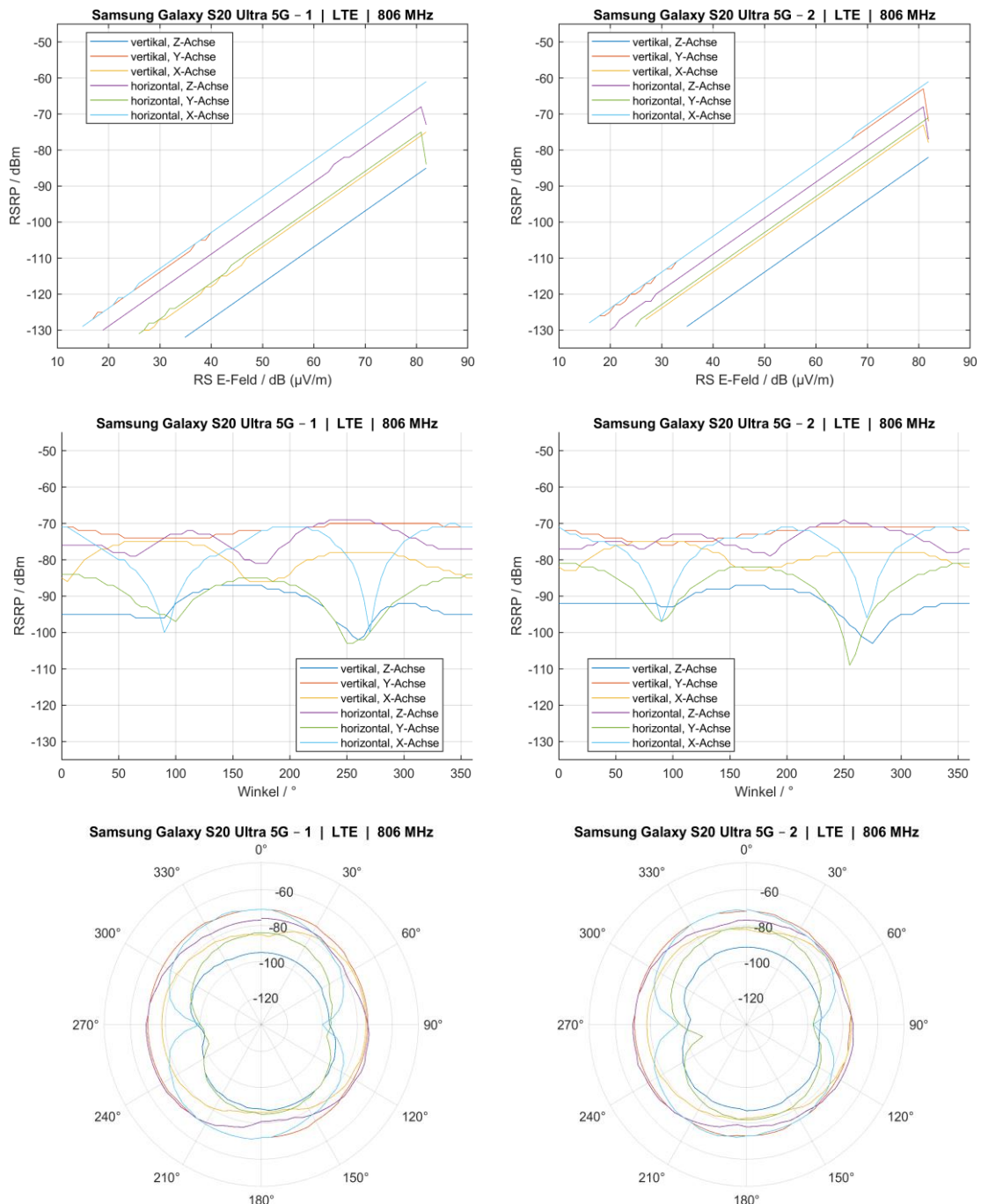


Abbildung 3-29 Übereinstimmung der Signalstärkemessung für zwei Smartphones des gleichen Modells am Beispiel beider Smartphones vom Modell „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ bei 806 MHz

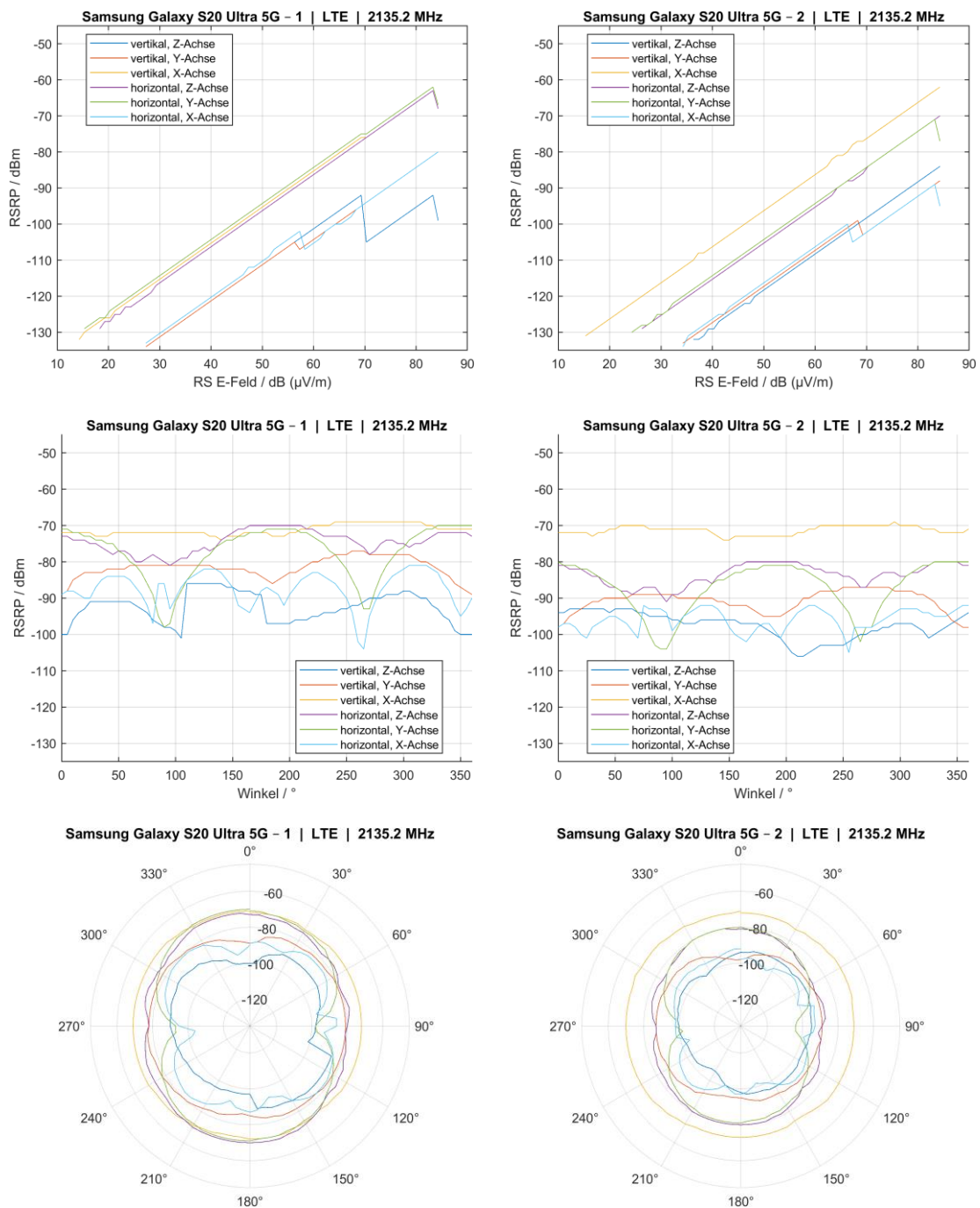


Abbildung 3-30 Nichtlineares Verhalten der Signalstärkemessung am Beispiel der beiden Smartphones vom Modell „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ bei 2135,2 MHz

3.4.1.3.4 Erkenntnisse

Die Erkenntnisse der Messungen zur Richtungsabhängigkeit lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Alle Smartphones zeigen eine deutliche Richtungsabhängigkeit der Signalstärkemessung. Sowohl die Ausrichtung zur Sendeantenne als auch die Polarisation der Sendeantenne beeinflussen den Signalpegel deutlich.
- Die beobachteten gesamten Schwankungsbreiten über alle gemessenen Konstellationen betragen bei den Smartphones typischerweise 30–40 dB und in einzelnen Fällen auch bis zu 50 dB.

- Innerhalb des gleichen Frequenzbands sind die Kurvenverläufe eines Smartphones meist sehr ähnlich. Zwischen den Frequenzbändern und den Funkstandards finden sich auch größere Unterschiede.
- Die Messung mehrere Smartphones des gleichen Modells führte nur teilweise zu gut übereinstimmenden Ergebnissen. Manchmal ist die Übereinstimmung auch nur für einzelne Frequenzbänder gut. Oft sind korrespondierenden Kurven der gleichen Drehachse und Polarisation nur zueinander verschoben, aber ansonsten recht ähnlich. Es gibt jedoch auch Fälle in denen die Verläufe zusätzlich voneinander abweichen. Neben generellen Unterschieden in den Empfangseigenschaften der Smartphones könnten insbesondere Umschalteffekte im Empfänger eine Rolle spielen. Einerseits könnte das Umschalten der Empfängerempfindlichkeit eine Rolle spielen, wenn dabei ein Sprung im gemessenen Signalpegel entsteht. Andererseits könnte zwischen mehreren parallel genutzten Empfangszweigen des Empfängers umgeschaltet werden. Dies könnte beides bei verschiedenen Geräten bei Unterschiedlichen Pegeln der Fall sein.

Die bei den Labormessungen deutlich gewordene starke Richtungsabhängigkeit des Smartphone-Empfangs erscheint auf den ersten Blick problematisch in Bezug auf die zu erzielende Messgenauigkeit eines Messnetzwerkes. Es muss jedoch beachtet werden, dass der dort nachgestellte Fall eines nur aus einer Richtung einfallenden Signals eine Extremsituation darstellt, die unter normalen Bedingungen im freien Feld praktisch nie anzutreffen ist. Aufgrund von Reflexionen kommt es nahezu immer zu Mehrwegeausbreitung, die dazu führt, dass das Signal aus mehreren Richtungen beim Empfänger eintrifft. Die scharfen Einzüge in den Kurven spielen in diesem Fall praktisch keine Rolle mehr, da ein Signal, das aus einer Richtung mit gutem Empfang eintrifft, letztendlich den dominierenden Beitrag zum empfangenen Signal leistet. Auch die in den Messungen beobachteten Sprünge und Verschiebungen der Messkurven dürften sich im freien Feld mit Mehrwegeausbreitung relativieren und geringer ins Gewicht fallen. Um dies auch unter Bedingungen im freien Feld zu verifizieren, wurden zusätzlich zu den bisher beschriebenen Labormessungen auch Messungen unter Feldbedingungen ausgeführt, die in Abschnitt 3.4.2 beschrieben werden.

3.4.1.4 Umrechnungsfaktoren

Zu den Zielen der Laboruntersuchungen gehörte neben der Analyse von Linearität und Richtungsabhängigkeit der Signalstärkemessungen der Smartphones auch die Ableitung von Umrechnungsfaktoren von der am Antennenanschluss vorliegenden empfangene Leistung hin zur elektrischen Feldstärke, die am Ort der Antenne vorherrscht.

Im Folgenden wird nun die Berechnung der Umrechnungsfaktoren von Signalstärkemesswerten der Smartphones in die entsprechende Feldstärke des Referenzsignals des jeweiligen Mobilfunkstandards vorgenommen. Es wird angenommen, dass im Langzeitmittel die Einfallsrichtung der beim Smartphone eintreffenden Signale isotrop verteilt ist. Dazu wird zunächst der Mittelwert der Signalstärkemesswerte der Messungen zur Richtungsabhängigkeit berechnet. Mithilfe der bei der Kalibrierung des Messaufbaus bestimmten Feldstärkewerte und der bei der Messung genutzten Ausgangsleistung des Basisstationssimulators kann damit der entsprechende Umrechnungsfaktor bestimmt werden. Gleichung 3-2 zeigt die zugehörige Berechnungsvorschrift.

$$K_{h,i} = L_{E,i} - \bar{L}_{P,h,i} = L_{E,i} - 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{P,h,i,j}}{10}} \right) \quad 3-2$$

Mit

- $K_{h,i}$ Umrechnungsfaktor des einzelnen Smartphones h in bei Frequenz i
- $L_{E,i}$ Feldstärke, die bei Frequenz i im Messvolumen durch die Kalibrierungsmessung ermittelt wurde, in dB ($\mu\text{V}/\text{m}$).
- $\bar{L}_{P,h,i}$ Mittlerer Signalpegel, der für das Smartphone h bei Frequenz i über alle Einzelmessungen j aller Orientierungen und beider Polarisierungen gemessen wurde.
- $L_{P,h,i,j}$ Signalpegel, der durch Smartphone h bei Frequenz i bei Einzelmessung j gemessen wurde.

Abbildung 3-31 veranschaulicht in Form eines Box-Plots, wie sich die damit ergebenden Umrechnungsfaktoren für die einzelnen Frequenzkanäle über alle Smartphones hinweg verteilen. Folgende Erkenntnisse lassen sich dieser Abbildung entnehmen:

- Der mittlere Umrechnungsfaktor aller Smartphones unterscheidet sich abhängig vom Frequenzband. Innerhalb eines Frequenzbandes sind die Unterschiede geringer als zwischen den Frequenzbändern.
- Die mittleren Umrechnungsfaktoren von UMTS und GSM liegen so zueinander wie die Umrechnungsfaktoren der korrespondierenden LTE-Frequenzbänder und stimmen recht genau mit diesen überein.
- Die Bandbreite der Smartphone-Umrechnungsfaktoren ist für LTE im 800 MHz-Band am geringsten und in allen anderen Bändern deutlich größer. Auch in diesem Punkt ähneln die Ergebnisse von UMTS und GSM den entsprechenden LTE-Bändern.
- Der Umrechnungsfaktor nimmt von niedrigen nach hohen Frequenzbändern zu.
- Unter Einbeziehung auch aller Smartphones mit deutlichen Abweichungen, schwanken die Umrechnungsfaktoren der Smartphones um bis zu etwa 20 dB bei einer Frequenz.

Bei diesem Vorgehen zur Bestimmung eines Umrechnungsfaktors ist zu beachten, dass sich die Einflüsse der beobachteten Umschaltvorgänge womöglich deutlich auswirken könnten. Wie beim Vergleich der Messungen zweier Smartphones des gleichen Modells gesehen, können dadurch die Kurven von bestimmten Rotationsachsen und Polarisationsrichtungen verschoben werden, was bei Kurven aus dem oberen Signalpegelbereich starken Einfluss auf die Mittelwertbildung hat. Dies ließe sich nur mit erheblichem Aufwand verbessern, indem beispielsweise die Rotationsmessungen bei unterschiedlichen Signalpegeln wiederholt werden und weitere Schnitte des Richtdiagramms des Smartphones aufgenommen werden.

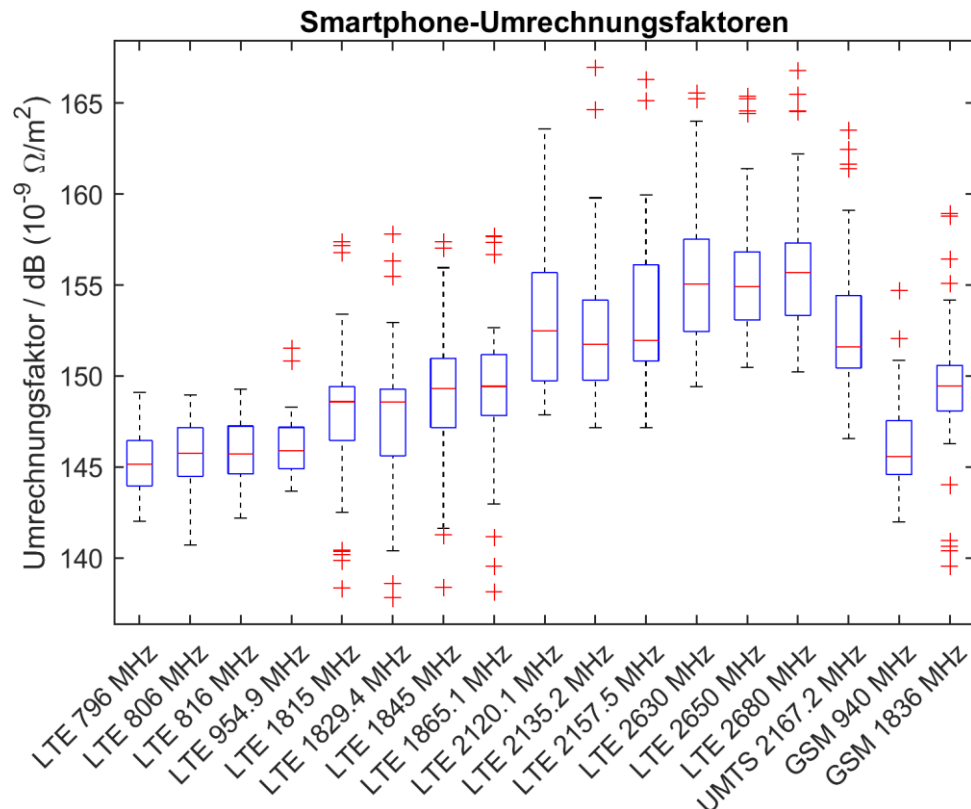


Abbildung 3-31 Boxplot der Umrechnungsfaktoren aller Smartphones für jeden gemessenen Kanal

3.4.1.5 Nutzereinfluss

3.4.1.5.1 Ziel der Untersuchung

Ziel der Untersuchung ist es eine Einschätzung des durch den Nutzer eines Smartphones verursachten Einflusses auf das Messergebnis der Signalstärkeindikatoren zu erhalten, und zwar sowohl über drei verschiedene Nutzungssituationen als auch drei verschiedene Personen.

3.4.1.5.2 Durchführung

Für diese Untersuchung wurde die Messkammer derart umgebaut, dass an der Stelle des Positionierers eine Person stehen kann, die mit dem Smartphone die entsprechende Nutzungssituation nachstellt. Folgende Nutzungssituationen wurden untersucht:

- Halten des Smartphones in der Hand zum Betrachten
- Telefonieren am Kopf
- Tragen des Smartphones in der Hosentasche

Da die Abschätzung durch die Person sehr unterschiedlich sein kann, abhängig davon wie sie zur Einfallsrichtung des Signals steht, wurde die Messung jeder Nutzungssituation in vier Ausrichtungen der Person zur Sendeantenne wiederholt. Ausgangsposition ist dabei stets mit Blick der Person in Richtung der Sendeantenne. Für die weiteren Positionen dreht sich die Person um jeweils 90° nach rechts. Abbildung 3-32 zeigt exemplarisch das Nachstellen der Nutzungssituationen in der Messkammer.

Von den drei Personen waren zwei männlich und eine weiblich.

Den Probanden wurde durch Senden von SMS-Benachrichtigungen durch den Basisstations-simulator signalisiert, wenn sie die nächste Nutzungssituation bzw. Ausrichtung einnehmen sollten. Nach einer Wartezeit, die so lange bemessen war, dass die Probanden ausreichend Zeit zur Neuausrichtung hatten, wurde die Messung nacheinander für alle Frequenzen ausgeführt. Da die Probanden nicht völlig starr sind, wie eine Halterung, wurden je Messung zehn Messwerte aufgezeichnet, um anschließend den gemittelten Wert nehmen zu können, falls Schwankungen während der Messung auftreten.

Die Sendeantenne wurde bei dieser Messung für jede der Nutzungssituationen auf die entsprechende Höhe verfahren, sodass sie sich auf Höhe des Smartphones befand. Dadurch sollte der Einfluss der Richtcharakteristik der Sendeantenne vermieden werden. Die Sendeantenne war für diese Messung in vertikaler Polarisation ausgerichtet.



Abbildung 3-32 Nachstellung der Nutzungssituationen in der Messkammer
Links: Nutzungssituation „Halten des Smartphones in der Hand zum Betrachten“
Rechts: Nutzungssituation „Smartphone zum Telefonieren am Ohr“

Die Untersuchung wurden für die folgenden Smartphones ausgeführt:

- Fairphone 3
- Honor 7X
- LG G5
- OnePlus 6
- Samsung Galaxy S8
- Samsung Galaxy S 20 Ultra 5G

3.4.1.5.3 Ergebnisse

Die Abbildungen 3-33 und 3-34 zeigen für die beiden Smartphones „OnePlus 6“ und „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ die Ergebnisse der Messungen aller Probanden, Nutzungssituationen und Standrichtungen in einem Diagramm je untersuchter Kanalfrequenz. Auf der x-Achse sind die Drehwinkel abgetragen und auf der y-Achse die Signalstärkemesswerte.

Die gemessene Signalstärke variiert abhängig von der jeweiligen Nutzungssituation, der Ausrichtung und der Person. Die Ergebnisse der einzelnen Personen liegen für die gleiche Nutzungssituation meist recht nah beieinander und weisen einen vergleichbaren Verlauf bei der Drehung auf. Es gibt jedoch auch mehrfach deutliche Abweichungen voneinander. Die

Schwankungsbreite der Messwerte über alle Probanden, Nutzungssituationen und Ausrichtungen hinweg liegt meist in der Größenordnung von 30 dB, allerdings treten auch mehrfach Schwankungen um bis zu 40 dB auf. In wenigen Ausnahmefällen liegen im 800 MHz-Band die Schwankungsbreiten nur bei etwa 20 dB. Damit fällt die Variation der Signalpegel insgesamt tendenziell etwas geringer aus als bei den Messungen der Richtungsabhängigkeit. Allerdings kann dies auch daran liegen, dass die Winkelauflösung wesentlich geringer ist und deshalb die tiefen Einzüge in den Richtdiagrammen nicht vollständig nachgezeichnet werden.

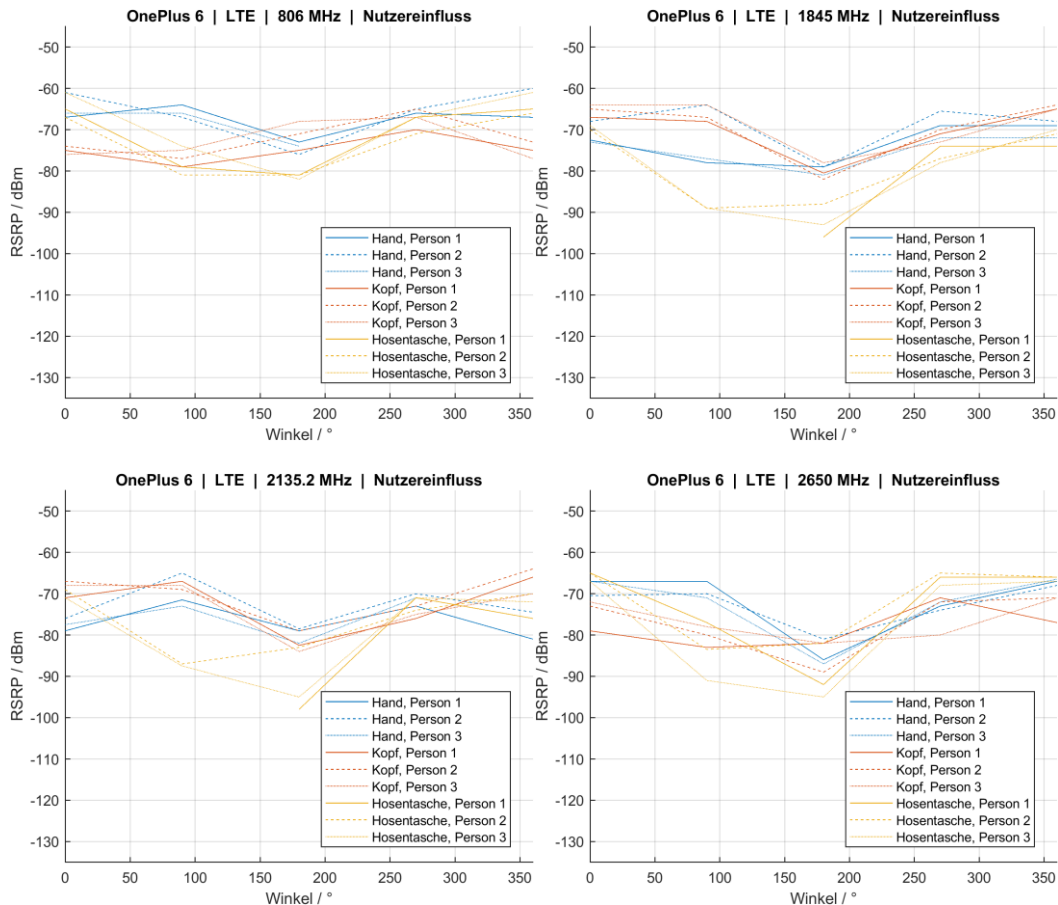


Abbildung 3-33 Ergebnisse der Messungen zum Nutzereinfluss unter Laborbedingungen für das Smartphone „OnePlus 6“

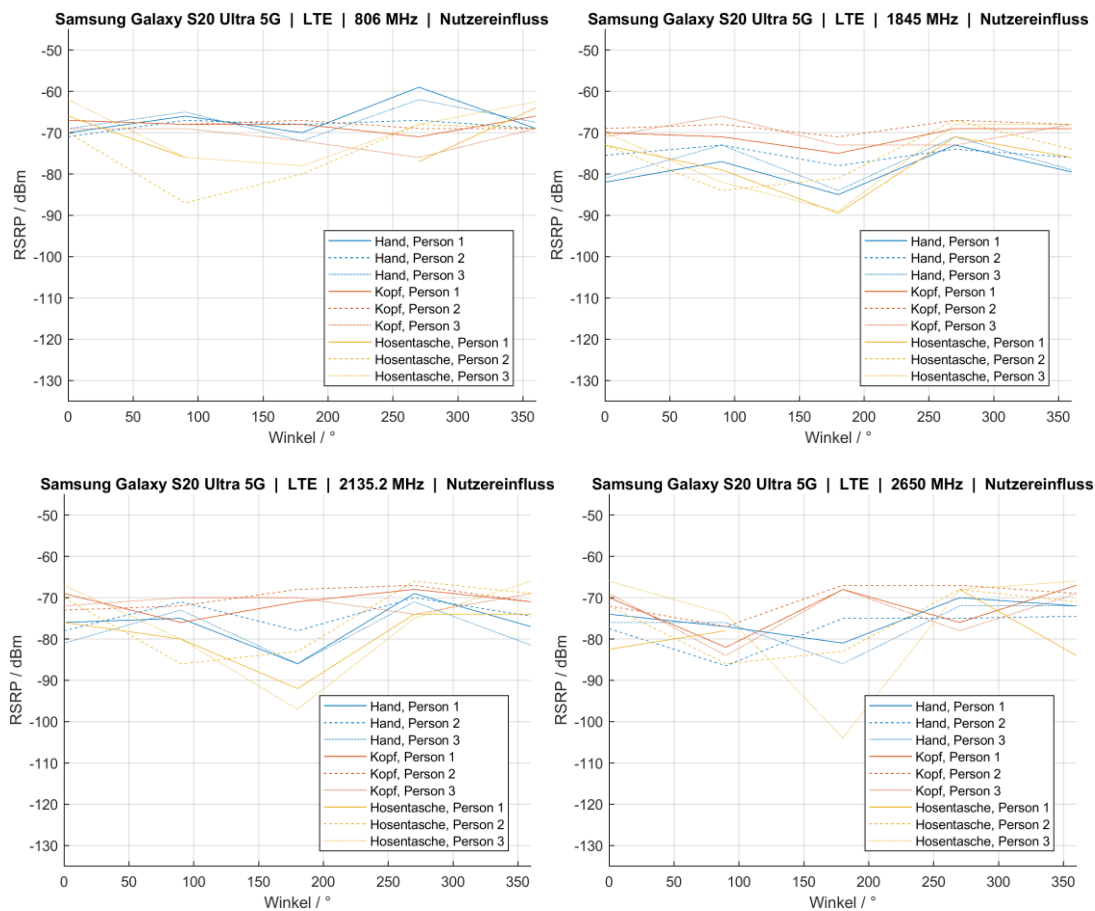


Abbildung 3-34 Ergebnisse der Messungen zum Nutzereinfluss unter Laborbedingungen für das Smartphone „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“

3.4.1.5.4 Erkenntnisse

Für den im Labor nachgestellten Fall eines nur aus einer Richtung einfallenden Signals verursacht der Nutzer je nach Orientierung zur Sendeantenne und Nutzungssituation mit bis zu 30 bzw. 40 dB signifikante Schwankungen der Signalstärke. Dieser Einfluss würde für derartige Situationen deutlich zur Unsicherheit der Messung beitragen und die Ergebnisqualität einer Immissionsabschätzung eines HF-Messnetzwerkes womöglich beeinträchtigen.

Wie groß die Dämpfung gegenüber dem nicht durch einen Nutzer beeinflussten Fall quantitativ ausfällt, wird in Abschnitt 3.5.5.3 ermittelt.

3.4.2 Untersuchungen unter Feldbedingungen

Damit die unter Laborbedingungen ermittelten Umrechnungsfaktoren und deren Eigenschaften auch unter realistischen Bedingungen verifiziert werden können, werden als Ergänzung zu den Labormessungen zusätzliche Feldmessungen ausgeführt.

3.4.2.1 Messgebiete & Messorte

Die Messeigenschaften von Smartphones sollen in realistischen Ausbreitungsumgebungen mit Mehrwegeausbreitung untersucht werden. Hierfür wurden im Stadtgebiet Aachen Bereiche identifiziert, die die folgenden Ausbreitungsumgebungen repräsentieren:

- Innerstädtisch (dichte, mehrstöckige Bebauung, geschlossene Häuserreihen)
- Vorstädtisch (niedrige Bebauung, Einfamilienhäuser mit Garten)
- Industriell/gewerblich
- Ländlich (dünne bis keine Bebauung, Wiesen, Felder)

Innerhalb der Gebiete wurden Messpunkte gesucht, die unterschiedliche Signalpegel aufweisen. Außerdem wurde versucht so weit wie möglich mehrere Frequenzbänder und Funkzellen je Funkdienst abzudecken. Diese Bedingungen konnten insgesamt gut erfüllt werden, wobei es jedoch auch Einschränkungen gibt. Zunächst einmal konnten bei LTE nicht alle genutzten Frequenzkanäle bzw. Frequenzbänder gleichermaßen abgedeckt werden. Das 800 MHz-Band konnte fast gar nicht einbezogen werden, da es im Außenbereich fast nie als verbundene Funkzelle genutzt wird. Es wird bevorzugt zur Versorgung im Innenbereich genutzt und nur zugeteilt, wenn eine Versorgung über höhere Frequenzbänder ausscheidet. Auch ansonsten unterscheidet sich die Verteilung auf die übrigen Frequenzbänder abhängig vom Netzbetreiber. Hier werden offensichtlich unterschiedliche Strategien in der Netzabdeckung und der Nutzerverteilung auf die Frequenzbänder verfolgt. Im 2100 MHz-Band wurden beispielsweise sehr viele Verbindungen bei Telefónica erzielt und etwas weniger bei Vodafone. Im Netz der Telekom war in diesem Band jedoch keine Verbindung zu erhalten. Im Gegensatz dazu wurde das 1800 MHz-Band fast gar nicht im Telefónica-Netz verbunden dafür aber im Telekom-Netz sehr häufig und etwas seltener bei Vodafone. Das 2600 MHz-Band wurde vergleichbar oft für alle Netzbetreiber angetroffen. Auch die Signalpegelbereiche, die in den einzelnen Frequenzbändern je Netzbetreiber abgedeckt werden konnten, unterscheiden sich. Dies betrifft auch die Verteilung der Signalpegel und Bänder bezogen auf die verschiedenen Ausbreitungsumgebungen. Insgesamt konnte jedoch, abgesehen vom 800 MHz-Band bei LTE, eine zufriedenstellende Abdeckung der Bänder und Signalpegel über die Netzbetreiber hinweg erzielt werden. Es sei angemerkt, dass sich die hier dargestellte Situation möglicherweise an anderen Orten und zu anderen Zeitpunkten unterscheiden kann.

Insgesamt wurden 65 Messpunkte ausgewählt, da verschiedene Umstände dazu beitragen, dass ansonsten nicht für alle Fälle die vorgesehene Mindestanzahl von 50 Messpunkten hätte erreicht werden können. Dazu zählt zum einen die Tatsache, dass bei GSM und UMTS an einigen Stellen der Maximalpegel von -51 dBm für den Signalstärkemesswert, der über die Android-API ausgegeben wird (vgl. Abschnitt 2.2.6), erreicht wird. Damit lässt sich ein sinnvoller Vergleich mit der elektrischen Feldstärke nicht mehr anstellen, da der tatsächliche Signalpegel höher liegen kann. Eine weitere Ursache für den Wegfall von Messpunkten ist, wenn die

verbundene Funkzelle des Smartphones einen so niedrigen Signalpegel aufweist, dass das Feldstärkemessgerät SRM-3006 die Funkzelle nicht mehr detektieren konnte.

Für alle Netzbetreiber und alle Funkdienste wurden nach der Auswahl die gleichen Messpunkte verwendet. Zwar unterscheiden sich die Signalpegel an den individuellen Punkten, aber dennoch konnten die gewünschten Kriterien auf diese Weise erfüllt werden. Die Durchführung wird durch diese Vereinfachung erheblich vereinfacht.

Da sich die Auswertung der Messreihe für den Umrechnungsfaktor auf die Signalstärke der verbundenen Funkzelle des Smartphones stützt, war ein wichtiges Auswahlkriterium, dass die Funkzelle während der Messung möglichst selten und im Idealfall gar nicht gewechselt wird. Ansonsten könnte das Messergebnis negativ beeinflusst werden, da nicht genügend Einzelmesswerte während des Schwenkens im Messvolumen für die zu berücksichtigende Funkzelle erreicht werden

Abbildung 3-35 zeigt die die einzelnen Messpunkte in einem Satellitenbild. Die Farben der Messpunkte zeigen die Zuordnung zu den einzelnen Ausbreitungsumgebungen an.



Abbildung 3-35 Messpunkte für die Untersuchungen im freien Feld in den verschiedenen Gebieten

3.4.2.2 Umrechnungsfaktor

3.4.2.2.1 Ziel der Untersuchung

Ziel ist die Untersuchung des Zusammenhangs der von Smartphones gemessenen Signalstärkeindikatoren mit der zugrundeliegenden Feldstärke des entsprechenden Referenzsignals des Mobilfunkstandards und einen Faktor für die Umrechnung zu bestimmen.

3.4.2.2.2 Durchführung

Als Feldstärkemessgerät für den Vergleich mit den Smartphone-Messungen kommt das SRM-3006 von Narda zum Einsatz. Um die Smartphones unbeeinflusst von der die Messung ausführende Person halten zu können, wurde eine Schaumstoffunterlage aus elektrisch neutralem Material angefertigt (siehe Abbildung 3-36), auf die das Smartphone flach abgelegt werden kann. Am vorderen Ende kann die Halterung mit den Händen gegriffen und so vor dem Körper gehalten werden, dass sich das Smartphone im gleichen Bereich wie die Messsonde des SRM-3006 bewegt.



Abbildung 3-36 Schaumstoffunterlage zum Halten des Smartphones bei den Messungen im freien Feld

An den nach Abschnitt 3.4.2.1 ausgesuchten Messpunkten wurde für jedes gemessene Smartphone nach dem folgenden Vorgehen verfahren:

- Einstellung des Smartphones auf den zu messenden Mobilfunkstandard
- Ggf. Abwarten, bis der Wechsel erfolgt ist.
- Platzieren des Smartphones auf der Schaumstoffunterlage.
- Starten der Messung in der Messanwendung mit einer Startzeitverzögerung, damit die Messung nicht durch die Messperson beeinflusst wird. Der Start der Messung wird durch einen Signalton angezeigt.

- Das Smartphone wird auf der Schaumstoffunterlage liegend in einer mäanderförmigen Bewegung von etwa Hüfthöhe bis auf mittlere Kopfhöhe der messenden Person durch das Messvolumen geschwenkt und wieder zurück, sodass das Messvolumen zweimal durchfahren wird. Die Messung dauert eine Minute, sodass bei der bei Android typischen Aktualisierungsrate von 2,1 s der Modemwerte 28 Einzelmesswerte erhalten werden.
- Wechsel zum nächsten Mobilfunkstandard und erneute Ausführung der Messung
- Wechsel zum Feldstärkemessgerät mit exakt gleichem Standort und Ausrichtung der messenden Person. Hierfür werden markante Punkte am Boden zur Orientierung verwendet.
- Starten der Vergleichsmessung mit dem SRM-3006 für alle Funkstandards. Hierfür wird eine Messroutine genutzt, die die Einzelnen auszuführenden Messungen nacheinander mit den entsprechenden Voreinstellungen ausführt.
- Schwenken der Messsonde in gleicher Weise wie beim Smartphone also von Hüft- bis Kopfhöhe in mäanderförmigen Bahnen. Dabei wird die Geschwindigkeit des Schwenkens der jeweiligen Sweep-Dauer der einzelnen Messdurchläufe, die Abhängig vom jeweiligen Messmodus ist, angepasst, sodass das Messvolumen jeweils zweimal durchlaufen wird. Die Anzahl der Messdurchläufe wurde derart empirisch ermittelt, dass mit der Kombination aus zweifachem Durchlaufen des Messvolumens und der Sweep-Anzahl stabile Ergebnisse erzielt wurden. Für LTE wurden 45 Messdurchläufe, bei UMTS 30 und bei GSM im Spektrummodus 120 Durchläufe genutzt.

Die Messungen aller Punkte für ein einzelnes Smartphone mussten aufgrund der Messdauern und zurückzulegenden Wegstrecken über mehrere Tage verteilt werden. Teilweise wurden die Messungen für mehrere Smartphones am gleichen Tag derart kombiniert, dass nur eine gemeinsame Vergleichsmessung mit dem SRM-3006 ausgeführt werden musste.

Über die einzelnen Messreihen (für die einzelnen Smartphones bzw. für die verschiedenen Mobilfunknetze beim gleichen Smartphone) hinweg, konnten die exakten Standorte an den Messpunkten nicht immer beibehalten werden. Aufgrund äußerer Umstände (Bauarbeiten, geparkte Fahrzeuge etc.) musste mehrfach an einen wenige Meter entfernten Punkt ausgewichen werden. Dies schränkt die Aussagekraft der Ergebnisse jedoch in keiner Weise ein, denn die Vorauswahl der Messpunkte ist ausschließlich zur Abdeckung der Signalpegel und Frequenzbänder in den verschiedenen Ausbreitungsbedingungen relevant. Eine Änderung dieser Parameter ist durch eine Abweichung von wenigen Metern im Allgemeinen nicht zu erwarten. Ein Vergleich für exakte Messpunkte über die Messreihen hinweg war nicht primäres Ziel bei dieser Untersuchung. Dies wurde bei den Wiederholungsmessungen in Abschnitt 3.4.2.5 betrachtet.

Für den Vergleich mit der Feldstärke und zur Bestimmung der Umrechnungsfaktoren wurde, wie bei Immissionsmessungen zur Ermittlung der Maximalimmission üblich, der vom SRM-3006 während des Schwenkvorgangs aufgezeichnete Maximalwert des jeweiligen Referenzsignals herangezogen, da konstruktive bzw. destruktive Überlagerung der elektromagnetischen Felder bereits in geringen Abständen zu Feldstärkevariationen mit örtlichen Feldstär-

keminima und -maxima führen. Bei auslastungsunabhängigen Signalen stellt dies die verlässlichste Methode dar, um reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Bei GSM entspricht dies dem Maximalwert der Feldstärke im Frequenzspektrum an der Kanalfrequenz des verbundenen GSM-Kanals und bei UMTS dem Maximalwert der codeselektiv gemessenen Feldstärke des P-CPICH der Funkzelle mit dem entsprechenden Primary Scrambling Codes (PSC) auf der entsprechenden Kanalfrequenz. Bei LTE werden jedoch verschiedene Signalanteile aus dem LTE-Signal extrahiert. Sie werden einzeln und als verschieden kombinierte Ergebnisgrößen angeboten. Geeignet sind diejenigen, die sich auf das zellspezifische Referenzsignal beziehen, da dieses Signal in die Messung des Signalstärkeindikators RSRP bei den Smartphones eingeht. Die relevanten Ergebnisgrößen des SRM-3006 sind (für die Erläuterung der LTE-Referenzsignale bei mehreren Antennen-Ports siehe Abschnitt 2.1.1):

- RS 0: Elektrische Feldstärke des Referenzsignals von Antennen-Port 0
- RS 1: Elektrische Feldstärke des Referenzsignals von Antennen-Port 1
- RS 2: Elektrische Feldstärke des Referenzsignals von Antennen-Port 2
- RS 3: Elektrische Feldstärke des Referenzsignals von Antennen-Port 3
- RS Avg: Mittelwert der elektrischen Feldstärke der Referenzsignale aller Antennen-Ports
- RS Sum: Summe der elektrischen Feldstärke der Referenzsignale aller Antennen-Ports
- RS Max: Maximum der elektrischen Feldstärke der Referenzsignale aller Antennen-Ports

Da die Smartphones bei der Messung von RSRP nur die Referenzsignale von Antennen-Port 0 und optional zusätzlich von Antennen-Port 1 berücksichtigen läge ein Vergleich mit RS 0 oder einer Kombination mit RS 1 nahe. Dies würde aber mögliche Signalanteile von Antennen-Port 2 & 3 bei der Nutzung von 4 Antennen-Ports unberücksichtigt lassen. Um von vornherein diese mögliche Schwachstelle der RSRP-Messung in den Ergebnissen zu berücksichtigen, wurde für diese Auswertung entschieden den Wert von RS Avg zu verwenden, da dieser die gemittelte elektrische Feldstärke der Referenzsignale aller Antennen-Ports umfasst. RS Sum wäre hingegen nicht geeignet, da dieser als Summe über die Antennen-Ports nicht mehr mit RSRP vergleichbar wäre. Ebenso scheidet RS Max aus da dieser Wert nur das Maximum an einem der Antennen-Ports ausgibt.

Bei den Smartphones steht im Gegensatz zum SRM-3006 der einzelne Messwert eines jeden Messdurchlaufs in den Ergebnisdateien zur Verfügung. Daher können bzw. müssen entsprechende Maximal- bzw. Mittelwerte in diesem Fall selbst berechnet werden. Hier bieten sich prinzipiell zwei Herangehensweisen an: Zum einen kann der Maximalwert über alle Messdurchläufe einer Messung ermittelt werden und für den Vergleich mit der elektrischen Feldstärke verwendet werden, da auch bei der SRM-Messung der Maximalwert verwendet wird. Ein auf diese Weise ermittelter Umrechnungsfaktor wäre jedoch nur mäßig geeignet für die Anwendung eines HF-Messnetzwerkes. Der Grund liegt darin, dass zur Ausnutzung der Messdaten vieler Smartphones an einem Ort eine geeignete Form der Mittelung ausgeführt werden muss. Um auf vergleichbare Messwerte wie bei Immissionsmessungen mit Maximalwertsuche

umrechnen zu können, bietet es sich daher an, auch bei der Ermittlung eines solchen Umrechnungsfaktors einen gemittelten Wert zu verwenden und mit dem Maximalwert der Feldstärkemessung zu vergleichen. Hierfür wird das arithmetische Mittel der Signalstärkewerte aller Messdurchläufe der einminütigen Smartphone-Messung an einem Ort bestimmt und ins Verhältnis mit dem dortigen Maximalwert des SRM-3006 gesetzt. Die Berechnung erfolgt mit den Dezibel-Werten, da die Abweichung der aus den Einzelmessungen bestimmten Umrechnungsfaktoren vom mittleren Umrechnungsfaktor des jeweiligen Smartphones in Dezibel normalverteilt sind (siehe hierzu auch 3.5.4.1).

Wie bereits in Abschnitt 2.2.6 erläutert, enden die ausgegebenen Wertebereiche für die Signalstärke bei UMTS und GSM bei -51 dBm, obwohl der Wertebereich laut Standard eigentlich bis -25 bzw. 48 dBm reicht. Nur bei einem Endgerät (Fairphone 3) wurden bei UMTS auch höhere Messwerte als -51 dBm gemessen. Messpunkte bei denen während der Messung nur der Wert -51 dBm aufgetreten ist, wurden bei der Auswertung nicht dargestellt. Bei der späteren Berechnung der Umrechnungsfaktoren für die einzelnen Smartphones (siehe Abschnitt 3.5.4.1) wurden alle Einzelmessungen mit einem Wert von -51 dBm aussortiert. Sie würden die Ermittlung eines Umrechnungsfaktors verfälschen, da die tatsächliche Signalstärke und damit auch die elektrische Feldstärke größer wären, als sie im Signalstärkemesswert abgebildet werden. Dies ist ein Problem für ein HF-Messnetzwerk, da damit die Exposition unterschätzt werden würde und das insbesondere an Orten mit hoher Exposition. Dieses Problem scheint nicht ohne Weiteres lösbar zu sein.

In die Untersuchung wurden folgende Endgeräte einbezogen:

- Fairphone 3
- Honor 7x
- Huawei P10
- Motorola Moto G5 Plus
- Nokia 8
- OnePlus 6
- Samsung Galaxy S8
- Samsung Galaxy S 20 Ultra 5G – 1
- Samsung Galaxy S 20 Ultra 5G – 2
- Sony Xperia Z5 Compact

3.4.2.2.3 Ergebnisse

Stellvertretend für die zehn gemessenen Smartphones werden im Folgenden exemplarisch die Ergebnisse von zwei dieser Geräte vorgestellt. Die Abbildungen 3-37 und 3-38 zeigen die Ergebnisse für das Smartphone „Motorola Moto G5“ und die Abbildungen 3-40 und 3-41 für das Smartphone „OnePlus 6“. Für jeden Funkdienst (LTE, UMTS, GSM) sind für jedes relevante Frequenzband jeweils zwei Diagramme enthalten, die den arithmetischen Mittelwert der vom Smartphone gemessenen Signalstärke für jeden Messpunkt über der zum Vergleich gemessenen maximalen elektrischen Feldstärke im gleichen Messvolumen abtragen. Im jeweils linken der Diagramme sind die Punkte nach Zugehörigkeit zu den verschiedenen Ausbreitungsumgebungen eingefärbt und im jeweils rechten nach Zugehörigkeit zum Netzbetreiber. Dadurch sollen etwaige Unterschiede aufgrund der Ausbreitungsumgebung oder des Mobilfunknetzes erkennbar werden. Die rote Gerade in den Diagrammen markiert den Mittelwert des Umrechnungsfaktors über alle Messpunkte in der jeweiligen Grafik. Die Steigung beträgt jeweils eins, unabhängig davon, ob die Messwerte eine andere Steigung bei Ausführung einer Regression ergeben würden. Die gestrichelten parallelen Linien markieren ± 5 dB Abweichung

vom Mittelwert des Umrechnungsfaktors zur erleichterten Einordnung der Streuung der Messwerte um den mittleren Umrechnungsfaktor.

Die Histogramme der Abbildungen 3-39 und 3-42 zeigen die Streuung der sich aus den Ergebnissen der einzelnen Messungen ergebenden Umrechnungsfaktoren für die Funkdienste und Frequenzbänder.

Die Messwerte ordnen sich in den Diagrammen im Großen und Ganzen um die eingezeichnete Gerade mit der Steigung eins an, die den mittleren Umrechnungsfaktor zwischen Signalstärkemesswert und elektrischer Feldstärke repräsentiert. Die meisten Werte weichen weniger als ± 5 dB von dieser Geraden ab. Es treten jedoch auch Ausreißer in unterschiedlichen Ausprägungen in bestimmten Frequenzbändern bei manchen Smartphones auf. Bei UMTS und GSM treten prinzipiell bei mehr Messpunkten größere Abweichungen als 5 dB auf. Ein systematischer Unterschied des Umrechnungsfaktors zwischen den einzelnen Netzbetreibern oder den verschiedenen Ausbreitungsumgebungen lässt sich nicht offensichtlich erkennen.

Die Histogramme zeigen, dass die Umrechnungsfaktoren der einzelnen Messpunkte tendenziell symmetrisch um den Mittelwert aus allen Punkten verteilt sind. Bei den Diagrammen, die nur sehr wenige Messwerte enthalten, ist das Bild zu sehr von einzelnen Werten abhängig, um die entsprechende Form zu ergeben. Dort, wo viele Messwerte vorhanden sind, deutet sich zum Teil eine Normalverteilung an.

Bei UMTS gibt es mit dem Sony Xperia Z5 compact (an dieser Stelle nicht gezeigt) einen starken Ausreißer des mittleren Umrechnungsfaktors, der mehr als 20 dB von allen anderen Smartphones abweicht. Die gemessene Signalstärke lag bei UMTS durchweg deutlich unterhalb aller anderen Smartphones. Ob dies modellbedingt auftritt oder ein Problem des individuellen Geräts ist, lässt sich nicht beantworten, ohne weitere Geräte dieses Typs zu untersuchen.

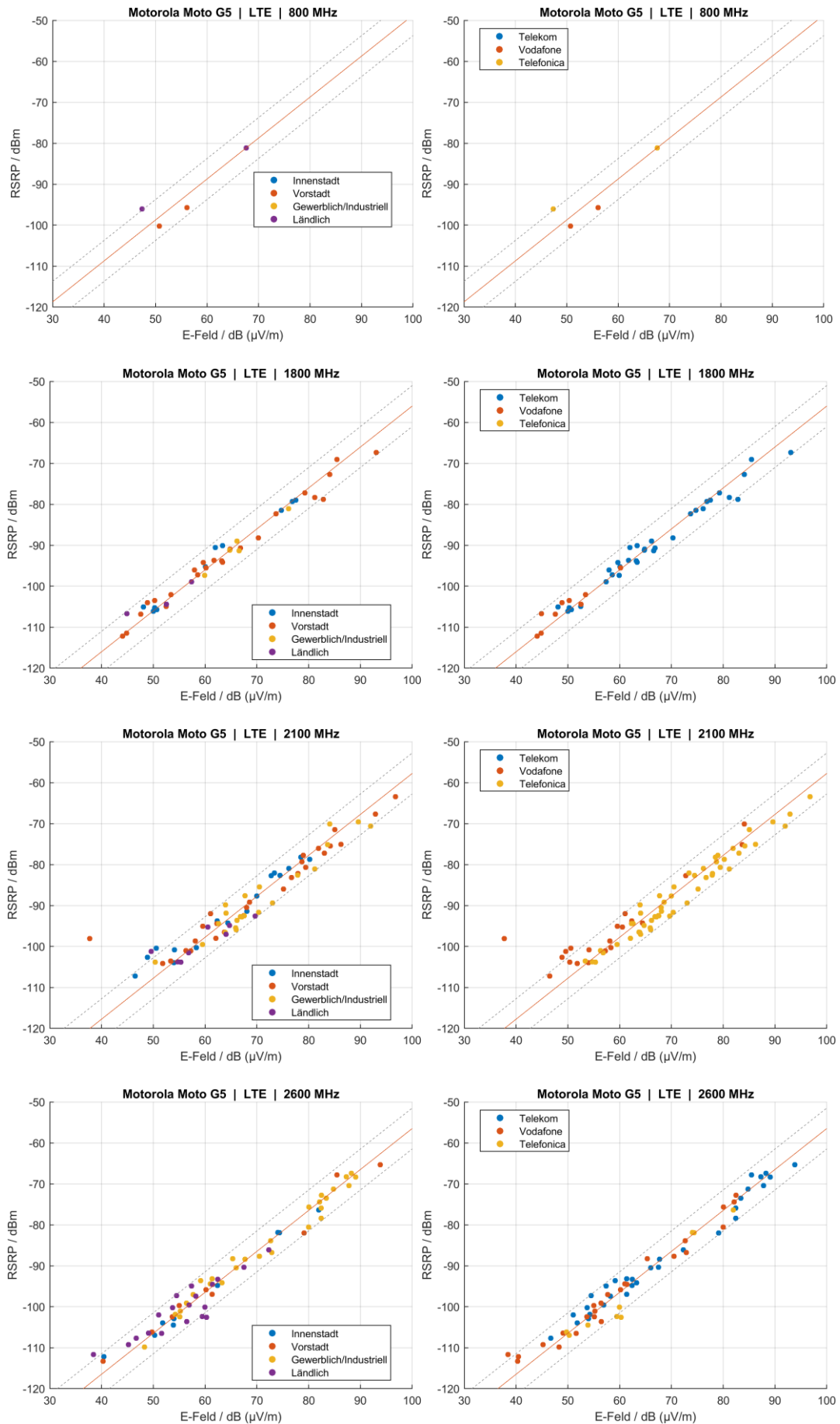


Abbildung 3-37 Vom Motorola Moto G5 an den einzelnen Messpunkten erfasste mittlere Signalstärke über der im gleichen Messvolumen gemessenen maximalen elektrischen Feldstärke für LTE

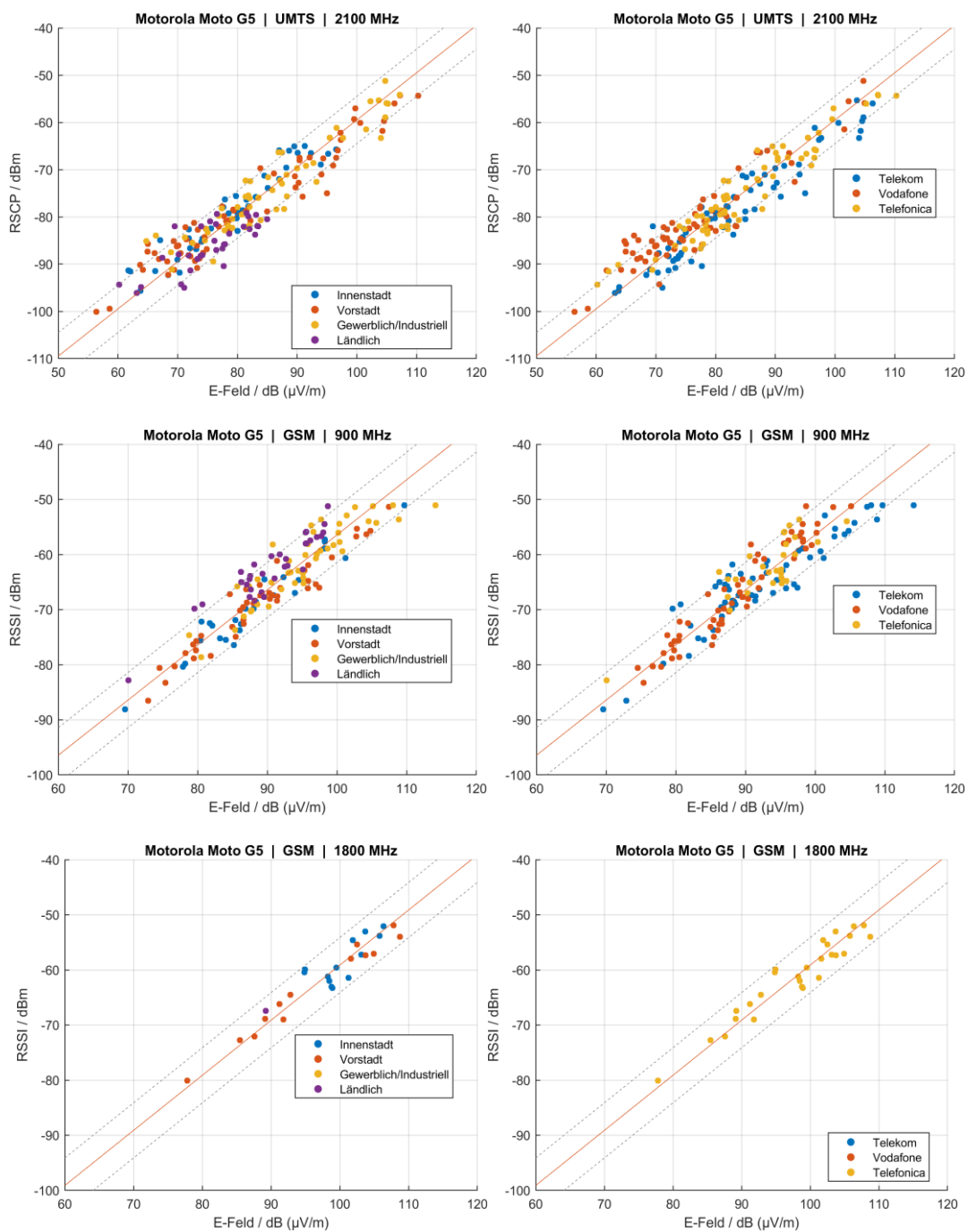


Abbildung 3-38 Vom Motorola Moto G5 an den einzelnen Messpunkten erfasste mittlere Signalstärke über der im gleichen Messvolumen gemessenen maximalen elektrischen Feldstärke für UMTS und GSM

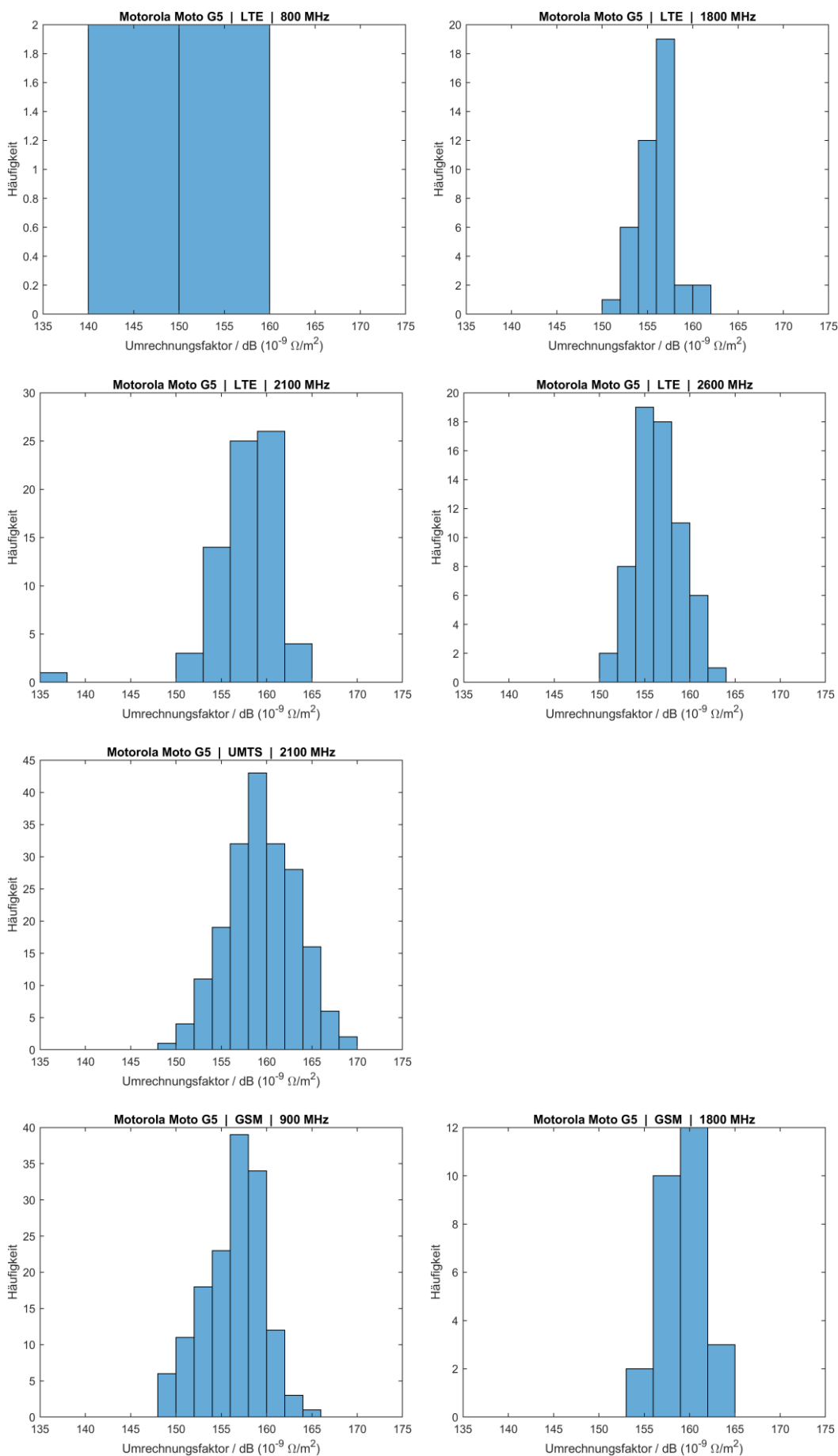


Abbildung 3-39 Histogramme der sich aus den Messungen des Motorola Moto G5 an den einzelnen Messpunkten ergebenden Umrechnungsfaktoren für die einzelnen Funkdienste und Frequenzbänder

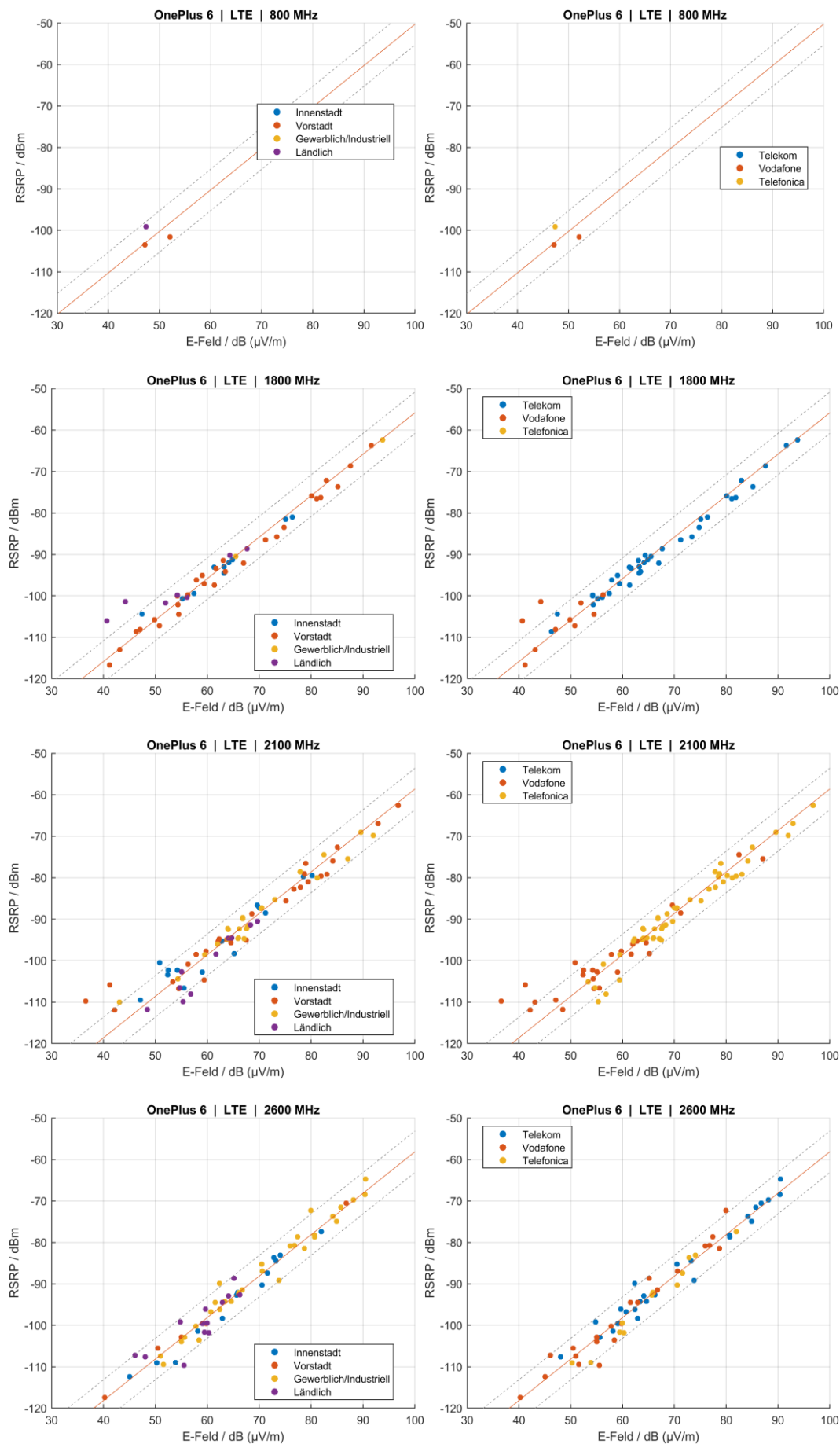


Abbildung 3-40 Vom OnePlus 6 an den einzelnen Messpunkten erfasste mittlere Signalstärke über der im gleichen Messvolumen gemessenen maximalen elektrischen Feldstärke für LTE

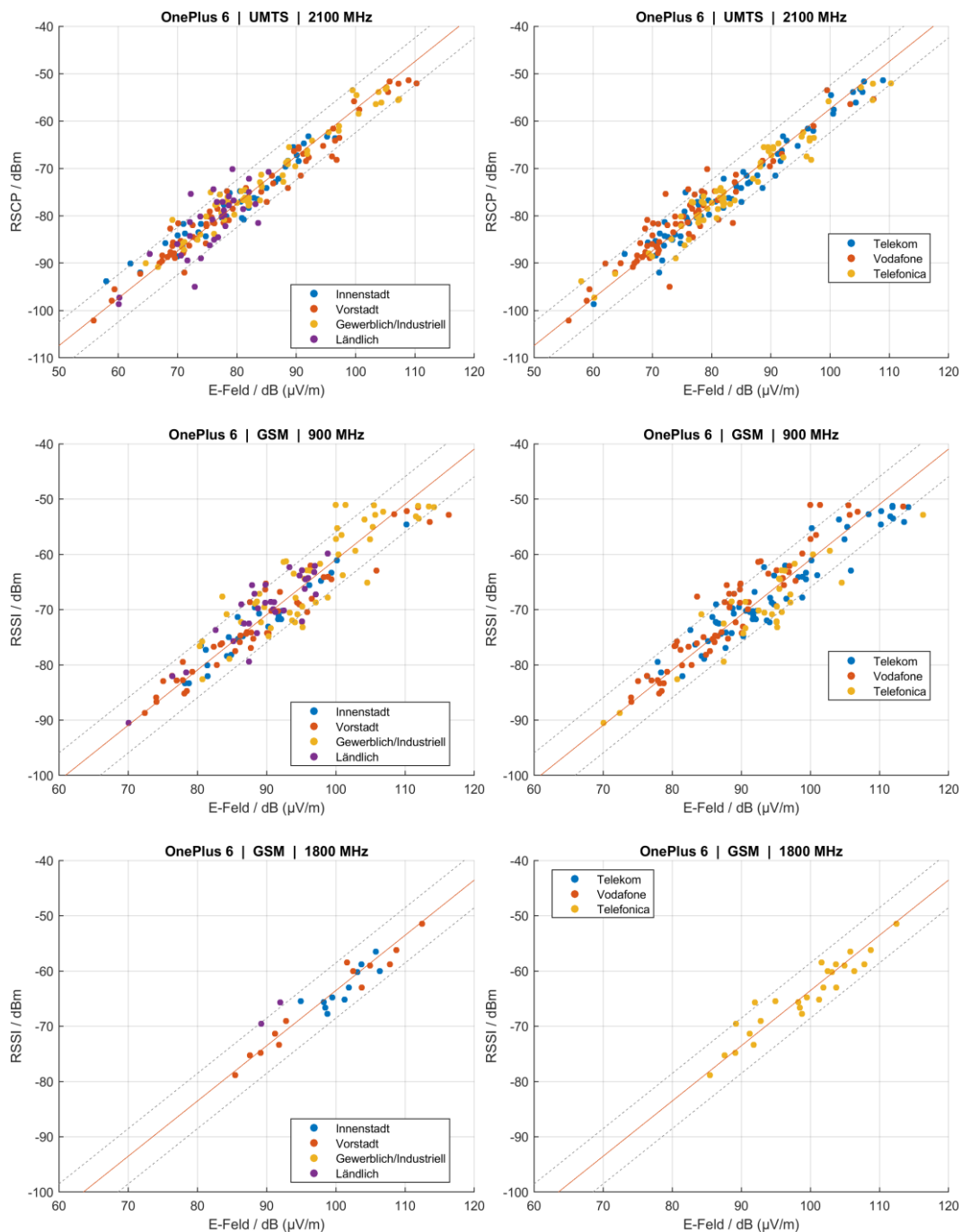


Abbildung 3-41 Vom OnePlus 6 an den einzelnen Messpunkten erfasste mittlere Signalstärke über der im gleichen Messvolumen gemessenen maximalen elektrischen Feldstärke für UMTS und GSM

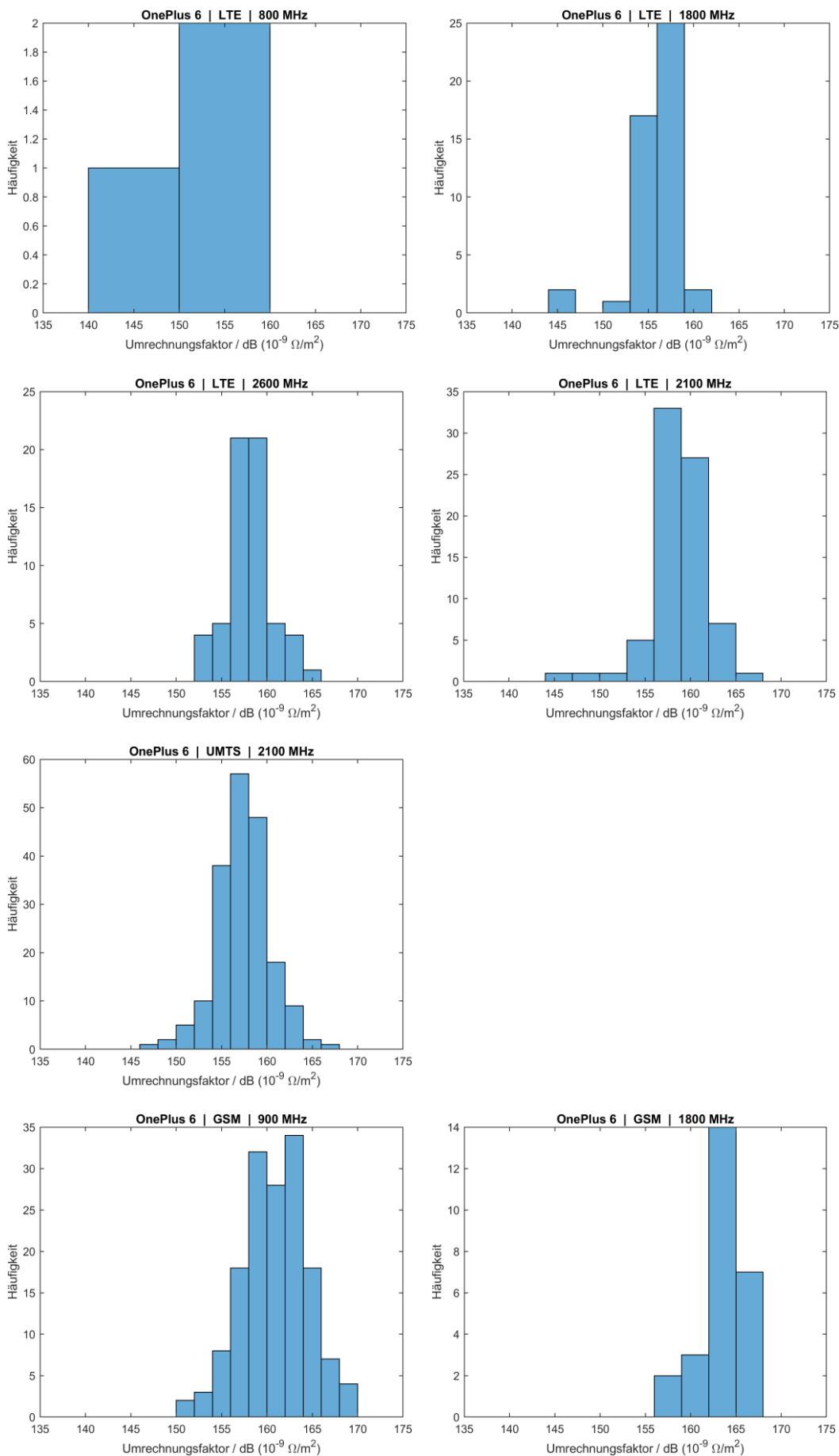


Abbildung 3-42 Histogramme der sich aus den Messungen des OnePlus 6 an den einzelnen Messpunkten ergebenden Umrechnungsfaktoren für die einzelnen Funkdienste und Frequenzbänder

3.4.2.2.4 Erkenntnisse

Die wichtigsten Erkenntnisse aus den Messungen sind wie folgt:

- Die Signalstärkemessung der Smartphones folgt unter Feldbedingungen der unterschiedlichen elektrischen Feldstärke an verschiedenen Messorten derart, dass sich ein im Mittel linearer Zusammenhang erkennen lässt. Starke Abweichungen hiervon sind insgesamt selten.
- Durch derartige Messreihen lassen sich Umrechnungsfaktoren bestimmen, die die Ableitung von Schätzwerten für die elektrische Feldstärke aus den Smartphone-Signalstärkemesswerten ermöglichen.
- Systematische Unterschiede des Umrechnungsfaktors zwischen den einzelnen Netzbetreibern oder den verschiedenen Ausbreitungsbedingungen existieren offenbar nicht.
- Wie das erwähnte Beispiel des Sony Xperia Z5 compact zeigt, kann es Fälle geben, in denen die Messwerte eines Smartphones für einen Funkdienst deutlich von dem abweichen, was die Mehrzahl der Smartphones üblicherweise bei gleicher Feldstärke ermitteln.

3.4.2.3 *Richtungsabhängigkeit*

3.4.2.3.1 Ziel der Untersuchung

Wie auch bei den Labormessungen soll in dieser Untersuchung die Richtungsabhängigkeit der Signalstärkemessung im freien Feld untersucht werden, um festzustellen wie groß diese unter realistischen Ausbreitungsbedingungen ausfällt.

3.4.2.3.2 Durchführung

Für diese Untersuchung wurden bis auf eine Ausnahme alle Messpunkte aus den für die Messungen zum Umrechnungsfaktor genutzten Messorten ausgewählt. Die Auswahl der insgesamt acht Messpunkte erfolgte derart, dass möglichst wenige bis keine Zellwechsel bei der Messung auftreten. Außerdem sollten mehrere Ausbreitungsbedingungen abgedeckt werden sowie Punkte mit und ohne Sichtverbindung zur Basisstation. Das Frequenzband der Messung hängt jeweils von der vom Smartphone am Messort verwendeten Funkzelle ab.

Um die Smartphones um die drei Hauptachsen drehen zu können, wurde wieder der Schaumstoffzylinder aus den Labormessungen verwendet. Hierfür wurde der Kunststoffteller, auf dem der Schaumstoffzylinder befestigt wird, mit einem Adapter versehen, der auf einem Stativ montiert werden konnte wie in Abbildung 3-43 gezeigt. Das Stativ verfügt über eine Winkelskala, mit der die Ausrichtung bei Rotation um die Vertikalachse vorgenommen werden kann. Die Messung erfolgte in Schritten von 45°. Das Stativ wurde mithilfe einer eingebauten Wasserwaage am jeweiligen Messort gerade ausgerichtet. Die Höhe wurde so eingestellt, dass die Oberkante des Schaumstoffzylinders 1,5 m über dem Erdboden lag.

Die Messung erfolgt nur für LTE, da zwischen den Mobilfunkstandards auf Grundlage der Labormessungen kein grundsätzlicher Unterschied zu erwarten ist. Das Smartphone wird nacheinander um seine drei Hauptachsen gedreht. Die Rotationsachse liegt in der Vertikalen. Die

Messung erfolgt für jede Achse in 45°-Schritten. Nach erfolgter Ausrichtung wird die Messung mit einem Zeitvorlauf gestartet, sodass sich die die Messung ausführende Person mehrere Meter vom Smartphone entfernen kann, um diese nicht zu beeinflussen. Die Messdauer wurde so gewählt, dass insgesamt zehn Messwerte aufgezeichnet werden, um mögliche kurzzeitige Fluktuationen durch Umgebungseinflüsse reduzieren zu können. Da die Messung an statischen Punkten und Ausrichtungen vorgenommen wird, ist eine längere Messdauer wie beim Schwenken nicht erforderlich. Es wird der Median der zehn Messwerte als Ergebnis in der Auswertung verwendet.



Abbildung 3-43 Für die Ausrichtungsmessungen im freien Feld verwendete Halterung auf Stativ

Die folgenden Smartphones wurden bei dieser Untersuchung berücksichtigt:

- Motorola Moto G5 Plus
- Nokia 8
- OnePlus 6
- Samsung Galaxy S 20 Ultra 5G
- Sony Xperia Z5 Compact

3.4.2.3.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse in den beiden Abbildungen 3-44 und 3-45 sind wieder stellvertretend für die Smartphones „Motorola Moto G5“ sowie „OnePlus 6“ und eine Auswahl von vier der acht Messpunkte in vergleichbarer Form wie bei den Labormessungen dargestellt, d.h. nebeneinander sowohl in Kartesischen als auch in Polarkoordinaten für jeden der acht Messpunkte.

Die Smartphones zeigen eine insgesamt deutlich schwächere Richtungsabhängigkeit der Signalstärkemessung als in den Labormessungen. Die Schwankungen des Messwerts über alle Ausrichtungen an einem Messpunkt betragen in fast allen Fällen weniger als 10 dB. Teilweise liegen sie bei nur etwa 5 dB. In nur einem Fall aus allen Messungen aller Smartphones reicht die Spannbreite bis fast 20 dB. Die konkreten Ergebnisse der einzelnen Smartphones unterscheiden sich zwar in ihrer Form, aber die Größenordnung der Schwankungen sind grundsätzlich gleich.

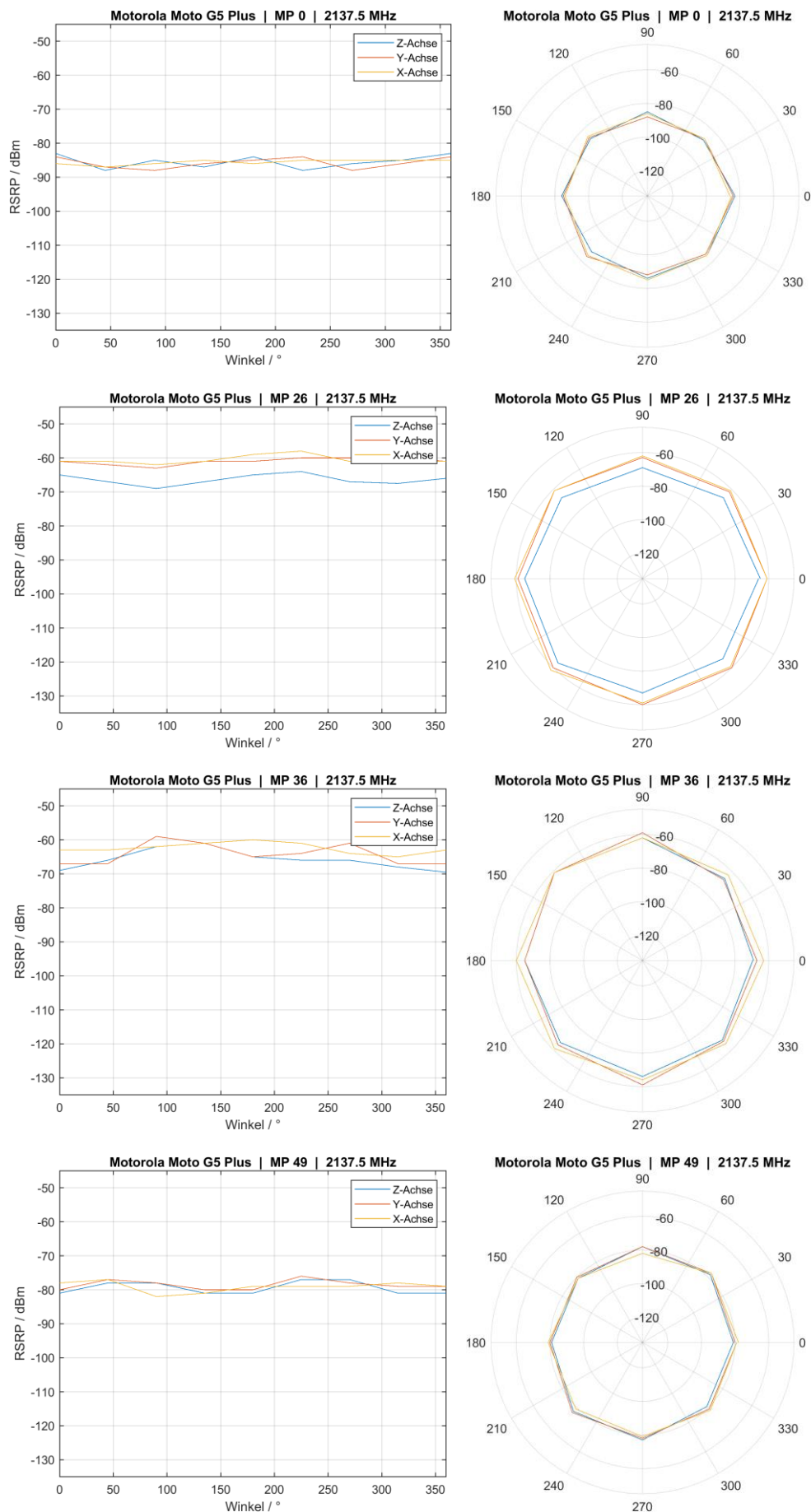


Abbildung 3-44 Ergebnisse der Messungen zur Richtungsabhängigkeit im freien Feld für das Smartphone „Motorola Moto G5 Plus“

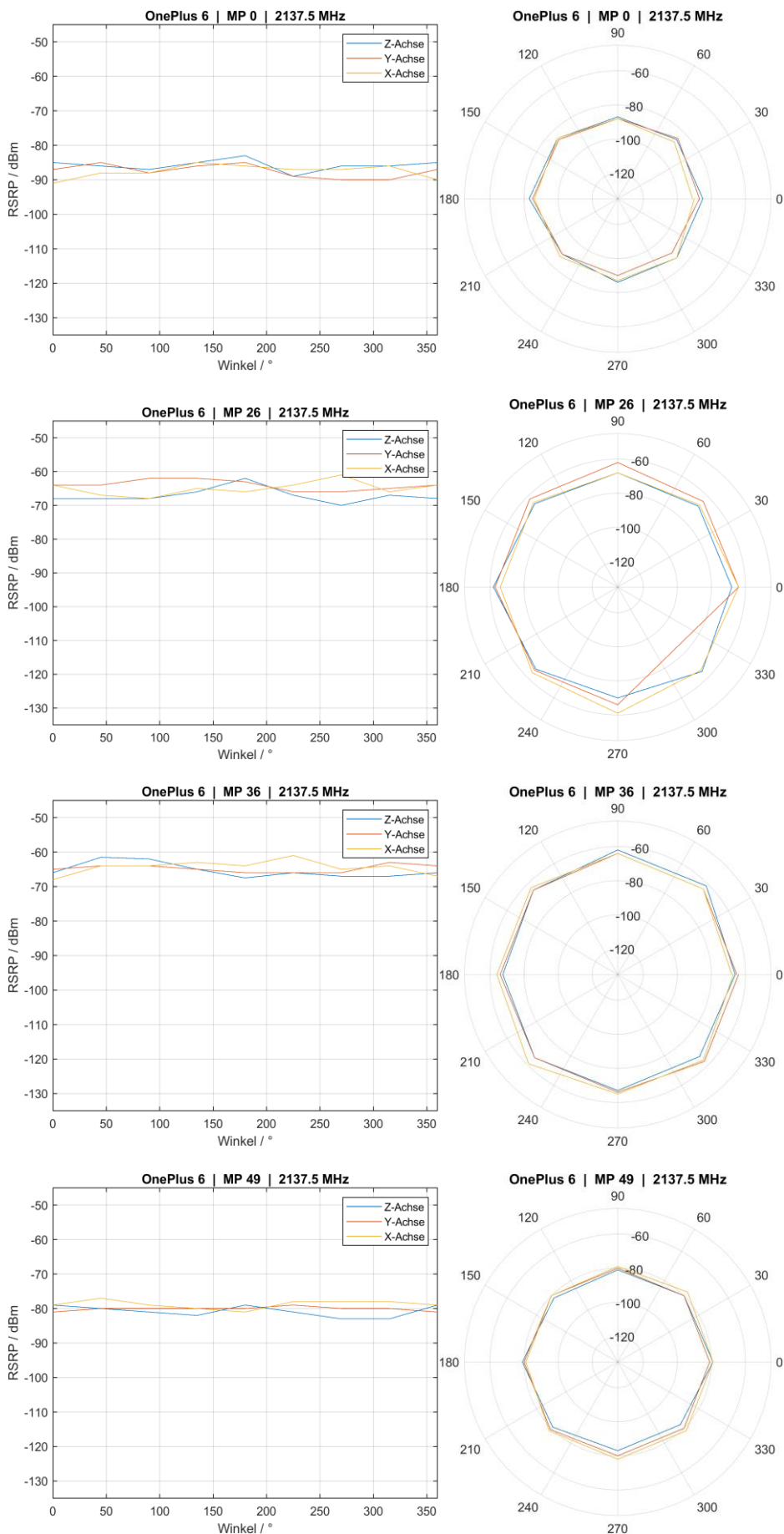


Abbildung 3-45 Ergebnisse der Messungen zur Richtungsabhängigkeit im freien Feld für das Smartphone „OnePlus 6“

An den Messpunkten 26 und 36 sind die auftretenden Schwankungen tendenziell etwas größer, was vermutlich daran liegt, dass diese entweder direkte Sichtverbindung oder zumindest nahezu Sichtverbindung zur Basisstation haben.

3.4.2.3.4 Erkenntnisse

Die Variation der gemessenen Signalstärke bei Änderung der Ausrichtung beträgt in fast allen Fällen unter 10 dB und liegt damit deutlich unter den Schwankungen der Signalstärke, die sich unter Laborbedingungen für den Einfall des Signals aus nur einer Richtung ergaben. Die zu erwartende Messgenauigkeit eines HF-Messnetzwerks wird daher unter realen Ausbreitungsbedingungen offenbar weniger stark durch die Richtungsabhängigkeit der Smartphone-Signalstärkemessung beeinträchtigt, als es aufgrund der Labormessungen zunächst erscheint. Es sei jedoch angemerkt, dass durch die geringere Winkelauflösung bei der Messung unter Feldbedingungen lokale Einzüge womöglich nicht erfasst wurden, wodurch die festgestellte Schwankungsbreite geringer ausfällt, als sie tatsächlich ist.

3.4.2.4 *Nutzereinfluss*

3.4.2.4.1 Ziel der Untersuchung

Bei dieser Untersuchung geht es darum eine Einschätzung über den Einfluss eines Nutzers auf die Ergebnisse der Smartphone-Messung zu erhalten. Wie auch bei den Messungen zur Richtungsabhängigkeit sollen die in den Labormessungen erhaltenen Ergebnisse mit solchen unter realistischen Ausbreitungsbedingungen verglichen werden.

3.4.2.4.2 Durchführung

Die Untersuchung erfolgte an einer Person und nur bei LTE. Es werden die gleichen Nutzungssituationen wie bei den Labormessungen nachgestellt. Auch der Ablauf ist identisch mit dem Unterschied, dass in diesem Fall die Messung auf dem Smartphone mit der Mess-App durchgeführt wird und für jede Position und Nutzungssituation durch die Messperson gestartet wird. Wie auch bei den anderen Messungen wird mit einer Startverzögerung gearbeitet, damit die Person ausreichend Zeit hat die passende Haltung einzunehmen. Es werden, wie bei der Ausrichtungsmessung, zehn Messwerte aufgezeichnet und der Medianwert der Messwerte als Ergebnis des jeweiligen Messvorgangs verwendet.

Als Messpunkte werden die gleichen wie bei den Ausrichtungsmessungen verwendet, da die Kriterien die zur Auswahl die gleichen sind. Es wurden ebenfalls dieselben Endgeräte wie dort untersucht.

3.4.2.4.3 Ergebnisse

In den Abbildungen 3-46 und 3-47 sind die Resultate der Messungen für je acht der zehn Messpunkte für die Smartphones „OnePlus 6“ und „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“ aufgeführt.

Die Variation der gemessenen Signalpegel ist tendenziell geringer als bei der Messung zum Nutzereinfluss im Labor. Dies ist bei Mehrwegeausbreitung im Gegensatz zum Einfall des Signals aus nur einer Richtung auch zu erwarten. Die Schwankung über alle Orientierungen und Nutzungssituationen beträgt mit etwa 10 bis 20 dB tendenziell weniger als bei den unbeeinflussten Richtungsmessungen. Allerdings kann dies erneut an der geringeren Winkelauflösung

liegen oder daran, dass die Rotationsachsen des Smartphones bei der Nutzermessung nicht identisch mit denen der Ausrichtungsmessung sind.

An Messpunkten mit Sichtverbindung oder nahezu Sichtverbindung (z.B. 26, 28, 36) fallen die Schwankungen tendenziell innerhalb einer Nutzungssituation größer aus. An Messpunkten, die keine Sichtverbindung aufweisen (z.B. 48) sind die Verläufe meist flacher, dafür liegen jedoch die Kurven der einzelnen Nutzungssituationen zum Teil weiter auseinander.

3.4.2.4.4 Erkenntnisse

Die Variation der gemessenen Signalstärke unter verschiedenen Nutzereinflüssen beträgt etwa 10 bis 20 dB und liegt damit unter den Schwankungen der Signalstärke, die sich unter Laborbedingungen für den Einfall des Signals aus nur einer Richtung ergaben. Allerdings wurden dort die Schwankungsbreiten teilweise auch dadurch erhöht, dass Unterschiede zwischen den drei Personen auftraten. Die zu erwartende Messgenauigkeit eines HF-Messnetzwerks wird daher unter realen Ausbreitungsbedingungen offenbar weniger stark durch die Richtungsabhängigkeit der Smartphone-Signalstärkemessung beeinträchtigt, als es aufgrund der Labormessungen zunächst erscheint. Dennoch führt der Nutzereinfluss zu einem relevanten Unsicherheitsbeitrag bei der Ermittlung von Feldstärkewerten aus den Smartphone-Signalstärkemessungen.

Wie groß die Dämpfung gegenüber dem nicht durch einen Nutzer beeinflussten Fall quantitativ ausfällt, wird in Abschnitt 3.5.4.3 ermittelt.

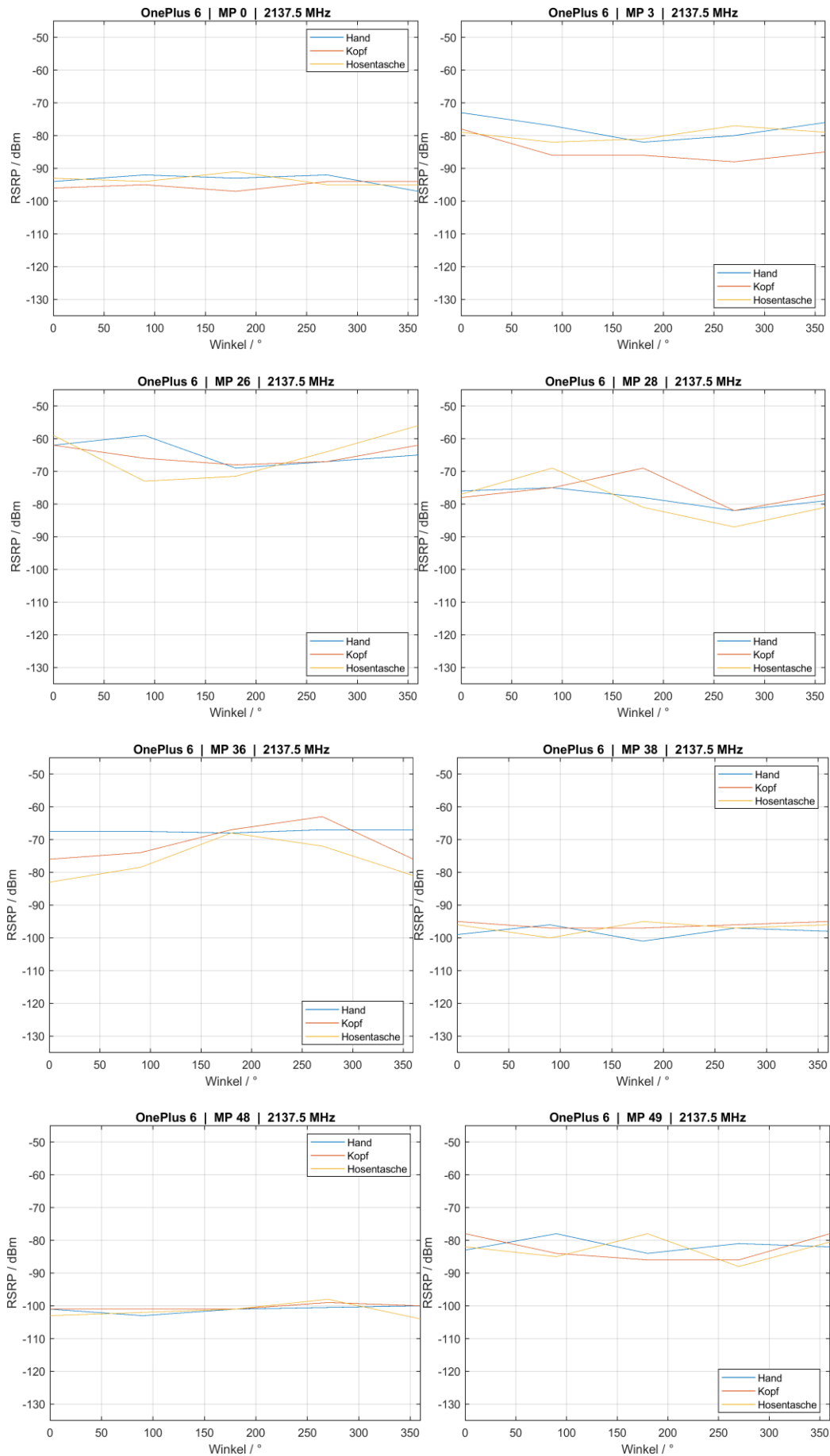


Abbildung 3-46 Ergebnisse der Messungen zum Nutzereinfluss im freien Feld für das Smartphone „OnePlus 6“

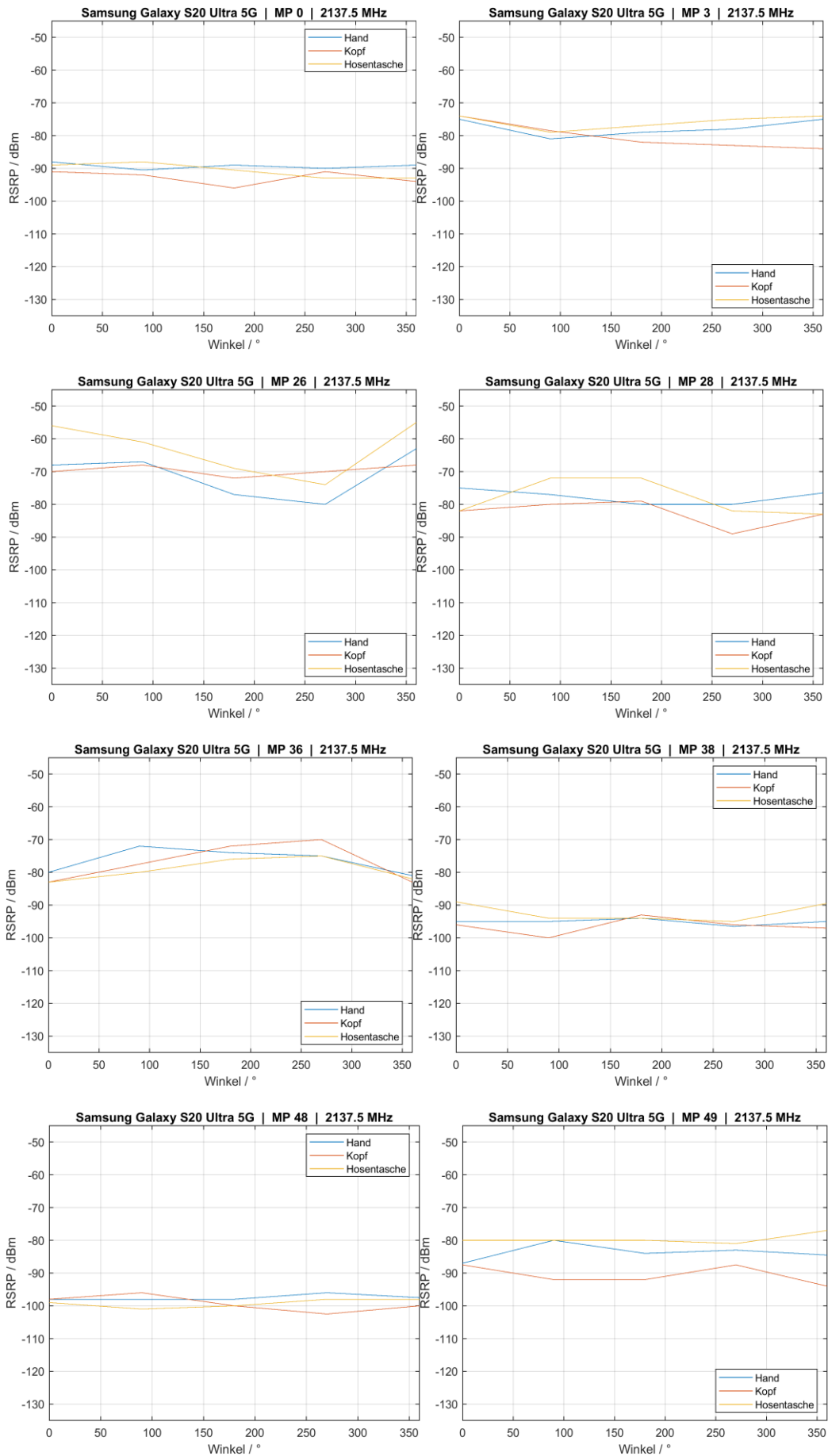


Abbildung 3-47 Ergebnisse der Messungen zum Nutzereinfluss im freien Feld für das Smartphone „Samsung Galaxy S20 Ultra 5G“

3.4.2.5 Wiederholungsmessungen

3.4.2.5.1 Ziel der Untersuchung

Ziel der durchgeführten Wiederholungsmessungen ist es die Reproduzierbarkeit von Signal- und Feldstärkemessungen sowie der Umrechnungsfaktoren zu analysieren, wenn Messungen mit einem zeitlichen Abstand von mehreren Tagen am gleichen Ort durchgeführt werden.

3.4.2.5.2 Durchführung

Die grundsätzliche Messdurchführung ist identisch mit dem Vorgehen zur Ermittlung der Umrechnungsfaktoren in Abschnitt 3.4.2.2. Bei den Wiederholungen wurde jedoch darauf geachtet, dass die Standposition der messenden Person jedes Mal exakt identisch ist. Die Messpunkte sollten die Bedingung erfüllen, dass bei allen Wiederholungen das Smartphone in der gleichen Funkzelle verbunden ist, damit ein Vergleich möglich ist. Da diese Messung auch für UMTS und GSM ausgeführt wurde, sollte außerdem gewährleistet sein, dass der Messwert niedriger als -51 dBm ist, um ein verwertbares aussagekräftiges Ergebnis zu erhalten. Insgesamt wurden acht Messpunkte ausgewählt.

Es ist anzumerken, dass in diesem Fall auch die Nachbarzellmessungen aufgezeichnet und in die Auswertung mit einbezogen wurden. Dadurch konnte trotz teilweise abweichenden verbundenen Funkzellen zwischen den einzelnen Messungen der Vergleich durchgeführt werden.

Insgesamt wurden Messungen an drei unterschiedlichen Tagen ausgeführt, wobei am zweiten Tag die gesamte Messprozedur an jedem Messort direkt dreimal nacheinander ausgeführt wurde, um auch die Reproduzierbarkeit unmittelbar nacheinander einzubeziehen. Zwischen dem ersten und zweiten Messtag lagen 9 Tage und zwischen der zweiten und dritten Wiederholung 21 Tage, sodass zwischen erster und letzter Messung etwa ein Monat vergangen ist.

Die Messung wurde für folgende Smartphones ausgeführt:

- Motorola Moto G5 Plus
- Nokia 8
- OnePlus 6
- Samsung Galaxy S 20 Ultra 5G
- Sony Xperia Z5 Compact

3.4.2.5.3 Ergebnisse

Die Abbildungen 3-48 und 3-49 zeigen die Ergebnisse für zwei der insgesamt fünf Smartphones, nämlich das „Motorola Moto G5 Plus“ und „OnePlus 6“. Für beide Smartphone werden für jeden der drei berücksichtigten Funkdienste nebeneinander zwei Diagramme gezeigt. Das linke Diagramm zeigt jeweils die bei den Wiederholungen gemessene gemittelte Signalstärke der einzelnen gemessenen Funkzellen an den Messpunkten. Das rechte Diagramm stellt den sich in Verbindung mit der beim jeweiligen Messdurchlauf mit dem SRM gemessenen maximalen elektrischen Feldstärke des Referenzsignals ergebenden Umrechnungsfaktor dar. Auf der x-Achse sind bei beiden Diagrammen die Messpunkte abgetragen. Die Bezeichnungen enthalten neben der Messpunktnummer, die Kanalfrequenz und bei LTE die PCI bzw. bei UMTS die PSC. Sofern durch die Nachbarzellmessungen mehrere Funkzellen bei mindestens vier der Messdurchläufe an einem Messpunkt vertreten waren, sind entsprechend mehrere Funkzellen aufgeführt.

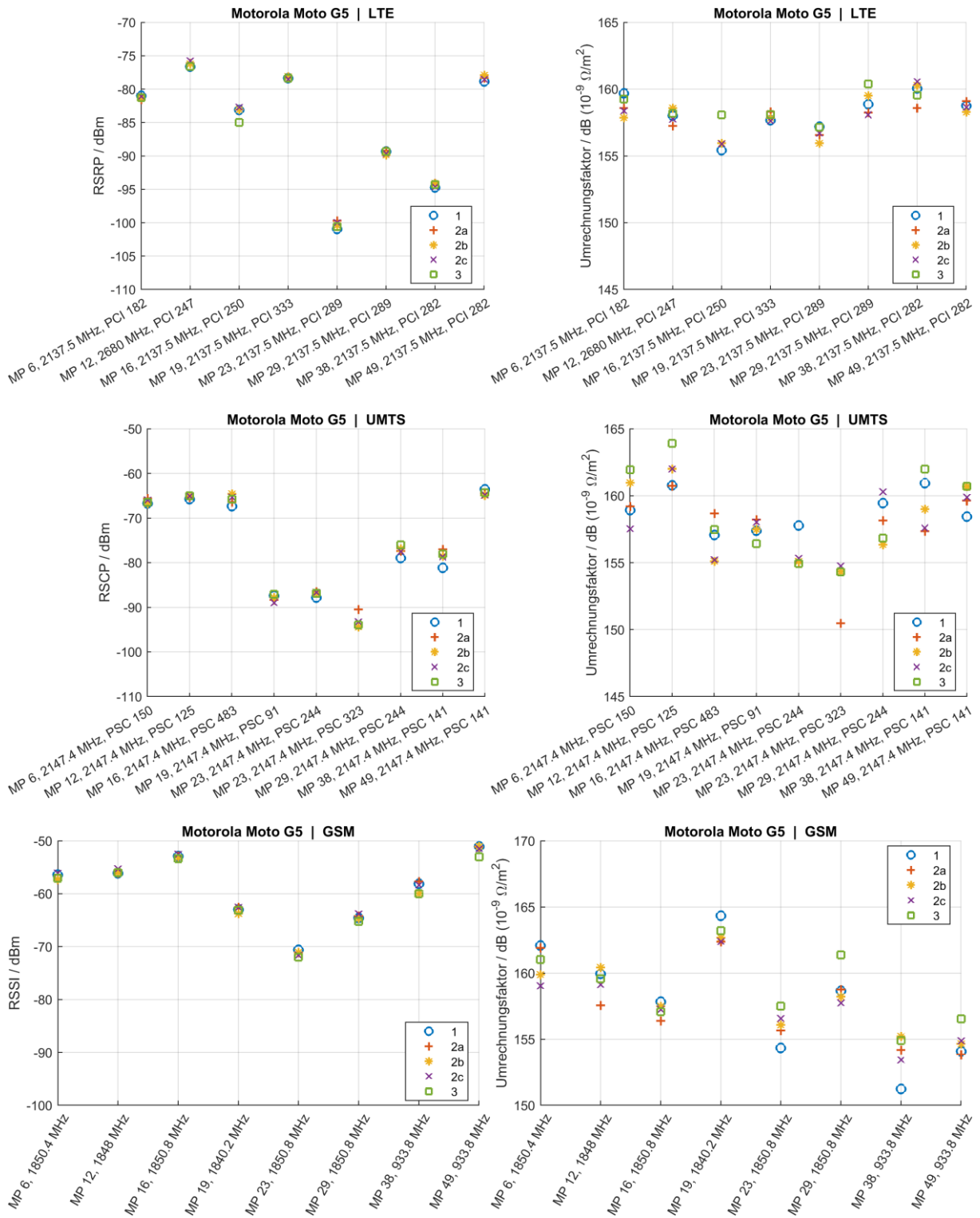


Abbildung 3-48 Ergebnisse der Wiederholungsmessungen im freien Feld für das Smartphone „Motorola Moto G5 Plus“

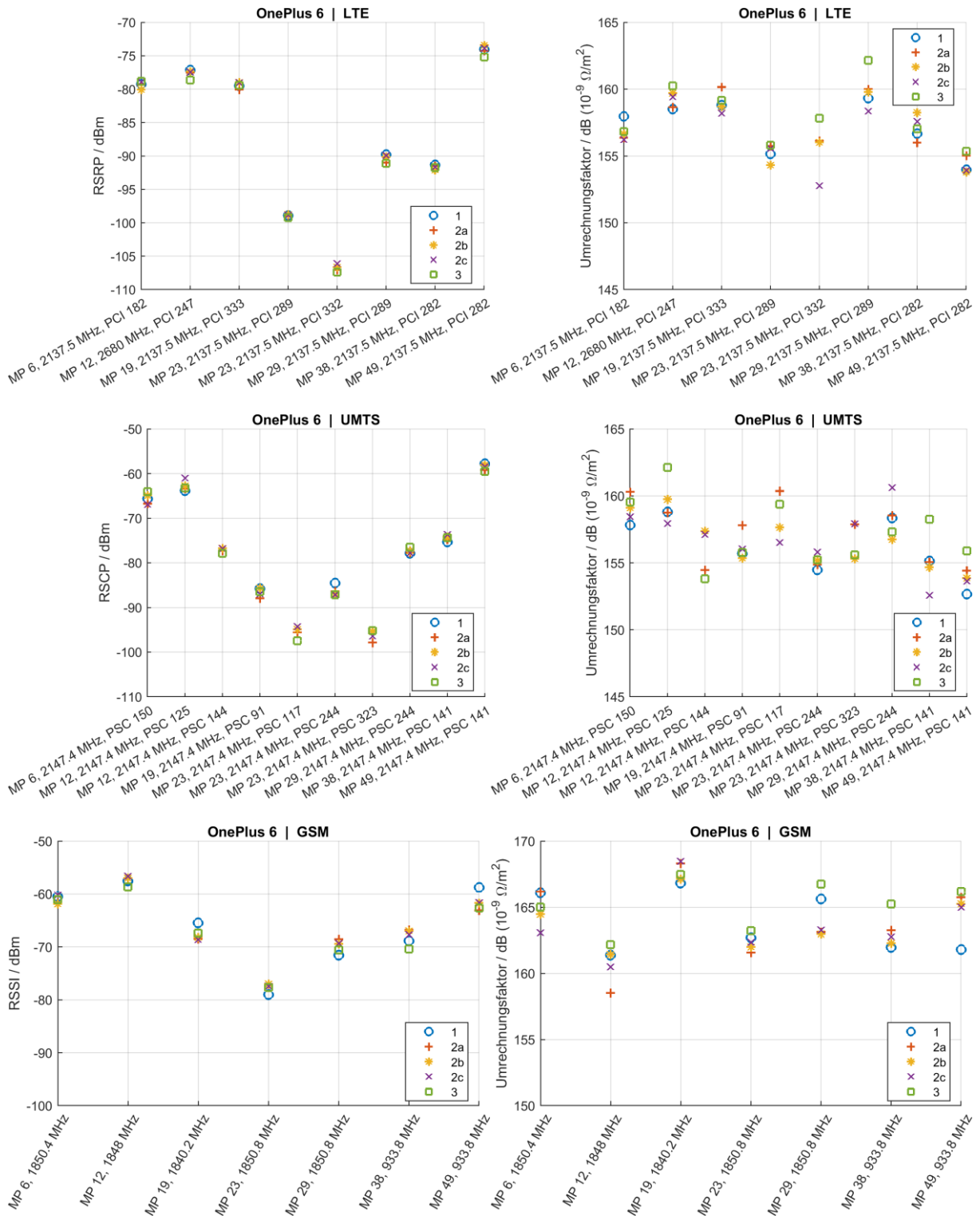


Abbildung 3-49 Ergebnisse der Wiederholungsmessungen im freien Feld für das Smartphone „OnePlus 6“

Abbildung 3-50 führt außerdem ähnlich wie zuvor die Signalstärkemessungen der Smartphones die Feldstärkemessergebnisse des SRM-3006 auf, um die Variation der Ergebnisse auch für die Feldstärkemessung sichtbar zu machen.

Es zeigt sich, dass die Abweichungen zwischen den einzelnen Signalstärkemessungen durchweg maximal 5 dB zwischen den Messdurchläufen variieren. Oftmals ist die Abweichung sogar noch deutlich geringer. Dies gilt auch bei den nicht gezeigten Smartphones fast ausnahmslos.

Die sich zusammen mit den gemessenen Feldstärkewerten ergebenden Umrechnungsfaktoren variieren über die Wiederholungen hinweg in vergleichbarer Weise.

Bei den SRM-Messergebnissen zeigt sich ebenfalls eine Schwankung zwischen den Wiederholungen. Diese liegt meist bei ungefähr 5 dB, wobei bei LTE auch geringere Abweichungen auftreten.

Bei Betrachtung der Wiederholungen fällt kein systematischer Unterschied der Abweichungen zwischen den Wiederholungen am selben Tag und an den verschiedenen Tagen auf.

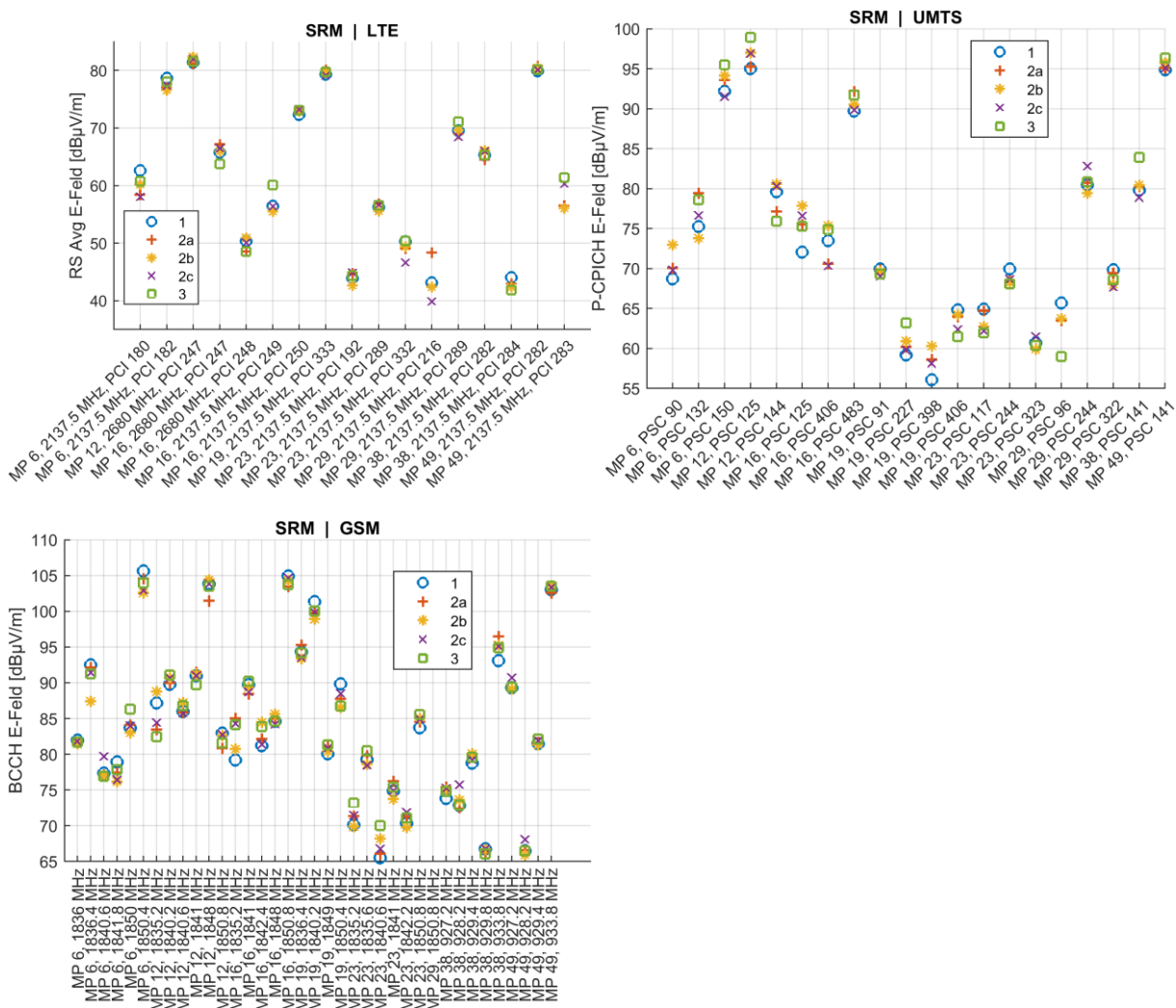


Abbildung 3-50 Ergebnisse der Wiederholungsmessungen im freien Feld für das SRM-3006

3.4.2.5.4 Erkenntnisse

Aufgrund der bei den Wiederholungsmessungen gemachten Beobachtungen wurden die folgenden Erkenntnisse gewonnen:

- Die Übereinstimmung zwischen den einzelnen Wiederholungen ist insgesamt recht gut. Sowohl bei den Smartphone-Messungen als auch bei den SRM-Messungen sind die Abweichungen zwischen den einzelnen Messergebnissen gering gegenüber dem gesamten Dynamikumfang über alle Messpunkte.

- Die sich am selben Messort ergebenden Umrechnungsfaktoren weichen in der Regel um wenige dB zwischen den Wiederholungen ab. In einzelnen Fällen gibt es etwas deutlichere Unterschiede.
- Die Übereinstimmung ist bei den Wiederholungen am gleichen Tag nicht systematisch besser als bei den Wiederholungen an den verschiedenen Messtagen.

Auch für den Betrieb eines HF-Messnetzwerkes zeigt diese Stichprobe darüber hinaus, dass Messungen, die von Smartphones an verschiedenen Tagen über einen gewissen Zeitraum hinweg gesammelt werden für eine Funkzelle, grundsätzlich sinnvoll miteinander verrechnet werden können, da sich die Abstrahlcharakteristik und Sendeleistung offenbar nicht ständig verändert. Dennoch ist es wichtig, bei der Auswertung zu berücksichtigen, dass es Änderungen geben könnte und Methoden vorzusehen, die eine solche Änderung erkennen können.

3.4.2.6 *Langzeitmessungen*

3.4.2.6.1 Ziel der Untersuchung

Ziel dieser Untersuchung ist es zu zeigen, dass die an einem Ort gemessenen Signalpegel der auslastungsunabhängigen Referenzsignale der Mobilfunkstandards über einen längeren Zeitraum konstant bleiben. Dies ist Voraussetzung dafür, dass beim Crowdsourcing solche Messdaten sinnvoll zusammen in eine Auswertung einfließen können, die nicht zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen wurden.

Für LTE soll außerdem der die auslastungsabhängige gesamte Signalleistung auf dem verbundenen Funkkanal erfassende Parameter RSSI beobachtet und mit der durch das SRM gemessenen Leistung auf dem Kanal verglichen werden. Dadurch soll ersichtlich werden, inwiefern es mit diesem Parameter möglich ist die Auslastung und somit die Momentanexposition zu ermitteln.

3.4.2.6.2 Durchführung

Die Messungen wurden in einem Laborraum des Instituts für Hochfrequenztechnik ausgeführt. Die Smartphones wurden in einer Reihe nebeneinander mit jeweils etwas Abstand dazwischen auf eine Schaumstoffunterlage gelegt, wie in Abbildung 3-51 zu sehen. Das SRM wurde derart platziert, dass die Messsonde in einer Reihe und auf einer Höhe mit den Smartphones lag. Dennoch ist zu erwarten, dass sich die gemessenen Werte der einzelnen Smartphones in ihrer Höhe unterscheiden können, da durch Fading unterschiedlichen Signalpegeln auch in geringem Abstand auftreten können. Daher ist ein absoluter Vergleich der Messwerte auch mit dem SRM-3006 wie bei der Bestimmung des Umrechnungsfaktors der Smartphones nicht sinnvoll. Stattdessen ist der relative Vergleich der Signalverläufe zueinander über die Zeit interessant.

Die Smartphones waren während der Messungen dauerhaft am Netzteil angeschlossen. Die Displays waren ausgeschaltet. Der Raum wurde während der Messungen nicht betreten, um Einflüsse durch Personen in der unmittelbaren Umgebung auszuschließen. Durch die exponierte Lage im zweiten Obergeschoss des Gebäudes mit direkter Sichtverbindung zur Basisstation, sind wenige Einflüsse entlang des Ausbreitungspfad zu erwarten. Die Messungen fanden in denjenigen Funkzellen statt, in die sich die Smartphones eingebucht haben.

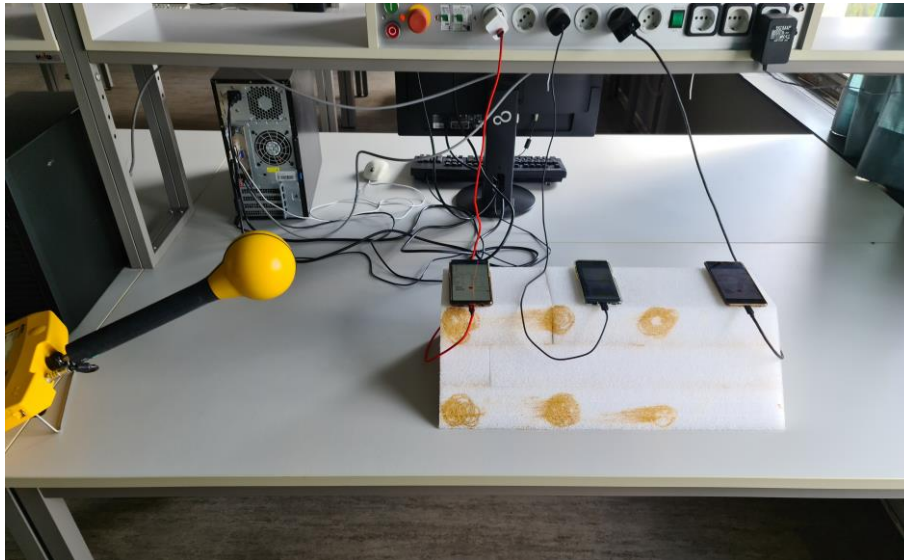


Abbildung 3-51 Anordnung der Smartphones und des SRM-3006 während der Langzeitmessungen

Die Messdaten des SRM-3006 wurden mithilfe eines MATLAB-Skriptes für jeden einzelnen Messdurchlauf (Sweep) aufgezeichnet. Für die Referenzsignale von LTE und UMTS wurden die jeweiligen codeselektiven Messmodi verwendet. Für GSM wurde das Frequenzspektrum aufgezeichnet. Für den Vergleich mit dem RSSI-Wert bei LTE wurde der Modus „Level Recorder des SRM genutzt. Dieser erfasst die gesamte Leistung innerhalb der eingestellten Bandbreite. Diese wurde so gewählt, dass sie den Kanal überdeckt, wobei die eingestellte Bandbreite von 13,333 MHz knapp geringer ist als die tatsächliche Signalbandbreite des gemessenen Funkkanals von 13,5 MHz. Die nächstgrößere einstellbare Bandbreite hätte jedoch bereits Anteile von benachbarten Kanälen erfasst, weshalb die geringfügig zu schmale Bandbreite genutzt wurde. Da es in diesem Fall nicht um die absolute Bestimmung der gesamten Kanalleistung bzw. der damit zusammenhängenden Feldstärke, sondern um das Verfolgen des Verlaufs, kann dies vernachlässigt werden.

Tabelle 3-5 zeigt die mittlere Dauer eines Messdurchlaufs für die einzelnen Messdurchläufe mit den jeweils genutzten Konfigurationen.

Messung	Mittlere Dauer eines Messdurchlaufs (Sweep)
LTE codeselektiv	645 ms
UMTS codeselektiv	915 ms
GSM Spektrum	106 ms
LTE Level Recorder	119 ms

Tabelle 3-5 Mittlere Dauern der Messdurchläufe in den verschiedenen genutzten Messmodi

Die Messungen für RSSI bei LTE konnten nur mit dem QualiPoc-Smartphone sowie dem OnePlus 6 ausgeführt werden, da die anderen für diese Messung zur Verfügung stehenden Smartphones keine Messwerte für RSSI liefern. Teilweise ist dies in der Android-Version begründet, teilweise aber auch darin, dass die Smartphone-Hersteller für die entsprechenden API-Funktionen keine Ausgabe programmiert haben. Auf dem QualiPoc-Smartphone wurden die Messungen mit der dort vorhandenen Spezial-Software ausgeführt, während alle übrigen Messungen auf den anderen Geräten mit der am IHF entwickelten App durchgeführt wurden.

3.4.2.6.3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Langzeitmessungen in den drei betrachteten Mobilfunkstandards werden in den Abbildungen 3-52, 3-54 und 3-56 für die jeweiligen Referenzsignale im Zeitverlauf sowohl für die Smartphones als auch das SRM dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine Darstellung für jedes Smartphone und das SRM in Form eines Histogramms in den Abbildungen 3-53, 3-55 & 3-57, wodurch erkennbar wird, wie häufig welche Signal- bzw. Felstärkepegel gemessen wurden. Bei LTE werden für das SRM die Ergebnisse der codeselektiven Messungen für die einzelnen Signaltypen RS AVG, RS 0 und RS 1 angegeben. RS 0 und RS 1 repräsentieren dabei das gemessene Referenzsignal von Antennen-Port 0 bzw. 1 (vgl. Abschnitt 2.1.1). RS AVG stellt den Mittelwert der Messungen an den einzelnen Antennen-Ports dar. Wie bei der Definition von RSRP erläutert (Abschnitt 2.1.1.2.1), ist es der Implementierung des Herstellers des Smartphones überlassen, ob er die Referenzsignale von Antennen-Port 1 neben denen von Antennen-Port 0 zusätzlich in die Messung einfließen lässt.

Aufgeführt sind jeweils die Ergebnisse der Funkzelle, in dem die Smartphones am meisten verbunden waren. Die Messdaten werden für den Fall, dass das Smartphone zwischenzeitlich mit einer anderen Funkzelle verbunden war, aus den Nachbarzellmessungen bezogen, sofern die Zelle dort erfasst wurde.

Bei Betrachtung des Signalverlaufs für LTE in Abbildung 3-52 lassen sich die folgenden Beobachtungen machen:

- Der Signalverlauf der RSRP-Messungen der Smartphones zeigt jeweils häufige Schwankungen um einen ansonsten weitestgehend konstanten Mittelwert.
- Die Messungen des SRM zeigen ebenfalls Schwankungen um einen Mittelwert, wobei es einzelne stärkere Ausreißer nach unten gibt. Außerdem scheint die Schwankungsbreite ab etwa mittags stärker zu sein.
- Die Messdaten der Smartphones und des SRM weisen zwischen 1:00 Uhr nachts und 6:00 Uhr morgens eine Lücke auf. Die Funkzelle wird offensichtlich in dieser Zeit vollständig abgeschaltet.
- Der Verlauf des Signals RS1 zeigt mehrere Auffälligkeiten. Zum einen ist dieses Signal auch während der aktiven Phase der Funkzelle zu einigen Zeiten nicht gemessen worden, zum anderen weist es eine Schwankungsbreite von bis zu 10 dB auf. Außerdem variiert die Schwankungsbreite und der Mittelwert scheint sich zwischen Abend und morgen zu unterscheiden. Es ist naheliegend, dass dieser Antennen-Port phasenweise kein Referenzsignal aussendet. Womöglich wird sie nur bei Bedarf von höheren Datenübertragungskapazitäten zugeschaltet. Warum sich aber auch der gemessene Signalpegel deutlich unterscheidet, ist unklar.

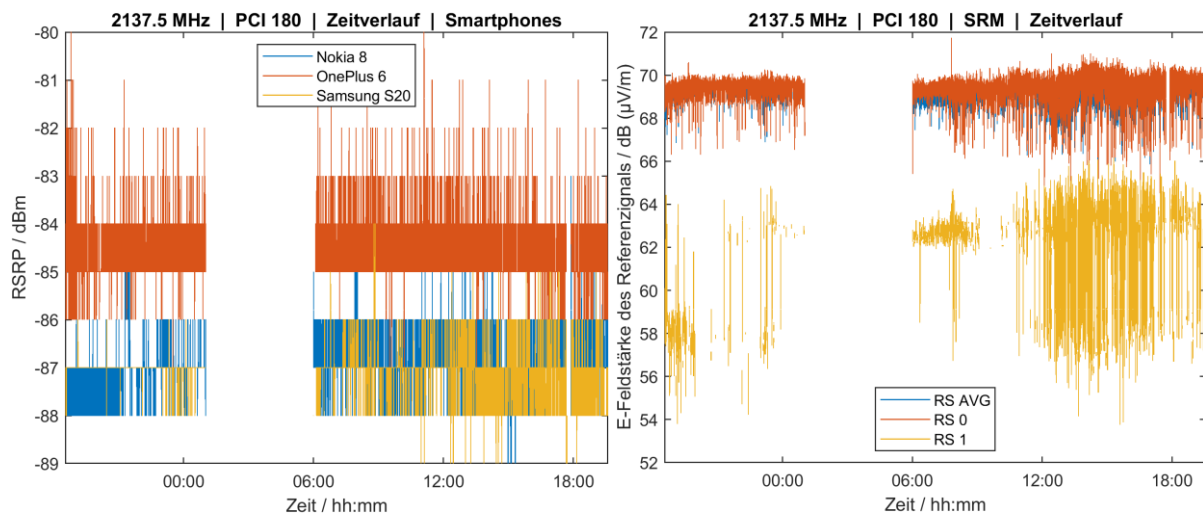


Abbildung 3-52 Ergebnisse der Signal- und Feldstärke bei den Langzeitmessungen für LTE im Zeitverlauf

Die Histogramme zu diesen Signalpegelverläufen in Abbildung 3-53 zeigen darüber hinaus außerdem:

- Die RSRP-Werte der Smartphones variieren über die Langzeitmessung hinweg kaum. Die meisten Messungen entfallen auf gleichen Messwert, wobei die es Schwankungen nach oben und unten von etwa 1 dB gibt. Vereinzelt gibt es auch größere Abweichungen, vor allem beim Gerät von OnePlus.
- Dass die Verteilung nicht ganz symmetrisch erscheint, dürfte unter anderem aus der Quantisierung der RSRP-Messwerte resultieren. Abhängig davon, wo der tatsächliche Mittelwert innerhalb eines Quantisierungsintervalls liegt, verschieben sich die Anteile, die in die benachbarten Intervalle fallen.
- Der Mittelwert von RSRP weicht beim OnePlus 6 von demjenigen der übrigen Smartphones um etwa 2 dB ab. Dies kann aus örtlichen Schwankungen der Signalstärke aufgrund von Fading resultieren. Die ermittelten Umrechnungsfaktoren der Smartphones in diesem Frequenzband unterscheiden sich nicht entsprechend.
- Auch die Messwerte des Referenzsignals RS 0 sowie der mittlere Wert RS AVG des SRM-3006 variieren während der Langzeitmessung um etwas mehr als 1 dB nach oben und unten
- Die Verteilung des Referenzsignals RS1 zeigt zwei unterschiedliche Mittelwerte, um die sich jeweils eine Verteilung ähnlich einer Gaußverteilung zeigt.

Es sei angemerkt, dass auch Auswertungen für weitere Zellen ausgeführt wurden, die im gleichen Frequenzband lagen. Zwei davon sind weitere Sektoren des gleichen Funkmastes, der gezeigten Funkzelle. Bei diesen traten sowohl bei den Signalstärken der Smartphones als auch bei den zugehörigen Feldstärken größere Schwankungen auf. Die Ursache der breiteren Streuung könnte darin begründet sein, dass die Funkzellen vom selben Mast in eine andere Richtung gerichtet sind, die weniger direkt auf den Untersuchungsort zeigt. Dadurch kommt es womöglich entlang des Ausbreitungspfads zu vermehrten Einflüssen.

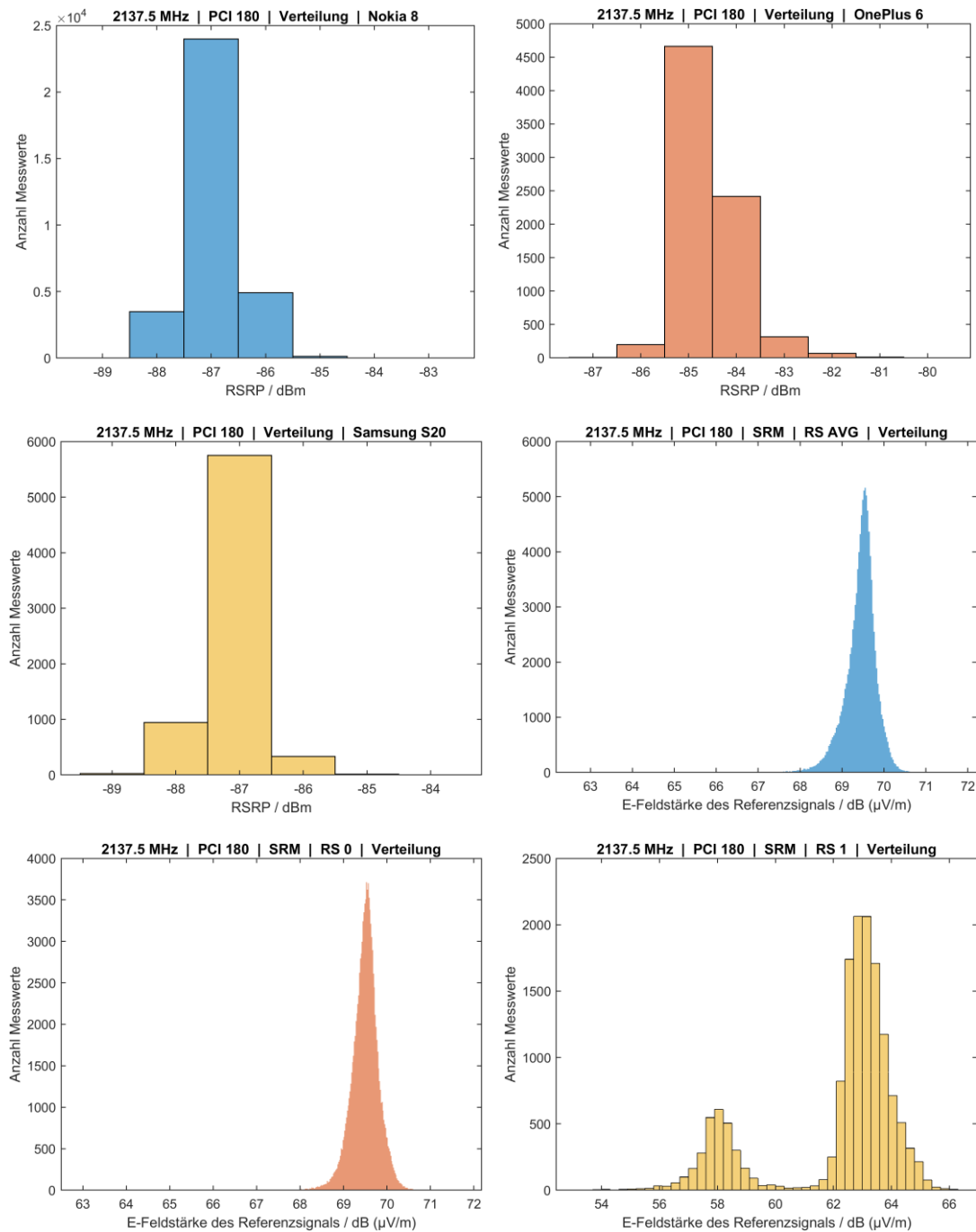


Abbildung 3-53 Histogramme der aufgetretenen Signal- und Feldstärke bei den Langzeitmessungen für LTE

Die Zeitverläufe der UMTS-Messungen in Abbildung 3-54 zeigen folgendes:

- Der Zeitverlauf der Smartphones zeigt, dass die Messwerte im Laufe der Messungen im Wesentlichen um wenige Schritte variieren. Es fällt auf, dass beim OnePlus 6 häufiger zwischen den Stufen gewechselt wird, als bei den beiden anderen Geräten. Beim Nokia 8 könnte dies damit zusammenhängen, dass es die meiste Zeit nicht in dieser Zelle, sondern in der anderen Funkzelle eingebucht ist und über die Nachbarzellen insgesamt weniger häufig aktualisierte Messwerte zur Verfügung stehen.
- Es gibt mehrere Ausreißer nach unten bei den Messwerten des OnePlus 6. Diese korrespondieren jedoch zeitlich nicht mit denjenigen Ausreißern der SRM-Messungen.

- Sowohl die Ausreißer der Smartphone-Messungen als auch der SRM-Messungen treten ausschließlich in einzelnen Messdurchläufen auf und der Messwert kehrt danach wieder in den Bereich zurück, in dem die mittleren gemessenen Pegel liegen.
- Die SRM-Messungen zeigen über die Zeit Schwankungen um meist weniger als 2 dB. Es gibt jedoch zwischendurch vereinzelt Spitzen sowie gelegentliche Abweichungen nach unten. Beides jeweils kurzzeitig in einzelnen Messdurchläufen.
- Beim Samsung S20 gibt es zwischen 8:00 und 9:00 Uhr morgens eine Abweichung zu höheren Messwerten. Genau zu dieser Zeit gab es allerdings beim SRM gegenläufige Abweichungen hin zu niedrigeren Messwerten.

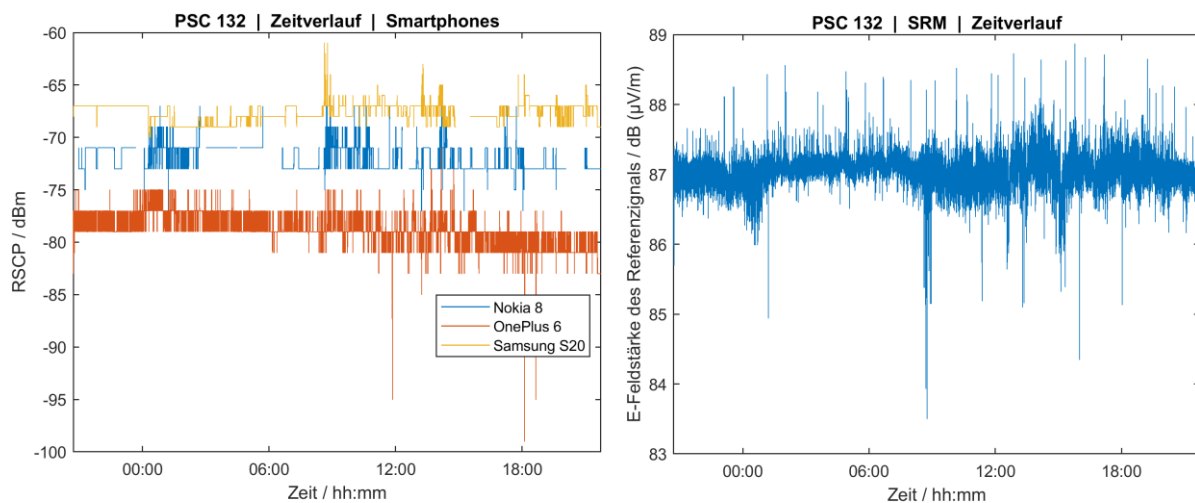


Abbildung 3-54 Ergebnisse der Signal- und Feldstärke bei den Langzeitmessungen für UMTS im Zeitverlauf

Zu den Histogrammen zur UMST-Langzeitmessung in Abbildung 3-55 sind folgende Dinge anzumerken:

- Bei den Smartphone-Messungen ist zu berücksichtigen, dass die Messwerte der CellInfo-Klasse in 2 dB-Schritten quantisiert werden, obwohl diese vom Modem eigentlich genauer gemessen und in 1 dB-Schritten an die Basisstation gemeldet werden können (vgl. Abschnitt 2.2.6). In der SignalStrength-Klasse, die beim Samsung Galaxy S20 Ultra 5G genutzt werden musste, da die CellInfo-Klasse keinen sinnvollen Wert ausgibt, wird hingegen auch in 1 dB-Schritten aufgelöst.
- Es zeigt sich, dass beim Nokia 8 fast ausschließlich zwei der Quantisierungsstufen angenommen werden, die insgesamt 4 dB abdecken. Beim OnePlus liegt ein größerer Schwerpunkt auf einem Wert und die zwei benachbarte Quantisierungsniveaus werden auch häufig angenommen. Während beim Nokia 8 der tatsächliche Mittelwert also vermutlich auf der Grenze zwischen den beiden Quantisierungsstufen liegt, wird er beim OnePlus 6 eher in der Mitte der Quantisierungsstufe liegen.
- Beim Samsung S20 ist die Verteilung weniger symmetrisch, obwohl die Auflösung in 1 dB-Schritten erfolgt.
 1. Die SRM-Messwerte zeigen eine symmetrische Normalverteilung um den Mittelwert. Die Schwankungen liegen unter 2 dB.

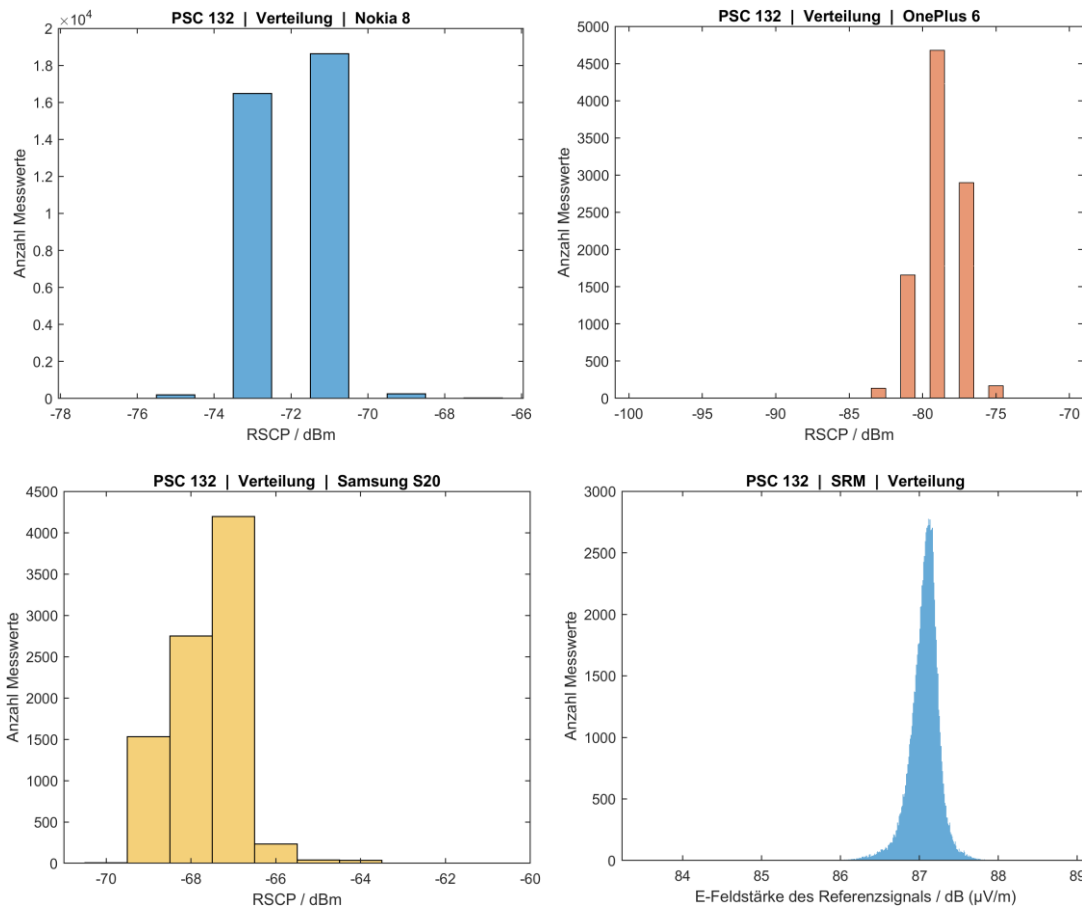


Abbildung 3-55 Histogramme der aufgetretenen Signal- und Feldstärke bei den Langzeitmessungen für UMTS

Bei den GSM-Messungen, waren die drei Smartphones in zwei unterschiedliche GSM-Zellen eingebucht, die am Untersuchungsort fast exakt den gleichen Signalpegel aufweisen. Zu dem Ergebnis im Zeitverlauf in Abbildung 3-56 ist folgendes anzumerken:

- Die Messwerte der Smartphones variieren fast ausschließlich jeweils zwischen zwei Quantisierungsniveaus.
- Der SRM-Verlauf zeigt bis auf zwei einmalige starke Ausreißer eine geringe Variation um den Mittelwert.

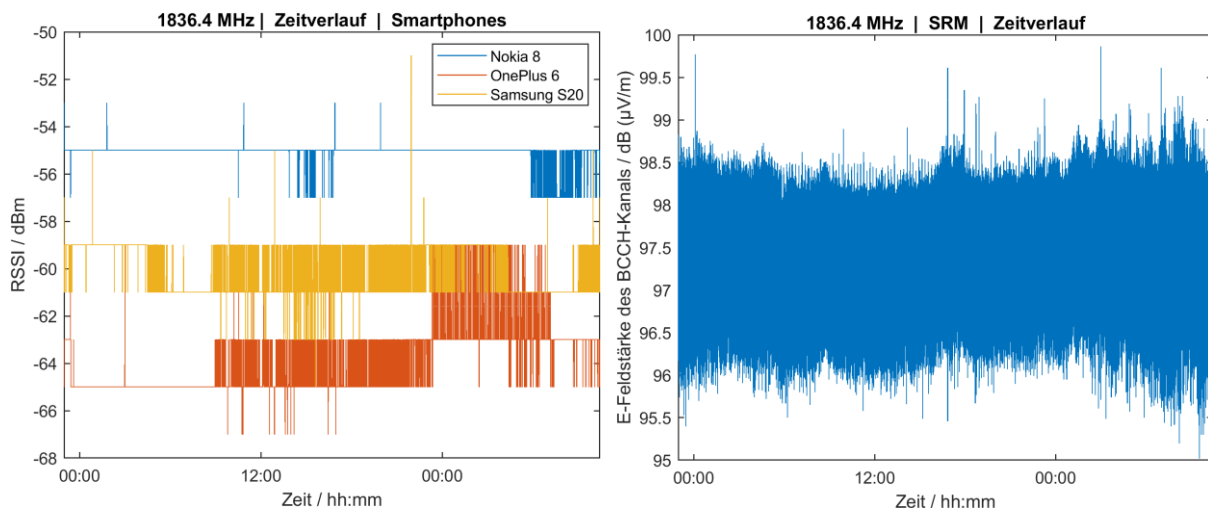


Abbildung 3-56 Ergebnisse der Signal- und Feldstärke bei den Langzeitmessungen für GSM im Zeitverlauf

Die in Abbildung 3-57 gezeigten Histogramme der zuvor im Zeitverlauf dargestellten Ergebnisse ähneln sehr denen der bereits gezeigten Standards. Die Quantisierung auf 2 dB-Schritte ist wieder deutlich zu erkennen.

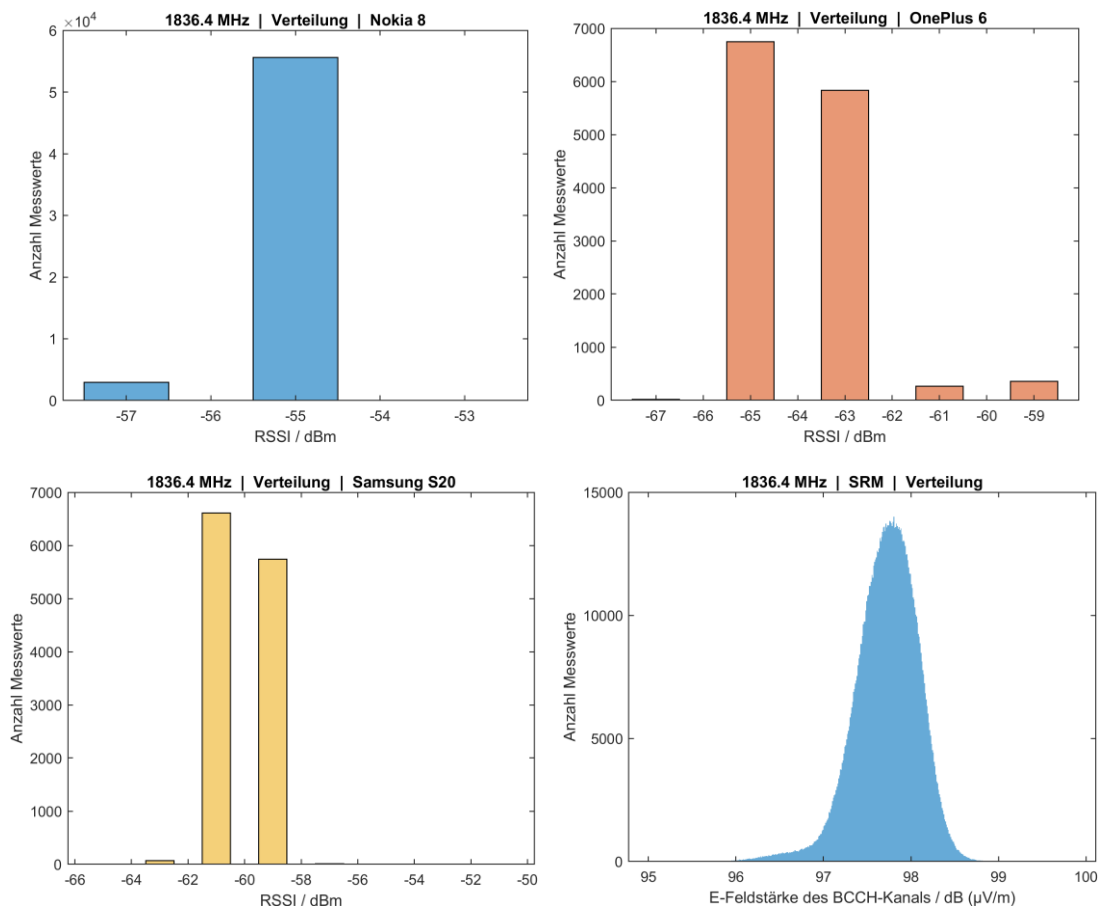


Abbildung 3-57 Histogramme der aufgetretenen Signal- und Feldstärke bei den Langzeitmessungen für GSM

Die bisher gezeigten Ergebnisse der Langzeitmessungen bezogen sich allesamt auf die auslastungsunabhängigen Referenzsignale, die mit konstanter Sendeleistung abgestrahlt werden. Für LTE wurde auch eine Messung des auslastungsabhängigen RSSI-Wertes vorgenommen, bei der die momentane Leistung innerhalb der Messbandbreite des LTE-Kanals bestimmt wird (vgl. Abschnitt 2.1.1.2.2). Die Ergebnisse für die Smartphones „OnePlus 6“ und „Samsung Galaxy S8“ mit der Software QualiPoc von Rohde & Schwarz sind in Abbildung 3-58 neben der mit dem SRM-3006 gemessenen elektrischen Feldstärke aufgeführt. Die Messdaten sind jeweils einmal ohne Mittelung für jeden einzelnen Messdurchlauf und einmal über ein gleitendes Fenster von einer Minute gemittelt dargestellt, um den Verlauf des mittleren Pegels besser erkennbar zu machen.

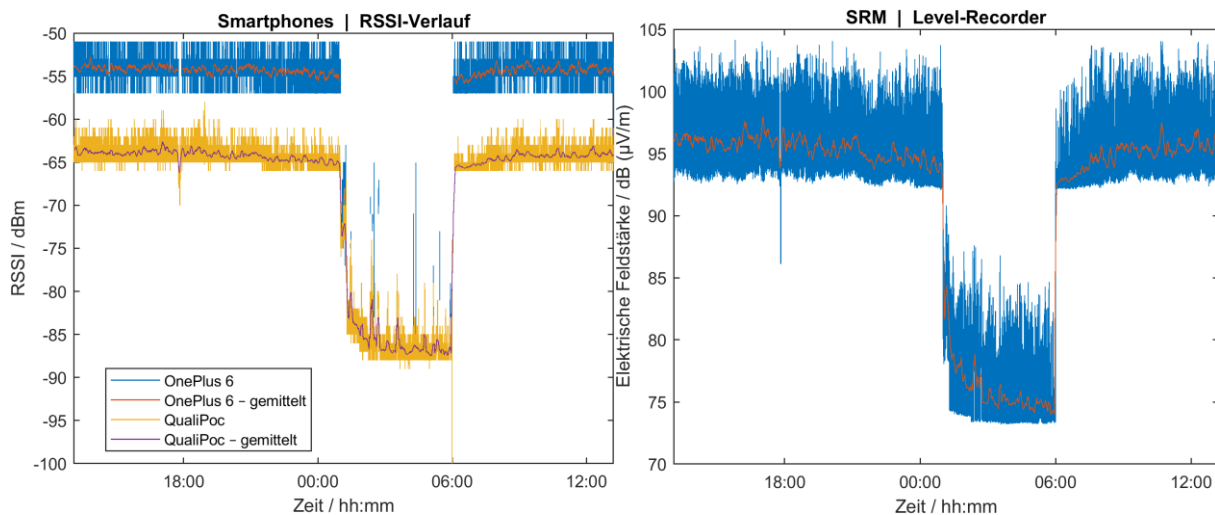


Abbildung 3-58 Ergebnisse der RSSI-Messung für LTE im Zeitverlauf

Die Abbildung lässt folgendes erkennen:

- Wie bereits bei den Messdaten von RSRP ist auch in den Messdaten von RSSI sowie bei den Messungen des SRM im Level Recorder die nächtliche Abschaltung von Funkzellen auf diesem Frequenzkanal in der Umgebung des Messorts erkennbar. Die gemessene Leistung bricht sowohl beim SRM als auch beim QualiPoc-Smartphone nachts zwischen 1:00 Uhr und 6:00 Uhr um bis zu 20 dB ein. Da das OnePlus-Smartphone nicht zum Verbleib in diesem Frequenzband gezwungen werden kann, wechselt es in ein Band mit besserem Empfangspegel, weshalb für dieses Smartphone während der Nachtabschaltung keine RSSI-Messwerte für dieses Frequenzband vorliegen.
- Die Messkurve des QualiPoc-Smartphones zeigt hinsichtlich des gemittelten Verlaufs große Ähnlichkeit zum Verlauf der Messung des SRM-3006. Es werden vorübergehende Einbrüche, wie zum Beispiel um etwa 18:00 Uhr, aber auch mehrere kurzzeitige Erhöhungen nachgezeichnet. Auch der nächtliche Rückgang der Leistung sowie die Spitzen in dieser Zeit sind dort deutlich wiederzuerkennen.
- Die Messwerte des OnePlus 6 zeichnen den mit dem SRM gemessene Leistung nicht so gut nach, wie das QualiPoc-Smartphone. Die grobe Tendenz z.B. vor und nach der Nachtabschaltung sowie die vorübergehenden Erhöhungen der Leistung lassen sich jedoch an einigen Stellen jedoch wiederfinden. Ob dies mit der speziellen QualiPoc-Software oder anderen Faktoren zusammenhängt, lässt sich mangels weiterer Testmöglichkeiten vorerst nicht weiter ergründen.

3.4.2.6.4 Erkenntnisse

Aus den Ergebnissen der Messungen leiten sich folgende Erkenntnisse ab:

- Grundsätzlich verteilen sich die Messwerte der auslastungsunabhängigen Referenzsignale in Form einer Gaußkurve um einen Mittelwert. Dies gilt sowohl für die Smartphone-Messwerte als auch die Messungen des SRM-3006. Allerdings gibt es vereinzelt Abweichungen, die zu leicht schiefen Verteilungen führen.
- Die Smartphone-Messwerte schwanken meist bei allen drei Geräten in der gleichen Größenordnung, wie auch die vom SRM gemessenen Werte.

- Nachts kommt es zu vollständigen Abschaltungen bestimmter Funkzellen. Dies müsste für eine tageszeitabhängige Immissionsabschätzung berücksichtigt werden, da sich die Immissionsverteilung in der Fläche und über die Frequenzbänder dadurch verändert.
- Die Referenzsignale der Mobilfunkstandards weisen insgesamt über eine längere Zeit an einem Ort stabile Werte auf und variieren um einen konstanten Mittelwert. Allerdings scheint sich die Streubreite zu vergrößern, wenn längere Ausbreitungspfade zurückgelegt werden.
- Die RSSI-Messungen von LTE zeigen, dass es zumindest prinzipiell möglich ist mit Smartphones die Kanalleistung zu verfolgen und eine Absenkung der Leistung z.B. in der Nachtphase zu erkennen. Allerdings ist eine tatsächliche Nutzung für ein HF-Messnetzwerk aufgrund der in Abschnitt 2.2.6 dargelegten Probleme und Einschränkungen hinsichtlich der Verfügbarkeit und Verlässlichkeit der RSSI-Messwerte derzeit nicht absehbar.

3.5 Abschätzung der mit einem einzelnen Endgerät erzielbaren Messgenauigkeit

In diesem Abschnitt wird auf Grundlage der in diesem Kapitel durchgeführten Messungen eine Abschätzung der Genauigkeit der aus einer einzelnen Smartphone-Signalstärkemessung mithilfe der bestimmten Umrechnungsfaktoren ableitbaren elektrischen Feldstärke vorgenommen. Hierfür wird zunächst eine Modellgleichung aufgestellt und die zu berücksichtigenden Unsicherheitsbeiträge aufgeführt. Anschließend werden die verschiedenen Messungen statistisch ausgewertet und die sich daraus ergebenden Unsicherheiten bestimmt. Schließlich wird ein Unsicherheitsbudget aus den Einzelbeiträgen aufgestellt und die Gesamtunsicherheit der einzelnen Smartphone-Messung bestimmt. Das Vorgehen basiert auf den Grundsätzen des „Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement“ (GUM) [120].

3.5.1 Modellgleichung

Um die Messgenauigkeit zu ermitteln ist zunächst eine geeignete Modellgleichung aufzustellen. Die interessierende Ergebnisgröße ist ein Schätzwert für die elektrische Feldstärke E . Diese soll aus dem Signalstärkemesswert P des Smartphones ermittelt werden. Für die Umrechnung werden die messtechnisch ermittelten mittleren Umrechnungsfaktoren K verwendet. Zusätzlich kann eine mittlere, ebenfalls messtechnisch ermittelte mittlere Nutzerdämpfung A berücksichtigt werden, um zu geringe Schätzwerte für die Feldstärke zu vermeiden. In logarithmischer Schreibweise für die Pegel ergibt sich somit folgender Zusammenhang:

$$L_E (\text{re } 1 \mu\text{V/m}) = L_P (\text{re } 1 \text{mW}) + K (\text{re } 10^{-9} \Omega/\text{m}^2) + A (\text{re } 1) \quad 3-3$$

mit

- L_E Elektrische Feldstärke des Referenzsignals in dB ($\mu\text{V/m}$)
- L_P Am Antennenanschluss des Smartphones gemessener Signalpegel des jeweiligen Referenzsignals in dBm
- K Umrechnungsfaktor von Signalpegel zur elektrischen Feldstärke des Referenzsignals in dB ($10^{-9} \Omega/\text{m}^2$)
- A Dämpfung des gemessenen Signalpegels durch den Nutzer in dB

3.5.2 Unsicherheitsbeiträge

Alle drei Eingangsgrößen in die Modellgleichung sind mit Unsicherheiten behaftet.

3.5.2.1 Unsicherheit der Signalpegelmessung

Für die Signalpegelmessung lassen sich drei offensichtliche Unsicherheitskomponenten ausmachen:

- Empfänger des Smartphones: Die Leistungsmessung des Empfängers eines Smartphones hat eine gewisse Genauigkeit, für die in den Mobilfunkstandards Mindestanforderungen definiert sind (vgl. Kapitel 2.1). Referenzpunkt für die Messung ist der Antennenanschluss. Dementsprechend umfasst diese Unsicherheitskomponente sämtliche

Unsicherheit, die ab diesem Punkt hinzugefügt wird, während die übrigen Komponenten alle Einflüsse vor dem Empfänger beschreiben.

Es wird angenommen, dass sich damit sämtliches nichtideales Verhalten des Empfängers ausreichend beschreiben und die Unsicherheit abschätzen lässt. Dies umfasst auch die in den Labormessungen beobachteten Pegelsprünge innerhalb der ansonsten linear verlaufenden Messkurven (Kapitel 3.4.1.2). Die dort beobachteten Pegelsprünge liegen fast ausschließlich innerhalb der vom Standard vorgegebenen Spannbreiten, die sich aus der Begrenzung der Mindestgenauigkeit ergeben.

- Quantisierung auf ganzzahlige Werte: Die Quantisierung der in Android ausgegebenen Signalstärkemesswerte auf ganzzahlige Dezibel-Werte (LTE) bzw. ungerade Dezibel-Werte (UMTS und GSM über die CellInfo-Klasse der Android-API) führt zu einem Unsicherheitsbeitrag, da dadurch die Auflösung der Messwerte begrenzt wird.
- Ausrichtung des Smartphones zur Basisstation: Die Ausrichtung des Smartphones zur Basisstation kann sich auf den empfangenen Signalpegel auswirken, sodass am gleichen Messpunkt abhängig von der Orientierung des Smartphones zur verbundenen Basisstation unterschiedliche Ergebnisse erhalten werden. Hierfür kann sowohl aus den Labor als auch den Feldmessungen empirisch ein Unsicherheitsbeitrag abgeleitet werden.

Weitere Einflüsse auf den mittleren Messwert der Feldstärkebestimmung, wie zum Beispiel kurzzeitige Schwankungen der Sendeleistung der Basisstation, Änderungen im Ausbreitungspfad, vorbeifahrende Fahrzeuge etc. werden nicht berücksichtigt, da sie tatsächliche Schwankungen der Feldstärke darstellen und deshalb auch von einem Feldstärkemessgerät in gleicher Weise erfasst werden würden. Weiterhin lassen sich diese Effekte aus den vorliegenden Daten nicht quantifizieren.

3.5.2.2 *Unsicherheit des Umrechnungsfaktors*

Die Bestimmung eines Umrechnungsfaktors von Signalstärkemesswerten der Smartphones zu Feldstärkewerten ist mit Unsicherheiten behaftet. Dazu gehören:

- Unsicherheit der Feldstärkemessung mit dem Feldstärkemessgerät (Unsicherheit des Messgeräts, der Probenahme, Nutzereinfluss)
- Unsicherheit der Smartphone-Messung (Unsicherheit des Empfängers, der Probenahme, Nutzereinfluss)
- Vorübergehende Umgebungseinflüsse (Unterschiedlich bei den beiden Messungen von Smartphone/Feldstärkemessgerät)

Diese Einflüsse im Detail zu untersuchen und zu beschreiben wäre mit erheblichen Aufwand verbunden und gegenüber dem daraus resultierenden Nutzen in keinem Verhältnis. Daher wird die Unsicherheit empirisch aus den Schwankungen der Ergebnisse bei der Bestimmung der Umrechnungsfaktoren unter Feldbedingungen ermittelt.

3.5.2.3 *Unsicherheit der Dämpfung durch den Nutzer*

Der Nutzer eines Smartphones beeinflusst abhängig von der Nutzungssituation und der Lage zur Basisstation durch Abschirmung und Verstimmung der Empfangsantenne die Signalstärkemessung. Während zwar eine mittlere Dämpfung bestimmt und zur mittleren Korrektur verwendet werden kann, bleibt ein Unsicherheitsbeitrag der nicht korrigiert werden kann. Diese Schwankungsbreite und die damit verbundene Unsicherheit wird aus den Feld- und Labormessungen empirisch ermittelt. Da sich bei den durchgeführten Untersuchungen auch die Ausrichtung zur Basisstation bzw. Sendeantenne änderte, wirkt sich auch die Abhängigkeit von der Ausrichtung des Smartphones aus. Eine Trennung beider Effekte ist nicht möglich. Im Sinne einer Abschätzung des ungünstigsten Falles werden daher die ermittelten Unsicherheiten beider Einflüsse in voller Höhe in das Unsicherheitsbudget aufgenommen.

3.5.3 **Abschätzung aus allgemeinen Informationen**

Diese Abschätzung entspricht dem Typ B (ohne statistische Methoden) zur Ermittlung der Standardunsicherheit nach GUM [120].

3.5.3.1 *Unsicherheit durch den Empfänger des Smartphones*

Die laut den Mobilfunkstandards vorgegebenen maximal erlaubten Abweichungen nach oben und unten können nach GUM als Flanken einer Rechteckverteilung angenommen werden. Die Unsicherheit ergibt sich dann aus der Standardabweichung dieser Rechteckverteilung als

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}},$$

wobei a der Halbwerte der Differenz von Ober- und Untergrenze a_+ und a_- mit $a = \frac{1}{2}(a_+ - a_-)$ entspricht. Es sei angemerkt, dass hier bewusst davon ausgegangen wird, dass die Signalpegel im logarithmischen Maß gleichverteilt sind.

Für die einzelnen Mobilfunkstandards sind diese Genauigkeitsanforderungen und die daraus resultierende Standardunsicherheiten in Tabelle 3-6 noch einmal zusammengestellt. Hierbei werden die Genauigkeiten für Normalbedingungen und nicht die für Extrembedingungen betrachtet.

Funkstandard	Signalstärkeindikator	Empfangene Kanalleistung	Mindestgenauigkeit laut Standard / Halbweite	Standardunsicherheit
LTE	RSRP	≤ -70 dBm	$\pm 4,5$ dB	2,6 dB
		> -70 dBm	± 8 dB	4,6 dB
UMTS	RSCP	≤ -70 dBm	± 6 dB	3,5 dB
		> -70 dBm	± 8 dB	4,6 dB
GSM	RSSI	≤ -70 dBm	± 4 dB	2,3 dB
		> -70 dBm	± 6 dB	3,5 dB

Tabelle 3-6 Mindestgenauigkeiten für die Messung der Signalstärkeindikatoren laut Mobilfunkstandards und daraus resultierende Standardunsicherheiten

3.5.3.2 Unsicherheit durch die Quantisierung auf ganzzahlige Werte

Das begrenzte Auflösungsvermögen bei Messungen kann ebenfalls durch eine Gleichverteilung, deren Halbbreite der Hälfte der Breite der Quantisierungsstufen entspricht, beschrieben werden. Zwar ist es in allen drei betrachteten Mobilfunkstandards vorgesehen, dass die Signalstärkemesswerte in Schritten von 1 dB an die Basisstation übermittelt werden, allerdings werden im Android-Betriebssystem bei allen untersuchten Smartphones bei UMTS und GSM im Gegensatz dazu nur ungerade Messwerte ausgegeben, sodass nur eine Auflösung in 2 dB-Schritten vorliegt. Die sich daraus ergebende Standardunsicherheit ist in Tabelle 3-7 aufgeführt.

Funkstandard	Signalstärkeindikator	Auflösung	Halbweite	Standardunsicherheit
LTE	RSRP	1 dB	0,5 dB	0,29 dB
UMTS	RSCP	2 dB	1 dB	0,58 dB
GSM	RSSI	2 dB	1 dB	0,58 dB

Tabelle 3-7 Standardunsicherheit der Signalstärkemessung aufgrund der begrenzten Auflösung

3.5.4 Abschätzung aus den Feldmessungen

Die Abschätzung der Unsicherheit erfolgt zunächst für die einzelnen Komponenten getrennt aus den Feld- und den Labormessungen, da diese unter derart unterschiedlichen Bedingungen aufgenommen wurden, dass eine direkte gemeinsame Auswertung nicht sinnvoll ist.

Die empirische Ermittlung von Standardunsicherheiten aus den Messungen entspricht dem Typ A (Statistische Analyse von Messwiederholungen) nach GUM.

3.5.4.1 Unsicherheit des Umrechnungsfaktors

Um den Zusammenhang zwischen der durch ein Feldstärkemessgerät gemessenen elektrischen Feldstärke E und der von einem Smartphone gemessenen Signalleistung P zu bestimmen, wurden Messungen im freien Feld durchgeführt. Dabei dient der durch das Feldstärkemessgerät festgestellte Maximalwert beim Schwenken im jeweiligen Messvolumen als Referenz. Dieser Maximalwert der Feldstärke soll aus den Messungen von Smartphones eines HF-Messnetzwerks ermittelt werden können. Hierzu wird ein Umrechnungsfaktor K benötigt, der diesen Zusammenhang beschreibt und diese Umrechnung ermöglicht.

Deshalb wird der Umrechnungsfaktor aus jeder einzelnen Smartphone-Messung im Vergleich mit der Feldstärkemessung am Messort ermittelt und für jedes Frequenzband und jedes Smartphone das Stichprobenmittel sowie die Stichprobenvarianz berechnet. Das Stichprobenmittel (arithmetischer Mittelwert) entspricht dem mittleren Umrechnungsfaktor, der als Grundlage für eine Umrechnung von Signalstärkemesswerten genutzt werden kann. Dieser wird jedoch bezogen auf die einzelne Smartphone-Messung immer nur im Mittel stimmen. Hier spielt die Tatsache, dass die Maximalwertbestimmung aus dem Messvolumen bei der Feldstärkemessung die ansonsten in diesem Messvolumen herrschenden Feldstärkevariationen ausblendet, während diese von den einzelnen Smartphone-Messungen in diesem gleichen Volumen (wenn ggf. auch in gemittelter Form) berücksichtigt werden.

Die Stichprobenvarianz bzw. die Standardabweichung der Umrechnungsfaktoren der Einzelmessungen wird als Standardunsicherheit u der Smartphone-Messungen im Verhältnis zu den Feldstärkemessungen aufgefasst. Diese umfasst sowohl die typische Messwertschwankung, die sich durch die Feldstärkefluktuationen in einer Umgebung im Verhältnis zur maximalen Feldstärke, wie sie durch ein Feldstärkemessgerät mit Max-Hold in dieser Umgebung gemessen würde, als auch Unsicherheitsbeiträge, die sich aus vorübergehenden Umgebungseinflüssen sowie die Unsicherheit bei der Smartphone- wie auch Feldstärkemessung einschließlich der Unsicherheit der Probenahme ergeben.

Jedes Smartphone kann aufgrund der verbauten Antenne und seiner Bauform einen unterschiedlichen Umrechnungsfaktor von der Signalstärke zur elektrischen Feldstärke besitzen, wobei sich dieser auch noch für die verschiedenen Frequenzbänder unterscheiden kann. Im Folgenden wird die Unsicherheit abgeschätzt, die die für die untersuchten Smartphones und die einzelnen Frequenzbänder bestimmten Umrechnungsfaktoren besitzen.

Die Gleichungen 3-4 und 3-5 zeigen die allgemeinen Formeln zur des arithmetischen Mittels und der Varianz, die im Folgenden als Grundlage zur Bestimmung des mittleren Umrechnungsfaktors sowie dessen Unsicherheit dienen.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad 3-4$$

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad 3-5$$

Gleichung 3-6 zeigt die Grundgleichung zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors L_K ohne Nutzereinfluss aus einer Smartphone-Signalpegelmessung L_p und einer Feldstärkemessung L_E .

$$K(\text{re } 10^3/(\text{A} \cdot \text{m})) = L_E(\text{re } 1\mu\text{V/m}) - L_P(\text{re } 1\text{mW}) \quad 3-6$$

Gleichung 3-7 zeigt die auf die vorliegenden Messungen angepasste Gleichung zur Berechnung des mittleren Umrechnungsfaktors \bar{K}_h . Die Berechnung erfolgt mit Pegeln (in Dezibel) und nicht mit Leistungs- bzw. Leistungswurzelgrößen, da die Pegeldifferenzen selbst Normalverteilt sind, wie in der weiteren Auswertung ersichtlich wird. Um die Lesbarkeit zu verbessern, wird im Gegensatz zu Gleichung 3-3 auf die Nennung der Bezugsgrößen innerhalb der Gleichung verzichtet.

$$\bar{K}_h = \frac{1}{m \cdot n} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n K_{h,i,j} = \frac{1}{n \cdot m} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (L_{E,i} - L_{P,h,i,j}) \quad 3-7$$

Mit

- \bar{K}_h Mittlerer Umrechnungsfaktor des betrachteten Smartphones (bei der betrachteten Frequenz) h in dB ($10^{-9} \Omega/\text{m}^2$)
- $K_{h,i,j}$ Umrechnungsfaktor, der sich aus der Einzelmessung des Smartphones j am Messpunkt i (bei der betrachteten Frequenz) ergibt in dB ($10^{-9} \Omega/\text{m}^2$).
- $L_{P,h,i,j}$ Bei der Einzelmessung j am Messpunkt i am Antennenanschluss des Smartphones h gemessener Signalpegel des jeweiligen Referenzsignals in dBm.
- $L_{E,i}$ Maximaler Feldstärkemesswert des SRM, der am Messpunkt i beim Schwenken aufgetreten ist, in dB ($\mu\text{V/m}$).
- m Anzahl der Messpunkte, an denen für das Smartphone (bei der betrachteten Frequenz) h gemessen wurde.
- n Anzahl der Messwerte, die an einem einzelnen Messpunkt aufgezeichnet wurde. (Streng genommen, kann sich die Anzahl je Messort unterscheiden. Dies ist hier vereinfacht dargestellt. Berücksichtigt wird die tatsächliche Anzahl.)

Die für die Berechnung der jeweiligen Standardabweichung des Umrechnungsfaktors eines Smartphones in einem Frequenzband aus den einzelnen gemessenen Umrechnungsfaktoren erfolgt gemäß folgender Formel:

$$s(K_h) = \sqrt{\frac{1}{m \cdot n - 1} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_{h,i,j} - \bar{K}_h)^2} \quad 3-8$$

Dieser Zusammenhang wurde durch bis zu 65 Messungen an verschiedenen Messorten sowie ca. 28 Messwertaufzeichnungen der Smartphones je Messort im Verhältnis zur SRM-Messung untersucht (Das genaue Vorgehen wurde in Abschnitt 3.4.2.2.2 beschrieben.). Diese verteilen sich jedoch ungleichmäßig auf die einzelnen Frequenzbänder bei LTE. Die Messunsicherheit wird auf Basis aller Einzelmessungen abgeschätzt. Da diese nicht unter exakt gleichen Bedingungen aufgenommen wurden und daher nicht als Wiederholungsmessungen aufgefasst werden können, wird die auf diese Weise experimentell ermittelte Standardabweichung unmittelbar als Standardunsicherheit des Umrechnungsfaktors angesehen ohne, dass die Standardabweichung durch die Wurzel der Anzahl der Messwerte geteilt wird.

$$u(K_h) = s(K_h) \quad 3-9$$

Abbildung 3-59 zeigt zunächst die Verteilungsdichte der Abweichung der Umrechnungsfaktoren $K_{h,i,j}$ der Einzelmessungen vom mittleren Umrechnungsfaktor des jeweiligen Smartphones und des jeweiligen Frequenzbandes gemäß:

$$\Delta K_{i,j} = K_{h,i,j} - \bar{K}_h \quad 3-10$$

Mit

- $\Delta K_{h,i,j}$ Abweichung des aus der Einzelmessung j bestimmten Umrechnungsfaktors vom mittleren Umrechnungsfaktor des jeweiligen Smartphones für das vorliegende Frequenzband h
- \bar{K}_h Mittlerer Umrechnungsfaktor des jeweiligen Smartphones für ein Frequenzband
- $K_{h,i,j}$ Umrechnungsfaktor der sich aus der Einzelmessung j des Smartphones an Messpunkt i und der zugehörigen Feldstärkemessung ergibt

Für alle drei Mobilfunkstandards zeigt sich, dass die Abweichungen gut durch eine Normalverteilung angenähert werden können und eine ähnliche Spannweite aufweisen. Bei LTE gibt es jedoch einige Ausreißer, bei denen der Umrechnungsfaktor deutlicher nach unten abgewichen sind. Ohne diese, wäre die Annäherung der Normalverteilung ebenso gut wie UMTS und GSM.

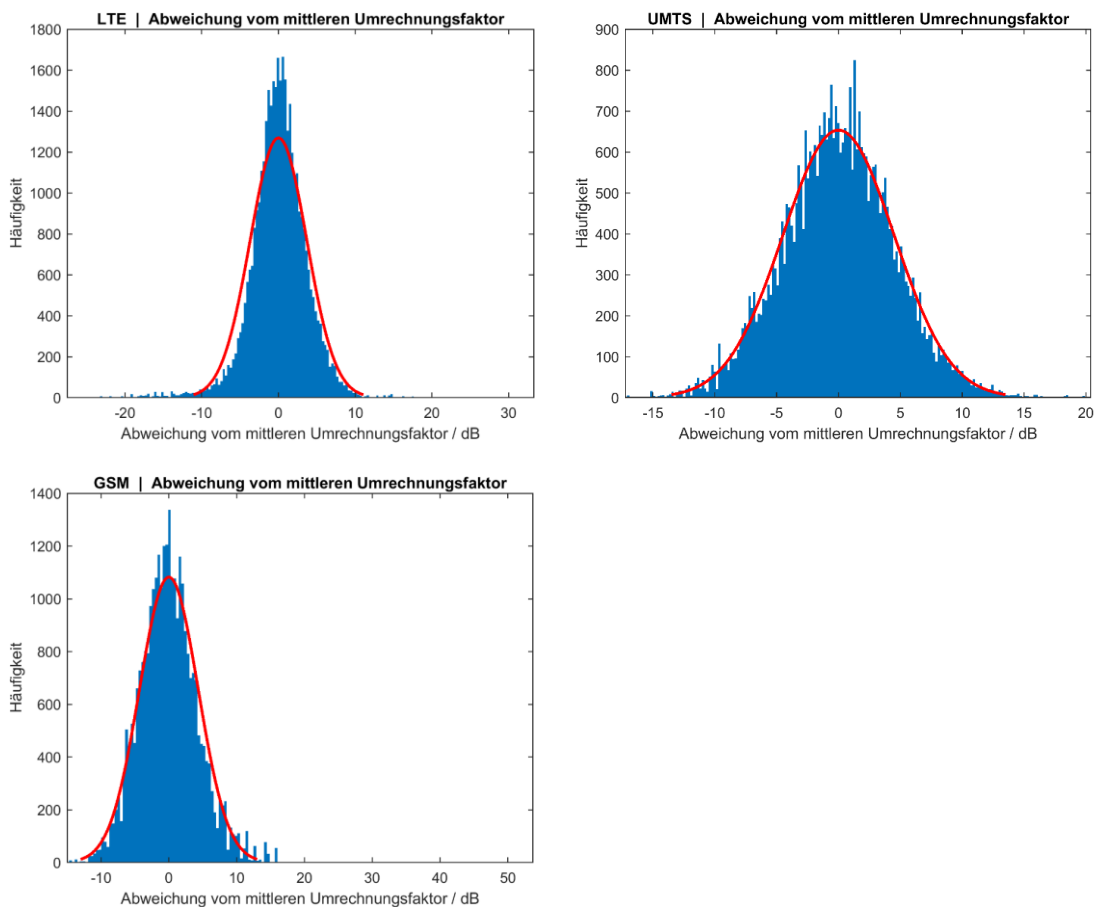


Abbildung 3-59 Abweichung der einzelnen Messungen zur Bestimmung des Umrechnungsfaktors vom mittleren Umrechnungsfaktor des jeweiligen Smartphones und der jeweiligen Frequenz für die drei Mobilfunkdienste LTE, UMTS & GSM

In den Tabellen 3-8 bis 3-14 sind für alle Smartphones die bestimmten mittleren Umrechnungsfaktoren \bar{K}_h , die Standardunsicherheit $u(K_h)$ dieser Umrechnungsfaktoren sowie die Anzahl der Messpunkte m und die Anzahl der vorliegenden Einzelmesswerte $m \cdot n$ in den jeweiligen Frequenzbändern der drei Mobilfunkstandards aufgeführt.

Bei LTE sind diejenigen Einträge grau hinterlegt, die aus weniger als zehn Messpunkten hervorgehen, da diese aufgrund der geringen Anzahl nicht als verlässlich angesehen werden können.

Smartphone	LTE Frequenzband / MHz				
	800	900	1800	2100	2600
Fairphone 3	150,1		146,0	159,1	159,2
Honor 7X	144,2		157,7	156,4	161,5
Huawei P10	149,1		152,9	157,0	157,7
Motorola Moto G5	148,4		156,1	157,4	156,5
Nokia 8	149,7		155,0	157,6	161,2
OnePlus 6	150,2	160,6	155,8	158,5	158,0
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 1	152,3	153,6	155,2	158,5	159,9
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 2			156,8	159,5	162,2
Samsung Galaxy S8	151,2		156,3	161,5	161,4
Sony Xperia Z5 Compact	147,2		153,1	154,3	157,0

Tabelle 3-8 Aus den Feldmessungen für LTE bestimmte Umrechnungsfaktoren in dB (10^{-9} W/m^2) je Smartphone und Frequenzband (Bei leeren Einträgen sind keine Messwerte des Smartphones in dem jeweiligen Frequenzband vorgekommen. Einträge, die aus weniger als 10 Messpunkten hervorgehen, sind grau hinterlegt.)

Smartphone	LTE Frequenzband / MHz				
	800	900	1800	2100	2600
Fairphone 3	1,61		2,76	3,37	3,44
Honor 7X	2,70		1,46	3,91	3,60
Huawei P10	2,20		5,01	4,43	3,77
Motorola Moto G5	3,79		2,71	4,61	3,14
Nokia 8	5,10		4,04	4,19	2,53
OnePlus 6	3,60	1,73	3,24	3,85	3,24
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 1	1,85	2,75	2,74	3,98	2,72
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 2			1,62	3,35	2,25
Samsung Galaxy S8	2,97		2,68	2,88	2,76
Sony Xperia Z5 Compact	1,61		4,37	3,97	3,07

Tabelle 3-9 Standardunsicherheit der aus den Feldmessungen für LTE bestimmten Umrechnungsfaktoren in dB (Bei leeren Einträgen sind keine Messwerte des Smartphones in dem jeweiligen Frequenzband vorgekommen. Einträge, die aus weniger als 10 Messpunkten hervorgehen, sind grau hinterlegt.)

Smartphone	LTE Frequenzband / MHz				
	800	900	1800	2100	2600
Fairphone 3	1	0	1	48	15
Honor 7X	2	0	1	50	12
Huawei P10	1	0	56	66	56
Motorola Moto G5	4	0	42	77	65
Nokia 8	3	0	11	75	31
OnePlus 6	3	1	47	78	63
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 1	3	14	37	69	50
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 2	0	0	1	46	14
Samsung Galaxy S8	6	0	49	58	50
Sony Xperia Z5 Compact	2	0	10	66	44

Tabelle 3-10 Anzahl der Messpunkte zur Bestimmung des jeweiligen Umrechnungsfaktors bei LTE (Einträge, die weniger als 10 Messpunkte enthalten, sind grau hinterlegt.)

Smartphone	LTE Frequenzband / MHz				
	800	900	1800	2100	2600
Fairphone 3	27	0	29	1381	418
Honor 7X	50	0	18	1389	323
Huawei P10	30	0	2045	2413	2021
Motorola Moto G5	95	0	1134	2169	1778
Nokia 8	84	0	307	2037	860
OnePlus 6	88	25	1326	2208	1748
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 1	81	373	948	1937	1331
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 2	0	0	28	1326	400
Samsung Galaxy S8	162	0	1378	1569	1427
Sony Xperia Z5 Compact	57	0	255	1809	1164

Tabelle 3-11 Anzahl der Einzelmesswerte zur Bestimmung des jeweiligen Umrechnungsfaktors bei LTE (Einträge, die aus weniger als 10 Messpunkten hervorgehen, sind grau hinterlegt.)

Smartphone	Umrechnungsfaktor / dB ($10^{-9} \Omega/m^2$)	Standardunsicherheit / dB	Anzahl Messpunkte	Anzahl Messwerte
Fairphone 3	157,4	4,13	65	1840
Honor 7X	152,3	4,73	65	1639
Huawei P10	152,6	4,68	174	6157
Motorola Moto G5	159,5	4,92	194	5291
Nokia 8	159,4	4,25	124	3322
OnePlus 6	157,5	4,3	195	5205
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 1	154,3	4,1	176	4528
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 2	155,9	4,27	60	1735
Samsung Galaxy S8	152,3	4,61	181	4911
Sony Xperia Z5 Compact	179,3	4,77	124	3360

Tabelle 3-12 Umrechnungsfaktor Standardunsicherheit und Anzahl der Messpunkte sowie Einzelmesswerte der Feldmessungen für alle Smartphones bei UMTS

Smartphone	Umrechnungsfaktor / dB ($10^{-9} \Omega/m^2$)		Standardunsicherheit / dB	
	Frequenzband / MHz			
	900	1800	900	1800
Fairphone 3	156,1	157,1	4,99	4,06
Honor 7X	154,5	159,9	3,85	4,18
Huawei P10	152,7	160,0	4,05	3,51
Motorola Moto G5	156,4	159,4	3,92	3,23
Nokia 8	154,4	162,2	3,93	2,72
OnePlus 6	161,1	163,5	4,49	3,57
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 1	154,8	160,2	3,56	3,27
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 2	154,0	161,7	3,74	2,95
Samsung Galaxy S8	-	-	3,67	2,87
Sony Xperia Z5 Compact	153,0	157,8	4,99	4,06

Tabelle 3-13 Umrechnungsfaktor und Standardunsicherheit der Feldmessungen für alle Smartphones bei GSM (Für das Samsung Galaxy S8 war keine Messung bei GSM möglich.)

Smartphone	Anzahl Messpunkte		Anzahl Messwerte	
	Frequenzband / MHz			
	900	1800	900	1800
Fairphone 3	25	29	634	627
Honor 7X	28	28	686	638
Huawei P10	135	17	4027	575
Motorola Moto G5	147	27	3769	658
Nokia 8	29	26	713	613
OnePlus 6	154	28	3935	715
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 1	144	24	3348	541
Samsung Galaxy S20 Ultra 5G - 2	28	26	789	700
Samsung Galaxy S8	87	25	2077	507
Sony Xperia Z5 Compact	25	29	634	627

Tabelle 3-14 Anzahl der Messpunkte und Anzahl der Messwerte der Feldmessungen für alle Smartphones bei GSM (Für das Samsung Galaxy S8 war keine Messung bei GSM möglich.)

Die auf diese Weise für den Umrechnungsfaktor bestimmte Unsicherheit beinhaltet über alle Messungen hinweg betrachtet in gewisser Weise bereits auch Unsicherheitsbeiträge aufgrund der Feldstärkemessung, die aus der Probennahme und möglichen Schwankungen im Mess-

ergebnis resultieren. Nicht abgebildet ist hingegen ein möglicher absoluter Messfehler der Referenzmessung aufgrund der Kalibrierung des Messgeräts. Aus diesem Grund sollte in einem Gesamtunsicherheitsbudget die Messunsicherheit des Messgeräts zusätzlich berücksichtigt werden. Für Messungen mit der Schwenkmethode kann nach [121] von einer erweiterten Unsicherheit von 3 dB ausgegangen werden.

3.5.4.2 Unsicherheit durch die Richtungsabhängigkeit

Smartphones empfangen Signale aufgrund ihrer Antenneneigenschaften abhängig von der Einfallrichtung unterschiedlich gut. Durch Mehrwegeausbreitung kommt es im freien Feld fast immer dazu, dass das empfangene Signal aus mehreren Richtungen beim Smartphone eintrifft, wodurch verschiedenen Einfallswinkel der Richtcharakteristik des Smartphones auf das Messergebnis einwirken. Die Messungen unter Feldbedingungen wurden für fünf Smartphones an 10 Messpunkten und jeweils acht Ausrichtungen für jede der drei Hauptachsen des Smartphones also 24 Messungen je Messpunkt ausgeführt. Bei jeder einzelnen Ausrichtung wurden nacheinander zehn Messwerte aufgezeichnet, um den Einfluss etwaiger kurzzeitiger Signalpegelschwankungen aufgrund von vorübergehenden Umgebungseinflüssen zu verringern. Aus den in Abschnitt 3.4.2.3 gezeigten Messergebnissen soll nun die zu erwartende Unsicherheit der Feldstärkebestimmung aufgrund der variierend Empfangseigenschaften bei unterschiedlicher Ausrichtung des Smartphones abgeleitet werden. Hierfür werden die Messergebnisse jeder Einzelmessung j von jedem Messpunkt i für jedes Smartphone um ihren Mittelwert $\bar{L}_{P,i}$ zentriert, damit an den Messorten unterschiedliche Signalpegel und verschiedene mittlere Umrechnungsfaktoren der Smartphones in die zu bestimmende Unsicherheit nicht einfließen. Die Berechnung der einzelnen Abweichung $\Delta L_{P,h,i,j}$ der Signalstärke bei der einzelnen Messung von der mittleren Empfangsleistung des Smartphones $\bar{L}_{P,i}$ am jeweiligen Messort erfolgt gemäß Gleichung 3-11.

$$\Delta L_{P,h,i,j} = L_{P,h,i,j} - \bar{L}_{P,h,i} = L_{P,h,i,j} - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n L_{P,h,i,j} \quad 3-11$$

- $\Delta L_{P,h,i,j}$ Abweichung des einzelnen Signalstärkemesswerts von der mittleren von Smartphone h gemessenen Signalstärke an Messpunkt i
- $\bar{L}_{P,h,i}$ Mittlere durch das Smartphone h am Messpunkt i gemessene Signalstärke über alle Ausrichtungen und Einzelmessungen j hinweg
- $L_{P,h,i,j}$ Signalstärkemesswert der Einzelmessung j des Smartphones an Messpunkt i

Das Histogramm in Abbildung 3-60 zeigt die auf diese Weise zentrierten Signalpegelmessungen aller Smartphones von allen Messpunkten über alle gemessenen Orientierungen mit einer Kurve einer angenäherten Normalverteilung. Die Annahme einer Normalverteilung ist aufgrund der guten Übereinstimmung offensichtlich gerechtfertigt. Die Spitzen und Täler ergeben sich aufgrund der Quantisierung auf ganzzahlige Werte und die Tatsache, dass je Ausrichtung je zehn Messwerte aufgenommen wurden, die oftmals alle gleich sind.

Die Standardabweichung der Normalverteilung kann somit als Standardunsicherheit für den Ausrichtungseinfluss dienen. Sie kann durch Gleichung 3-12 berechnet werden und beträgt 2,46 dB. Die Messungen wurden nur bei LTE ausgeführt, sodass dieser für eine erste Näherung auch für die Mobilfunkstandards UMTS und GSM genutzt werden müsste.

$$s(\Delta L_P) = \sqrt{\frac{1}{l \cdot m \cdot n - 1} \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (L_{P,h,i,j} - \bar{L}_{P,h,i})^2} \quad 3-12$$

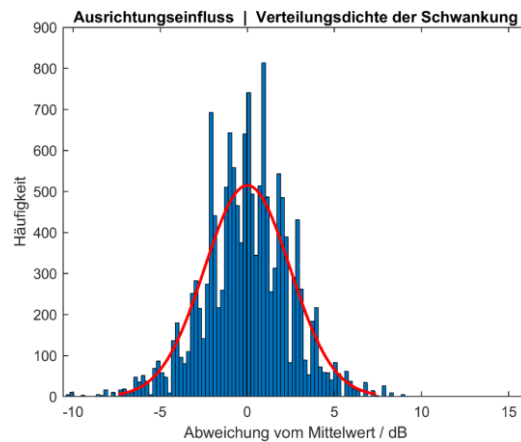


Abbildung 3-60 Verteilungsdichte Schwankung der Signalstärkemesswerte durch Variation der Ausrichtung der Smartphones

3.5.4.3 Unsicherheit durch den Nutzereinfluss

Bei der Handhabung durch seinen Nutzer wird ein Smartphone in verschiedener Weise beeinflusst. Einerseits wird durch das Berühren z.B. mit der Hand die Antenne des Smartphones verstimmt, sodass diese ihre Abstrahlungseigenschaften ändert, andererseits werden durch Hand und Körper der Person die zu empfangenden Signale geschirmt. Die daraus resultierende Dämpfung des gemessenen Signalpegels hängt von der jeweiligen Nutzungssituation und der Lage zur Basisstation ab, wobei zwischen unterschiedlichen Nutzern deutliche Unterschiede auftreten können. Diese Effekte sollen im Folgenden durch einen mittleren Dämpfungsfaktor und einer damit verbundenen Unsicherheit beschrieben werden. Die Werte werden aus den in Kapitel 3.4.2.4 vorgestellten Messdaten ermittelt. Hierbei wurde für fünf Smartphones an zehn Messorten mit einer Person jeweils drei Nutzungssituationen gestellt, wobei die Messung in vier horizontalen Orientierungen der Person im 90°-Winkel zueinander wiederholt wurde. Für jede derart gestellte Situation wurden nacheinander zehn Einzelmesswerte der Signalstärke ausgelesen.

Konkret wird die Änderung des Umrechnungsfaktors betrachtet, das heißt zu jeder Messung unter Nutzereinfluss wird ein Umrechnungsfaktor durch Vergleich mit einer Feldstärkemessung im gleichen Volumen, in dem die jeweilige Nutzungssituation gestellt wurde, bestimmt. Der einzelne Umrechnungsfaktor unter Nutzereinfluss ergibt sich dabei wie in Gleichung 3-13 gezeigt.

$$K_{\text{Nutzer},h,i,j} = L_{E,i} - L_{P,\text{Nutzer},h,i,j} \quad 3-13$$

mit

- $K_{\text{Nutzer},h,i,j}$ Umrechnungsfaktor, der sich unter Nutzereinfluss bei Smartphone h an Messpunkt i bei Einzelmessung j ergibt, in dB ($10^{-9} \Omega/m^2$)
- $L_{P,\text{Nutzer},h,i,j}$ Signalstärkemessung, die von Smartphone h unter Nutzereinfluss an Messpunkt i bei Einzelmessung j aufgezeichnet wurde, in dBm

- $L_{E,i}$ Feldstärke, die an Messort i im Messvolumen der Nutzungssituation gemessen wurde, in dB ($\mu\text{V}/\text{m}$).

Um die mittlere Dämpfung zu erhalten wird dann die Differenz in dB zwischen dem beeinflussten und dem bereits bestimmten mittleren, unbeeinflussten Umrechnungsfaktor gebildet. Dabei gilt, dass der Umrechnungsfaktor größer wird, wenn der Signalstärkemesswert kleiner wird.

Die Berechnung der Dämpfung für jedes Smartphone h bei jeder Einzelmessung j erfolgt gemäß Gleichung 3-14.

$$A_{h,i,j} = K_{\text{Nutzer},h,i,j} - \bar{K}_h \quad 3-14$$

mit

- $A_{h,i,j}$ Dämpfung des gemessenen Signalpegels bzw. Änderung des Umrechnungsfaktors durch den Nutzer bei Smartphone h an Messpunkt i bei Einzelmessung j in dB
- $K_{\text{Nutzer},h,i,j}$ Umrechnungsfaktor, der sich unter Nutzereinfluss bei der Einzelmessung j an Messpunkt i aus Vergleich des vom Smartphone h gemessenen Signalpegels $L_{P,\text{Nutzer},h,i,j}$ und der gemessenen Feldstärke $L_{E,i}$ am Messort ergibt in dB ($10^3/(A \cdot m)$).
- \bar{K}_h Mittlerer Umrechnungsfaktor des Smartphones h wie in Tabelle 3-8 angegeben.

Wie auch bei der Betrachtung des Einflusses der Ausrichtung werden die Abweichungen aller Messungen aller Smartphones gemeinsam betrachtet. Abbildung 3-61 zeigt die sich daraus ergebende Verteilung der Abweichung als Histogramm und die Annäherung einer Normalverteilung.

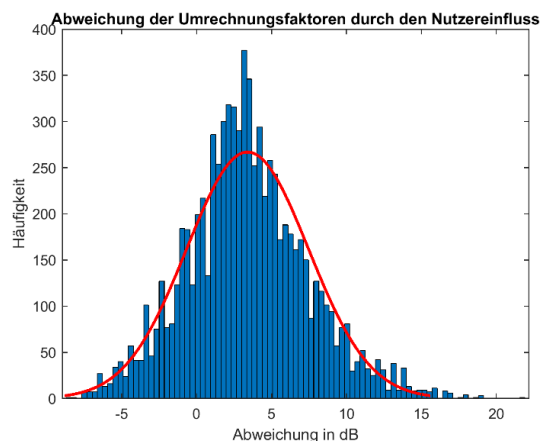


Abbildung 3-61 Verteilung der Abweichung der sich aus den Einzelmessungen unter Nutzereinfluss ergebenden Umrechnungsfaktoren von dem mittleren unbeeinflussten Umrechnungsfaktor des jeweiligen Smartphones

Als mittlerer Dämpfungsfaktor \bar{A} bzw. Faktor um den sich der Umrechnungsfaktor im Mittel vergrößert ergibt sich nach Gleichung 3-15 auf diese Weise 3,4 dB.

$$\bar{A} = \frac{1}{l \cdot m \cdot n} \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n A_{h,i,j} = \frac{1}{l \cdot n \cdot m} \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (K_{\text{Nutzer},h,i,j} - \bar{K}_h) = 3,4 \text{ dB} \quad 3-15$$

Die Standardunsicherheit wird wieder aus der Standardabweichung $s(A)$ der einzelnen Dämpfungsfaktoren $A_{h,i,j}$ vom zuvor bestimmten mittleren Dämpfungsfaktor \bar{A} , wie in Gleichung 3-16 gezeigt, bestimmt.

$$s(A) = \sqrt{\frac{1}{l \cdot m \cdot n - 1} \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (A_{h,i,j} - \bar{A})^2} = 4,07 \text{ dB} \quad 3-16$$

Es folgt eine Standardunsicherheit von 4,07 dB aufgrund des Nutzereinflusses. Diese Standardunsicherheit vereint die Unsicherheit der Bestimmung des Dämpfungsfaktors, die Unsicherheit, die sich durch den Nutzer in verschiedenen Nutzungssituationen ergibt, sowie die Abweichung der Dämpfungsfaktoren der verschiedenen Smartphones.

3.5.5 Abschätzung aus den Labormessungen

3.5.5.1 Variation des Umrechnungsfaktors verschiedener Smartphones

Da es unmöglich ist, sämtliche am Markt erhältliche Smartphones hinsichtlich ihres Umrechnungsfaktors zu untersuchen, kann es sinnvoll sein von einem mittleren Umrechnungsfaktor auszugehen, der für alle Smartphones angewendet werden kann, wobei man bewusst in Kauf nimmt, dass dieser nicht für alle Smartphones gleichermaßen exakt ist. Dies kann durch eine entsprechende Unsicherheit beschrieben werden.

Während in der Messreihe unter Feldbedingungen nur zehn Smartphones untersucht werden konnten und die Messungen auch nur für die Frequenzbänder ausführbar waren, in die die Smartphones zugewiesen wurden, konnten unter Laborbedingungen insgesamt 41 Geräte vermessen werden. Aus diesem Grund werden die Labormessungen nun dafür verwendet, um abzuschätzen über welche Streubreite sich die Umrechnungsfaktoren der Smartphones verteilen und welche Unsicherheit daraus resultiert, wenn ein mittlerer Umrechnungsfaktor angesetzt werden muss, da ein gerätespezifischer Wert nicht vorliegt.

In Abbildung 3-62 sind die in Abschnitt 3.4.1.4 ermittelten Umrechnungsfaktoren als Histogramm dargestellt. Bei LTE lässt sich die Verteilung noch am besten durch eine Normalverteilung annähern. Hierbei spielt aber auch eine Rolle, dass hierbei mehrere verschiedene Frequenzbänder mit variierenden Umrechnungsfaktoren und damit insgesamt mehr Messungen eingehen. Trotz der mäßigen Übereinstimmung wird zur Abschätzung der Unsicherheit dennoch auch bei UMTS und GSM eine Normalverteilung angenommen. Tabelle 3-15 führt die sich damit ergebenden mittleren Umrechnungsfaktoren und die Unsicherheit, die sich bei der pauschalen Nutzung dieser ergeben würde, auf. Weshalb diese Umrechnungsfaktoren deutlich niedriger ausfallen als die in den Feldmessungen bestimmten Faktoren, wird im folgenden Abschnitt erläutert.

$$\bar{K} = \frac{1}{l \cdot m} \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^m K_{h,i} \quad 3-17$$

Mit

- \bar{K} Mittlerer Umrechnungsfaktor aller Smartphones und ggf. über alle gemessenen Frequenzen hinweg

- $K_{h,i}$ Umrechnungsfaktor des einzelnen Smartphones h in Frequenzband i

Die Standardunsicherheit ergibt sich dann wie folgt:

$$u(K) = s(K) = \sqrt{\frac{1}{l \cdot m - 1} \sum_{h=1}^l \sum_{i=1}^m (K_{h,i} - \bar{K})^2} \quad 3-18$$

Die einzelnen Umrechnungsfaktoren wurden zuvor wie folgt aus den Einzelmessungen eines Smartphones bei einer Frequenz bestimmt:

$$K_{h,i} = L_{E,i} - \bar{L}_{P,h,i} = L_{E,i} - 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n 10^{\frac{L_{P,h,i,j}}{10}} \right) \quad 3-19$$

Mit

- $K_{h,i}$ Umrechnungsfaktor des einzelnen Smartphones h in bei Frequenz i
- $L_{E,i}$ Feldstärke, die bei Frequenz i im Messvolumen durch Kalibrierungsmessungen ermittelt wurde, in dB ($\mu\text{V}/\text{m}$).
- $\bar{L}_{P,h,i}$ Mittlerer Signalpegel, der für das Smartphone h bei Frequenz i über alle Einzelmessungen j aller Orientierungen und beider Polarisationen gemessen wurde.
- $L_{P,h,i,j}$ Signalpegel, der durch Smartphone h bei Frequenz i bei Einzelmessung j gemessen wurde.

Die Mittelung des Signalpegels erfolgt in diesem Fall über die Leistungsgröße, da es um die Mittelung der gemessenen Signalleistung geht.

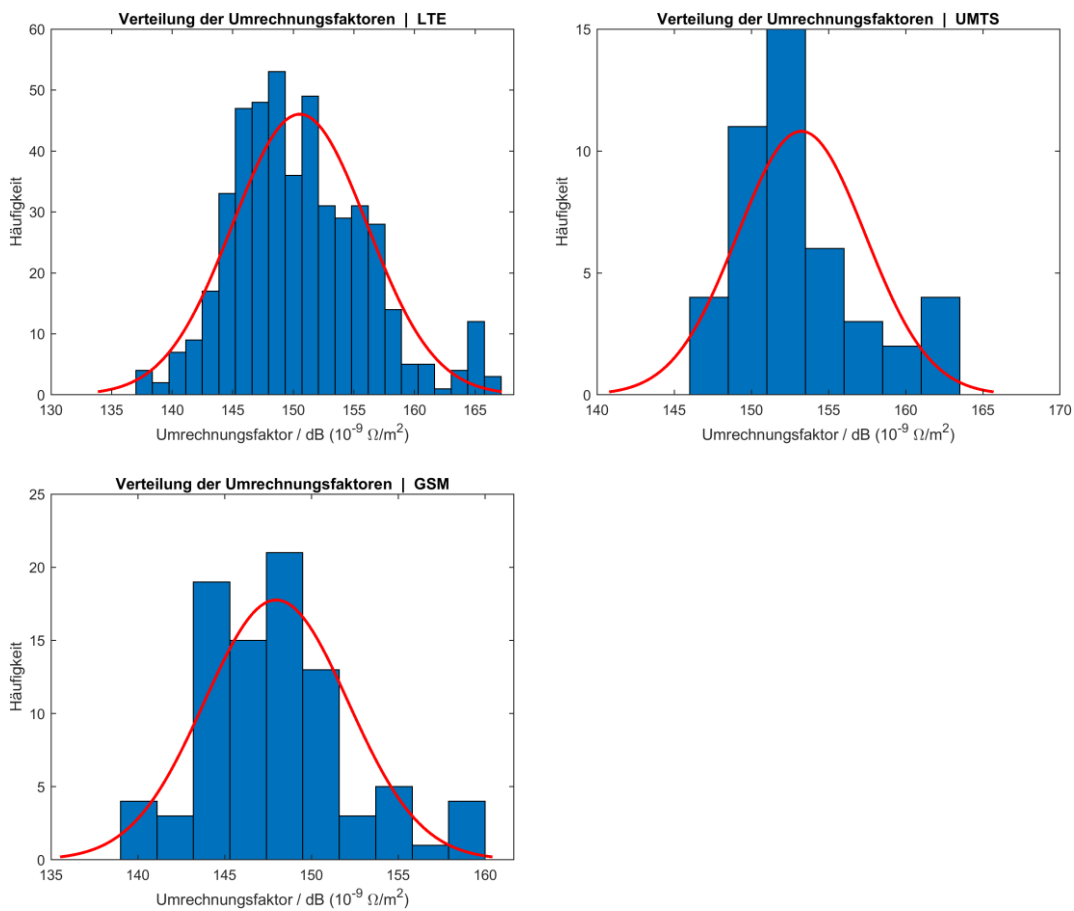


Abbildung 3-62 Schwankung der Umrechnungsfaktoren aller gemessenen Smartphones über alle jeweils vom Mobilfunkdienst genutzten Frequenzbänder

Funkdienst	Mittlerer Umrechnungsfaktor / dB (10 ⁻⁹ Ω/m ²))	Standardunsicherheit / dB
LTE	150,5	5,56
UMTS	153,2	4,15
GSM	148,0	4,15

Tabelle 3-15 Mittlerer Umrechnungsfaktor je Funkdienst für alle gemessenen Smartphones über alle jeweils genutzten Frequenzbänder sowie die zugehörige Standardunsicherheit

Abbildung 3-63 und Abbildung 3-64 sowie Tabelle 3-16 und Tabelle 3-17 zeigen die Verteilung der Umrechnungsfaktoren der Smartphones und die zugehörigen Werte, wenn nach den einzelnen Frequenzbändern unterschieden wird. Dadurch reduziert sich in den meisten Fällen die Standardunsicherheit.

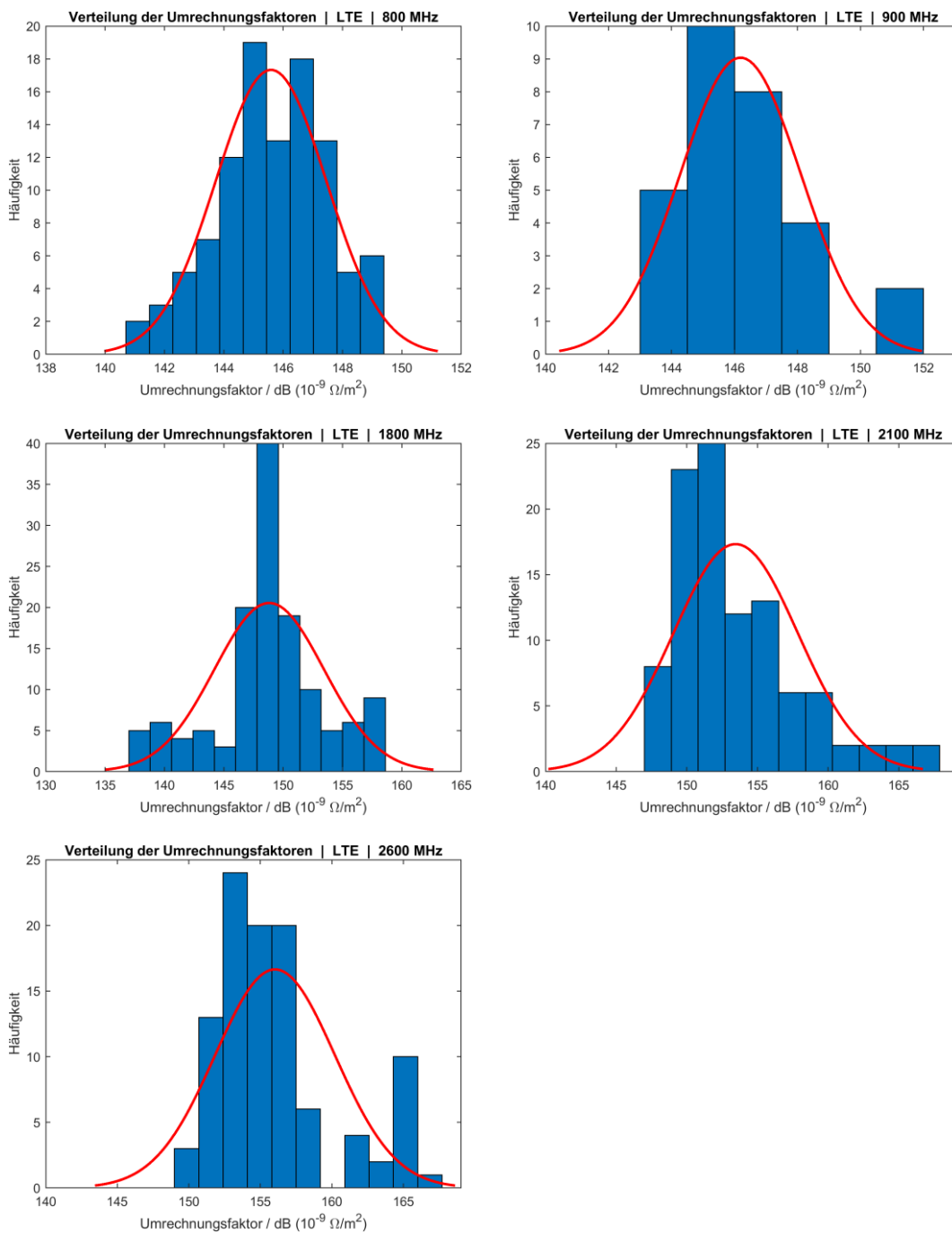


Abbildung 3-63 Schwankung der Umrechnungsfaktoren aller gemessenen Smartphones für LTE unterteilt nach Frequenzband

Frequenzband / MHz	Mittlerer Umrechnungsfaktor / dB (10 ⁻⁹ Ω/m ²)	Standardunsicherheit / dB
800	145,6	1,87
900	146,2	1,92
1800	148,8	4,61
2100	153,4	4,42
2600	156,0	4,19

Tabelle 3-16 Mittlerer Umrechnungsfaktor und Standardunsicherheit für LTE nach einzelnen Frequenzbändern

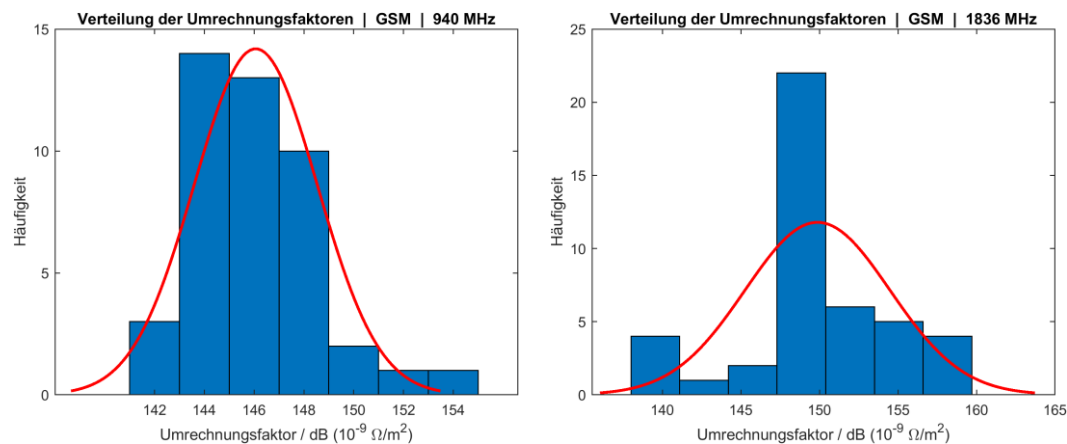


Abbildung 3-64 Schwankung der Umrechnungsfaktoren aller gemessenen Smartphones für LTE unterteilt nach Frequenzband

Frequenzband / MHz	Mittlerer Umrechnungsfaktor / dB (1/(A·m))	Standardunsicherheit / dB
900	146,1	2,47
1800	149,9	4,61

Tabelle 3-17 Mittlerer Umrechnungsfaktor und Standardunsicherheit für GSM nach einzelnen Frequenzbändern

3.5.5.2 Vergleich des Umrechnungsfaktors aus Labor- & Feldmessungen

Im Folgenden werden die Umrechnungsfaktoren aus den Labor- und Feldmessungen miteinander verglichen. Hierfür wird für jedes Smartphone der Feldmessungen bei jedem Frequenzband die Differenz zwischen dem Umrechnungsfaktor der Feldmessreihe und demjenigen aus den Labormessungen in dB gebildet (siehe Gleichung 3-20). Abbildung 3-65 zeigt das Ergebnis über alle Smartphones und Frequenzen für die drei Mobilfunkdienste. Es zeigt sich, dass die mittlere Abweichung für LTE bei etwa 6 dB liegt. Bei UMTS liegt dieser Wert mit etwa 4 dB niedriger und bei GSM mit einem Schwerpunkt bei 8 dB und einigen höheren Werten darüber.

$$\Delta K_{h,i} = K_{\text{Feld},h,i} - K_{\text{Labor},h,i} \quad 3-20$$

wobei

- $\Delta K_{h,i}$ Differenz in dB zwischen dem Umrechnungsfaktor aus den Feld- und Labormessungen bei Smartphone h bei Frequenz i
- $K_{\text{Feld},h,i}$ Durch die Feldmessungen bestimmter Umrechnungsfaktor von Smartphone h bei Frequenz i
- $K_{\text{Labor},h,i}$ Durch die Labormessungen bestimmter Umrechnungsfaktor von Smartphone h bei Frequenz i

Grundsätzlich ist aufgrund der unterschiedlichen Bedingungen unter denen die Messungen von Labor und im freien Feld stattfinden physikalisch ein derartiger Unterschied zu erwarten. Bei den Labormessungen fällt am Ort der Messung das Signal nur aus einer einzigen Richtung ein und entspricht nahezu einer ebenen Welle. Der Vergleich der vom Feldstärkemessgerät

ermittelten Feldstärke und der über alle Ausrichtungen des Smartphones gemittelten Signalstärke führt also zu einem Umrechnungsfaktor, der im Mittel für alle möglichen Orientierungen (gleichverteilt) für eine reflexionsfreie Umgebung ohne Interferenzen gilt. Dieser Zustand liegt im freien Feld jedoch nie vor. Durch verschiedene Effekte (Reflexion, Streuung, Beugung, etc.) entlang des Ausbreitungspfad es kommt es zu Mehrwegeausbreitung, sodass das Signal bzw. die Welle aus mehreren Richtungen am Ort des Empfangs eintreffen. Dementsprechend kommt es zu konstruktiven und Destruktiven Überlagerungen, die innerhalb von geringen Abständen variieren. Kommt es hierbei an einzelnen Punkten zu kohärenter Überlagerung von zwei Wellen mit gleicher Amplitude, so ergibt sich eine Verdopplung der Amplitude der elektrischen Feldstärke. Auch andere Kombinationen mehrerer Wellen eines Signals sind denkbar, die zu Feldstärkeerhöhungen in dieser Größenordnung führen können. Aus diesem Grund wird bei Feldstärkemessungen für eine konservative Bestimmung die Schwenkmethode in einem Raumvolumen genutzt und das Maximum dieser Messung als Ergebnis festgehalten. Dies wurde auch bei den Messungen im freien Feld zur Bestimmung der Smartphone-Umrechnungsfaktoren genutzt. Da bei den Smartphone-Messungen eines HF-Messnetzwerkes jedoch eine sinnvolle Auswertung nur möglich ist, wenn eine Mittelung der Messungen in der näheren Umgebung erfolgt, müssen die Einzelmessungen beim Schwenken des Smartphones mit dem Maximalwert der Feldstärke in Beziehung gesetzt werden. Dadurch entsteht im Mittel die Situation, dass vom Feldstärkemessgerät eine konstruktive Überlagerung der elektrischen Feldstärke, die dem genannten Fall der kohärenten Überlagerung mit einer Verdopplung der Amplitude entspricht oder nahekommt, gemessen wird, während mit dem Smartphone eine mittlere Signalstärke gemessen wird, die im Mittel mit dem Fall ohne Interferenzen korrespondiert. Aufgrund dieses Unterschieds ist die Abweichung zwischen den im Labor und im Feld ermittelten Umrechnungsfaktoren plausibel. Abhängig davon, ob bei einem HF-Messnetzwerk die Maximalwertsuche angewendet oder der Mittelwert angesetzt werden soll, ist je nachdem der Umrechnungsfaktor entsprechend anzupassen. Generell erscheint es jedoch nach derzeitigem Erkenntnisstand so, dass die Bestimmung von Umrechnungsfaktoren unter Feldbedingungen eher geeignet ist, da dabei die typischen Eigenschaften, die auch bei einem HF-Messnetzwerk vorliegen, besser nachgebildet werden. Eine Nachbildung von Mehrwegeausbreitung und Fading ist zwar grundsätzlich auch unter Laborbedingungen möglich, erfordert aber aufwendigere Messaufbauten.

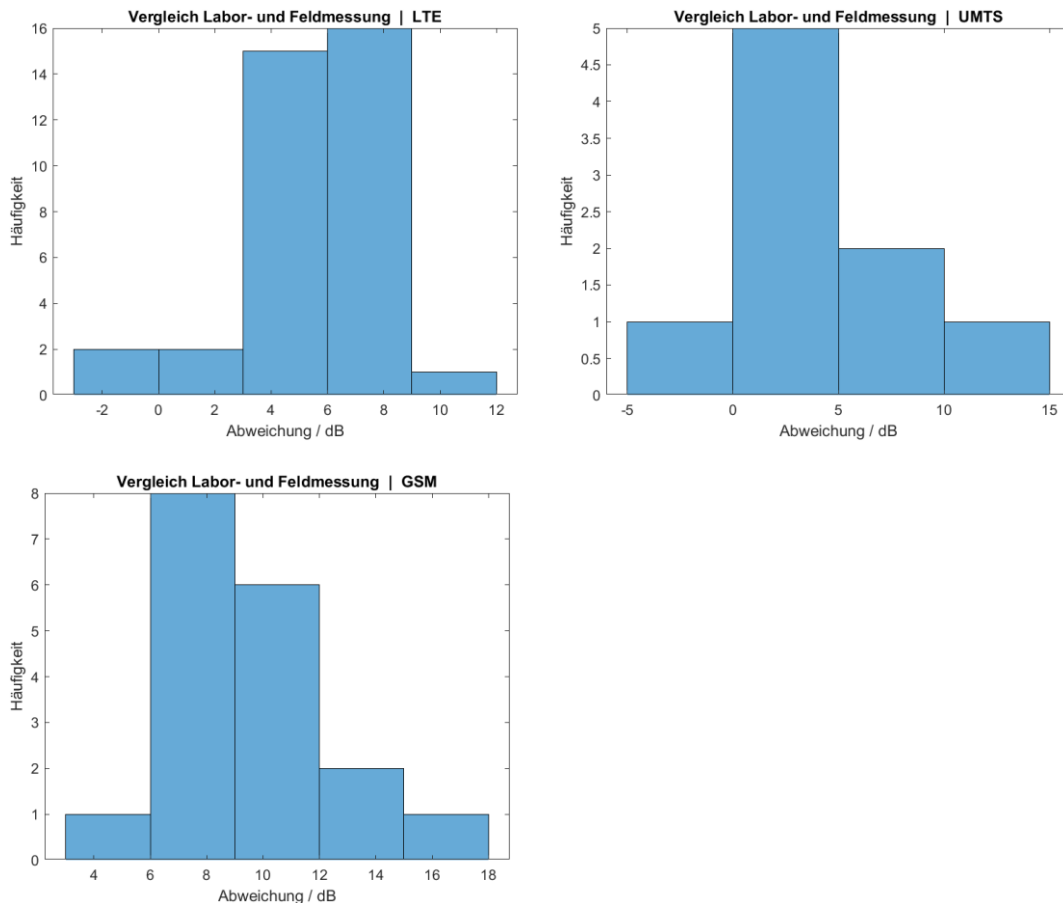


Abbildung 3-65 Abweichung zwischen Umrechnungsfaktoren aus den Feldmessungen und den Labormessungen.

3.5.5.3 Unsicherheit durch den Nutzereinfluss

Der Nutzereinfluss wurde ebenfalls unter Laborbedingungen untersucht. Hierbei konnten auch mehrere Frequenzbänder und insgesamt drei unterschiedliche Nutzer einbezogen werden. Abbildung 3-66 zeigt die Verteilung der Signalstärkemesswerte der Smartphones unter dem Nutzereinfluss über alle Nutzer und Nutzungssituationen hinweg sowohl für alle Frequenzbänder zusammen als auch für jedes Frequenzband einzeln. Die Verteilung ist nicht symmetrisch, sondern tendenziell linksschief, das heißt, dass starke Dämpfungen weniger wahrscheinlich sind als schwache Dämpfungen. Daher ist auch die Annäherung durch eine Normalverteilung nicht optimal. Wird dennoch die Standardabweichung als Standardunsicherheit berechnet ergeben sich die in Tabelle 3-18 gezeigten Werte.

Die Werte fallen deutlich höher als bei den Feldmessungen aus, was wiederum darauf zurückzuführen ist, dass im Labor das Signal aus nur einer Richtung einfällt. Liegen Körperteile des Nutzers zwischen der Sendeantenne und dem Smartphone fällt die Dämpfung sehr hoch aus, während bei Mehrwegeausbreitung das Signal aus mehreren Richtungen die Möglichkeit hat einzutreffen, von denen in der Regel nicht alle gleichermaßen gedämpft sind.

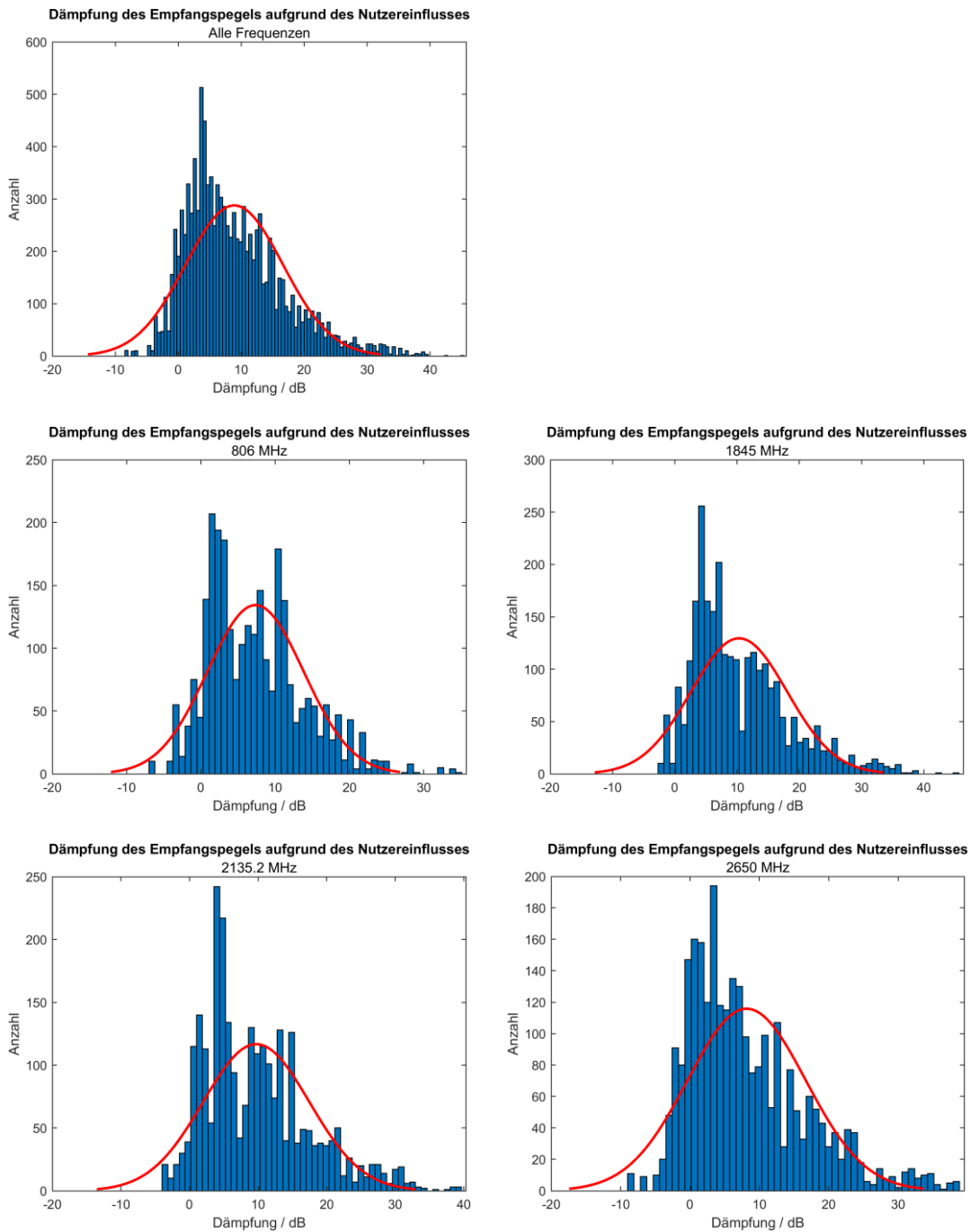


Abbildung 3-66 Verteilung der Dämpfung bei Nutzereinfluss über alle Einzelmessungen aller betrachteten Smartphones

Frequenzband / MHz	Dämpfung / dB	Standardunsicherheit / dB
alle	8,89	7,75
800	7,35	6,49
1800	10,31	7,73
2100	9,72	7,74
2600	8,16	8,53

Tabelle 3-18 Standardunsicherheit bei den Labormessungen durch den Nutzereinfluss in den verschiedenen Frequenzbändern

3.5.6 Unsicherheitsbudget

Im Folgenden wird aus den einzelnen in Abschnitt 3.5.2 genannten Unsicherheitsbeiträgen ein Unsicherheitsbudget aufgestellt und die Gesamtunsicherheit daraus ermittelt. Tabelle 3-19 zeigt das Unsicherheitsbudget für LTE für ein typisches Beispiel. Dabei wurde für die Unsicherheit durch den Empfänger des Smartphones die höhere Spannbreite von ± 8 dB angesetzt, da die Bedingung hierfür sehr häufig erfüllt ist. Außerdem wurde die Unsicherheit durch die Quantisierung auf 1 dB-Schritte für den Fall von LTE übernommen. Für die Unsicherheitsbeiträge durch die Ausrichtung des Smartphones und den Nutzereinfluss werden die zuvor pauschal aus den Feldmessungen bestimmten Standardunsicherheiten angesetzt. Beim Umrechnungsfaktor wird davon ausgegangen, dass für das Smartphone für die einzelnen LTE-Frequenzbänder ein Umrechnungsfaktor nach der Methode der durchgeführten Feldmessungen bestimmt wurde und zur Feldstärkeermittlung eingesetzt werden kann. Ausgehend von den in Tabelle 3-9 aufgeführten Standardunsicherheiten wurde pauschal eine Unsicherheit von 4,8 dB für den Umrechnungsfaktor angenommen, da dieser Wert in den Fällen mit einer Mindestanzahl an Messungen von etwa 10 stets darunter liegt.

Die Sensitivitätskoeffizienten, die den Einfluss der einzelnen Unsicherheitskomponente auf die Unsicherheit der Ergebnisgröße beschreibt, haben für das zugrundeliegende Modell alle den Wert eins. Die Gesamtunsicherheit ergibt sich nach dem Fehlerfortpflanzungsgesetz unter der Annahme unkorrelierter Eingangsgrößen gemäß

$$u(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2(y)}.$$

Die erweiterte Messunsicherheit liegt dann für den Erweiterungsfaktor $k_{0,95} = 2$ bei 16,7 dB.

Das heißt in 95 % der Fälle befindet sich der tatsächliche Wert für die elektrische Feldstärke innerhalb der Spanne von $\pm 16,7$ dB um den aus der einzelnen Smartphone-Messung ermittelten Wert.

Standardunsicherheitskomponente	Quelle der Unsicherheit	Wert der Standardunsicherheit $u(x_i)$ / dB	Sensitivitätskoeffizient c_i	Unsicherheitsbeitrag $u_i(y) = c_i u(x_i)$ / dB
$u(L_P)$	Signalstärkemessung			
	Empfänger des Smartphones	4,62	1	4,62
	Quantisierung auf ganzzahlige dB-Werte	0,29	1	0,29
	Ausrichtung des Smartphones zur BS	2,41	1	2,41
$u(K)$	Umrechnungsfaktor			
	Schwankung der Signalstärke in Bezug auf die Feldstärkemessung	4,80	1	4,80
	Referenzmessung der Feldstärke	1,50	1	1,50
$u(A)$	Nutzereinfluss	4,07	1	4,07
Gesamtunsicherheit / dB				8,33
Erweiterungsfaktor				2
Erweiterte Unsicherheit / dB				16,7

Tabelle 3-19 Unsicherheitsbudget für die Feldstärkeermittlung durch ein Smartphone am Beispiel typischer Werte für LTE

3.6 Zusammenfassung & Fazit

In diesem Kapitel wurden die durchgeführten Messungen zur Untersuchung der Messeigenschaften von Smartphones und der Bestimmung von Umrechnungsfaktoren von Signalstärke in Feldstärkewerte dokumentiert. Wichtige Einflüsse auf die Signalstärkemessung wurden analysiert und die erzielbare Genauigkeit bei der Feldstärkebestimmung aus einer einzelnen Smartphone-Messung abgeschätzt.

Die Beobachtungen bei starken Signalpegelsprüngen haben gezeigt, dass sich die gemessenen Signalstärken innerhalb weniger Sekunden auf die neuen Zielwerte einstellen. Es ergaben sich zwar bei einem Teil der Geräte Unterschiede in der Rate, mit der neue Messwerte aus dem Modem über die Android-API bereitgestellt werden, abhängig davon, ob der Bildschirm des Geräts ein- bzw. ausgeschaltet ist. Allerdings wirkt sich dies nur auf die Zeit bis zum Sichtbarwerden von Signalpegeländerungen aus, jedoch nicht auf die Geschwindigkeit mit der sich

die Signalpegel an neue Bedingungen anpassen. Zum Zeitpunkt der Ausgabe wird daher offensichtlich immer der gerade im Modem ermittelte Wert erhalten. Die Aktualisierungsgeschwindigkeit ist damit auch für den Fall, dass das Endgerät bewegt wird, ausreichend.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass die Messungen der Signalstärken auch durch starke Signale in unmittelbarer Nachbarschaft zum Frequenzkanal nicht beeinflusst werden, solange die Störungen außerhalb der jeweiligen Signalbandbreite des Mobilfunkkanals liegen. Labormessungen zur Überprüfung der Wertebereiche und Limits haben ergeben, dass sämtliche Signalpegel in 1 dB-Schritten über den gesamten im Standard vorgegebenen Wertebereich im Modem erreicht und an die Basisstation gemeldet werden können. Am unteren Ende der Signalstärkeskala reißt jedoch die Verbindung je nach Funkstandard ab, bevor der niedrigste Wert erreicht wurde. Die Erfahrungen bei der Verwendung des Datenzugriffs über Android haben jedoch für UMTS und GSM ergeben, dass die Signalstärken über die API nur in Schritten von 2 dB ausgegeben werden und der Wertebereich bei -51 dBm abgeschnitten wird, obwohl der Wertebereich eigentlich bis -48 dBm (GSM) bzw. -24 dBm (UMTS) reicht. Dies bedeutet, dass bei hohen Feldstärken eine Unterschätzung durch den Verlust der höheren Werte der Signalstärkeskala auftritt, die sich auch nicht ohne weiteres kompensieren lässt.

Bei den Messungen zur Ermittlung von Umrechnungsfaktoren von Signal- in Feldstärkewerte konnte ein linearer Zusammenhang zwischen der gemessenen Signalstärke der Smartphones und den vorliegenden Feldstärken festgestellt werden. Allerdings kam es unter Laborbedingungen dazu, dass in manchen Fällen in den linearen Signalverläufen Sprünge aufgetreten sind, sodass der Verlauf auf einer parallelen Geraden fortgesetzt wurde. Im freien Feld hat sich jedoch keine nennenswerte Beeinträchtigung hierdurch beobachten lassen. Hier streuten die für die für die einzelnen Messorte bestimmten gemittelten Signalstärken in Bezug zur maximal gemessenen elektrischen Feldstärke um eine Gerade, die den jeweiligen Umrechnungsfaktor repräsentiert. Die ermittelten Umrechnungsfaktoren waren in der Tendenz größer in den höheren Frequenzbändern. Über die verschiedenen Smartphones hinweg lagen die Schwankungsbreiten abhängig vom Frequenzband und Funkdienst für die Umrechnungsfaktoren im freien Feld zwischen etwa 5 bis 8 dB und halten sich damit in beherrschbaren Grenzen.

In den Labormessungen offenbarte sich für den Fall eines aus nur einer einzigen Richtung einfallenden Signals eine starke Richtungsabhängigkeit des Signalstärkemesswerts, die sich jedoch bei ähnlichen Untersuchungen unter Feldbedingungen, wo durch Mehrwegeausbreitung das Signal aus mehreren Richtungen gleichzeitig beim Endgerät eintrifft, erheblich schwächer zeigte. Ähnlich, wenn auch nicht im gleichen Ausmaß, fiel die Dämpfung durch den Nutzereinfluss in den Labormessungen größer aus als im freien Feld. Insgesamt konnte eine erweiterte Messunsicherheit für die Bestimmung der elektrischen Feldstärke aus einer einzelnen Smartphone-Signalstärkemessung von 16,7 dB abgeschätzt werden.

Die messtechnischen Untersuchungen haben deutlich gemacht, dass ein ausreichender Zusammenhang zwischen der elektrischen Feldstärke und den Signalstärkemessungen besteht und die wichtigsten messtechnischen Eigenschaften gegeben sind, um mit einer gewissen Unsicherheit Schätzwerte der Feldstärke ableiten zu können.

4 Untersuchung von Smartphone-Crowdsourcingdaten

In diesem Kapitel wird die Auswertung von Signalstärkemessungen, wie sie durch Crowdsourcing mittels Smartphones von einem HF-Messnetzwerk zur Verfügung gestellt werden können, an zwei konkreten Datenpaketen erprobt. Das Ziel ist, zu ergründen, inwieweit derartige Daten eine Abschätzung der Immission durch den Mobilfunk-Downlink ermöglichen können.

Zunächst werden die Eigenschaften der zur Verfügung stehenden Datenbasis vorgestellt. Anschließend wird ein Überblick über die Verarbeitungskette gegeben, die die Daten von den Quelldateien bis zur Immissionsabschätzung durchlaufen, bevor die einzelnen Verarbeitungsschritte mit ihren jeweiligen Ergebnissen vorgestellt werden. Dazu gehört eine umfassende Plausibilitätsprüfung mit einem statistischen Überblick über die Zusammensetzung der Datenpakete. Die Ergebnisse der Immissionsabschätzung werden schließlich mit Feldstärkemessungen innerhalb der Untersuchungsgebiete verglichen, um die Übereinstimmung der Schätzung mit der tatsächlichen Immissionssituation zu überprüfen.

4.1 Ursprung & Eigenschaften der Datenbasis

Für die in diesem Kapitel durchgeführten Untersuchungen kommen Datenpakete der Firma umlaut insight GmbH zum Einsatz. Zur Erfassung der Daten kommt eine von umlaut entwickelte Crowdsourcing-Lösung zum Einsatz, bei der auf den Smartphones gewöhnlicher Mobilfunknutzer im Hintergrund Messdaten zum Mobilfunkempfang aufgezeichnet werden [122]. Dies geschieht über einen Software-Baustein der in über 900 populäre Apps integriert ist. Ist eine dieser Apps installiert, erfolgt die Datenerfassung nach erfolgter Zustimmung des Nutzers ohne weitere Interaktion kontinuierlich im Hintergrund. Dabei wird auf die Positions- und Verbindungsdaten zurückgegriffen. Zu jeder Positionsinformation, die vom Smartphone ermittelt wird, werden die Informationen über die Netzwerkverbindung gespeichert. Die Positionsbestimmung wird durch die Software nicht selbst ausgelöst, sodass nur bei Zugriff auf die Standortdaten durch andere Anwendungen oder das System Messungen ausgelöst werden. Dies bedeutet, dass Messungen gehäuft während der Nutzung von Karten- und Navigations-Apps stattfinden. Dadurch ergibt sich eine Konzentration der Messpunkte auf Straßen und in Bereichen, in denen von derartigen Apps Gebrauch gemacht wird. Bei aktiver Standortnutzung wird in der Regel etwa im Sekundentakt eine neue Standortinformation bestimmt. Auf diese Weise sind die ermittelten Empfangsleistungen abhängig von den für das Smartphone zum Messzeitpunkt vorherrschenden Funkausbreitungsbedingungen. Das heißt, dass die Messung durch die Nutzung des Endnutzers beeinflusst sein kann.

Die gesammelten Daten werden bei Bestehen einer WLAN-Verbindung an einen zentralen Server übertragen. Nach mehreren Tagen ohne WLAN-Verbindung werden die Daten notfalls über Mobilfunk hochgeladen.

Die Daten werden zur Unterstützung von Netztests und für Aussagen über die Mobilfunkversorgung verwendet. Der Umfang der im connect-Netztest 2020 berücksichtigten Daten belief sich beispielsweise für den Zeitraum von Mitte Mai bis Mitte November 2019 deutschlandweit

auf rund 2,8 Milliarden Einzelmesswerte [123]. Diese wurden von 467.000 Nutzern beigetragen.

Neben den in Abschnitt 2.4.2.1 genannten Mindestanforderungen stehen in jedem Datensatz, hiermit sind die Informationen eines einzelnen Auslesevorgangs gemeint, weitere für die Auswertung nützliche Informationen zur Verfügung. Dazu gehört zum einen die vom Endgerät bei der Standortbestimmung ermittelte Standortgenauigkeit, die angibt, wie groß die Abweichung des bestimmten vom tatsächlichen Standort ausfallen kann. Diese Information ist hilfreich, da bei Abweichungen des Standorts auch die Signalstärke nicht exakt einem Ort zugeordnet werden kann und eine zusätzliche Unsicherheit in die Auswertung eingeht. Außerdem ist es auf diese Weise möglich, ab einer gewissen Schwelle unzuverlässige Messwerte auszusortieren und nicht in die weitere Auswertung mit einzubeziehen. Zusätzlich ist in den Datensätzen die Bewegungsgeschwindigkeit des Endgeräts zum Zeitpunkt der Aufzeichnung enthalten, was aus mehreren Gründen nützlich ist. Ist die Signalstärkemessung während einer Fortbewegung entstanden, ist das Ergebnis der Signalstärkemessung gemäß der erfolgenden Mittelung durch die Signalstärke entlang der Bewegungsbahn beeinflusst und stellt nicht zwingend den Signalstärkewert dar, der bei Stillstand an der Position aufgenommen worden wäre. Dies ist bei der Auswertung zu berücksichtigen. Außerdem kann es auch hier erforderlich sein, Messwerte auszusortieren, die bei zu hoher Geschwindigkeit aufgezeichnet wurden.

Sowohl der Umfang der Datenbasis als auch die Menge der zur Verfügung stehenden Informationen übertrifft die der in Abschnitt 2.4.2.2 beschriebenen öffentlich verfügbaren Datenbanken bei weitem, sodass eine Erprobung des Crowdsourcingansatzes auf Grundlage zweier Datenpakete der Firma umlaut vorgenommen wurde.

Das erste Datenpaket umfasst Messungen über den Zeitraum von einem Jahr aus dem Großraum München, das zweite Datenpaket umfasst Messungen über den Zeitraum eines Monats aus dem Stadtgebiet von Aachen. Das Datenpaket aus München deckt das in Abbildung 4-1 gezeigte Gebiet mit einer Fläche von rund 4400 km² ab und enthält insgesamt 211.333.068 Einzeldatensätze, die je einem Auslesevorgang von Informationen eines Smartphones repräsentieren. Der Erhebungszeitraum der Daten reichte vom 01.09.2019 bis zum 31.08.2020. Das zweite Datenpaket aus Aachen beinhaltet 2.010.467 Rohdatensätze und erstreckt sich über das in Abbildung 4-2 dargestellte Gebiet. Die Daten stammen aus dem Juni 2021.

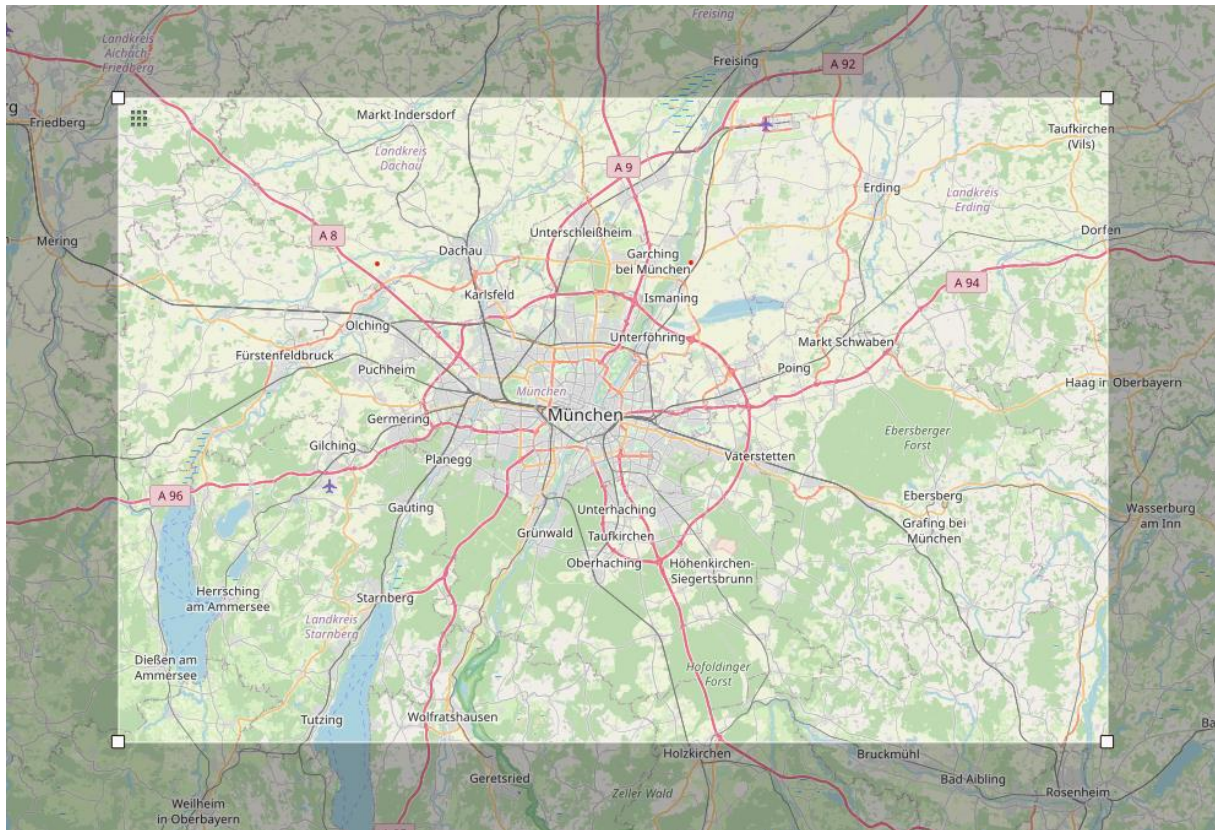


Abbildung 4-1 Untersuchungsgebiet im Großraum München (© OpenStreetMap-Mitwirkende [124])

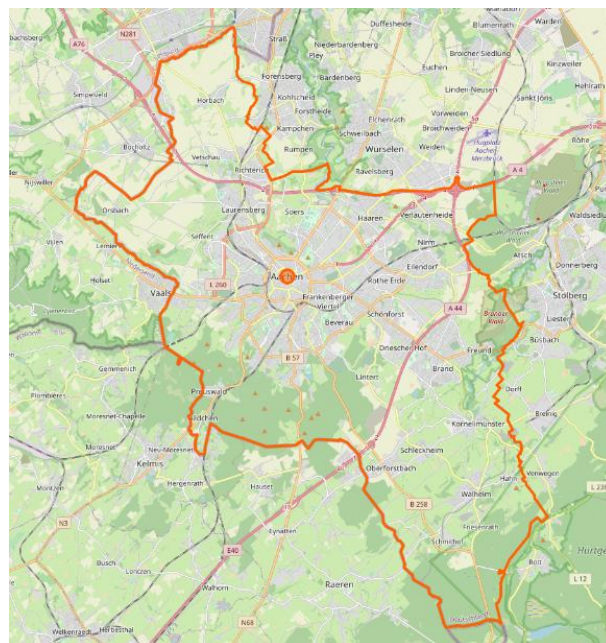


Abbildung 4-2 Untersuchungsgebiet Stadt Aachen zur Validierung (© OpenStreetMap-Mitwirkende [124])

4.2 Überblick über die vollständige Verarbeitungskette

Zur Ableitung von Immissionsabschätzungen aus den zur Verfügung stehenden Smartphone-Messdaten wurde eine vollständige Verarbeitungskette vom Import der Daten bis hin zur Berechnung von Immissionswerten und der Visualisierung der Ergebnisse aufgebaut. Die Umsetzung erfolgte vollständig mit der Software MATLAB. Abbildung 4-3 gibt einen Überblick über die Abfolge der einzelnen Verarbeitungsschritte. Diese bedeuten im Einzelnen:

- 1. Import & Konvertierung der Rohdaten:** Zuallererst werden die Daten in die Software MATLAB importiert und in entsprechende Datentypen konvertiert, um eine effiziente Verarbeitung und Zwischenspeicherung zu gewährleisten.
- 2. Aussortieren unzuverlässiger Messwerte:** Zu den ersten Arbeitsschritten gehört die Bereinigung der Rohdaten. Hierbei werden Datensätze aussortiert, die nicht für eine verlässliche Auswertung genutzt werden können. Dies schließt Datensätze ein, die bezogen auf zwingend notwendige Informationen nicht vollständig sind oder deren Messwerte außerhalb des zulässigen Bereichs liegen und somit untauglich sind. Weiterhin werden Messwerte aussortiert, die aufgrund ihrer Standorteigenschaften zu ungenau sind.
- 3. Segmentierung in einzelne Funkzellen:** Damit nur solche Werte bei der Auswertung miteinander kombiniert werden, die von der gleichen Quelle stammen, ist eine Segmentierung der Daten in zusammengehörige Gruppen vorzunehmen. Dementsprechend ist zwischen den verschiedenen Mobilfunkbetreibern, den einzelnen Funkdiensten, dem Frequenzband bis hin zur einzelnen Funkzelle zu unterscheiden.
- 4. Interpolation der Messdaten:** Die Messdaten der einzelnen Funkzellen liegen verstreut entlang der Pfade, die die Smartphones während der Aufzeichnung zurückgelegt haben. Um den Nutzen aus wiederholten Messungen desselben und verschiedener Smartphones am gleichen Ort ziehen zu können, ist in engen Ortsbereichen eine geeignete Mittelung der Signalstärken vorzunehmen. Gleichzeitig müssen aus den verstreut liegenden Messwerten für eine flächige Auswertung Ergebnisse für ein festes Raster berechnet werden, sodass bei der Zusammenfassung der Werte zugleich eine Interpolation erfolgt.
- 5. Umrechnung der Signalstärke in Feldstärkewerte:** Nachdem aus den einzelnen Smartphone-Messungen interpolierte Signalstärkewerte ermittelt wurden, können diese anhand der mittleren Umrechnungsfaktoren in Feldstärkewerte umgewandelt werden. Dabei können die individuellen Umrechnungsfaktoren der verschiedenen Funkdienste und Frequenzbänder berücksichtigt werden.
- 6. Extrapolation zur Maximalimmission:** Die aus den Smartphone-Signalstärkemessungen abgeleiteten Feldstärkewerte beziehen sich zunächst nur auf den Signalanteil des jeweiligen auslastungsunabhängigen Referenzsignals des Mobilfunkstandards und damit nur auf einen Teil der vorliegenden Immission. Dies spiegelt die Immissionssituation nur unzureichend wider. Deshalb wird eine Extrapolation zur möglichen Maximalimmission bei voller Auslastung der Funkzelle vorgenommen.

- 7. Summation der Immissionsbeiträge der Funkzellen und Funkdienste:** Nachdem die Auswertung je Funkzelle erfolgt ist, müssen abschließend die Werte aller Funkzellen an einem Ort überlagert werden und die Summe gebildet werden, um eine Abschätzung der Gesamtexposition durch den Mobilfunk-Downlink für diesen Ort zu erhalten.

Die Schritte 4 & 5 können auch in vertauschter Reihenfolge ausgeführt werden. Dies bietet sich vor allem dann an, wenn modellspezifische Umrechnungsfaktoren angewendet werden sollen. Wird hingegen nur ein pauschaler Umrechnungsfaktor für alle Gerätetypen eingesetzt, kann die Umwandlung der Signalstärke in Feldstärkewerte sinnvoll nach der Interpolation erfolgen.

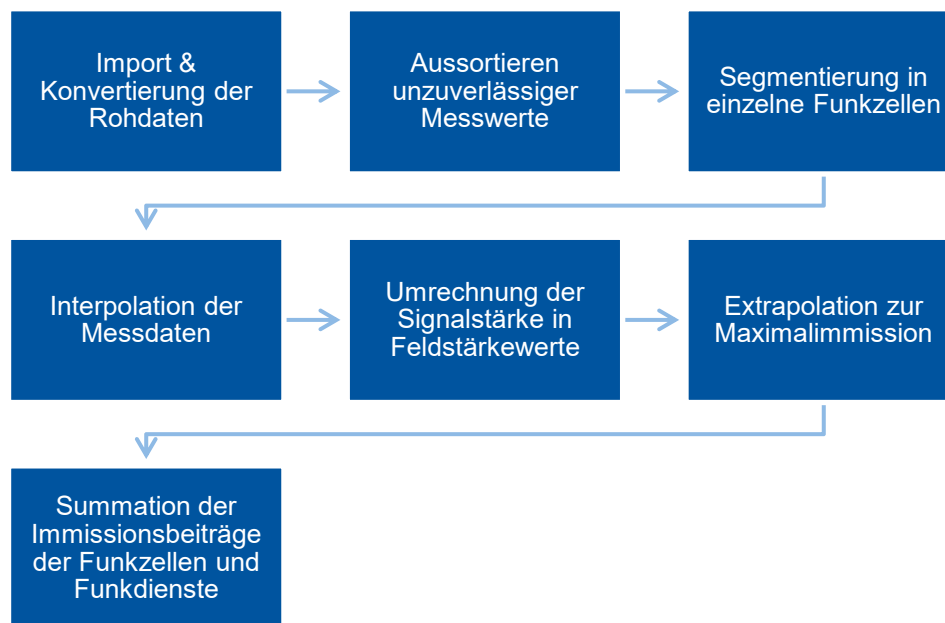


Abbildung 4-3 Übersicht über die Datenverarbeitungsschritte zur Ableitung von Immissionsabschätzungen aus den Smartphone-Crowdsourcingdaten

4.3 Vorbereitung der Daten

In diesem Abschnitt werden die Vorverarbeitungsschritte genauer erläutert.

4.3.1 Import & Konvertierung der Daten

Die Daten von der Firma umlaut wurden im Datenformat „Apache Parquet“ bereitgestellt, ein spaltenorientiertes Speicherformat, das eine sehr effiziente Kompression von Daten erlaubt, wenn innerhalb einer Spalte häufig die gleichen Werte auftreten. Sofern die Daten jedoch zeilenweise verarbeitet werden müssen, so wie bei der weiteren Verarbeitung zur Auswertung, ist das Entpacken der Daten verhältnismäßig aufwendig. Daher wurden die Daten vollständig in MATLAB importiert und anschließend im Datenformat des Programms abgelegt, um die Daten jederzeit schnell zur Verarbeitung und Auswertung laden zu können. Dabei wurden die Informationen jeweils in geeignete MATLAB-Datentypen konvertiert. Da zuvor viele Einträge ineffizient als Datentyp String vorlagen, reduziert sich der Speicherbedarf auf der Festplatte durch Umwandlung in zahlen- bzw. kategorienbasierte Datentypen erheblich (beim Datenpaket zum Großraum München von 28,6 GB auf 6,87 GB) und ermöglicht darüber hinaus eine

wesentlich effizientere Verarbeitung. Im Arbeitsspeicher benötigt das vollständige Datenpaket für den Großraum München ca. 50 GB. Zur Datenverarbeitung wird daher ein Rechner mit insgesamt 384 GB Arbeitsspeicher verwendet.

4.3.2 Aussortieren unvollständiger & unbrauchbarer Datensätze

Damit in der späteren Datenverarbeitung nur Datensätze eingehen, die gewisse Mindeststandards hinsichtlich der Vollständigkeit und Plausibilität der für die Expositionsabschätzung notwendigen Informationen erfüllen, werden alle Datensätze hierauf geprüft und ggf. aussortiert. Hierfür kommt ein mehrstufiges Verfahren zum Einsatz, wobei sich die Stufen wie folgt grob umschreiben lassen:

- **Stufe 1:** Aussortieren von Messungen, die bereits bei der Erfassung als unzuverlässig markiert wurden.
- **Stufe 2:** Aussortieren von Messungen, die aufgrund einer oder mehrerer Informationen des Eintrags als unplausibel anzusehen sind.
- **Stufe 3:** Aussortieren von Einträgen, bei denen aufeinanderfolgende Messungen veraltete Informationen enthalten.
- **Stufe 4:** Aussortieren von Daten, die nicht gewissen Qualitätskriterien hinsichtlich der Aktualität und Genauigkeit bestimmter Teilinformationen genügen.

Im ersten Schritt werden die Datensätze aussortiert, die bereits durch die Firma umlaut als unzuverlässig gekennzeichnet wurden. Zu den Kriterien gehört, dass die benötigten Berechtigungen vorliegen, dass der Verbindungstyp Mobilfunk und nicht WLAN ist, dass der Flugmodus nicht aktiviert ist, sowie dass die Daten nicht unter Roaming-Bedingungen aufgenommen wurden. Außerdem wird überprüft, ob ein Smartphone-Modell tatsächlich den Wertebereich der Signalstärke korrekt abdeckt, da es vor allem bei älteren Modellen vorkommt, dass statt aller Werte nur einige wenige Werte angenommen werden können. Aufgrund dieser Kriterien reduziert sich die Anzahl der Datensätze bereits erheblich – beim Münchener Datenpaket um etwa ein Drittel, beim Aachener Datenpaket sogar um mehr als die Hälfte.

Im zweiten Schritt werden Datensätze aussortiert, die aufgrund einer oder mehrerer ihrer Informationen nicht plausibel sind. Folgende Kriterien werden in diesem ersten Schritt zum Aussortieren angewendet:

- **Flugmodus aktiviert:** Datensätze, bei denen gemeldet wird, dass der Flugmodus aktiviert ist, werden ausgesondert, da entweder keine oder keine aktuelle Modeminformation in diesem Fall zu erwarten ist.
- **Service-Status ist nicht „kein Dienst“ oder „ausgeschaltet“:** Datensätze, bei denen keine Verbindung zum Mobilfunknetz besteht oder bei denen die Verbindung abgeschaltet ist, werden nicht weiter betrachtet.
- **Ländercode gehört nicht zu Deutschland:** Entspricht der Ländercode des verbundenen Mobilfunknetzes nicht dem deutschen, so ist der Datensatz nicht plausibel.

- **Netzwerkcode gehört keinem deutschen Netzbetreiber:** Entspricht der Netzwerkcode nicht demjenigen eines der drei deutschen Netzbetreiber ist der Datensatz nicht plausibel.
- **Netzwerkgeneration entspricht nicht 2G-5G:** Wenn die Netzwerkgeneration nicht bekannt ist, ist eine korrekte Bewertung der Immission aus der Signalstärke nicht möglich, sodass derartige Datensätze aussortiert werden.
- **Ungültige Empfangspegel:** Liegen die Empfangspegel außerhalb der gültigen Wertebereiche, werden die entsprechenden Datensätze ausgesondert.
- **Fehlende/Ungültige Cell-ID:** Die Messdaten lassen sich bei der Auswertung nur dann korrekt miteinander verrechnen, wenn sie der gleichen Immissionsquelle zugeordnet werden können. Daher werden Datensätze mit fehlender oder ungültiger Cell-ID (z.B. 0, -1, unendlich) aussortiert.
- **Zu wenige Messwerte in einer Zelle:** Wenn zu wenige Messwerte für eine Funkzelle vorliegen, ist damit eine sinnvolle Auswertung nicht möglich. Daher werden in diesem zweiten Schritt Datensätze aus Funkzellen, für die nicht mindestens zehn Messwerte vorliegen aussortiert, um unnötigen Ballast bei der weiteren Datenverarbeitung zu vermeiden.

In Stufe 3 des Aussortierens werden solche Werte entfernt, bei denen ein veralteter bereits beim vorhergehenden Auslesevorgang erhaltener Modemmesswert aufgezeichnet wurde. Veraltete Modeminformationen können dadurch zustande kommen, dass wie in Abschnitt 3.3.2 festgestellt, immer nur alle 2,1 s bei eingeschaltetem Display bzw. ca. alle 10 s bei ausgeschaltetem Display ein neuer Modemmesswert über die Android-API verfügbar ist. Bei aktiver GPS-Nutzung geschieht jedoch in der Regel näherungsweise im Sekundentakt ein GPS-Fix, was bei den vorliegenden Daten als Auslöser für die Aufzeichnung genutzt wird. Diese Form von veralteter Information kann anhand ihres Zeitstempels der letzten Aktualisierung identifiziert werden. Im vorliegenden Datensatz wird aus den Zeitstempeln im Verhältnis zum Systemzeitstempel bereits ein Alter der Information ermittelt.

Um betroffene Datensätze aussortieren zu können, wird eine datensatzübergreifende Betrachtung vorgenommen. Die Datensätze werden zunächst nach Gerätemodell, Name des SIM-Betreibers sowie dem Zeitstempel geordnet. Auf diese Weise liegen idealerweise die Messwerte eines einzelnen Endgeräts in zeitlicher Reihenfolge hintereinander. Da keine andere Identifizierungs- bzw. Unterscheidungsmöglichkeit in den Daten gegeben ist, muss dieser Weg gewählt werden. Sind die Werte derart sortiert, werden die aufeinanderliegenden Signalstärkemesswerte miteinander verglichen. Sind diese identisch, wird das Alter des Modemmesswerts betrachtet. Steigt das Alter bei aufeinander identischen Messwerten an, ist diese Information veraltet und wurde mehrfach aufgezeichnet. Sie wird aussortiert, da ansonsten dem Standort ein Messwert zugeordnet würde, der für diesen womöglich keine Gültigkeit hat. Durch diesen Aussonderungsschritt entfallen etwa zwei Drittel der noch für München verbliebenen Messwerte und sogar über 80 % der Werte aus dem Aachener Datenpaket.

In der letzten Stufe des Aussortierens werden Messwerte entfernt, die nicht gewissen Qualitätskriterien genügen. Folgende Kriterien werden angewendet:

- **Standortgenauigkeit schlechter als 20 m:** Ist die vom Smartphone geschätzte Genauigkeit des Standorts nicht 20 m oder besser, wird der Datensatz verworfen, da ansonsten die Gefahr besteht, dass der Signalstärkemesswert einem Ort zu weit entfernt vom tatsächlichen Aufzeichnungsort zugeordnet wird.
- **Alter der Standortinformation größer als 10 s:** Ist das Alter der Standortinformation zu hoch, besteht die Möglichkeit, dass das Smartphone in der Zwischenzeit weiterbewegt wurde und die Standortzuordnung für den Messwert keine Gültigkeit mehr hat. Deshalb werden Messwerte aussortiert, deren Standort älter als 10 s ist.
- **Alter der Modeminformation größer als 10 s:** Ist das Alter der Modeminformation zum Zeitpunkt der Erfassung des Datensatzes zu hoch, kann es sein, dass das Smartphone weiterbewegt wurde und die Messung von einem anderen als dem zugeordneten Standort stammt. Daher werden Messwerte mit älterer Modeminformation als 10 s entfernt.
- **Produkt aus Fortbewegungsgeschwindigkeit und Alter der Modeminformation liegt über 20 m:** Bei Fortbewegung des Smartphones kann es dazu kommen, dass der ermittelte Standort nicht mit dem Standort der Aufzeichnung der Modeminformation übereinstimmt, wenn diese beim Auslesen bereits ein gewisses Alter hat. Daher wird das Produkt aus der Fortbewegungsgeschwindigkeit und dem Alter der Modeminformation berechnet. Daraus ergibt sich die Entfernung, die zwischen dem Ort der Modemmessung und dem aktuell per GPS bestimmten Standort liegt. Überschreitet diese 20 m wird die Modeminformation wegen einer zu großen Abweichung aussortiert.

Durch diese Qualitätskriterien entfallen noch einmal etwa 10 % der für München verbliebenen Messwerte, sodass nach Durchlaufen aller Stufen von anfänglich etwa 211 Millionen Messwerten noch etwas mehr als 39 Millionen Messwerte übriggeblieben sind. Für Aachen fallen an dieser Stelle etwa 14 % der Messwerte weg, sodass von anfänglich knapp über 2 Millionen Datensätzen nur etwa 124.000 übriggeblieben sind.

Die Tabellen 4-1 und 4-2 zeigen für beide Datenpakete die Anzahl von Messwerten, die die jeweiligen Anforderungen nicht erfüllen sowie die Gesamtanzahl der aussortierten Messwerte für alle Aussortierungsschritte und Stufen des Aussortierens. Es ist zu beachten, dass bei den Stufen 2 & 4 mehrere Kriterien zum Aussortieren gleichzeitig erfüllt sein können, sodass die Gesamtanzahl der aussortierten Werte nicht der Summe der aufgrund der einzelnen Kriterien auszusortierenden Werten entspricht.

Es fällt auf, dass die Ausschussquote in Datenpaket zum Stadtgebiet Aachen deutlich höher ist als bei dem Münchener Datenpaket. Dort waren am Ende knapp 20% der Daten verblieben, während für Aachen nur knapp über 6% übrig sind. Zunächst war hier ein wesentlich größerer Teil der Messungen als unzuverlässig markiert, aber auch durch wiederholte Aufzeichnungen des gleichen Modemmesswerts mussten zahlreiche Einträge entfernt werden.

Bedingung	Anzahl
Alle Datensätze vor Aussortieren	211.333.068
Als unzuverlässig markierte Datensätze	71.764.315
Verbleibende Datensätze nach Stufe 1 des Aussortierens	139.568.753
Flugmodus aktiv	0
Service-Status „kein Dienst“/„ausgeschaltet“	524.404
Ländercode nicht Deutschland	341.083
Netzwerkcode kein deutscher Netzbetreiber	339.028
Ungültige Netzwerkgeneration	1.387.851
Ungültiger Signalpegel bei GSM	278.600
Ungültiger Signalpegel bei UMTS	1.545.826
Ungültiger Signalpegel bei LTE	3.071.238
Fehlende/Ungültige Cell-ID	1.519.021
Weniger als 10 Messwerte in Funkzelle	40.672
Gesamtanzahl in Stufe 2 aussortiert	6.914.558
Verbleibende Datensätze nach Stufe 2 des Aussortierens	132.654.195
Wiederholte Aufzeichnung der gleichen Modeminformation	88.956.778
Verbleibende Datensätze nach Stufe 3 des Aussortierens	43.697.417
Genauigkeit des Standorts schlechter als 20 m	1.836.256
Alter der Standortinformation größer als 10 s	471
Alter des Signalstärkemesswerts größer als 10 s	391.580
Produkt aus Fortbewegungsgeschwindigkeit und Alter des Signalstärkemesswerts größer als 20 m	2.383.970
Gesamtanzahl in Stufe 4 aussortiert	4.231.448
Verbleibende Datensätze nach Stufe 4 des Aussortierens	39.465.969

Tabelle 4-1 Anzahl der Datensätze vor und nach den jeweiligen Stufen des Aussortierens sowie die Anzahl der aufgrund bestimmter Bedingungen aussortierter Werte für den Datensatz aus dem Großraum München

Bedingung	Anzahl
Alle Datensätze vor Aussortieren	2.010.467
Als unzuverlässig markierte Datensätze	1.117.647
Verbleibende Datensätze nach Stufe 1 des Aussortierens	892.820
Flugmodus aktiv	0
Service-Status „kein Dienst“/„ausgeschaltet“	554
Ländercode nicht Deutschland	20.957
Netzwerkcode kein deutscher Netzbetreiber	18.985
Ungültige Netzwerkgeneration	3.130
Ungültiger Signalpegel bei GSM	1.956
Ungültiger Signalpegel bei UMTS	2.029
Ungültiger Signalpegel bei LTE	71.173
Fehlende/Ungültige Cell-ID	1.527
Weniger als 10 Messwerte in Funkzelle	1.667
Gesamtanzahl in Stufe 2 aussortiert	100.006
Verbleibende Datensätze nach Stufe 2 des Aussortierens	792.814
Wiederholte Aufzeichnung der gleichen Modeminformation	646.664
Verbleibende Datensätze nach Stufe 3 des Aussortierens	146.150
Genauigkeit des Standorts schlechter als 20 m	11.389
Alter der Standortinformation größer als 10 s	2
Alter des Signalstärkemesswerts größer als 10 s	6.792
Produkt aus Fortbewegungsgeschwindigkeit und Alter des Signalstärkemesswerts größer als 20 m	7.740
Gesamtanzahl in Stufe 4 aussortiert	20.686
Verbleibende Datensätze nach Stufe 4 des Aussortierens	124.108

Tabelle 4-2 Anzahl der Datensätze vor und nach den jeweiligen Stufen des Aussortierens sowie die Anzahl der aufgrund bestimmter Bedingungen aussortierter Werte für den Datensatz aus dem Stadtgebiet Aachen

4.3.3 Frequenzzuordnung

Bei Betrachtung der Verteilung der Messungen auf die Frequenzbänder fiel auf, dass der überwiegende Anteil an Messungen über keine Information zum jeweiligen Frequenzband verfügt. Das heißt die Kanalnummer, aus der sich die jeweilige Frequenz des genutzten Kanals bestimmen lässt, war in den meisten Datensätzen nicht vorhanden. Im Münchener Datenpaket verfügten für LTE nur etwa 10% über eine Kanalnummer, im Aachener Datenpaket etwa 17%. Da bei LTE verschiedene Frequenzbänder zum Einsatz kommen, die sich auch hinsichtlich der anzusetzenden Grenzwerte unterscheiden, ist diese Information zur korrekten Immissions-

bewertung erforderlich. Außerdem werden auf den einzelnen Kanalfrequenzen unterschiedliche Kanalbandbreiten eingesetzt, die ebenfalls für die Abschätzung der Exposition erforderlich sind. Wenn die Kanalfrequenz bekannt ist, kann anhand dieser eine Zuordnung vorgenommen werden, da in der Regel auf einer Kanalfrequenz in einem Netz meist die gleichen Bandbreiten genutzt werden,.

Warum diese Information derart häufig nicht vorliegt, ist nicht ganz klar, da eigentlich bereits ab API-Level 24 (Android-Version 7.0.0) ein Zugriff darauf möglich ist und der Anteil von Messdatensätzen von Smartphones mit niedrigerer Version bei unter 5% liegt. Es besteht die Möglichkeit, dass herstellerseitig die Kanalnummer nicht immer über die API ausgegeben wird, allerdings entspricht dies nicht den Erfahrungen aus der Nutzung der für die Zwecke des Projekts entwickelten App „CellViewer“, bei der bislang bei allen getesteten Geräten die Kanalnummer (ARFCN) zuverlässig erhalten wurde. Da die Zuordnung zu Frequenzkanälen einerseits wichtig ist, um den passenden Grenzwert anzusetzen, und andererseits, um beurteilen zu können, wie gut die verschiedenen Frequenzbänder im Datenbestand repräsentiert sind, wurde eine Möglichkeit zur Zuordnung der Kanalfrequenzen entwickelt, wodurch der Anteil von Messdatensätze ohne Frequenzzuordnung für das Münchener Datenpaket auf unter 1 % und für das Aachener Datenpaket auf etwa 12 % gesenkt werden konnte.

Hierfür wurden zwei unterschiedliche Ansätze verfolgt: Der erste Ansatz beruht darauf, dass bei Telefónica und Vodafone eine feste Zuordnung zwischen der Sektor-ID der LTE-Funkzellen und der Kanalfrequenz besteht. Dieses Schema kann zur verlässlichen Zuordnung der Frequenzen bei Datensätzen genutzt werden, für die keine ARFCN vorliegt.

Bei der Telekom liegt eine vergleichbare Systematik nicht vor. Die Sektor-IDs werden hier offensichtlich am jeweiligen Mast stets beginnend bei null hochgezählt, wobei die Nummerierung fortlaufend ist, sodass die Zuordnung von Sektor-ID und Kanalnummer abhängig von der Bestückung des Mastes ist. Daher wurde bei fehlender Kanalnummer eines Datensatzes, diejenige Kanalnummer zugeordnet, die in der jeweiligen Funkzelle am häufigsten vorgekommen ist. Datensätze, die eine widersprüchliche Kanalnummer in ihrer Funkzelle aufweisen, wurden aussortiert. Gründe für mehrdeutige ARFCNs können sein, dass sich die ARFCN im Laufe des Erfassungszeitraums vorübergehend oder dauerhaft geändert hat, oder dass die Information der Kanalnummer im Android-Betriebssystem nicht korrekt ausgegeben wurde.

Ach bei den beiden anderen betrachteten Funkdiensten UMTS und GSM fehlen die Kanalnummern bei einem Großteil der Datensätze. Da bei UMTS jedoch nur ein einziges Frequenzband und nur eine feste Bandbreite genutzt wird und somit eine Unterscheidung zur korrekten Bestimmung der Grenzwertausschöpfung nicht erforderlich ist, spielt es keine Rolle, ob eine Kanalnummer vorhanden ist. Eine Zuordnung von Frequenzen wurde daher nicht vorgenommen. Darüber hinaus ist ein Immissionsmonitoring für UMTS aufgrund der Tatsache, dass die Netzbetreiber UMTS inzwischen bereits vollständig abgeschaltet haben, perspektivisch ohnehin nicht von Relevanz.

Bei GSM nutzte im Zeitraum der Datenerhebung nur noch Telefónica zwei unterschiedliche Frequenzbänder, bei denen sich auch der Grenzwert unterscheidet. Daher wurde nur für dieses Netz eine Zuordnung der Frequenzen angestrebt. Dies musste wie auch bei den LTE-Messungen im Telekom-Netz über die Messungen mit Kanalnummer in der gleichen Funkzelle

erfolgen. In diesem Fall war jedoch nur eine Erhöhung der Anzahl von Datensätzen mit Kanalnummer von knapp 5 % auf 50 % möglich. Beim Aachener Datenpaket ist dies jedoch aufgrund der zu geringen Datenbasis für einen Großteil der Messungen nicht gelungen.

4.4 Statistischer Überblick

Nachdem die Daten wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert vorbereitet und von ungültigen oder unzuverlässigen Datensätzen bereinigt wurden, wurde ein statistischer Überblick erstellt, der die Zusammensetzung der Datenpakete hinsichtlich verschiedener Aspekte verdeutlicht. Dies dient auch dazu die Aussagekraft der Datenpakete hinsichtlich der umfassenden Erfassung der Immission zu ergründen.

4.4.1 Verteilung der Messungen auf Netzbetreiber auf Netzbetreiber, Funkdienste & Frequenzbänder

Die Verteilung der Messungen auf die Netzbetreiber, Funkdienste und Frequenzbänder ist ein wichtiger Aspekt, wenn es darum geht die Immission abzuschätzen, da diese alle ausreichend vertreten sein müssen, um überhaupt eine Abschätzung vornehmen zu können.

In den Abbildungen 4-4 und 4-5 zeigen Tortendiagramme für die beiden Datenpakete die Verteilung der Messdatensätze auf die Mobilfunkdienste und Netzbetreiber. Es fällt auf, dass die Messungen ungleichmäßig auf die drei Mobilfunknetze in Deutschland verteilt sind. Datensätze aus dem Netz von Telefónica machen jeweils über die Hälfte der Messwerte aus. Vodafone und Telekom folgen mit deutlichem Abstand. Diese Verteilung entspricht nicht den jeweiligen Marktanteilen in Deutschland, der für die Telekom im Jahr 2020 bei 32,2%, für Vodafone bei 38,1% und für Telefónica bei 29,5% liegt [125]. Möglicherweise weicht der Anteil speziell in den betrachteten Regionen ab, allerdings ist es auch möglich, dass die Verbreitung des Software-Bausteins für die Datenerfassung bei Telefónica-Kunden größer ist. Wenn der Anteil von Geschäftskundenanschlüssen bei Telekom und Vodafone größer ist, ergibt sich dies womöglich daraus, dass auf geschäftlichen Endgeräten derartige Apps nicht installiert werden.

Die ungleiche Verteilung kann dazu führen, dass die Abdeckung der Fläche für die drei Netze unterschiedlich gut ausfällt und auch die Anzahl der Wiederholungsmessungen an den einzelnen Orten geringer ist. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass eine größere Anzahl an Messungen eine bessere Abschätzung ermöglicht als eine geringere Anzahl.

Noch größer fällt die Ungleichverteilung auf die drei Mobilfunkstandards der zweiten bis vierten Generation (GSM, UMTS, LTE) aus. LTE macht über alle drei Netzbetreiber hinweg in beiden Datenpaketen mehr als 80 % der Datensätze aus. UMTS folgt mit nur 13,6 % bzw. 11,2 % der Messwerte. GSM ist schließlich in den Daten aus dem Großraum München nur noch mit 2,3 % und bei denen aus dem Stadtgebiet Aachen nur noch mit 6,0 % der Einträge vertreten. Bei der Aufschlüsselung der Verteilung auf die Funkdienste für die einzelnen Netzbetreiber zeigt sich, dass deutliche Unterschiede vorhanden sind. Zwar liegen für alle Netzbetreiber am meisten Messwerte für LTE vor, jedoch fällt der Anteil bei Vodafone mit knapp unter 70 % in München geringer aus. Dafür ist der Anteil von UMTS-Messungen etwa doppelt so hoch wie im Durchschnitt. Bei Telefónica ist mit unter 7 % der Anteil von UMTS wiederum nur halb so groß wie

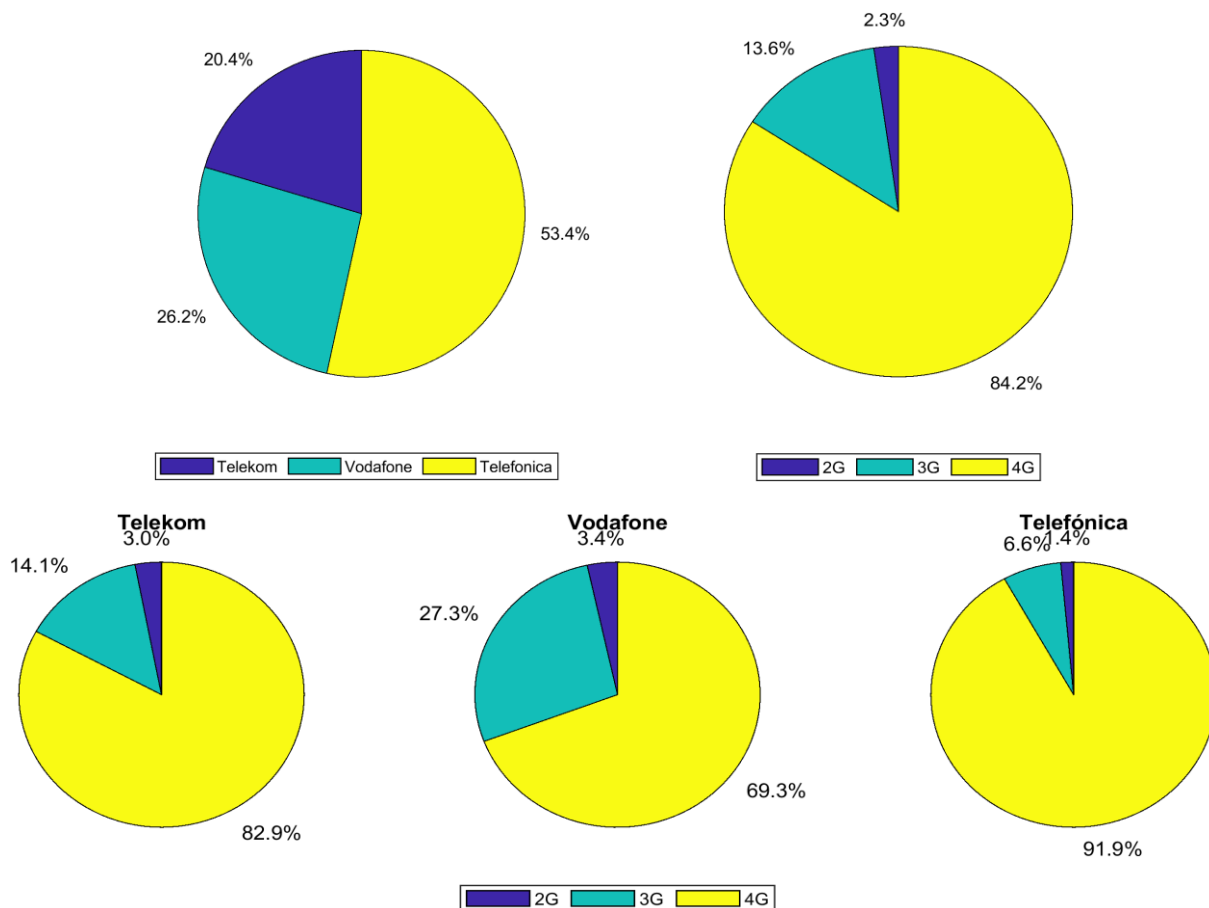


Abbildung 4-4 Tortendiagramme der Verteilung der Crowdsourcing-Messdaten aus dem Großraum München auf die Netzbetreiber und Funkdienste

im Schnitt über alle Netzbetreiber, während LTE hier sogar fast 92 % aller Datensätze ausmacht. Im Datenpaket aus dem Stadtgebiet Aachen variiert die Verteilung noch deutlich stärker zwischen den drei Netzen. Dies kann aufgrund des kürzeren Erhebungszeitraums und des wesentlich geringeren Umfangs von Datensätzen resultieren, da die womöglich auch vorübergehende Aktivität einzelner Geräte großen Einfluss auf die Zusammensetzung nehmen kann. Besonders hervorzuheben ist, dass im Telekom-Netz überhaupt keine Messungen für den Funkstandard GSM aufgezeichnet wurden.

Die sehr unterschiedlichen Anteile der verschiedenen Funkstandards dürfte daraus resultieren, dass heutige Smartphones in der Regel den LTE-Standard nutzen, wann immer dieser verfügbar ist. Auf die niedrigeren Mobilfunkgenerationen wird nur dann zurückgegriffen, wenn LTE nicht verfügbar ist. Dies kann zum Beispiel auch unter ungünstigen Empfangsbedingungen innerhalb von Gebäuden oder Tunneln der Fall sein. Da das GSM-Netz dennoch nach wie vor flächendeckend vorhanden ist und UMTS bis zu seiner Abschaltung zumindest in Ballungsgebieten weit verbreitet war, ist die Untererfassung dieser Mobilfunknetze ein erhebliches Problem bei der Immissionsermittlung.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass diese Analyse keinerlei Wertung der Versorgungsqualität der drei Netzbetreiber darstellt. Die Tatsache, dass durch das verwendete Crowdsourcingnetzwerk bestimmte Netzbetreiber und Funkdienste größeres Gewicht innerhalb der Datenpakete aufweisen, lässt keinen Schluss auf tatsächliche Flächendeckung und Verfügbarkeit

der Dienste zu, sondern ist vielmehr auf die Zusammensetzung der beitragenden Nutzerbasis zurückzuführen.

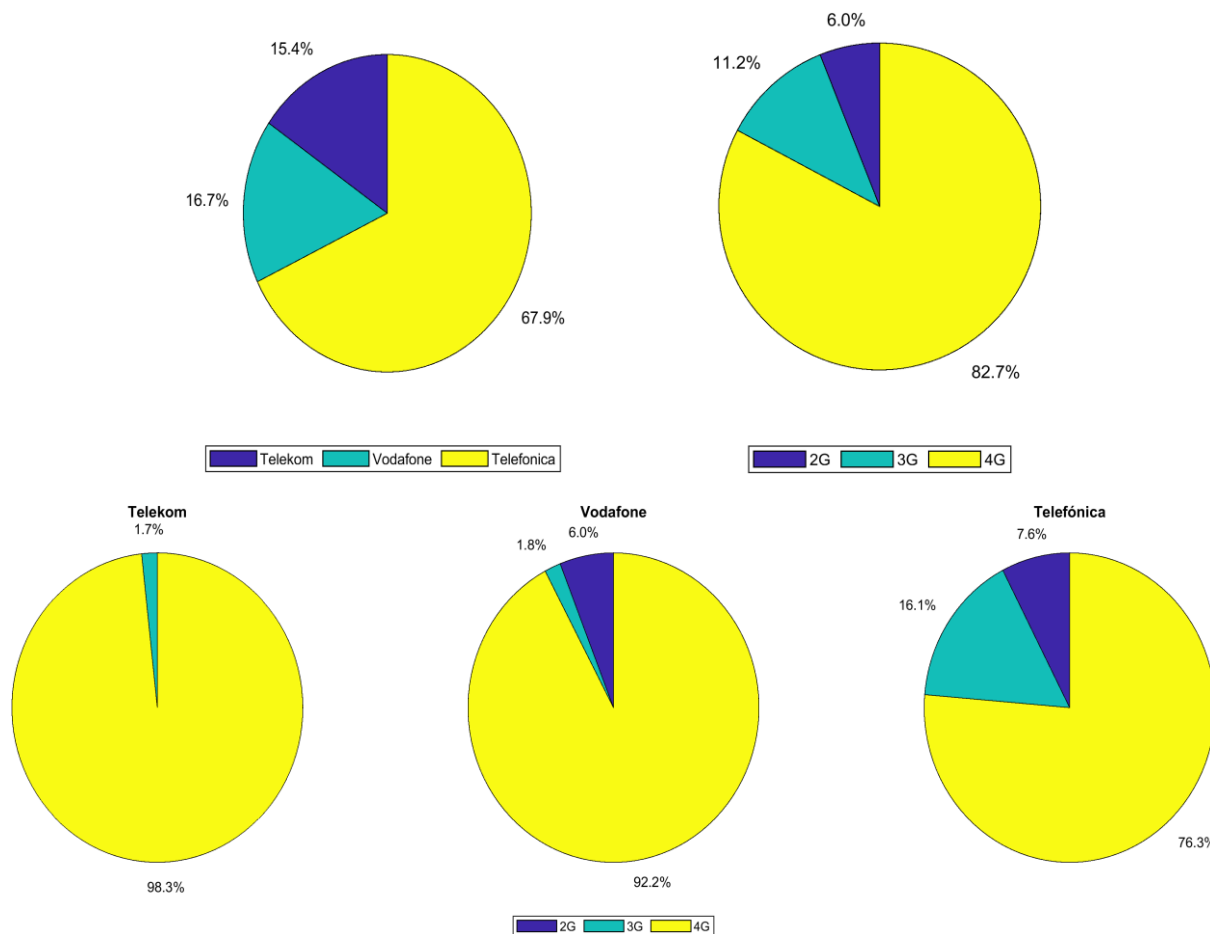


Abbildung 4-5 Tortendiagramme der Verteilung der Crowdsourcing-Messdaten aus dem Stadtgebiet Aachen auf die Netzbetreiber und Funkdienste

Die Verteilung der Messwerte auf die einzelnen Frequenzbänder nach der in Abschnitt 4.3.3 beschriebenen Zuordnung wird für LTE und GSM in den Abbildungen 4-6 und 4-7 in Form von Balkendiagrammen dargestellt. Die Anzahl der Messwerte teilt sich ungleichmäßig auf die Frequenzbänder auf. Bei LTE sticht das 1800 MHz-Band in München und das 2100 MHz-Band in Aachen besonders heraus. Abgesehen vom 700 MHz- und 900 MHz-Band, die kaum genutzt werden und auch deshalb kaum enthalten sein dürften, sind die übrigen Frequenzbänder ähnlich stark vertreten. Tabelle 4-3 schlüsselt für das Münchener Datenpaket zusätzlich die Verteilung auf die einzelnen Kanalfrequenzen bei LTE auf. Wie bei den Frequenzbändern ergibt sich eine ungleichmäßige Verteilung auf die Kanalfrequenzen. Auffallend ist die Dominanz des Telefónica-Kanals bei 1845 MHz, der knapp über 28% der Messungen ausmacht. Allerdings werden womöglich auch nicht alle Kanäle von den Netzbetreibern gleichermaßen genutzt und sind daher auch nicht unbedingt gleichmäßig in der Fläche verfügbar. Dies hängt von der jeweiligen Netzauslastungs- und Netzausbaustrategie des Betreibers ab. Möglicherweise werden aber dennoch nicht alle Kanäle ausreichend abgedeckt.

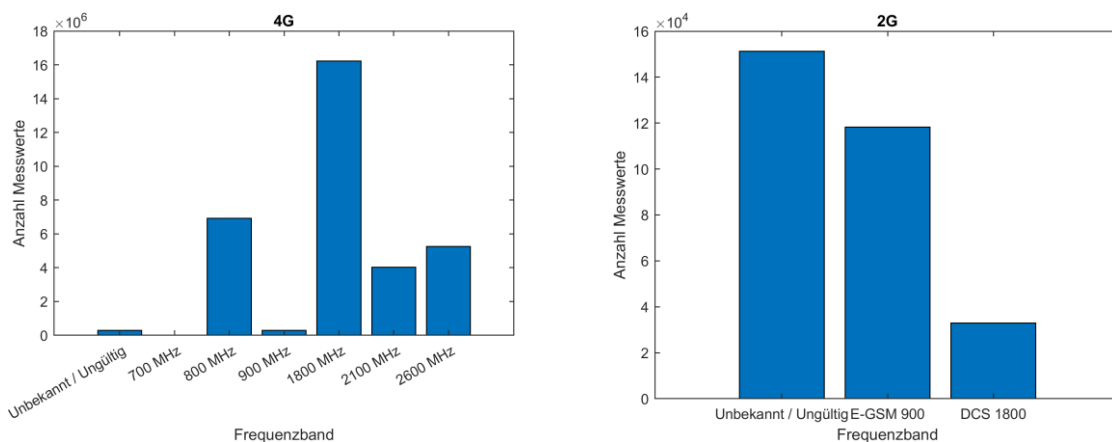


Abbildung 4-6 Verteilung der Messdatensätze aus dem Großraum München auf die einzelnen Frequenzbänder bei LTE (4G) und GSM (2G)

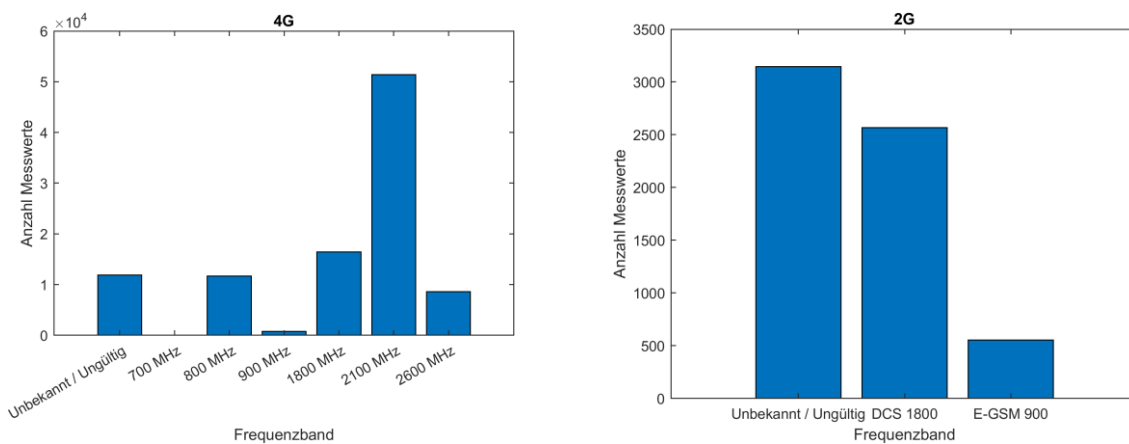


Abbildung 4-7 Verteilung der Messdatensätze aus dem Stadtgebiet Aachen auf die einzelnen Frequenzbänder bei LTE (4G) und GSM (2G)

Netzbetreiber	Kanalnummer	Frequenz	Band	Anzahl Messwerte	Prozentualer Anteil
3	1600	1845	3	9.282.438	28,1%
1	1300	1815	3	4.741.384	14,4%
3	3350	2680	7	4.533.521	13,7%
3	6200	796	20	3.796.486	11,5%
2	101	2120,1	1	2.451.224	7,4%
2	6300	806	20	2.179.207	6,6%
2	1801	1865,1	3	2.170.937	6,6%
3	252	2135,2	1	1.571.522	4,8%
1	6400	816	20	941.415	2,9%
1	3050	2650	7	414.577	1,3%
2	2850	2630	7	307.439	0,9%
1	3749	954,9	8	292.402	0,9%
1	1444	1829,4	3	27.363	0,1%
2	9460	783	28	7.571	0,0%
1	475	2157,5	1	5.827	0,0%

Tabelle 4-3 Verteilung der Messdatensätze aus dem Großraum München auf die LTE-Frequenzbänder

4.4.2 Verteilung der Messungen auf Hersteller & Modelle

Die Betrachtung der Verteilung der Messungen auf Hersteller und Smartphone-Modelle ist unter anderem dafür relevant, wenn es darum geht, Umrechnungsfaktoren zu bestimmen, da es Sinn macht, vor allem für stark genutzte Geräte entsprechende Messungen auszuführen.

Zu den nach dem Aussortieren verbliebenen Messungen in dem Datenpaket aus dem Großraum München haben insgesamt 944 verschiedene Gerätemodelle von 101 Herstellern beigetragen. An den Messungen im Datensatz vom Stadtgebiet Aachen waren insgesamt 124 Gerätemodelle von insgesamt 19 Herstellern beteiligt. Die Tabellen 4-4 und 4-5 führen jeweils die zehn Hersteller auf, deren Smartphones die meisten Messungen in den Datensätzen aufgezeichnet haben. Es besteht in beiden Datenpaketen eine sehr starke Dominanz von Messwerten aus Samsung-Geräten. Der Beitrag liegt über dem Marktanteil des Herstellers in Deutschland. Im Münchener Datenpaket ist das am meisten beisteuernde Gerätemodell alleine für 10,3 % der Datensätze verantwortlich. Es handelt sich um das Modell mit der Nummer SM-G950F, was den Modellnamen Galaxy S8 trägt.

Für das crowdsourcingbasierte Immissionsmonitoring stellt diese auffällige Häufung zunächst nicht grundsätzlich ein Problem oder Nachteil dar.

Platz	Hersteller	Anzahl Messwerte	Prozentualer Anteil
1	samsung	33.317.468	84,5%
2	Sony	2.309.310	5,9%
3	HUAWEI	503.024	1,3%
4	motorola	479.428	1,2%
5	Xiaomi	357.967	0,9%
6	OnePlus	317.153	0,8%
7	ZTE	262.906	0,7%
8	CUBOT	171.999	0,4%
9	Fairphone	128.467	0,3%
10	Fortune Ship	124.735	0,3%

Tabelle 4-4 Verteilung der Messwerte des Münchener Datenpakets auf die zehn am meisten vertretenen Hersteller

Platz	Hersteller	Anzahl Messwerte	Prozentualer Anteil
1	samsung	99.393	80,1%
2	Sony	11.464	9,2%
3	motorola	7.542	6,1%
4	HUAWEI	2.441	2,0%
5	Lenovo	1.130	0,9%
6	HMD Global	925	0,7%
7	Xiaomi	420	0,3%
8	OnePlus	369	0,3%
9	LGE	159	0,1%
10	Google	64	0,1%

Tabelle 4-5 Verteilung der Messwerte des Aachener Datenpakets auf die zehn am meisten vertretenen Hersteller

4.4.3 Verteilung der Messungen in der Fläche

Ein wichtiger Aspekt für das vorgesehene Expositionsmonitoring ist die Abdeckung der Fläche. Dies wird im Folgenden durch Heatmaps, die darstellen, wie viele der nicht aussortierten Messwerte pro Rasterkästchen vorhanden sind, analysiert. Dabei werden für das Datenpaket zum Großraum München zwei unterschiedliche Rasterungen genutzt. Für die Gesamtansicht wird eine Rasterung in Kästchen der Größe 100 m x 100 m vorgenommen. Als zweites wird der Stadtkern mit 20 m x 20 m aufgelöst. Es wird außerdem nach Mobilfunknetzbetreibern und Mobilfunkdiensten unterschieden. Tabelle 4-6 zeigt die Übersicht über die Belegung der Kästchen, wobei jeweils angegeben wird, wie groß der Anteil der Kästchen ist, die Messwerte enthalten. Es wird ersichtlich, dass der Anteil der Kästchen, die wenigstens einen Messwert enthalten größer wird, wenn anstatt der Gesamtansicht der Stadtkern betrachtet wird und das,

obwohl gleichzeitig eine feinere Rasterung genutzt wird. Dies ist aufgrund der Unterschiedlichen Bebauungs- und Bevölkerungsdichte im Umland des Ballungsgebiets München und dem Stadtkern in der Art zu erwarten. Zum einen bewegen sich im Stadtgebiet mehr Menschen mit ihrem Smartphone und tragen dadurch zur Aufzeichnung von Messdaten bei und zum anderen ist das Straßennetz dichter, was wiederum für eine dichtere Abdeckung der Fläche sorgt.

Die Abbildungen 4-8 und 4-9 zeigen die Verteilung der Messwerte für beide Rasterungen in und um München. Damit sich leere Bereiche deutlicher von Bereichen mit wenigen Messwerten absetzen, ist überall dort, wo die Anzahl der Messwerte null beträgt gar kein Punkt eingezeichnet und damit eine Lücke zu sehen. Aus den Abbildungen wird ersichtlich, dass sich die Messwerte im Wesentlichen entlang der Hauptverkehrsachsen verteilen. Nebenstrecken kommen schwächer vor. Anwohnerstraßen werden vermutlich oftmals nur durch einzelne Nutzer abgedeckt oder werden gar nicht erfasst. Im innerstädtischen Bereich ist die Abdeckung des Straßennetzes insgesamt besser als in den ländlicheren Bereichen. Aber auch in Wohngebieten sind nicht sämtliche Straßen erfasst. Der Begriff „flächendeckend“ ist hierbei relativ zu sehen. Flächendeckend kann bei einem derartigen Messansatz nicht bedeuten, dass die Messwerte tatsächlich über die gesamte Fläche verteilt sind und das dazu auch noch gleichmäßig.

Die Abbildungen 4-10 und 4-11 zeigen die Heatmaps einmal für die einzelnen Netzbetreiber und einmal für die einzelnen Funkdienste. Hier zeigt sich hauptsächlich wie sich die bereits in Abschnitt 4.4.1 festgestellte Ungleichverteilung der Messwerte in der Fläche auswirkt. So ist zu erkennen, dass die Abdeckung für Telefónica am besten ausfällt und höhere Messpunktdichten in der Innenstadt erreicht werden, als bei für Telekom und Vodafone. Das zeigt sich auch in den Prozentanteilen von belegten Kästchen in Tabelle 4-6. Aus Abbildung 4-11 wird ersichtlich, dass die Abdeckung der Fläche für GSM und UMTS deutlich schlechter ausfällt als bei LTE. Dies ist aufgrund der unterschiedlichen Anzahl an erfassten Messwerten auch derart zu erwarten und schlägt sich auch in den prozentualen Anteilen an Messwerte enthaltenden Rasterkästchen von Tabelle 4-6 nieder. Besonders hervorzuheben ist, dass in diesem Fall die Abdeckung im Innenstadtbereich nicht besser wird, sondern bei der feineren Rasterung sogar schlechter ausfällt. Dies könnte daraus resultieren, dass vor allem im städtischen Bereich gegenüber den ländlicheren Gegenden die Versorgung mit LTE besonders gut ist und kaum auf GSM zurückgegriffen werden muss.

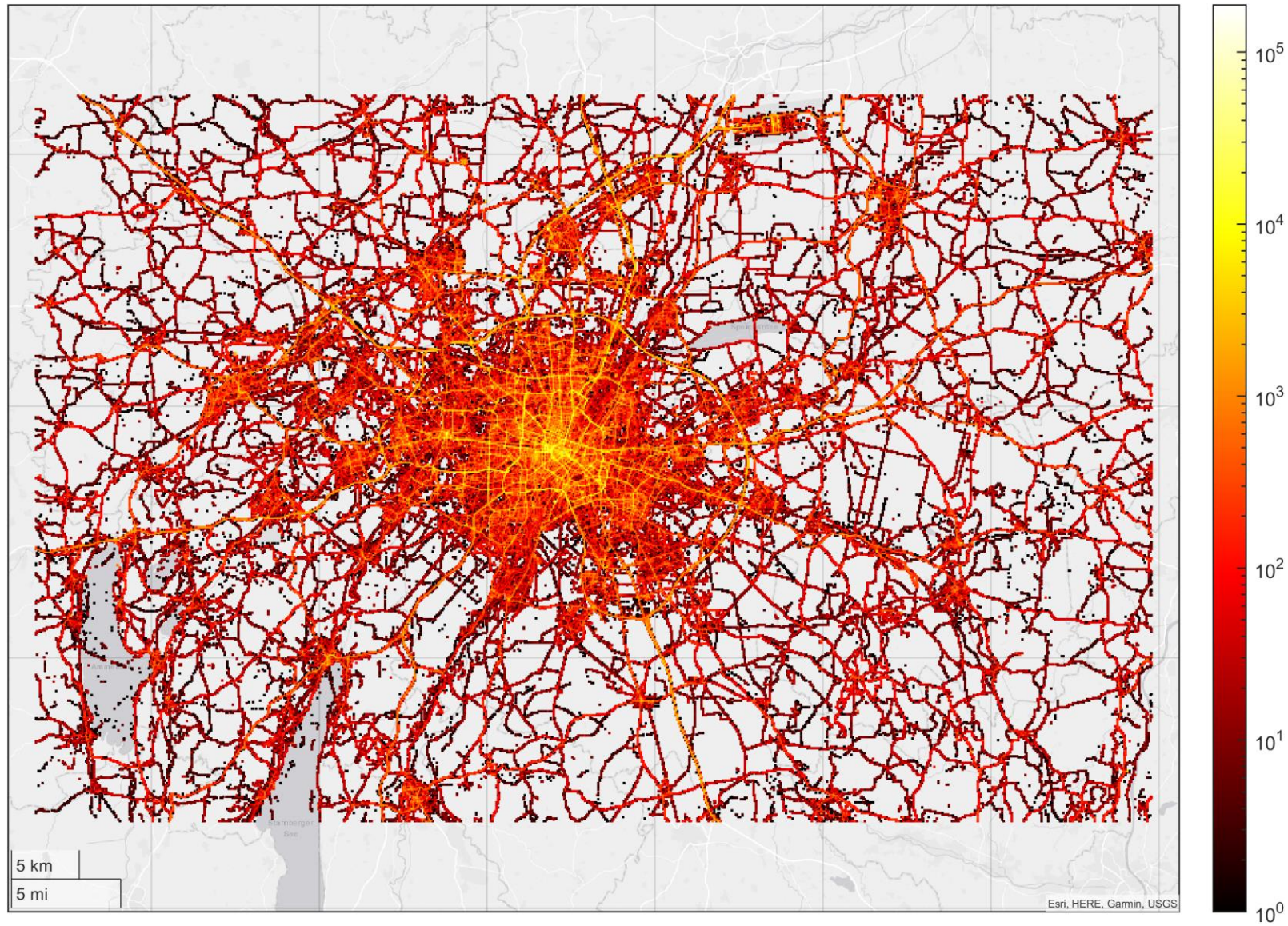


Abbildung 4-8 Heatmap der Messwertanzahl pro Rasterkästchen der Auflösung 100 m x 100 m für die Gesamtansicht des Großraum Münchens

Ausschnitt	Netzbetreiber	Funkdienst	Rastergröße	Anteil Kästchen mit Messwerten
Gesamtansicht	alle	alle	100 m	28,6%
Stadtkern	alle	alle	20 m	40,3%
Gesamtansicht	Telekom	alle	100 m	19,7%
Stadtkern	Telekom	alle	20 m	22,5%
Gesamtansicht	Vodafone	alle	100 m	19,8%
Stadtkern	Vodafone	alle	20 m	24,3%
Gesamtansicht	Telefónica	alle	100 m	23,1%
Stadtkern	Telefónica	alle	20 m	32,9%
Gesamtansicht	alle	LTE	100 m	27,1%
Stadtkern	alle	LTE	20 m	38,0%
Gesamtansicht	alle	UMTS	100 m	16,0%
Stadtkern	alle	UMTS	20 m	20,3%
Gesamtansicht	alle	GSM	100 m	11,1%
Stadtkern	alle	GSM	20 m	6,0%

Tabelle 4-6 Übersicht über die prozentualen Anteile von mit Messwerten belegten Kästchen der jeweiligen Rasterung bei den einzelnen Kartenausschnitten

Die entsprechenden Heatmaps für das Datenpaket aus dem Stadtgebiet Aachen sind in den Abbildungen 4-12 und 4-13 dargestellt. Die Verteilung der Werte in der Fläche lässt bereits erahnen, dass die Abdeckung äußerst lückenhaft ist. Es ist zu erkennen, dass insbesondere für GSM und UMTS nur in wenigen Teilbereichen bzw. auf wenigen Teilstrecken überhaupt Messwerte vorliegen. Eine Immissionsabschätzung ist auf dieser Grundlage für diese Standards fast nirgendwo im Untersuchungsgebiet möglich. Die Beschränkung auf den Zeitraum von nur einen Monat ist also offensichtlich nicht ausreichend, um eine ausreichende Abdeckung zu erreichen.

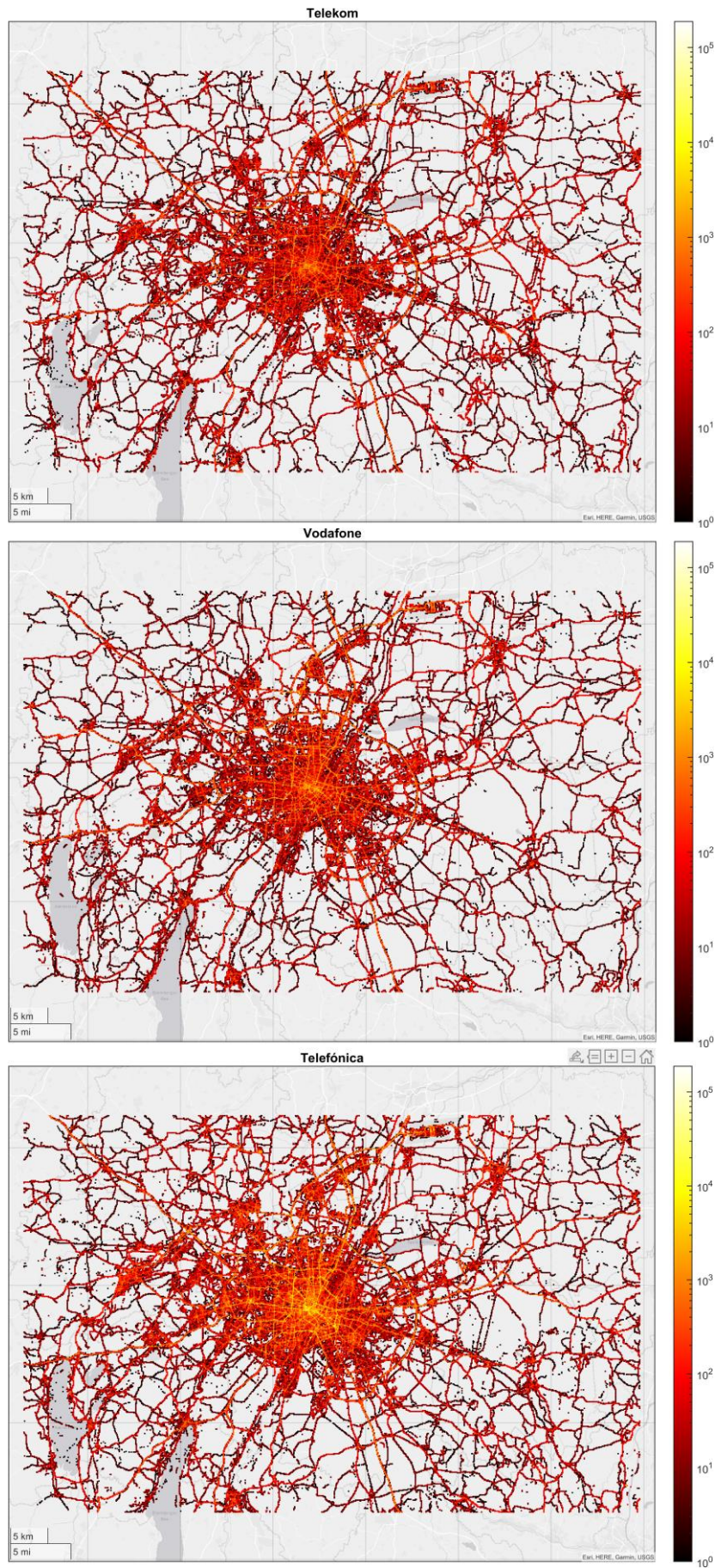


Abbildung 4-10 Heatmap der Messwertanzahl pro Rasterkästchen der Auflösung 100 m x 100 m für die Gesamtansicht des Großraum Münchens in den einzelnen Mobilfunknetzen

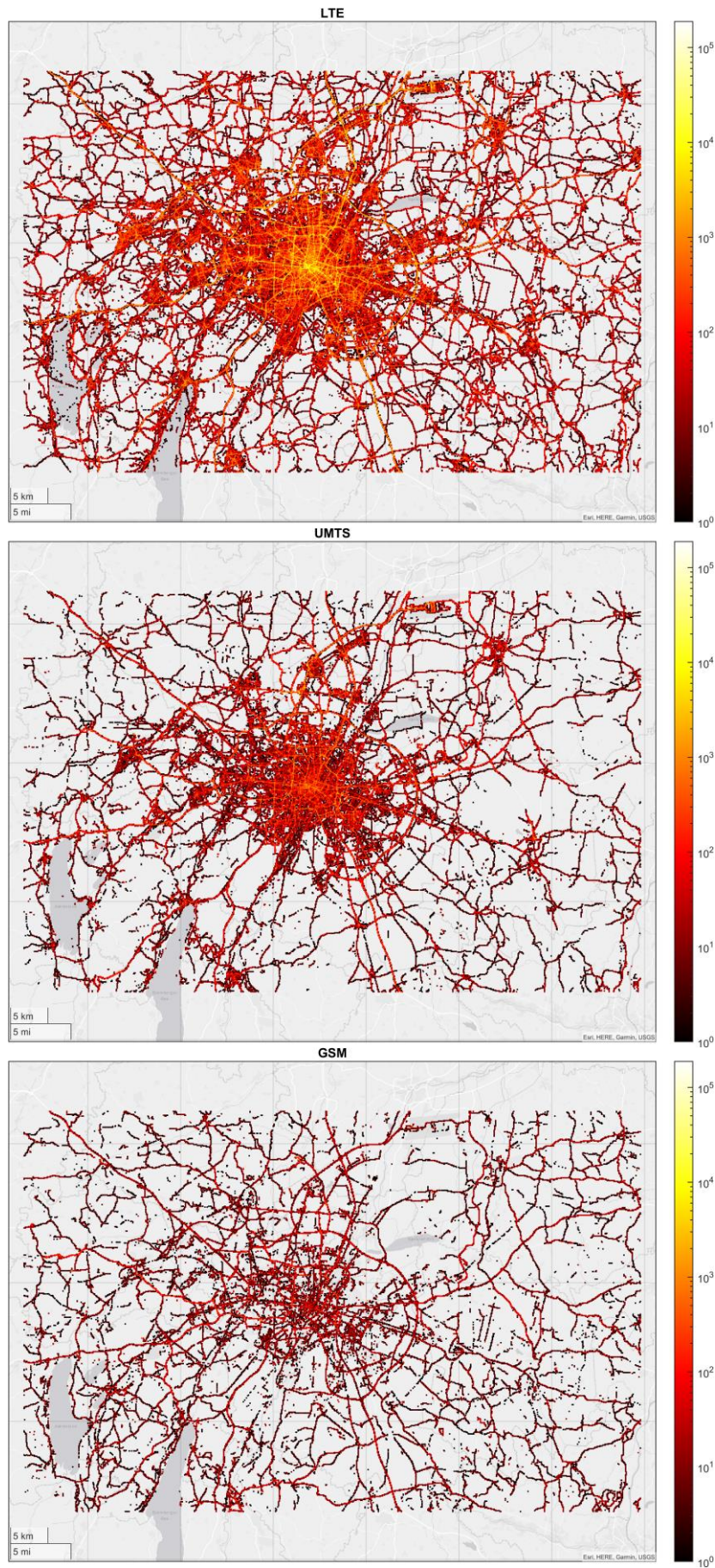


Abbildung 4-11 Heatmap der Messwertanzahl pro Rasterkästchen der Auflösung 100 m x 100 m für die Gesamtansicht des Großraum Münchens in den einzelnen Mobilfunkdiensten

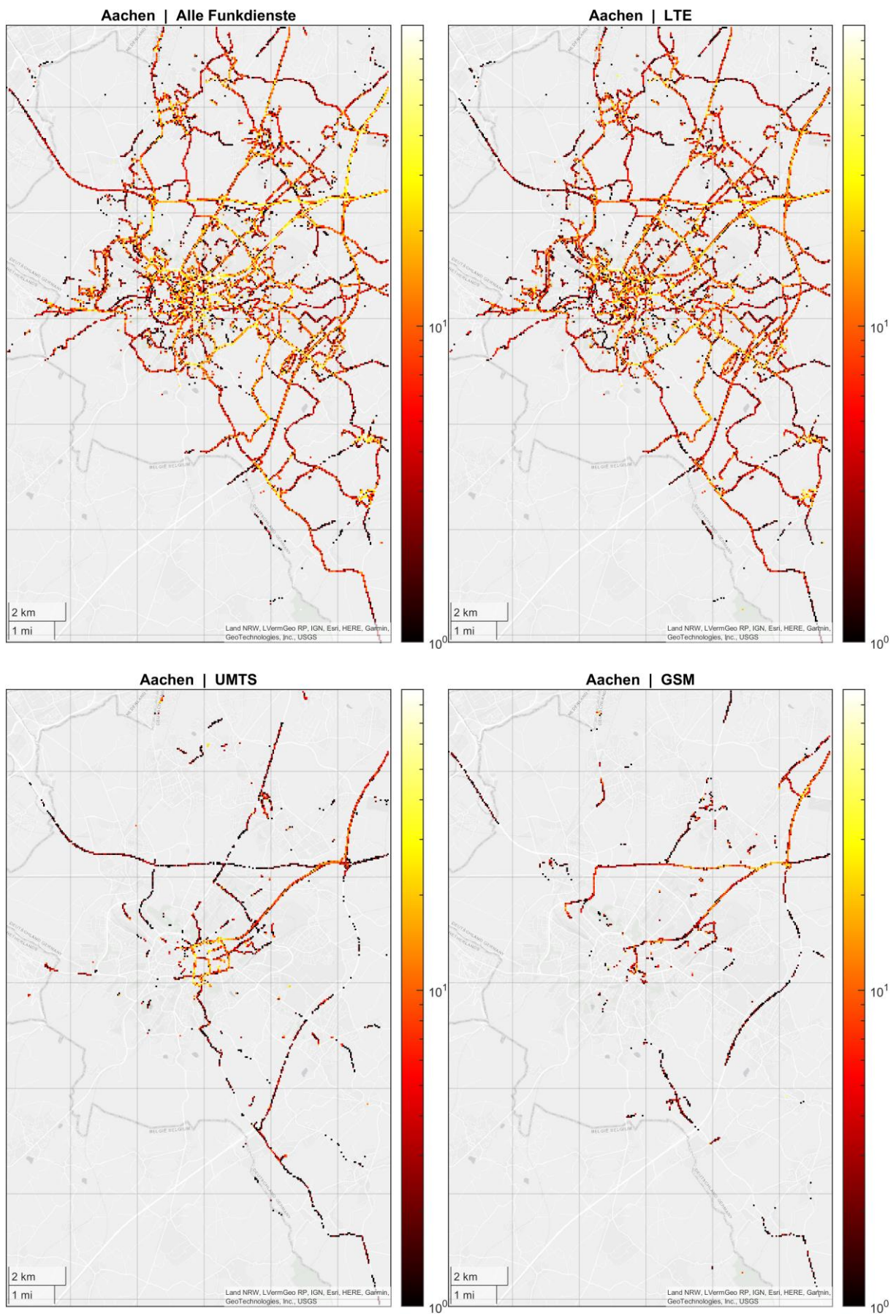


Abbildung 4-12 Verteilung der Smartphone-Crowdsourcingdaten für das Stadtgebiet Aachen in der Fläche insgesamt und unterschieden nach den Mobilfunkstandards

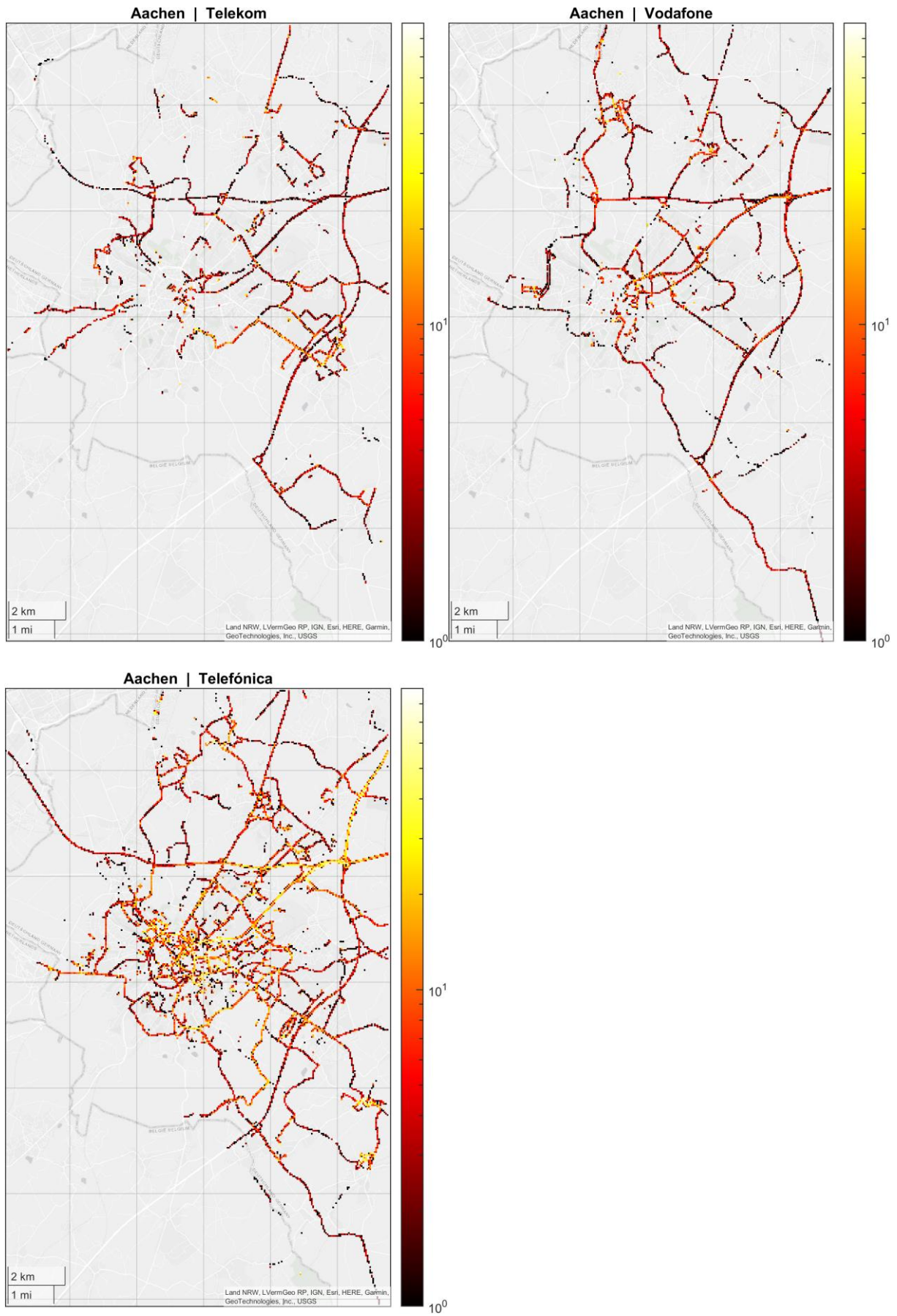


Abbildung 4-13 Verteilung der Smartphone-Crowdsourcingdaten für das Stadtgebiet Aachen in der Fläche unterschieden nach den Mobilfunknetzbetreibern

4.4.4 Zeitliche Verteilung

Wenngleich die zeitliche Verteilung der erhobenen Datensätze nur beschränkte Relevanz für die Immissionsabschätzung hat, zum Beispiel um die Kontinuität der Erfassung über den Erhebungszeitraum zu prüfen, wird an dieser kurz auf diesen Aspekt eingegangen. Abbildung 4-14 zeigt für das Datenpaket aus dem Großraum München, welches über den Zeitraum von einem Jahr erhoben wurde, wie die Messdaten auf die einzelnen Monate, Tageszeiten und Wochentage verteilt sind. Es ist deutlich der Beginn der Einschränkungen aufgrund der Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie zu erkennen, die ab März 2020 mit einer Reduzierung der Bewegungsaktivitäten verbunden waren. Allerdings hat es auch eine deutliche Abnahme der Anzahl der Messwerte vom Oktober auf November 2019 gegeben, was vermutlich nicht ausschließlich auf weniger Aktivitäten im Freien beim Übergang zum Winter zurückzuführen ist. Die Ursache ist unbekannt.

Die Anzahl der Messungen im Tagesverlauf ändern sich zwischen Tag und Nacht deutlich. Auch hier hängt dies mit dem Umfang der Fortbewegung zu den verschiedenen Tageszeiten zusammen. Für die Immissionsermittlung spielt dies eine untergeordnete Rolle, da eine Abschätzung einer auslastungsabhängigen Immission mangels verlässlicher Kenngrößen absehbar ohnehin nicht möglich ist. Auch bei den Wochentagen zeigt sich, dass Samstag und Sonntag weniger Messwerte aufgezeichnet wurden. Dies dürfte damit zusammenhängen, dass weniger Arbeitswege an diesen Tagen zurückgelegt werden und somit auch weniger Streckenaufzeichnungen erfolgen.

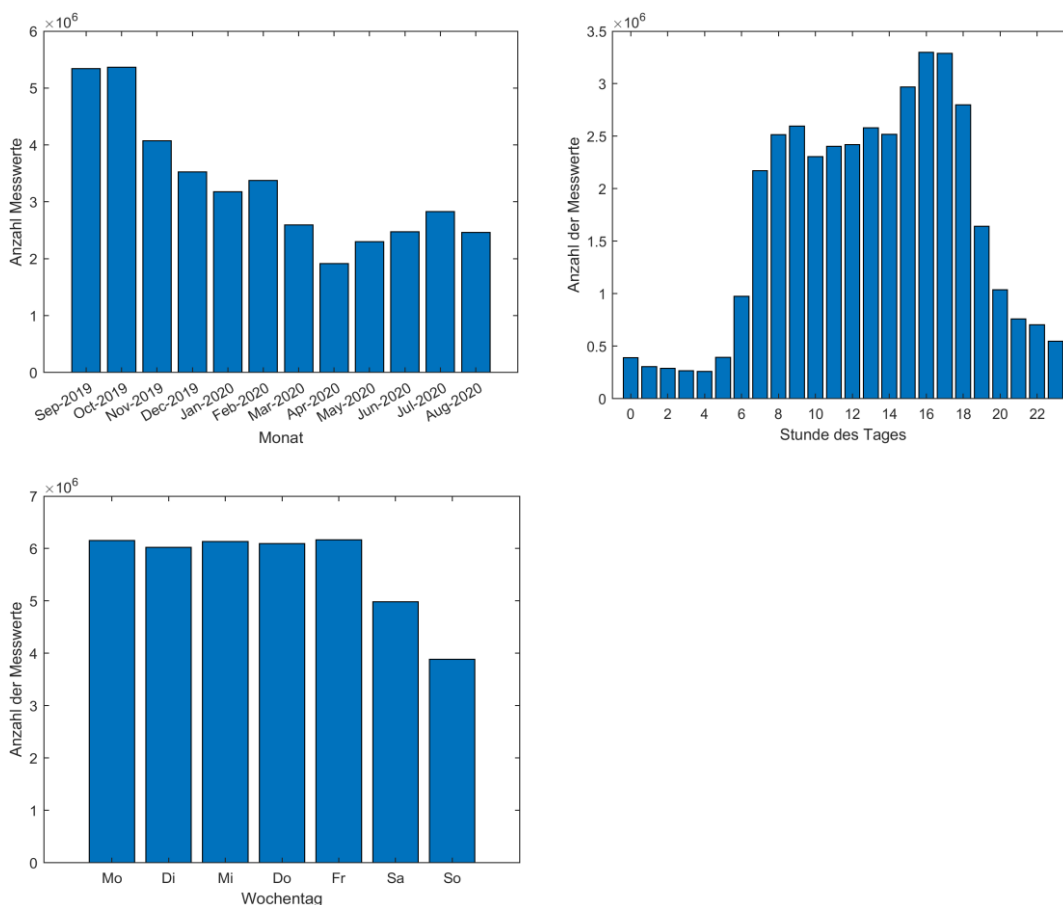


Abbildung 4-14 Zeitliche Verteilung der Datensätze aus dem Großraum München auf Monate, Wochentage und Tageszeiten

In Abbildung 4-15 ist die Verteilung auf die Wochentage für die Daten aus dem Aachener Stadtgebiet ungleichmäßiger. Dies dürfte draus resultieren, dass der nur einen Monat umfassende Erhebungszeitraum nicht ausreicht, um Sondereffekte einzelner Tage über die Wochen hinweg auszugleichen. Die Tageszeitabhängigkeit zeigt einen ähnlichen Verlauf wie in München, wobei es zu einem deutlicheren Einbruch am späteren Vormittag kommt.

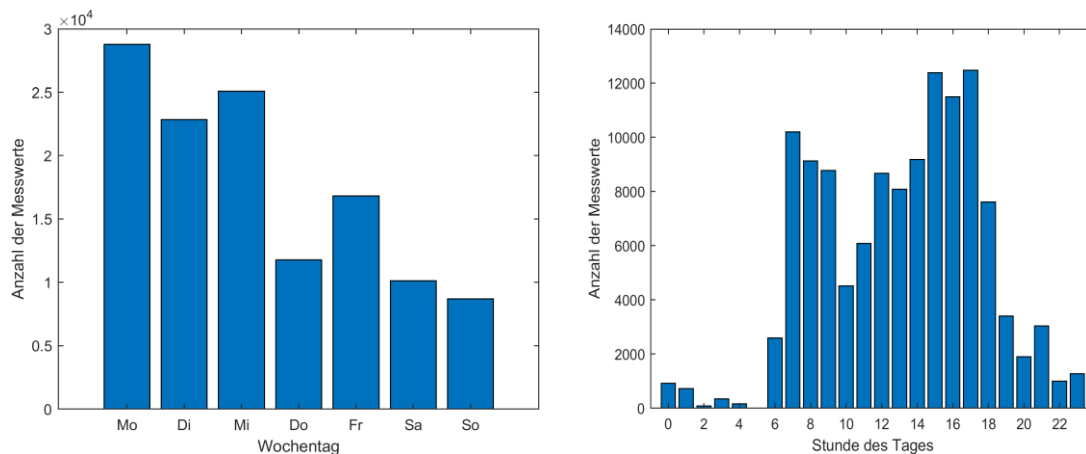


Abbildung 4-15 Zeitliche Verteilung der Datensätze aus dem Stadtgebiet Aachen auf Wochentage und Tageszeiten

4.4.5 Verteilung der Signalstärken

Eine der wichtigsten Eigenschaften der Datensätze ist die Signalstärkeinformation, da aus dieser letztendlich eine Schätzung für die Immission gewonnen werden soll. Daher ist es wichtig die Plausibilität der Signalstärkemesswerte zu überprüfen. Zwar wurden bereits ungültige Werte aussortiert, allerdings ist es auch entscheidend, dass die Verteilung der von den Smartphones aufgezeichneten Signalstärkewerte sinnvoll ist. Zu diesem Zweck wurden daher die Verteilungen der Signalstärken für die einzelnen Funkdienste insgesamt und für die drei Netzbetreiber in den Abbildungen 4-16 und 4-17 für die beiden Datenpakete ermittelt.

Wichtige Erkenntnisse hieraus sind, dass die Wertebereiche der Signalstärken plausibel abgedeckt sind, das heißt, dass prinzipiell alle möglichen Werte auftreten, wobei sehr hohe und sehr niedrige Signalstärken, wie zu erwarten, seltener vorkommen als Signalstärkewerte im mittleren Bereich. Es ist auch zu erkennen, dass die Quantisierung bei GSM und UMTS nur in 2 dB-Schritten und nicht in 1 dB-Schritten wie bei LTE erfolgt. Somit bestätigt sich die Beobachtung der bisherigen Untersuchungen der Smartphone-Messungen auch über eine große Anzahl von Smartphones hinweg.

Bei den Verteilungen der Signalstärken aus dem Aachener Datenpaket ist der Verlauf teilweise etwas unförmig. Dies könnte daraus resultieren, dass aufgrund des geringen Datenumfangs eine Häufung von Messungen in einem bestimmten Gebiet mit einem bestimmten Signalpegel womöglich auch durch ein einzelnes Gerät stark beeinflusst worden sein kann.

Es sei angemerkt, dass die Lage der Verteilungen der unterschiedlichen Mobilfunkdienste zueinander nicht den Schluss erlaubt, dass der Empfang besser oder schlechter ist. Die Verteilungen der Signalstärkewerte der Funkstandards unterscheiden sich vor allem deshalb, weil

die Referenzsignale, auf die sie sich beziehen, unterschiedliche Signalanteile aus dem Gesamtsignal des jeweiligen Standards repräsentieren und sich dadurch verschiedene typische Leistungswerte ergeben.

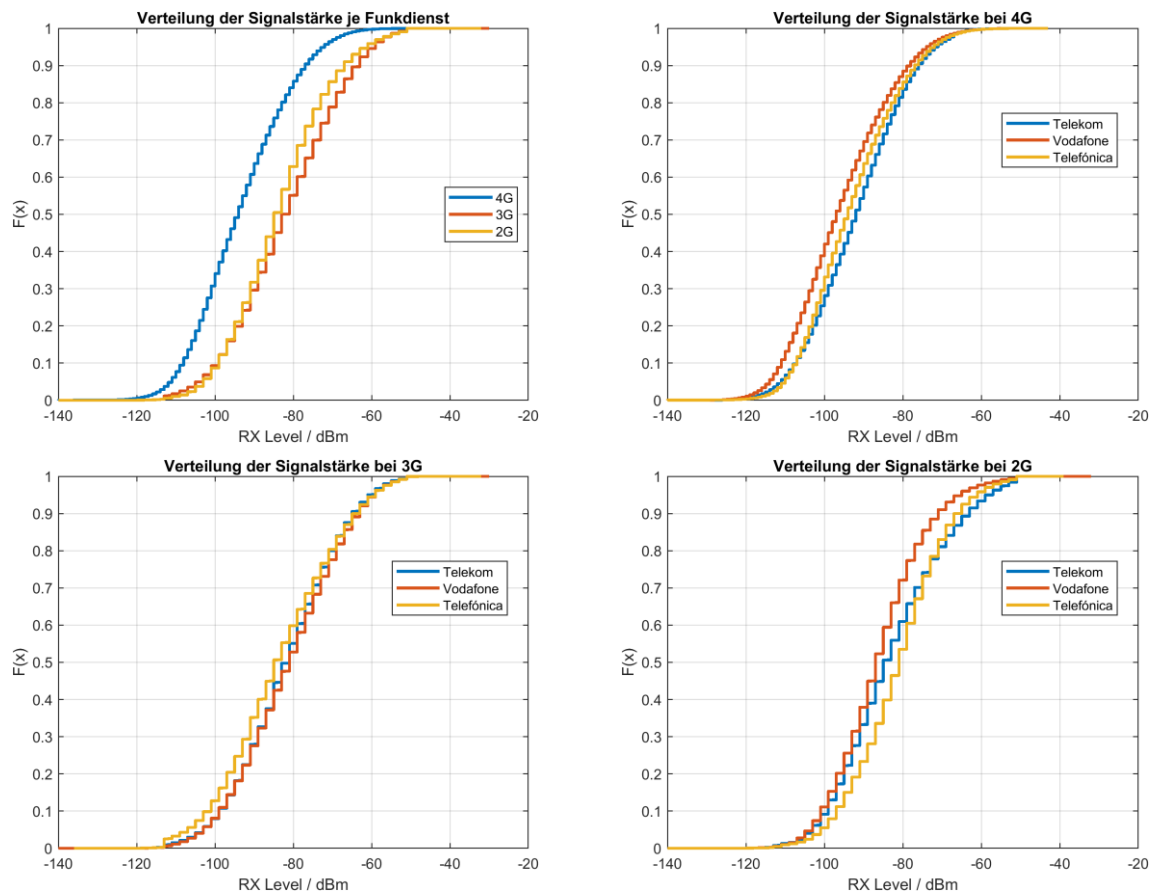


Abbildung 4-16 Verteilung der Signalstärken im Datenpaket aus dem Großraum München

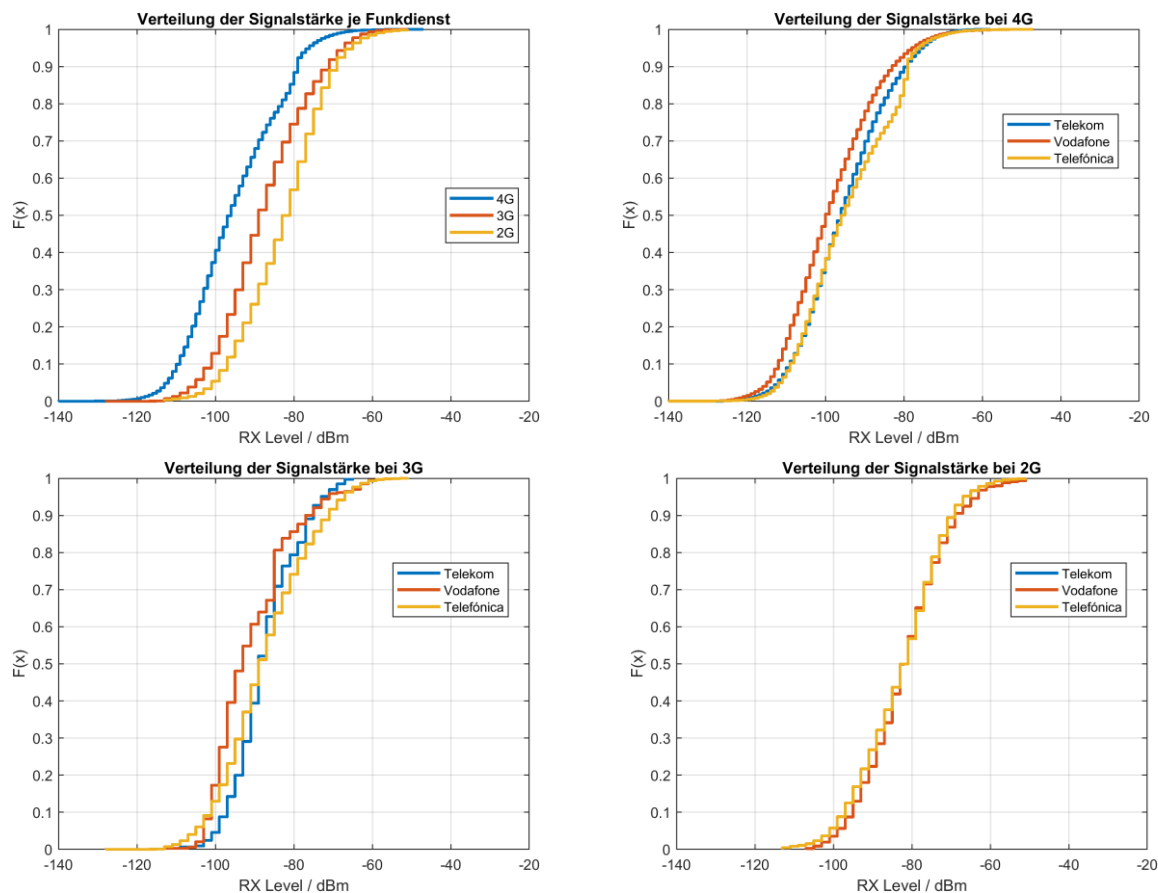


Abbildung 4-17 Verteilung der Signalstärken im Datenpaket aus dem Stadtgebiet Aachen

4.4.6 Anzahl Mobilfunkzellen

Die Anzahl der erfassten Funkzellen ist ebenfalls ein relevanter Parameter, der als Anhaltspunkt über die Erfassung der Immissionsbeiträge im Untersuchungsgebiet dienen kann. Abbildung 4-18 zeigt für beide Datenpakete, wie viele unterschiedliche Mobilfunkzellen in den einzelnen Mobilfunknetzen und den jeweiligen Mobilfunkdiensten registriert wurden. Im Großraum München wurden insgesamt 35.084 Mobilfunkzellen gesichtet. Die größten Anzahlen sind erwartungsgemäß bei UMTS und LTE zu finden, während bei GSM nur ein Bruchteil dessen gezählt wurde. Dies ist jedoch realistisch, da GSM zwar noch in der Fläche verfügbar ist, aber hauptsächlich zur Gewährleistung der Kompatibilität für alte Geräte bereitgehalten wird, während bei LTE und UMTS hohe Kapazitäten bereitgehalten werden müssen. Dementsprechend gibt es vor allem bei LTE oftmals mehrere Funkzellen auf verschiedenen Frequenzbändern, die vom gleichen Funkmast ausgesendet werden, während es für GSM nur eine für jeden Sektor gibt.

Auch im Aachener Datenpaket mit insgesamt 1.109 erfassten Funkzellen dominiert vor allem LTE. UMTS, das zum Erhebungszeitraum bereits kurz vor der Abschaltung stand und daher womöglich auch kaum mehr genutzt wurde, ist entsprechend schwach vertreten. Dass bei Telekom und Vodafone deutlich weniger Zellen erfasst wurden als bei Telefónica, ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die Abdeckung in diesen Netzen deutlich schlechter war und somit viele vorhandene Zellen gar nicht gesichtet wurden. Dies gilt in besonderem Maße auch für die UMTS- und GSM-Netze dieser beiden Betreiber, wo im Telekom-Netz nicht einmal eine einzige GSM-Funkzelle enthalten ist.

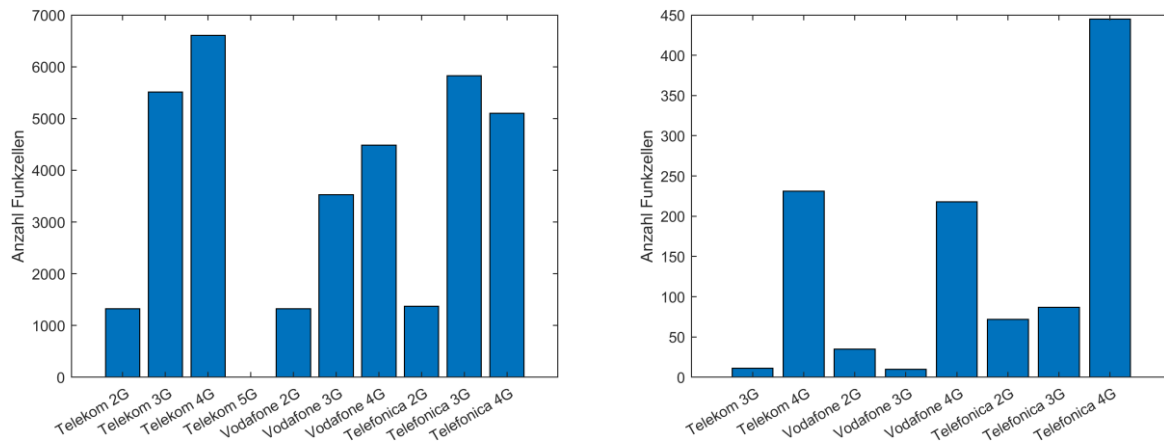


Abbildung 4-18 Anzahl der erfassten Mobilfunkzellen für die einzelnen Standards in den drei Mobilfunknetzen im Datenpaket aus dem Großraum München (links) und dem Datenpaket aus dem Stadtgebiet Aachen (rechts)

Die unzureichende Erfassung aller im Untersuchungsgebiet vorhandenen Funkzellen stellt für den Ansatz zur Immissionsabschätzung ein erhebliches Problem dar, da somit relevante Immissionsquellen nicht enthalten sind und auch an den Orten, für die Daten vorliegen möglicherweise nur ein unvollständiges Bild der Immissionsbeiträge vorliegt.

4.4.7 Standortgenauigkeit

Die Genauigkeit der Standortinformation ist wichtig für die Zuordnung der Signalstärkewerte zum jeweiligen Messort, damit die Immissionsabschätzung nicht durch Messwerte beeinflusst wird, die eigentlich von einem anderen Ort stammen, wo womöglich ein deutlich abweichender Signalpegel vorliegt. Das Android-Betriebssystem stellt neben den Geokoordinaten auch einen Schätzwert der Standortgenauigkeit zur Verfügung, der als Richtwert genutzt werden kann. Auch die Bewegungsgeschwindigkeit wird ausgegeben und kann in Verbindung mit dem Alter der Modeminformationen Aufschluss darüber geben, wie weit der Ort der Signalstärkemessung von dem ermittelten Standort entfernt liegt. Hierfür kann das Produkt der beiden Werte gebildet werden, um die zurückgelegte Strecke zu ermitteln.

Diese Parameter sind für beide Datenpakete in den Abbildungen 4-19 und 4-20 dargestellt. Die Diagramme beruhen auf den Zahlen vor Aussortieren nach den Qualitätskriterien von Stufe 4 (vgl. Abschnitt 4.3.2), damit die Sättigungsbereiche ersichtlich sind. Ansonsten wären die Kurven an der gezogenen Grenze zum Aussortieren abgeschnitten worden.

Es zeigt sich, dass in beiden Datenpaketen sowohl die Verteilungsfunktion der Standortgenauigkeit als auch des Produkts aus Bewegungsgeschwindigkeit und Alter der Modeminformation bis etwa um den Bereich von 20 m steil ansteigt und danach deutlich abflacht. Das bedeutet, dass die meisten Werte, jeweils ca. 95 %, darunterliegen und nur ein relativ kleiner Anteil darüber. Daher wurde dieser Wert als Grenze zum Aussortieren verwendet, weil dies einen guten Kompromiss zwischen der Begrenzung der Unsicherheit durch Standortabweichungen und der Anzahl aussortierter Messwerte darstellt.

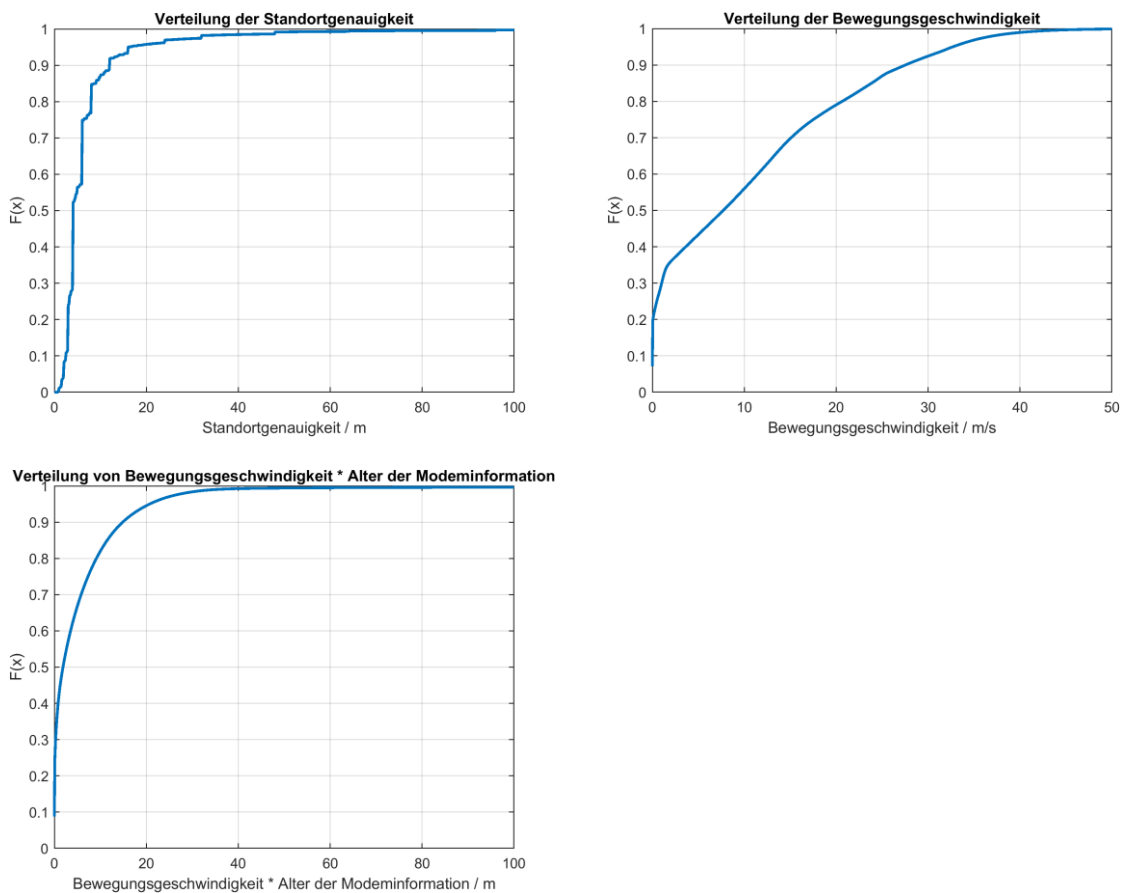


Abbildung 4-19 Verteilung der standortbezogenen Parameter im Datensatz aus dem Großraum München

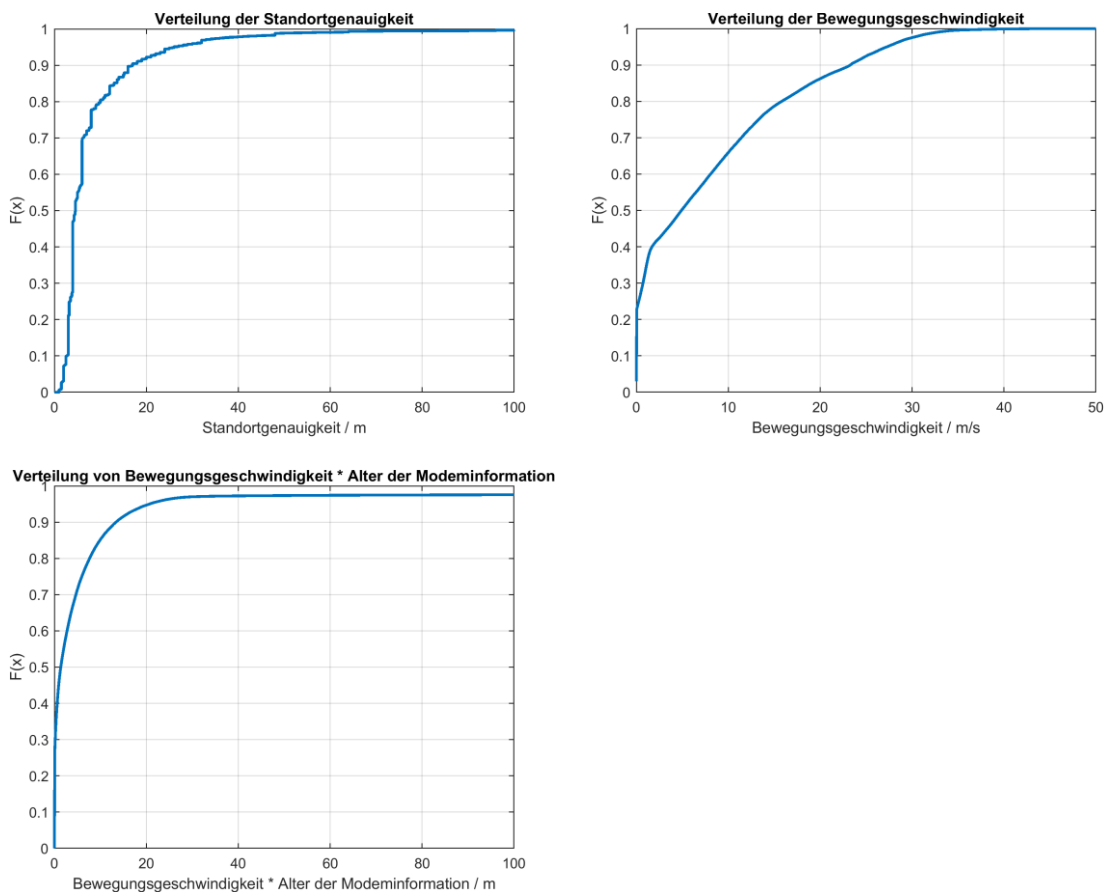


Abbildung 4-20 Verteilung der standortbezogenen Parameter im Datensatz aus dem Stadtgebiet Aachen

4.5 Methoden zur Interpolation der Smartphone-Messdaten

4.5.1 Eigenschaften von Crowdsourcingdaten

Crowdsourcingdaten, wie sie von einem Netzwerk aus Smartphones gesammelt werden können, werden unter unkontrollierten Bedingungen aufgezeichnet und können auf vielfältige Weise beeinflusst werden. Die Umstände der einzelnen Messung (z.B. Abschattung durch den Nutzer) sind unbekannt und somit auch die Auswirkungen der Einflüsse auf die gemessene Signalstärke. Auch die Standortinformation kann ungenau oder fehlerhaft sein, was dazu führt, dass die Messung nicht exakt dem richtigen Ort zugeordnet wird. All diese Einflüsse lassen sich zusammen als rauschartige Störung bei der Ableitung von Feldstärkeschätzungen aus den Smartphone-Messungen auffassen.

Die einzelne Smartphone-Messung kann daher als Kennwert für die Immission nicht die gleiche Genauigkeit erzielen wie ein dezidiertes Messgerät. Ziel einer Auswertung muss es deshalb sein aus mehreren Messungen in näherer Umgebung, die idealerweise von verschiedenen Smartphones stammen und in unterschiedlichen Situationen entstehen, einen geeigneten Ergebniswert zu ermitteln, der die unterschiedlichen Einflüsse möglichst ausgleicht und somit eine Verbesserung der Genauigkeit für eine Immissionsabschätzung ermöglicht. Benötigt werden also Verfahren, die mit verrauschten Messdaten umgehen können.

Messungen entstehen dort, wo die Nutzer sich aufhalten bzw. auf den Routen, auf denen sie sich entlangbewegen. Dadurch ergibt sich eine ungleichmäßige Abtastung der Fläche. Es gibt Bereiche mit vielen Messwerten und Bereiche mit wenigen oder keinen Messwerten oder Messwerten in großem Abstand. Geeignet sind daher nur Methoden, die als Eingangsdaten mit verstreuten Daten umgehen können, die nicht auf einem festen Raster liegen.

Neben den wichtigsten Kenngrößen Signalstärke und Standort, wirkt sich vor allem eine fehlerhafte Zuordnung von Cell-IDs kritisch aus. Sofern eine falsche Zuordnung vorliegt, geht eine Messung in die Auswertung einer Funkzelle ein, die überhaupt keinen direkten Zusammenhang zu der dortigen Signalstärke hat. Kann eine solche fehlerhafte Zuordnung nicht festgestellt werden und liegen dann nicht ausreichend korrekte Messwerte in dieser Umgebung vor, kann ein solcher Messwert das Ergebnis stark beeinflussen, selbst wenn ein Auswertungsverfahren grundsätzlich mit verrauschten, also fehlerbehafteten Messwerten umgehen kann. Daher werden Methoden benötigt, die robust gegenüber zumindest einem gewissen Anteil an Ausreißern sind.

Auch ohne derartige Fehler werden sich die Messergebnisse einzelner Smartphones aufgrund ihrer Eigenschaften (unterschiedliche Umrechnungsfaktoren) und auch aufgrund von unterschiedlichen Bedingungen bei Wiederholungsmessungen unterscheiden. Neben der Reduzierung der Ortsauflösung durch die Abbildung auf feste Rasterpunkte, gehört es somit zu den gewünschten Effekten einer Interpolation, dass gleichzeitig die Varianz gegenüber den in die Berechnung eingehenden Messwerten reduziert wird. Gleichzeitig werden jedoch auch tatsächlich vorliegende Signalpegelschwankungen entfernt. Hierfür muss eine geeignete Abwägung gefunden werden, um relevante Variationen der Immission nicht zu verlieren.

Die Signalstärke bzw. eine daraus abzuleitende elektrische Feldstärke ändert sich innerhalb einer gewissen Distanz, wenn Fast Fading vernachlässigt wird, nicht abrupt, sondern allmählich. Selbst in Situationen, in denen von Sichtverbindung in einen abgeschatteten Bereich übergegangen wird, wird der Gradient nie beliebig steil. Benachbarte Messwerte sind daher korreliert und hängen voneinander ab. Wie weit dieser Einfluss reicht, unterscheidet sich je nachdem, wie stark die Feldstärke in einem Bereich schwankt.

Zusammengefasst lässt sich sagen, dass es darum geht ein mittleres Ergebnis aus einer großen Anzahl von Messungen abzuleiten, das weitgehend befreit ist von den Einflüssen einer einzelnen Messung.

4.5.2 Auswertungsmethoden

Um prinzipiell zu einer besseren Genauigkeit gegenüber der Einzelmessung eines Smartphones zu gelangen, müssen die Messdaten mehrerer Smartphones über Raum und Zeit zusammengefasst werden. Dabei genügt es nicht alle Signalstärkewerte zusammen zu betrachten und miteinander zu verrechnen, um daraus die Immission abzuleiten. Da sich die Funkzellen wie einzelne Immissionsquellen überlagern, müssen diese zunächst individuell betrachtet werden. Daher ist eine Segmentierung der Daten in zusammengehörige Gruppen vorzunehmen, damit nur solche Werte miteinander kombiniert werden, die von der gleichen Quelle stammen. Dementsprechend ist zwischen den verschiedenen Mobilfunkbetreibern, den einzelnen Funkdiensten, dem Frequenzband bis hin zur einzelnen Funkzelle zu unterscheiden. Die wesentlichen dazu notwendigen Informationen (Mobilfunknetzbetreiber, Cell-ID, Funkdienst) liegen in jedem Datensatz vor. Die sehr wenigen Datensätze, bei denen diese Information nicht vollständig vorhanden ist, wurden von vornherein aussortiert.

Aufgrund der im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Eigenschaften der zu verarbeitenden Daten kommen verschiedene räumliche Interpolationsmethoden als Kandidaten infrage. Wichtig ist, dass diese mit verrauschten Messdaten umgehen können und nicht auf ein festes Raster der Eingangsdaten angewiesen sind.

Eine einfache Möglichkeit zur Auswertung stellen Methoden dar, die den interpolierten Wert aus den vorhandenen Messwerten innerhalb einer gewissen Nachbarschaft um den betrachteten Ort herum ermitteln. Dabei wird als Grundvoraussetzung angenommen, dass benachbarte Werte ähnlich zueinander sind, wie es auch in den meisten Situationen bei den für die Immissionsabschätzung betrachteten Feldstärken der Fall ist. Es wird kein Raster für die Eingangsdaten vorausgesetzt. Stattdessen können die Messpunkte völlig unregelmäßig verteilt liegen, wie es bei durch mittels Crowdsourcing auf Smartphones gesammelten Messdaten der Fall ist. Über die Nachbarschaft wird definiert, wie viele und welche der bekannten Datenpunkte in die Berechnung einfließen. Entweder werden Datenpunkte innerhalb einer räumlich festen Form (z.B. Kreis bis zu einer maximalen Distanz) um den betrachteten Ort oder eine Anzahl der am nächsten benachbart liegenden Datenpunkte berücksichtigt. Man spricht daher auch von lokaler Interpolation. Erfolgt keine Beschränkung auf eine Nachbarschaft, fließen sämtliche bekannten Messwerte in die Schätzung ein. Diese globale Interpolation eignet sich nicht zur Ermittlung möglichst exakter Werte, sondern nur zur Beurteilung globaler räumlicher Strukturen. Für die Immissionsabschätzung ist aufgrund der starken Variation der Immissionshöhe innerhalb einer Funkzelle vor allem auch im Bereich von Bebauung ein globaler Ansatz

nicht geeignet. Außerdem ist eine Begrenzung auf eine maximal zu berücksichtigende Distanz gegenüber einer Beschränkung auf eine Anzahl an benachbart liegenden Messungen besser geeignet. Denn ansonsten können abhängig von der in der Umgebung vorliegenden Messpunktdichte sehr unterschiedliche Berücksichtigungsradien auftreten und Messpunkte mit großer Distanz zum zu interpolierenden Ort eingehen, die aufgrund ihres Abstands mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht mehr mit der tatsächlich dort vorliegenden Feldsituation vergleichbar sind. Umgekehrt würden bei hoher Messpunktdichte sehr kleine Radien auftreten, obwohl auch darüber hinaus eine ähnliche Feldstärke zu erwarten ist. In diesem Fall werden von den vorliegenden Messungen weniger Werte einbezogen, als es für die Ermittlung eines potentiell noch stabileren Ergebnisses möglich wäre.

Die Messwerte innerhalb der Nachbarschaft können entsprechend ihres Abstandes zum zu interpolierenden Ort gewichtet werden, sodass näher benachbarte Messwerte größeren Einfluss auf das Ergebnis haben, als weiter entfernte Messwerte. Für die Bestimmung der Gewichte können verschiedene Funktionen in Abhängigkeit der Distanz zum Einsatz kommen. Gleichung 3-21 zeigt die allgemeine Form für die Berechnung nach diesem Prinzip.

$$u(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^N w_i(\mathbf{x}) u_i(\mathbf{x}_i)}{\sum_{i=1}^N w_i(\mathbf{x})} \quad 3-21$$

Hierbei ist

- \mathbf{x} Vektor mit den Koordinaten des Punktes, für den die Interpolation zu berechnen ist
- $u(\mathbf{x})$ Ergebnis der Interpolation am Punkt \mathbf{x}
- $u_i(\mathbf{x}_i)$ Messwert am Ort \mathbf{x}_i
- $w_i(\mathbf{x})$ Gewichtung des Messwerts am Ort \mathbf{x}_i
- N Anzahl der Punkte, die in die Berechnung eingehen

Wird für alle berücksichtigten Messwerte das gleiche Gewicht unabhängig von der Distanz angesetzt, ergibt sich das arithmetische Mittel dieser Werte. Eine häufig genutzte Variante zur Gewichtung stellt die Inverse Distanzwichtung (IDW) dar. Hierbei wird die Gewichtung in Gleichung 3-22 aus der inversen Distanz bestimmt, wobei die Abnahme der Gewichte mit der Distanz durch eine Potenz ggf. noch verstärkt werden kann. Die Bestimmung der Gewichte erfolgt entsprechend Gleichung 3-22.

$$w_i(\mathbf{x}) = \frac{1}{d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)^p} \quad 3-22$$

Mit

- \mathbf{x} Vektor mit den Koordinaten des Punktes, für den die Interpolation zu berechnen ist.
- $d(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ Distanz zwischen dem Messwert am Ort \mathbf{x}_i und dem zu interpolierenden Punkt \mathbf{x}
- $w_i(\mathbf{x})$ Gewichtung des Messwerts am Ort \mathbf{x}_i

- p Exponent zur Verstärkung der Abnahme der Gewichte mit dem Abstand

Bei Vorliegen einer konstanten Messpunktdichte über die Fläche bleibt für den Exponent Eins das Gesamtgewicht aller äquidistanten Messwerte für alle Distanzen konstant. Während die Anzahl der Messwerte auf einem bestimmten Radius mit der Distanz zunimmt, nimmt das Gewicht der Werte auf den Radien mit der inversen Distanz ab. Beim arithmetischen Mittel hingegen ist es bei konstanter Messpunktdichte so, dass das Gesamtgewicht der Messwerte einer bestimmten Entfernung mit wachsender Distanz zunimmt.

Die auf diese Weise ermittelten Schätzwerte passieren nicht die bekannten Punkte. Es handelt sich demnach um eine nicht-exakte Interpolation. Dies ist aufgrund dessen, dass die vorliegenden Messwerte verrauscht sind und gemittelt werden sollen, ein gewünschter Effekt. Ein Problem bei der Mittelung besteht jedoch darin, dass auch tatsächlich vorliegende lokale Minima und Maxima abgeschwächt werden können und somit womöglich nicht mehr ausreichend nachgezeichnet werden. Hier ist eine geeignete Abwägung zwischen der Stärke des Mittelungseffektes zur Verringerung des Einflusses des Rauschens, die sich aus der Größe der berücksichtigten Nachbarschaft und der Gewichtung der Werte darin ergibt, und der Erhaltung von relevanten Feldstärkeänderungen zu treffen. Bei Verwendung des arithmetischen Mittels, also bei Gleichgewichtung aller Werte in der Nachbarschaft, besteht die Gefahr Extrema insbesondere bei großen Nachbarschaften zu sehr abzuschwächen. Bei der Inversen Distanzgewichtung ist dieser Effekt verringert, da die näher liegenden Messwerte stärker gewichtet werden, als weiter entfernte Werte. Problematisch kann sich hierbei jedoch auswirken, wenn die nahe liegenden Werte durch Rauschen bzw. Messfehler stark vom Mittelwert am Interpolationsort abweichen. Dann verfälschen diese Messwerte das Interpolationsergebnis durch ihre stärkere Gewichtung. Inhomogene Verteilungen der Messwerte in der Fläche führen dazu, dass dichter belegte Gebiete einen größeren Einfluss auf den interpolierten Wert haben als weniger dicht belegte Gebiete mit vergleichbarer Entfernung. Grundsätzlich ist der Wertebereich der Interpolation auf denjenigen der Eingangswerte beschränkt. Trends in den Daten, wie zum Beispiel eine in eine Richtung abfallende Signalstärke, werden bei diesem Vorgehen nicht in der Auswertung berücksichtigt.

Trotz gewisser Schwächen erfüllen diese nachbarschaftsbezogenen Ansätze alle Grundvoraussetzungen für eine Anwendung zur Auswertung der vorliegenden Crowdsourcing-Daten und besitzen Eigenschaften, die sinnvoll in Bezug auf die in Abschnitt 4.5.1 beschriebenen Merkmale der Daten sind.

Eine Klasse alternativer Methoden für die Auswertung stellen geostatistische Interpolationsmethoden dar. Diese fortgeschrittenen Verfahren sind deutlich komplexer, als die bisher betrachteten nicht-statistischen, deterministischen Vorgehensweisen. Dafür sind sie jedoch prinzipiell imstande die Schwachstellen der einfacheren Methoden durch Nutzung der räumlichen Korrelation auszugleichen und könnten daher womöglich bessere Ergebnisse erzielen. Ein solches Verfahren ist beispielsweise die Gaußprozessregression, die im Kontext der Geostatistik meist auch als Kriging bezeichnet wird. Allgemein eignen sich Gaußprozesse zur Interpolation, Extrapolation sowie Glättung beliebigdimensionaler diskreter Messpunkte, insbesondere auch von verrauschten Messwerten, wie sie bei einem crowdsourcingbasierten Messsystem mit Smartphones vorliegen. Bei der Gaußprozessregression muss vorab keine spezielle Modellfunktion bekannt sein. Stattdessen wird eine automatische Modellbildung auf der Basis

von Beobachtungen vorgenommen. Dabei wird durch den Gaußprozess schließlich das typische Verhalten des zu beschreibenden Systems erfasst. Als Ergebnis wird die Lösung mit der höchsten Wahrscheinlichkeit erhalten. Je nach Lösungsmethode kann auch die zugehörige ortsabhängige Varianz mit angegeben werden. Eine umfassende theoretische Einführung in das Thema der Gaußprozessregression findet sich in [126], während [127] eine Abhandlung zur Anwendung in der Geostatistik liefert.

Bei der Gaußprozessregression wird die Beziehung zwischen den Messwerten durch Kovarianzen abgebildet, wobei eine Kovarianzfunktion beschreibt, wie stark die Beziehung zu Messwerten in einer bestimmten Entfernung ist. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist die Exponentialfunktion geeignet, um das Verhalten zu beschreiben. Die freien Parameter dieser Funktion werden beim Trainieren des Regressionsmodells aus den Messdaten ermittelt, bis sie das Verhalten der Messdaten zueinander bestmöglich beschreibt. Bei der Inversen Distanzwichtung kann durch den Exponenten p die Abnahme der Gewichtungsfaktoren beeinflusst werden. Hierfür besteht kein derart standardisiertes Vorgehen mit Optimierungsverfahren wie bei der Bestimmung der Parameter der Kovarianzfunktion bei der Gaußprozessregression.

In der Literatur wurden die beschriebenen Verfahren in [93] zusammen mit weiteren Methoden anhand von kontrolliert aufgenommenen Smartphone-Messungen evaluiert. Hintergrund ist die Vorhersage der Netzabdeckung mithilfe von Crowdsourcing-Messungen. Mehrere Szenarien werden betrachtet, die unterschiedliche Charakteristiken von Crowdsourcing-Messungen nachbilden. Dazu gehören der Einfluss der Ungenauigkeit des Standorts, die räumliche Verteilung der Messpunkte sowie die Messpunktdichte. Es wurde die Genauigkeit der Ergebnisse miteinander verglichen, wobei das sogenannte Ordinary Kriging über alle Szenarien hinweg insgesamt am besten abschnitt. Beim Ordinary Kriging handelt es sich um eine spezielle Form der Gaußprozessregression, wie sie im Bereich der Geostatistik häufig Verwendung findet. Sie nutzt eine konstante, aus den Eingangsdaten zu bestimmende Erwartungswertfunktion. Die Inverse Distanzwichtung, die deutlich einfacher umzusetzen ist, schnitt jedoch überall nahezu gleichwertig ab.

Dieses Verfahren wurde auch im Bereich der EMF-Erfassung bereits eingesetzt. In [128] wurden mehr als 1000 Messungen mit einer Breitband-Messsonde in einem urbanen Gebiet aufgenommen anschließend mittels Kriging interpoliert, um die räumliche Verteilung der Immission zu untersuchen. Es konnte gezeigt werden, dass dieser Ansatz der räumlichen Statistik geeignet ist, um die Höhe elektromagnetischer Felder im städtischen Umfeld zu analysieren und zu mappen. Weitere Anwendungsbeispiele, bei denen Kriging als Interpolationsmethode verwendet wird, sind in [129] und [130] zu finden. Ziel ist es Hot Spots zu lokalisieren und sequenziell weitere Messungen in diesen Bereichen vorzunehmen bzw. mit auf Fahrzeugen montierten Messeinrichtungen Eingangsdaten zu generieren, um die Immissionshöhe für ein größeres Gebiet zu ermitteln. Aufgrund der vielversprechenden Ergebnisse dieser Arbeiten in der Literatur wurde dieses Verfahren durch den Auftragnehmer bereits im Rahmen zweier Veröffentlichungen [131, 132] anhand von Quasi-Crowdsourcingdaten erprobt.

4.5.3 Umsetzung und Anwendung

In den folgenden Kapiteln werden die vorliegenden Crowdsourcingdatensätze mithilfe der beschriebenen Verfahren ausgewertet und evaluiert. Dabei wird der Schwerpunkt auf der Anwendung der Inversen Distanzwichtung liegen, da diese für die grundlegende Erprobung den besten Kompromiss aus der Eignung für diese Aufgabe und dem Rechenaufwand darstellt. Die Gaußprozessregression stellt einen deutlich höheren Rechenaufwand dar, wobei die zu erwartende Genauigkeit im Vergleich zur Inversen Distanzwichtung aber nur unwesentlich höher ist. Im Hinblick auf einen großflächigen Einsatz wird daher die Inverse Distanzwichtung vorerst als geeignetere Methode angesehen. Für die Messorte der Validierungsmessungen wird die Auswertung der Smartphone-Messungen jeweils zusätzlich zum Vergleich auch durch Berechnung des arithmetischen Mittels aus den Messwerten der Nachbarschaft sowie durch Ordinary Kriging vorgenommen.

Für die Erprobung der Auswertungsverfahren wird folgende Konfiguration verwendet: Der Exponent p wird bei der Inversen Distanzwichtung nicht zur weiteren Verstärkung der Abnahme des Einflusses mit dem Abstand genutzt, also zu eins gesetzt, da eine gewisse Mittelung über die Umgebung gewollt ist, um von einem ausgleichenden Effekt von verschiedenen beeinflussten Messungen zu profitieren. Würde die Gewichtung von sehr nah beim Interpolationspunkt liegenden Messwerten zu groß, würden die Einflüsse auf diesen einzelnen Messwert starke Auswirkungen auf das Ergebnis haben. Als Koordinaten gehen die Geokoordinaten als Längen- und Breitengrad in die Berechnung ein. Die Distanz wird durch entsprechende Funktionen in Längenmaße in Metern umgerechnet. Hierbei wird eine feste Grenze von 20 m gezogen, ab der weiter vom betrachteten Ort entfernte Messwerte nicht mehr in die Berechnung mit einbezogen werden. Dadurch wird vermieden, dass weit entfernte Messwerte, die mit der Signalstärkesituation am Interpolationsort nur noch einen geringen bis keinen Zusammenhang besitzen, den Messwert durch ihre möglicherweise große Anzahl beeinflussen. Außerdem wird der Rechenaufwand dadurch etwas reduziert. Die vorläufige Festlegung auf 20 m erfolgt hierbei aufgrund der Feststellung, dass die typischerweise geschätzte Standortabweichung bei der Geolokalisierung der Smartphones unterhalb dieser Distanz liegt (vgl. Abschnitt 4.4.7). Damit werden also in der Regel alle Messwerte, die aufgrund der Fehlerschätzung tatsächlich auf dem Interpolationspunkt gelegen haben könnten in die Bestimmung des Interpolationsergebnisses einbezogen. Hinzu kommt, dass durch die typischen Bebauungsstrukturen im städtischen Umfeld über größere Distanzen hinweg nicht mehr die Voraussetzung einer ausreichenden Ähnlichkeit der vorliegenden Feldstärke erfüllt ist, um für die Schätzung relevant zu sein. Auf größeren freien Flächen kann die Feldstärke auch über weitere Entfernungen hinweg sehr ähnlich bleiben. Dies in solchen Fällen zu berücksichtigen ist jedoch nicht ohne weiteres möglich.

Liegen innerhalb dieses Bereiches nicht mindestens fünf Messwerte, über die die Berechnung ausgeführt werden kann, wird kein Resultat für diesen Interpolationspunkt ausgegeben. Damit sollen Ergebnisse vermieden werden, die nur von sehr wenigen Messwerten abhängen und demnach kein Mindestmaß an Mittelung für ein stabiles Ergebnis aufweisen. Außerdem wird auf diese Weise nur dort eine Schätzung für die Immission erzeugt, wo Informationen aus den Smartphone-Messungen vorliegen. Auch diese Festlegung ist zunächst ein Ausgangswert, der im Rahmen weiterer Untersuchungen optimiert werden kann.

4.6 Erstellung von Immissionskarten

Im Folgenden wird demonstriert, wie die Rohmessdaten sowie die Ergebnisse einer Immissionsabschätzung auf der Basis von Smartphone-Crowdsourcingdaten in der Fläche aussehen, wenn sie in der Kartenansicht dargestellt werden.

4.6.1 Darstellung der Rohdaten der Signalstärkemessungen der Smartphones & Erprobung des Auswertungsverfahrens

Bevor in weiteren Schritten die Auswertung der Messdaten vorgenommen wird, sollen an dieser Stelle kurz Beispiele für typische Verteilungen von Messwerten in der Fläche sowie deren Signalstärkewerten gezeigt werden. Abbildung 4-21 zeigt dies beispielhaft anhand einer LTE-Funkzelle mit 16.690 Messwerten in der Münchener Innenstadt.

Bereits diese Form der Rohdaten gibt einen sehr guten Eindruck davon, wie die Signalstärke und damit die Immission in der Umgebung verteilt ist. Wiederholte Aufzeichnungen entlang des gleichen Pfads ergeben tendenziell ähnliche Signalpegelverläufe. Es sind aber auch vereinzelt deutlichere Unterschiede erkennbar. Selbst scharfe Kanten durch Abschattungen sind an Straßenkreuzungen deutlich erkennbar. Abbildung 4-23 und Abbildung 4-24 zeigen jeweils Detailausschnitte von Bereichen mit deutlichen Signalpegeländerungen, während Abbildung 4-22 die für Abschattungen ursächliche Bebauungsstruktur anhand eines Satellitenbildes verdeutlicht. Diese qualitativen Erkenntnisse lassen es durchaus realistisch erscheinen, bei ausreichend vorhandenen Messungen sowohl ein stabiles mittleres Messergebnis als auch eine gute räumliche Auflösung der Immissionsschwankungen zu erhalten.

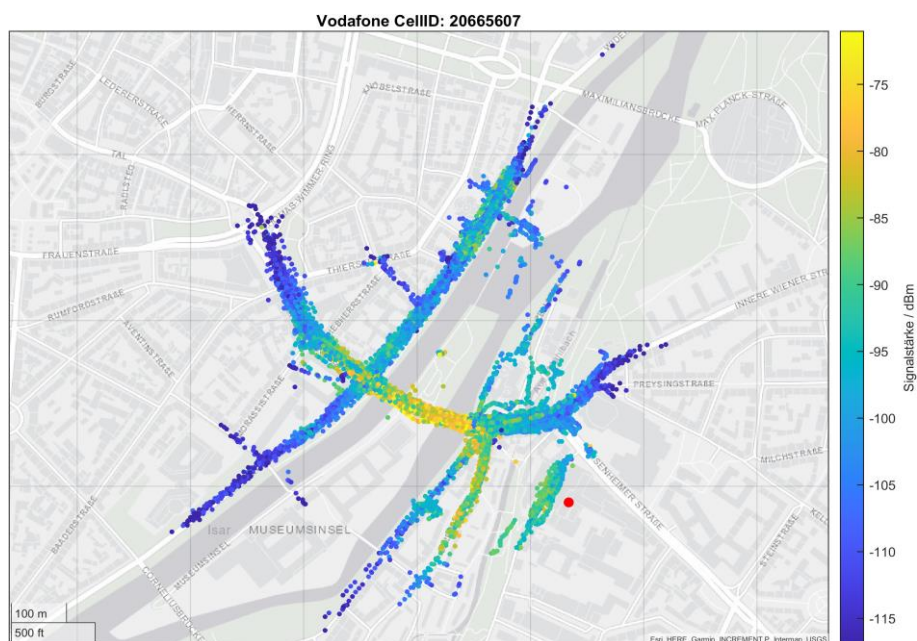


Abbildung 4-21 Typisches Beispiel für die Verteilung der Messungen einer Funkzelle in der Fläche und deren Signalstärkewerte im 2600 MHz-Band. Der rote Punkt markiert den Standort der Basisstation laut cellmapper.net.

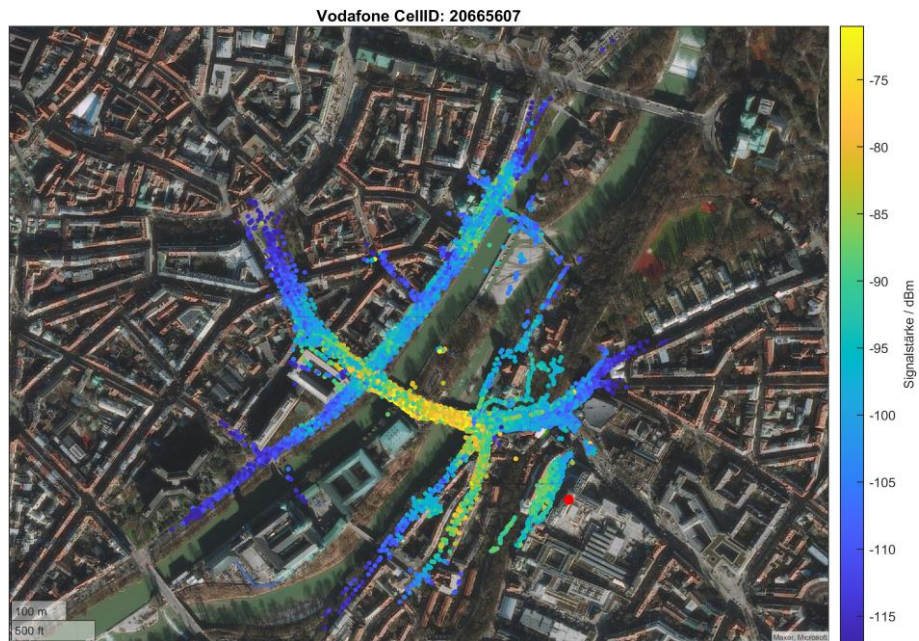


Abbildung 4-22 Ansicht der beispielhaften Funkzelle in Satellitenansicht zur Verdeutlichung der Bebauungsstruktur

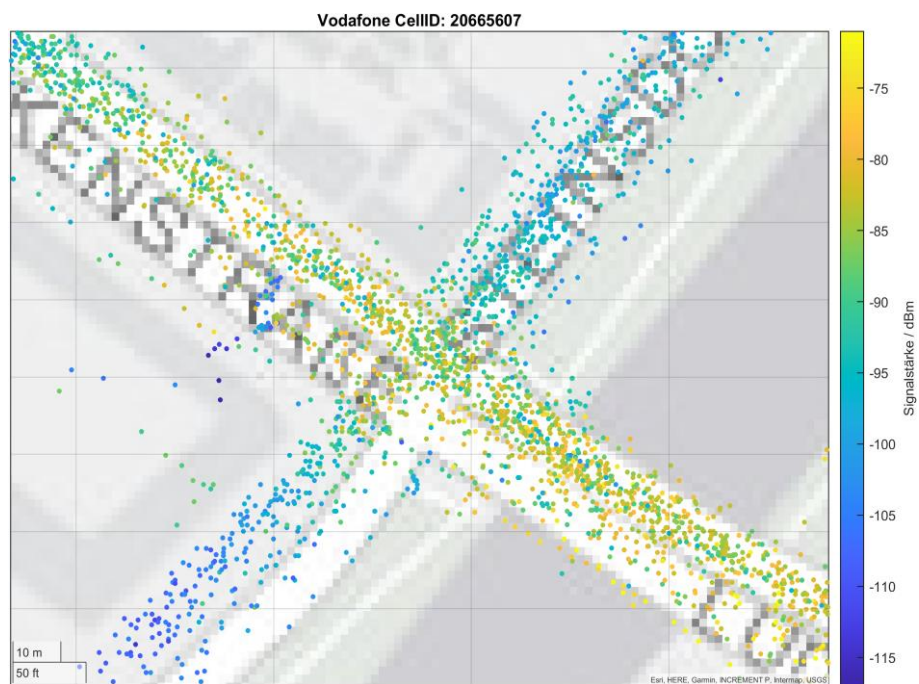


Abbildung 4-23 Detailansicht einer Kreuzung mit hoher Signalstärke entlang einer Straße und Abschattung des Signals bei der kreuzenden Straße

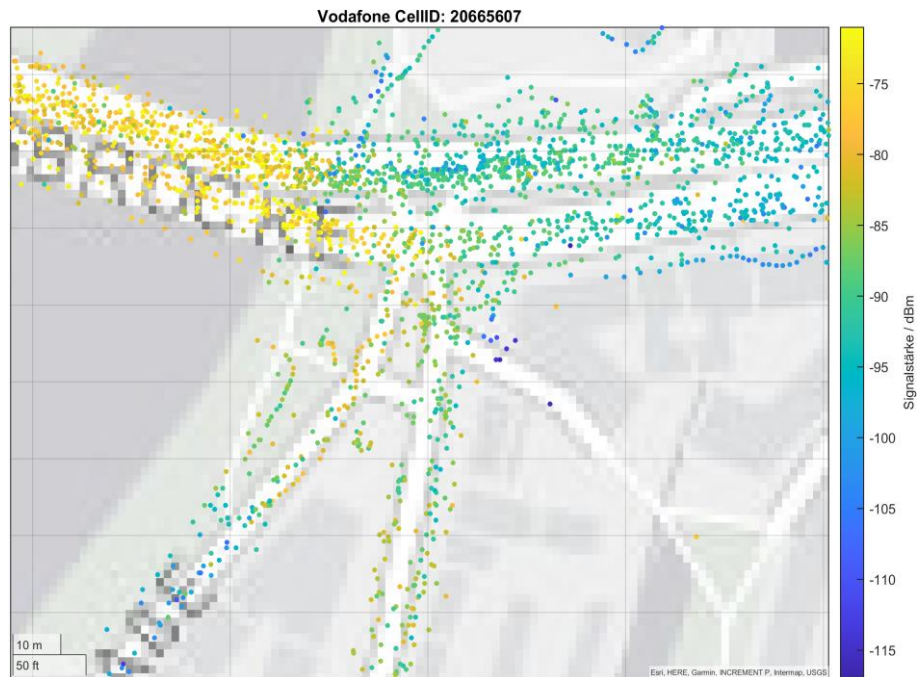


Abbildung 4-24 Detailansicht eines Bereichs mit deutlicher Signalstärkeänderung

Abbildung 4-25 zeigt das Ergebnis der Interpolation mittels Inverser Distanzwichtung für diese Funkzelle. Das Raster weist Abstände von 20 m x 20 m auf. Es wird ersichtlich wie die Messdaten gemittelt werden, ohne dass jedoch der Dynamikumfang derart verringert wird, dass dadurch Immissionsspitzen übersehen werden.

Abbildung 4-26 zeigt die Anzahl der Messwerte, die in die Berechnung des interpolierten Wertes am jeweiligen Punkt eingegangen sind. Es zeigt sich, dass die Messpunktdichte zum Rand der Funkzelle hin abnimmt, da hier die Handover zu anderen Funkzellen geschehen und diese nicht immer zum gleichen Zeitpunkt geschehen. Es ist außerdem ersichtlich, dass in den kleineren Straßen im Verhältnis weniger Messwerte zur Verfügung stehen als auf den Hauptstraßen.

In Abbildung 4-27 ist dargestellt, wie viele unterschiedliche Gerätemodelle an der Ermittlung des Ergebnisses des einzelnen Punktes beteiligt waren. In den Bereichen mit den höheren bzw. höchsten Signalstärken liegen jeweils auch mehr bzw. die meisten Messungen von verschiedenen Gerätemodellen vor.

Beide Größen können als Indikator für die Verlässlichkeit des Ergebnisses der Interpolation dienen, denn eine größere Anzahl von Messungen und insbesondere von verschiedenen Endgeräten lassen im Allgemeinen Ergebnisse erwarten, die weniger durch Einflüsse einer einzelnen Messung bzw. eines einzelnen Gerätes bestimmt sind.

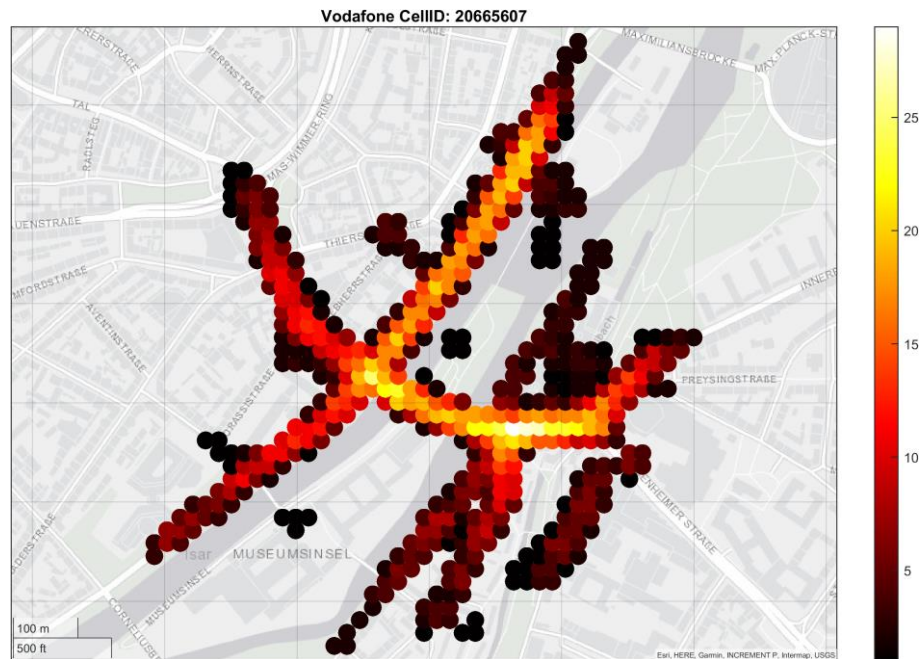


Abbildung 4-27 Anzahl verschiedener Gerätemodelle, die in die Ermittlung des Ergebnisses für den jeweiligen Punkt eingegangen ist.

4.6.2 Immissionskarten für den Großraum München

Um die Auswertungsmethode im größeren Maßstab zu erproben, wurde für die gesamten Datenpakete von München und Aachen aus allen vorliegenden Messwerten eine Immissionskarte generiert. Hierzu wurde die gesamte zu Beginn des Kapitels in Abschnitt 4.2 beschriebene Verarbeitungskette durchlaufen. Die Daten jeder der insgesamt etwa 35.000 bzw. etwa 1.100 erfassten Funkzellen aller Mobilfunkstandards, die über mindestens 10 Messwerte (nach Aus-sortieren) verfügten, wurden mithilfe der Inversen Distanzwichtung ausgewertet. Auf diese Weise wurde eine gewichtet gemittelte Signalstärke für jeden Rasterpunkt, in dessen Umgebung sich Messwerte befanden, bestimmt. Es wurde ein Raster von 20 m x 20 m gewählt, da dieses noch mit vertretbarem Rechenaufwand umsetzbar war.

Die so ermittelten Signalstärken wurden zur Vereinfachung mit einem pauschalen Faktor für alle Smartphones in Feldstärkewerte umgewandelt. Die auf das jeweilige Referenzsignal bezogenen Feldstärken wurden wiederum entsprechend dem üblichen Vorgehen bei codeselektiven Messungen auf Anlagenvollauslastung hochgerechnet. Dabei wurde angenommen, dass alle LTE-Funkzellen über zwei Antennen-Ports abgestrahlt werden und die Leistung des Referenzsignals um 3 dB gegenüber den Nutzdaten erhöht ist (RS-Boost). Als Kanalbandbreite wurden die zum Zeitpunkt der Erfassung üblichen Bandbreiten der jeweiligen Kanalfrequenzen angesetzt. Bei UMTS wurde pauschal angenommen, dass das Verhältnis der Leistung des Pilotkanals zur gesamten maximalen Kanalleistung 1/10 ist [121]. Für GSM wurde mit einem zusätzlichen Verkehrskanal (Traffic Channel) zum Pilotkanal (Broadcast Channel) gerechnet.

Die auf diese Weise hochgerechneten Feldstärken wurden auf die Grenzwerte der 26. BImSchV [133] bezogen und für jeden Rasterpunkt die Beiträge aller Funkzellen quadratisch aufsummiert. Die Ergebnisse sind für den gesamten Mobilfunk sowie für die einzelnen Mobilfunkdienste in den Abbildungen 4-28 bis 4-45 dargestellt. Für LTE wird zusätzlich eine individuelle Immissionskarte zum Immissionsbeitrag in jedem Frequenzband gezeigt. Für alle Fälle

wird sowohl eine Gesamtansicht des gesamten Gebiets sowie ein Ausschnitt, der sich auf etwas mehr als das Stadtgebiet beschränkt. Die Abbildungen 4-46 und 4-47 zeigen zusätzlich die Verteilung der Grenzwertausschöpfungsgrade, die sich aus den in den Karten dargestellten Werten ergeben.

Auf den Karten können entlang einiger Routen vor allem im ländlichen Raum Abschnitte mit höherer und niedrigerer Immission erkannt werden. Im innerstädtischen Bereich fallen die ermittelten Immissionshöhen entlang der Straßen gleichmäßiger aus und liegen insgesamt tendenziell höher als im außerstädtischen Bereich. Dies kann mit einer höheren Dichte der Funkzellen zusammenhängen. Allerdings kann dies auch an einer besseren Abdeckung aller vorhandenen Funkzellen liegen aufgrund einer höheren Nutzerdichte.

Es kann nicht notwendigerweise geschlossen werden, dass in Bereichen in denen eine geringere Exposition abgeschätzt wurde, tatsächlich eine geringere Exposition durch den Mobilfunk vorherrscht, da es möglich ist, dass weitere immissionsrelevante Funkzellen an dieser Stelle nur nicht ausreichend durch Smartphones erfasst wurden. So ist es zum Beispiel möglich, dass vor allem in ländlicheren Bereichen eine Strecke zwar mehrfach von einem Mobilfunknutzer mit seinem aufzeichnenden Smartphone passiert wurde, damit aber nur die Funkzellen des immer gleichen Anbieters aufgezeichnet wurde. Die tatsächliche Anzahl expositionsrelevanter Funkzellen an einem Ort ist im Allgemeinen nicht bekannt und kann auch nicht ohne Weiteres ermittelt werden.

Trotz dieser Unsicherheiten und weiter zu untersuchenden Fragen gibt diese Kartenansicht einen guten Eindruck davon, welche Art von Ergebnis durch ein crowdsourcingbasiertes System generiert werden kann.

Beim Vergleich der Karten der verschiedenen LTE-Frequenzbänder fällt auf, dass sich zum Teil sehr unterschiedliche Abdeckungsbereiche ergeben. So ist etwa das 2600 MHz-Band fast ausschließlich im städtischen Bereich aber nicht in der ländlicheren Umgebung anzutreffen. Dies ist aufgrund der kürzeren Reichweite in diesem Frequenzband und der daher bevorzugten Nutzung zur Schaffung zusätzlicher Kapazitäten über geringere Distanzen hinweg in Ballungsgebieten in dieser Form zu erwarten. Die Bänder bei 800 MHz und 1800 MHz sind hingegen verstärkt auch außerhalb des städtischen Bereichs vorhanden. Das 2100 MHz zum Teil ebenso. Beim 800 MHz-Band sticht hervor, dass die Abdeckung im städtischen verhältnismäßig dünn ist gegenüber den übrigen Bändern, abgesehen vom 900 MHz-Band, das ohnehin nur sehr lückenhaft erfasst ist, da es bislang auch nicht so stark für LTE genutzt wurde. Dies könnte vor allem daraus resultieren, dass die niedrigen Frequenzbänder aufgrund der besseren Durchdringung von Gebäudewänden bevorzugt für die Indoor-Versorgung genutzt werden, wenn ein Empfang in den höheren Frequenzbändern nicht möglich ist. Dadurch sind die Smartphones bei der Datenaufzeichnung, die nur bei GPS-Empfang geschieht, nur selten mit einer Funkzelle bei niedrigen Frequenzen verbunden. Trotz der Abhängigkeit von diesen Netzauslastungsstrategien der Betreiber, geben die Immissionskarten der LTE-Bänder einen nützlichen Einblick in die unterschiedliche Verteilung der Immission und die gebietsabhängigen unterschiedlichen Beiträge zur Gesamtmission.

Bei UMTS zeigt sich ebenfalls eine Konzentration auf das Stadtgebiet. Allerdings sind auch im ländlichen Bereich vielerorts einzelne Punkte zu erkennen, für die ein Immissionswert ermittelt wurde. Es liegt also nahe, dass die Immission in der Fläche nur unzureichend erfasst wurde,

obwohl auch dort eine UMTS-Versorgung vorlag. Noch gravierender fällt bei der Betrachtung der Auswertung für GSM die unzureichende Erfassung der Immission auf. Bis auf wenige Strecken ist im gesamten Untersuchungsgebiet die Abdeckung nur bruchstückhaft vorhanden. Hinzu kommt, dass auch in den Bereichen mit einer Immissionsauswertung davon auszugehen ist, dass nicht die gesamte Immission, sondern womöglich nur eine einzige Funkzelle enthalten ist. Auf Grundlage des vorliegenden Datenbestandes ist dementsprechend für GSM offenbar keine sinnvolle Abschätzung der Immission möglich, auch nicht in Teilbereichen. Bei UMTS hingegen könnten zumindest in den besser abgedeckten Innenstadtbereichen die wesentlichen Immissionsbeiträge registriert worden sein.

Um die auf diese Weise aus den Smartphone-Messungen ermittelten Immissionsdaten zumindest punktuell mit der tatsächlich vorherrschenden Immission vergleichen zu können, wurden Validierungsmessungen während der Datenerhebungsphase im Untersuchungsgebiet vorgenommen. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4.8 vorgestellt.

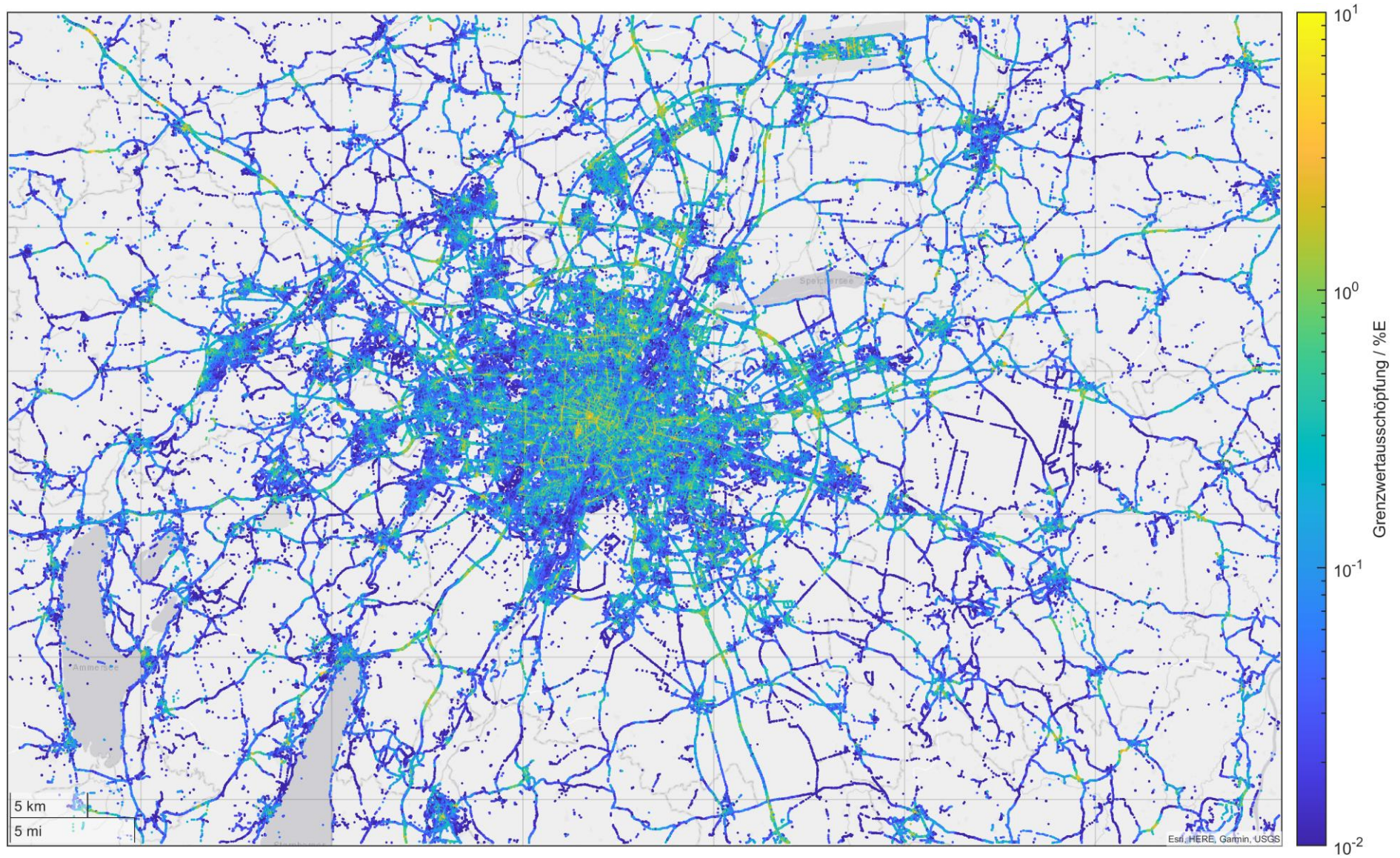


Abbildung 4-28 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des gesamten Mobilfunk-Downlinks für den Großraum München

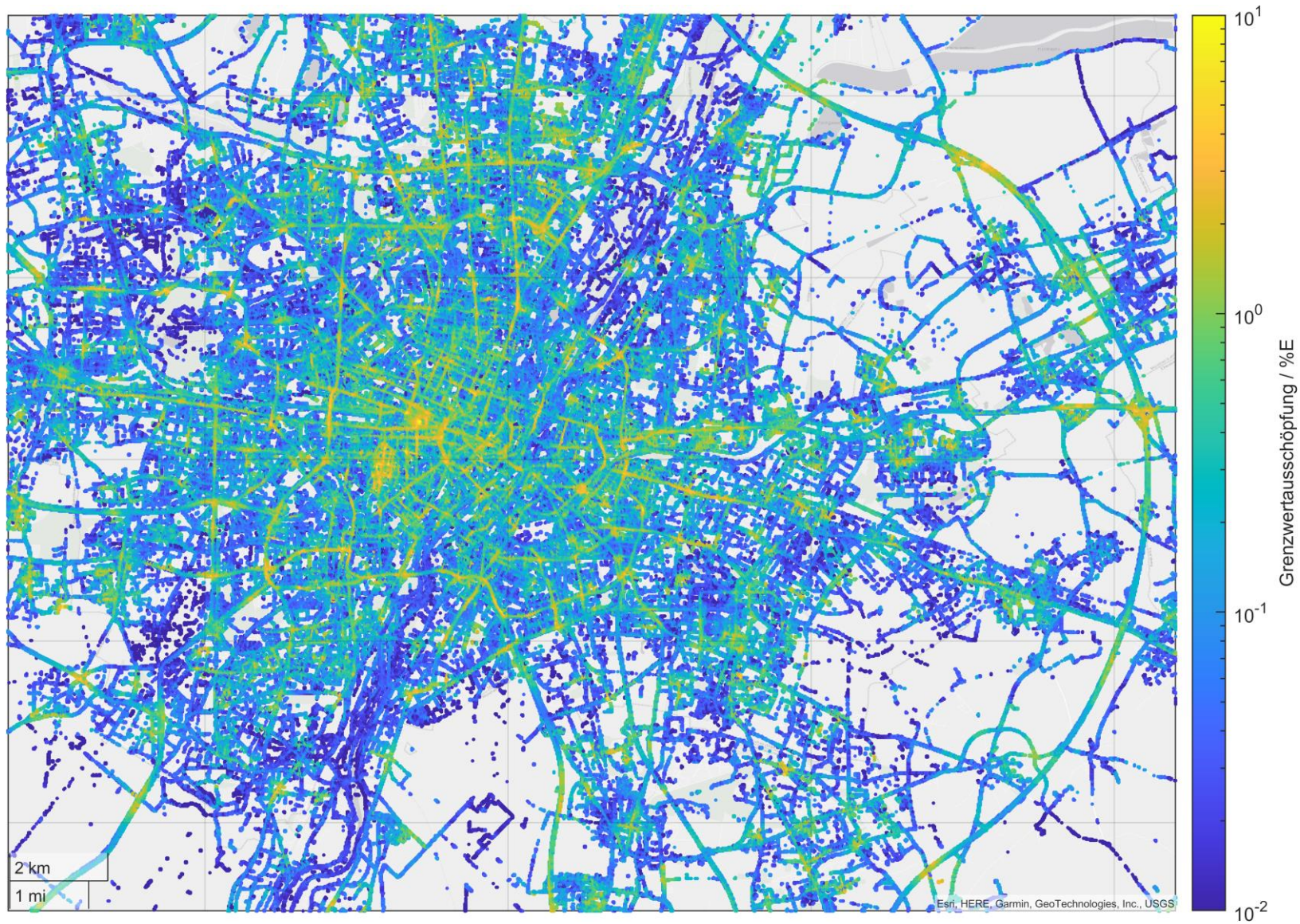


Abbildung 4-29 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des gesamten Mobilfunk-Downlinks für den Großraum München

München | LTE | Alle Frequenzbänder

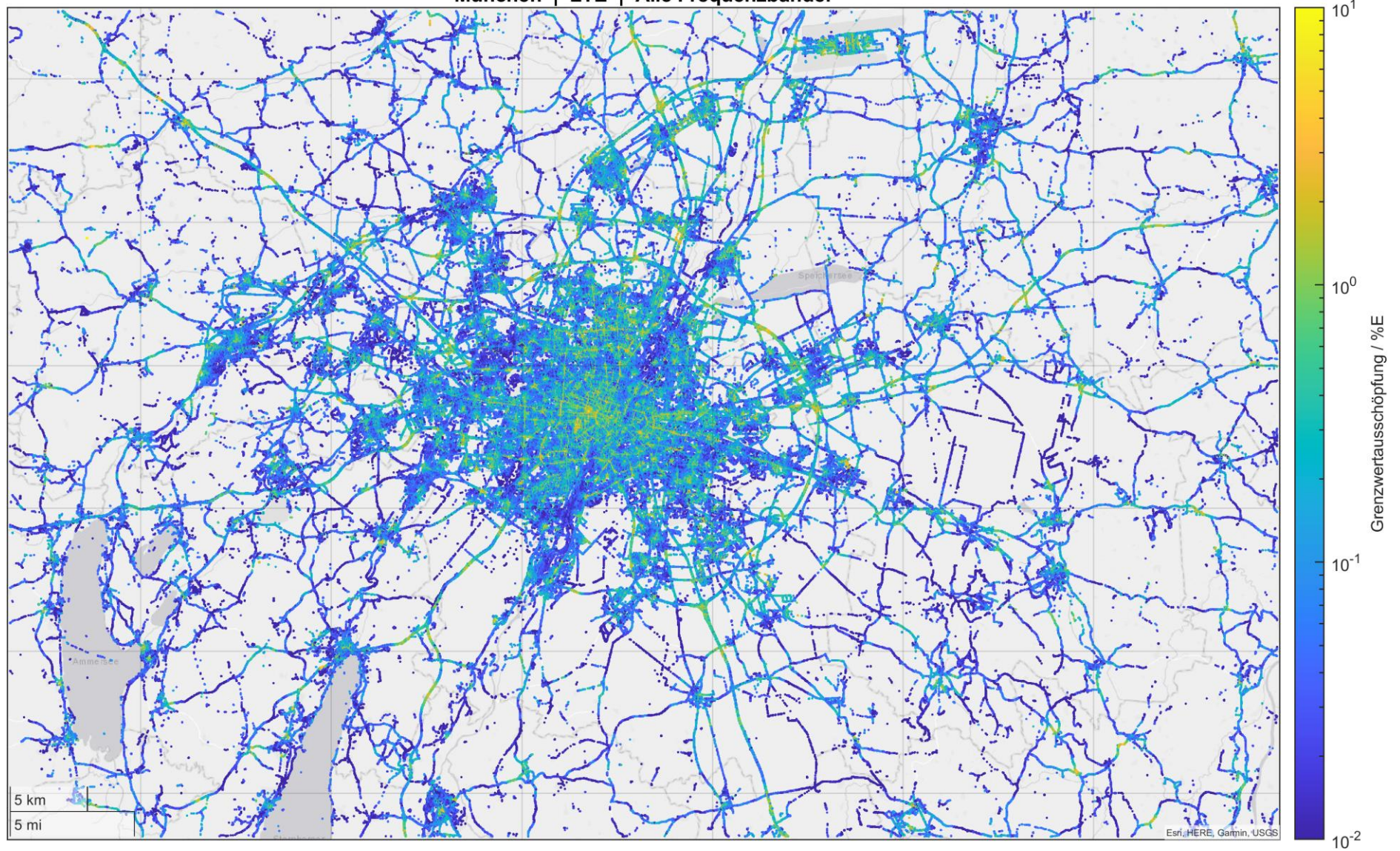


Abbildung 4-30 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des gesamten LTE-Downlinks für den Großraum München

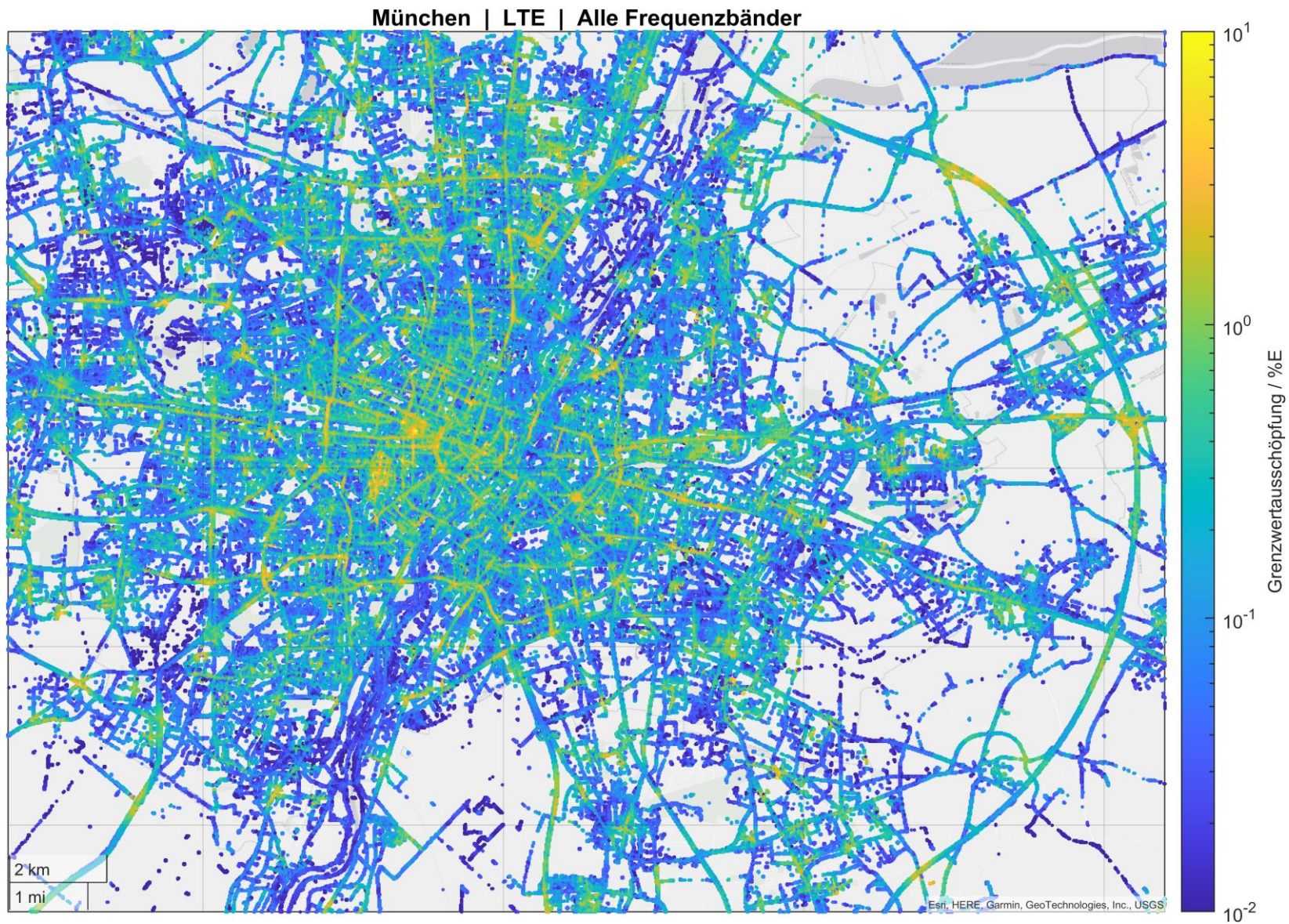


Abbildung 4-31 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des gesamten LTE-Downlinks für den Großraum München

München | LTE | 800 MHz-Band

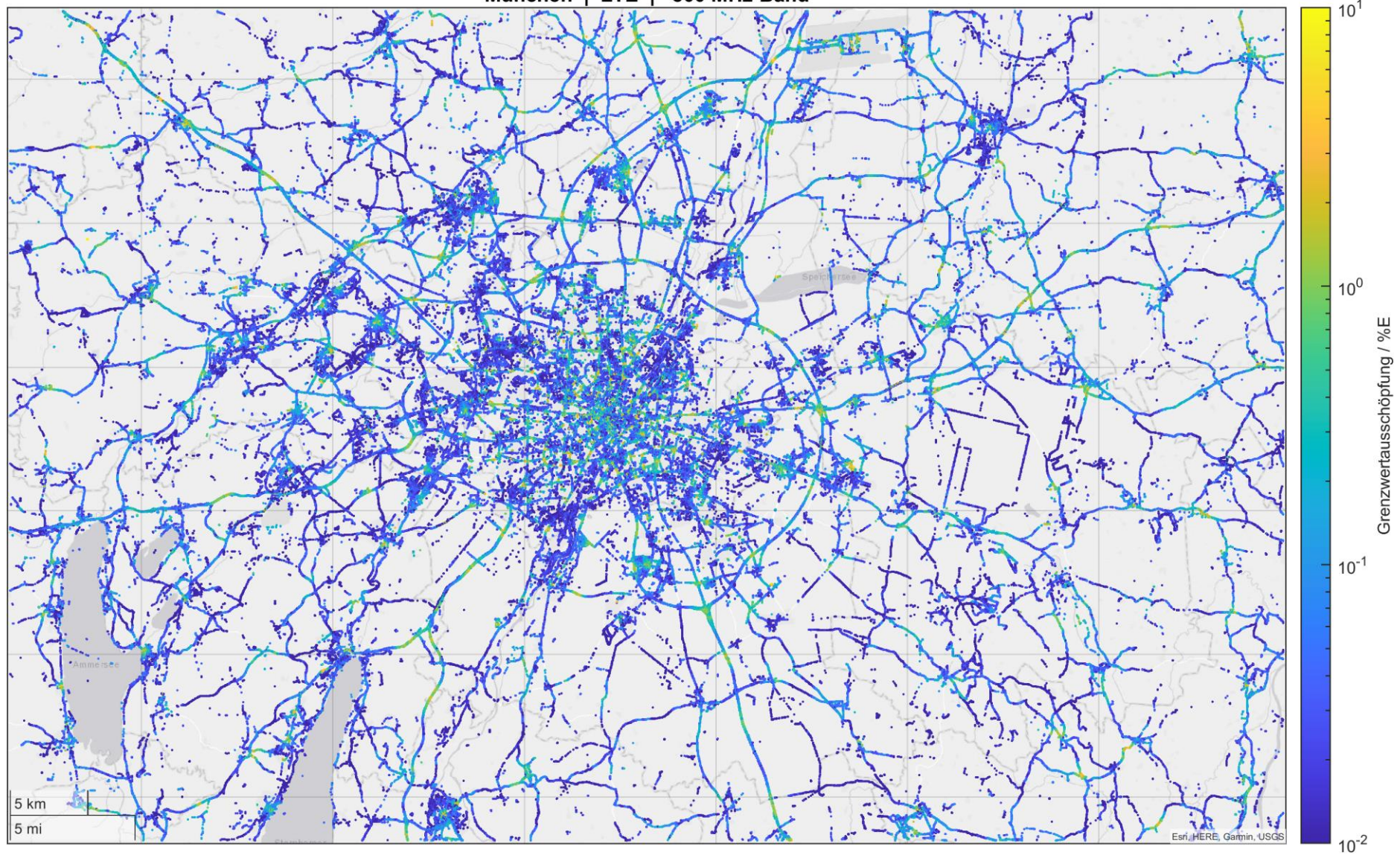


Abbildung 4-32 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 800 MHz-Band für den Großraum München

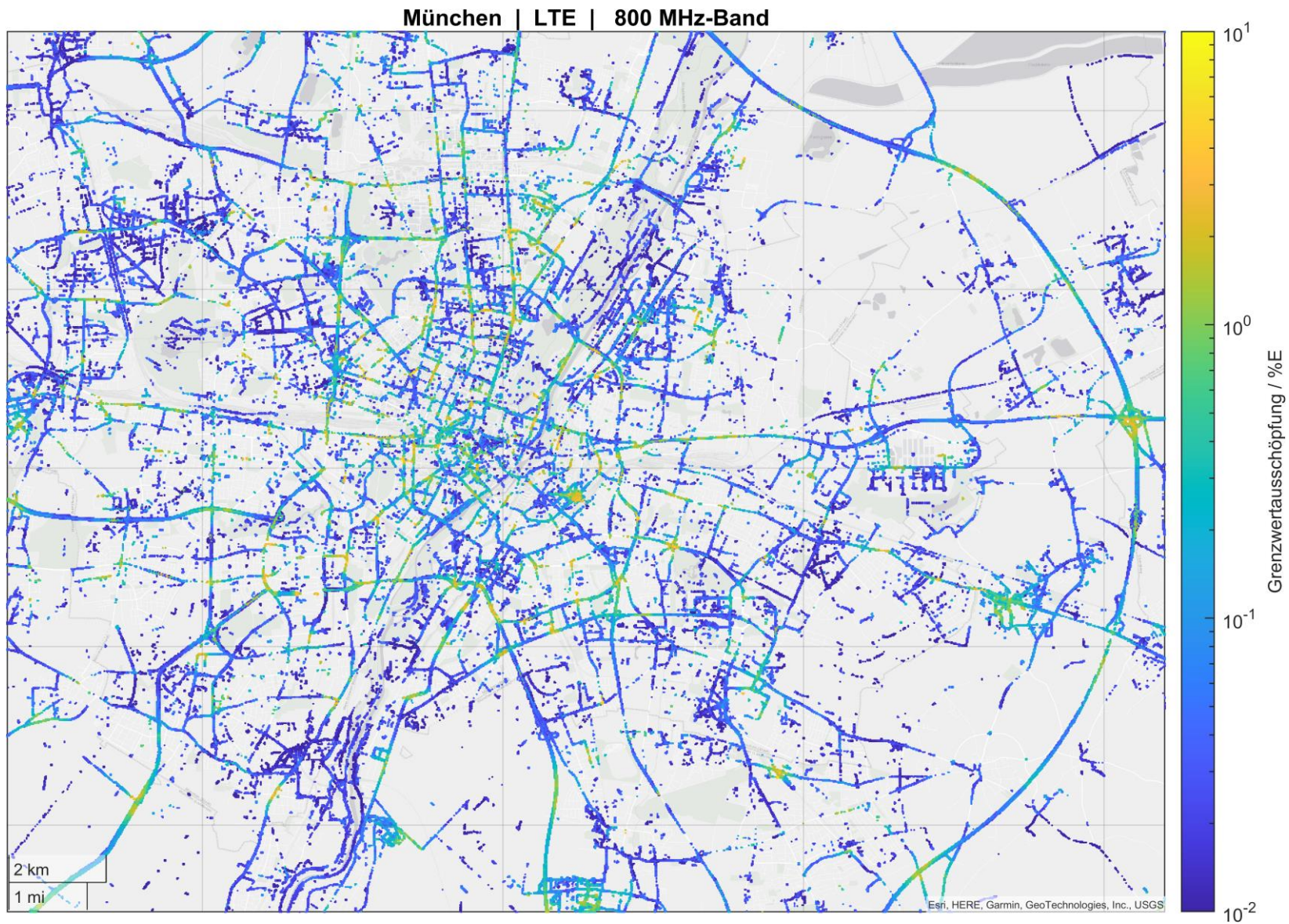


Abbildung 4-33 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 800 MHz-Band für den Großraum München

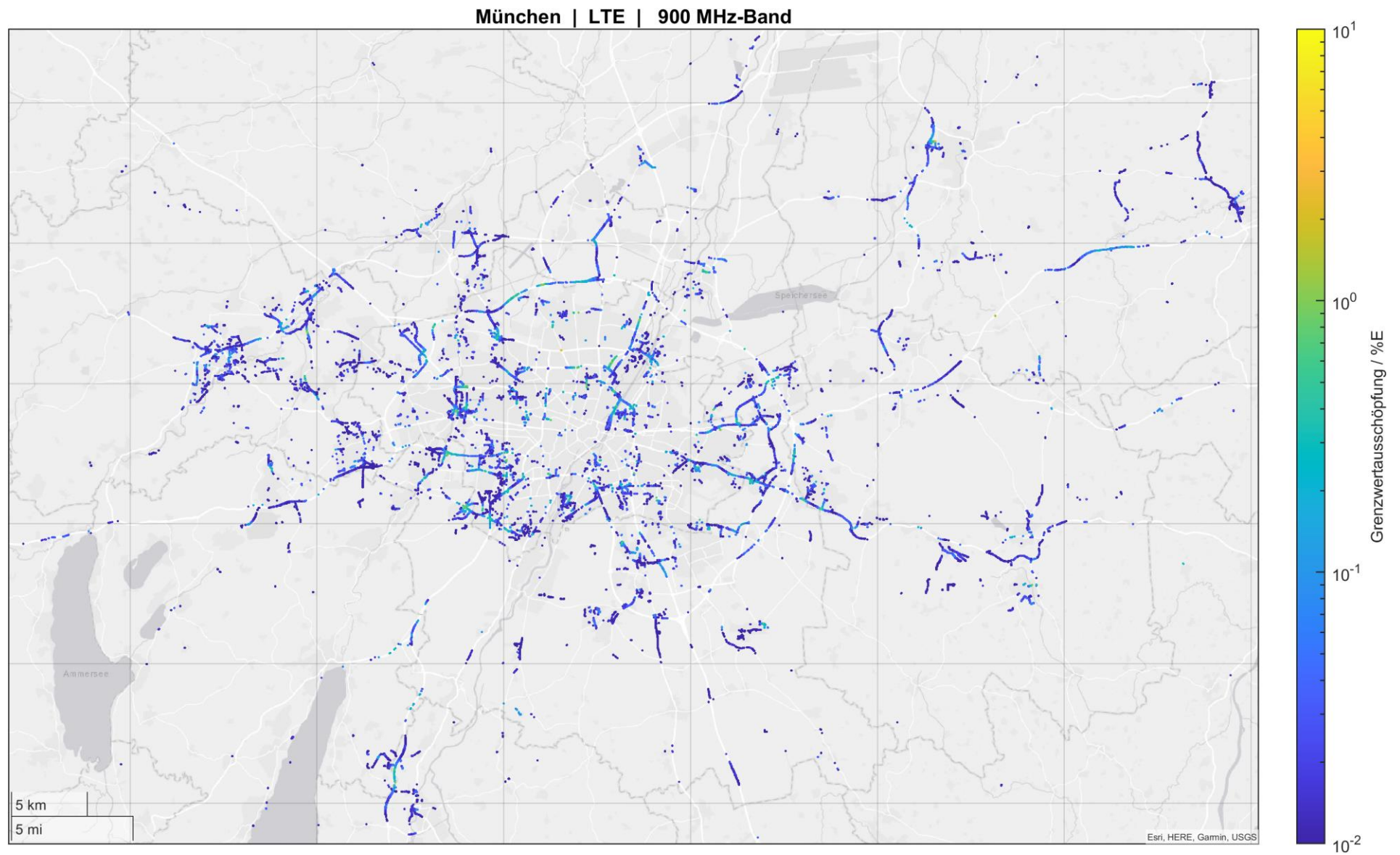


Abbildung 4-34 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 900 MHz-Band für den Großraum München

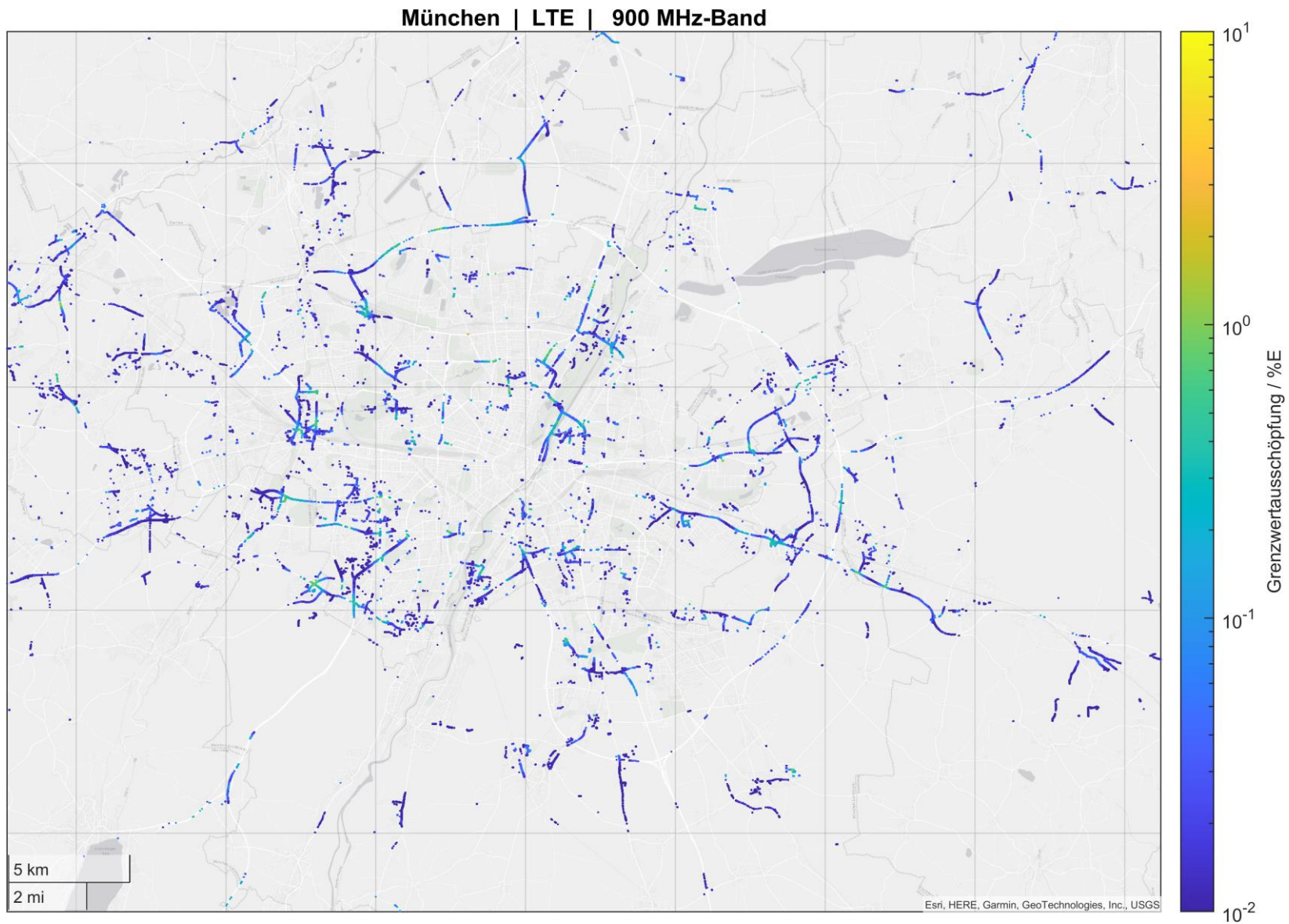


Abbildung 4-35 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 900 MHz-Band für den Großraum München

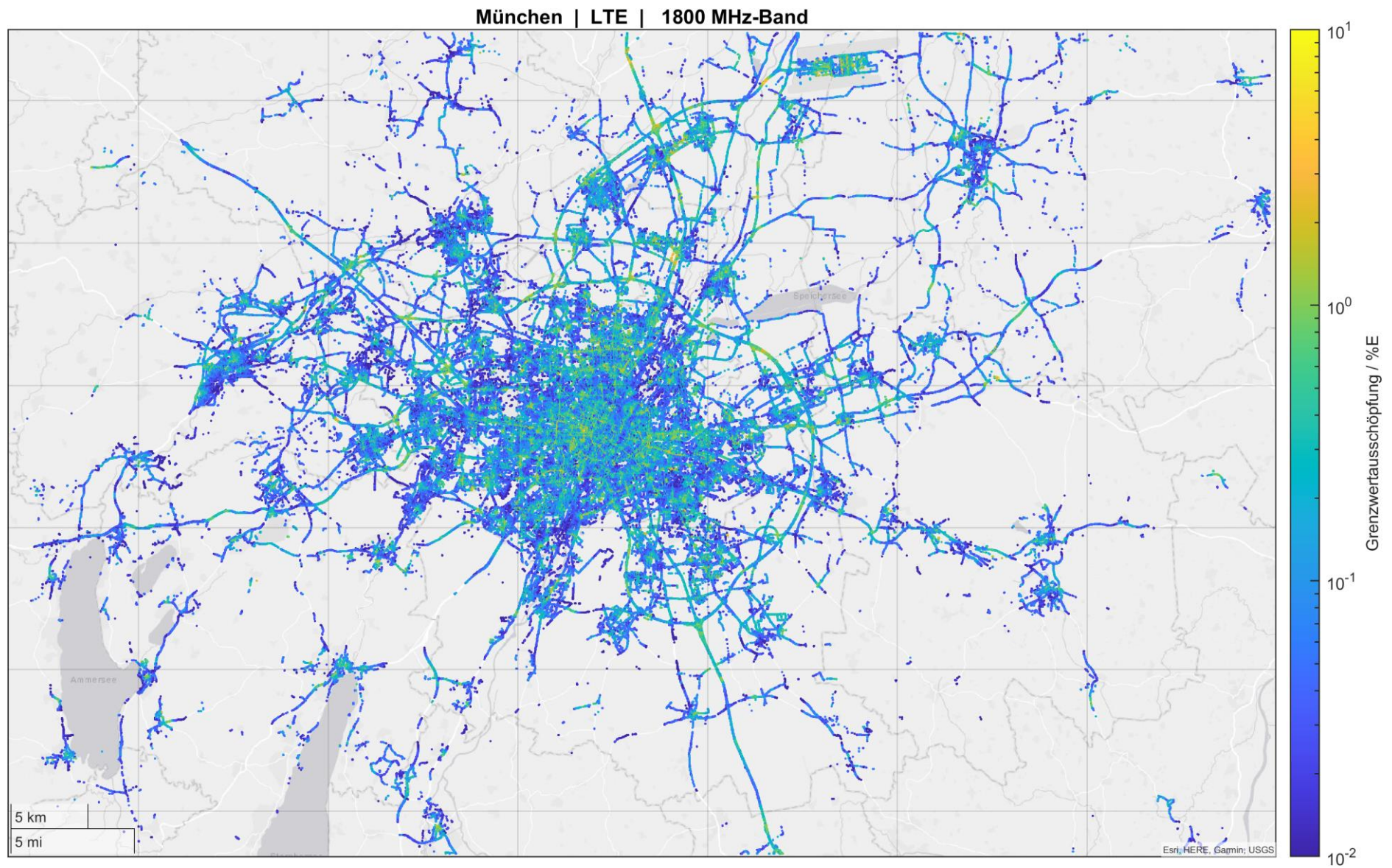


Abbildung 4-36 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 1800 MHz-Band für den Großraum München

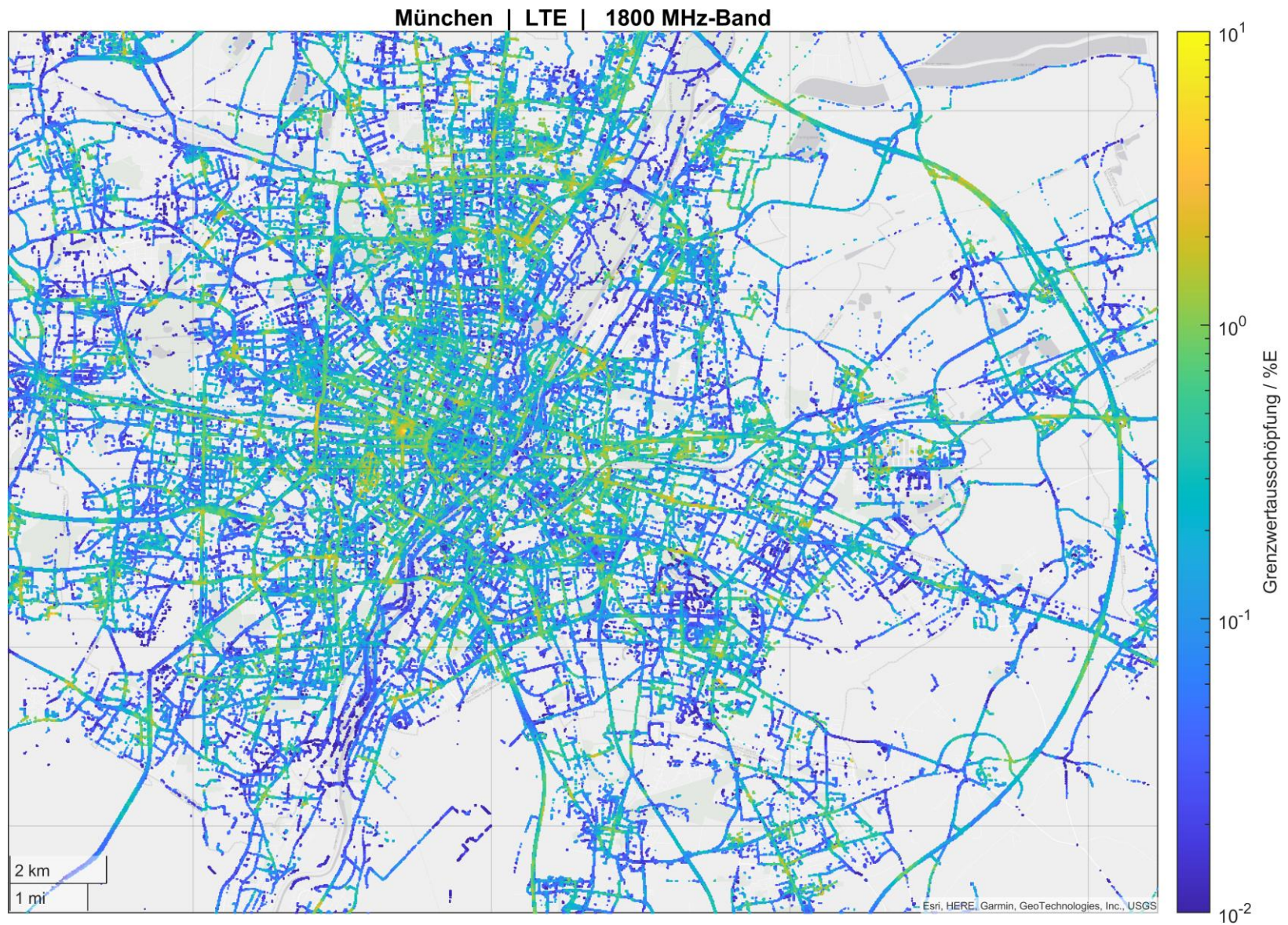


Abbildung 4-37 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 1800 MHz-Band für den Großraum München

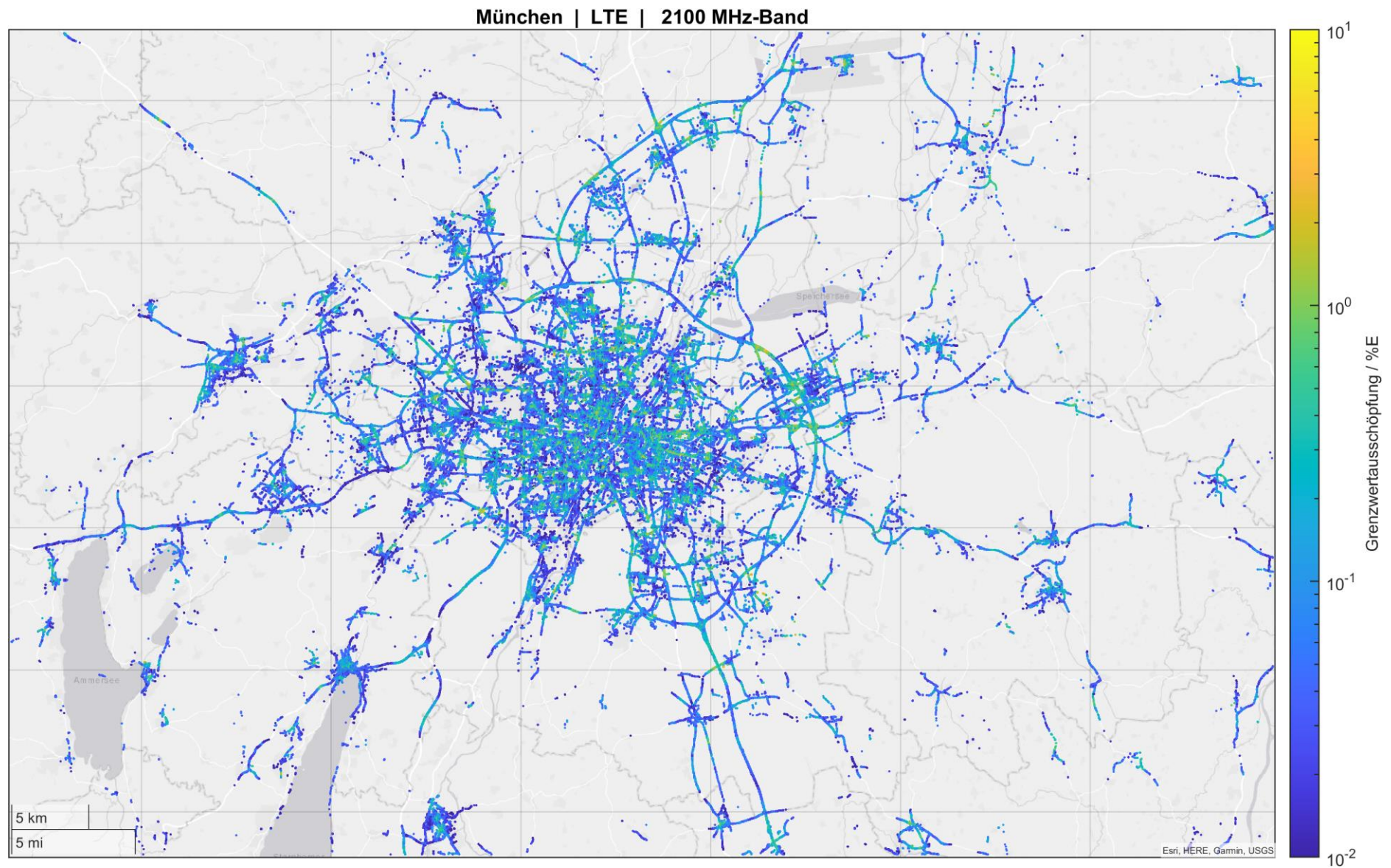


Abbildung 4-38 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 2100 MHz-Band für den Großraum München

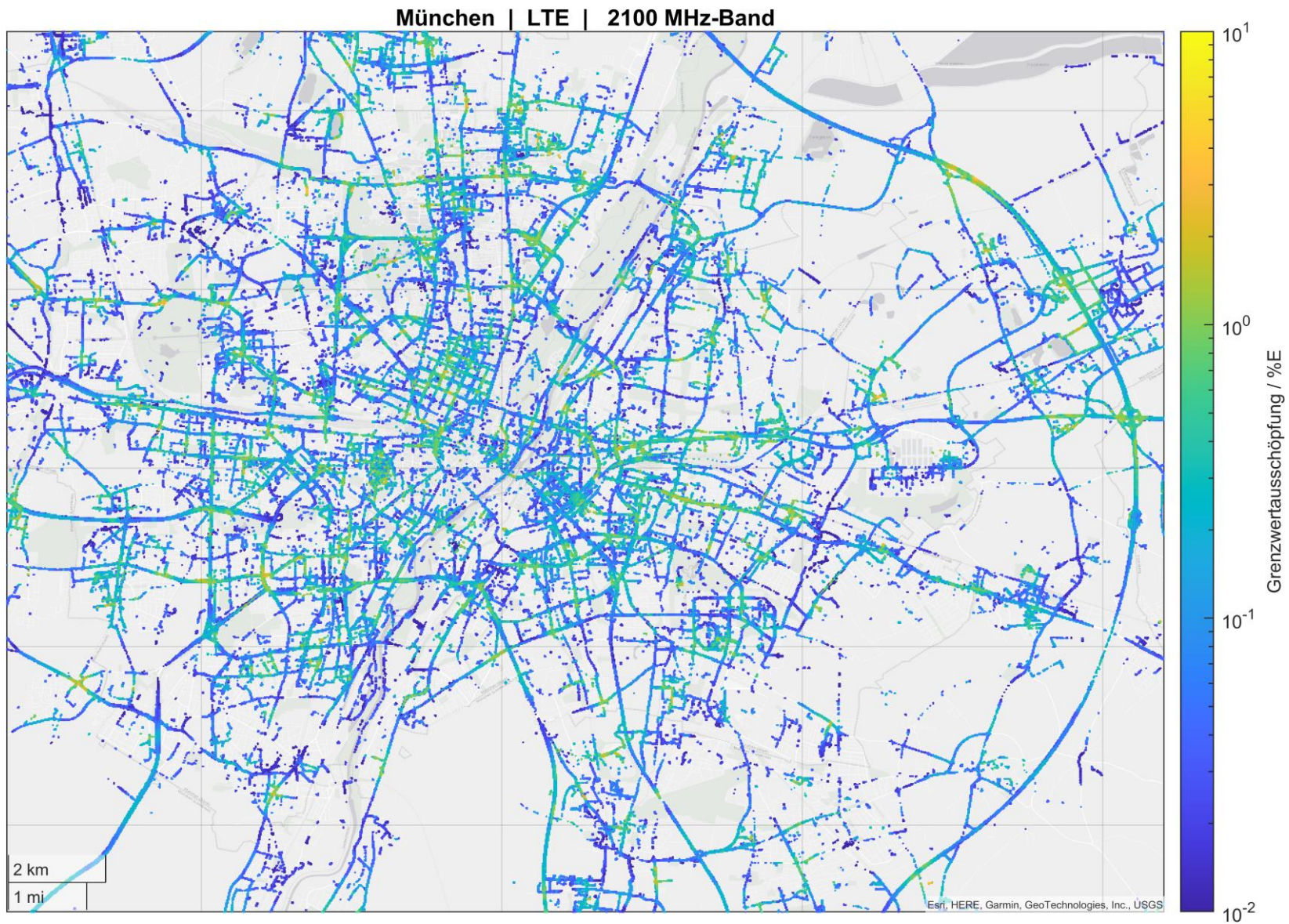


Abbildung 4-39 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 2100 MHz-Band für den Großraum München

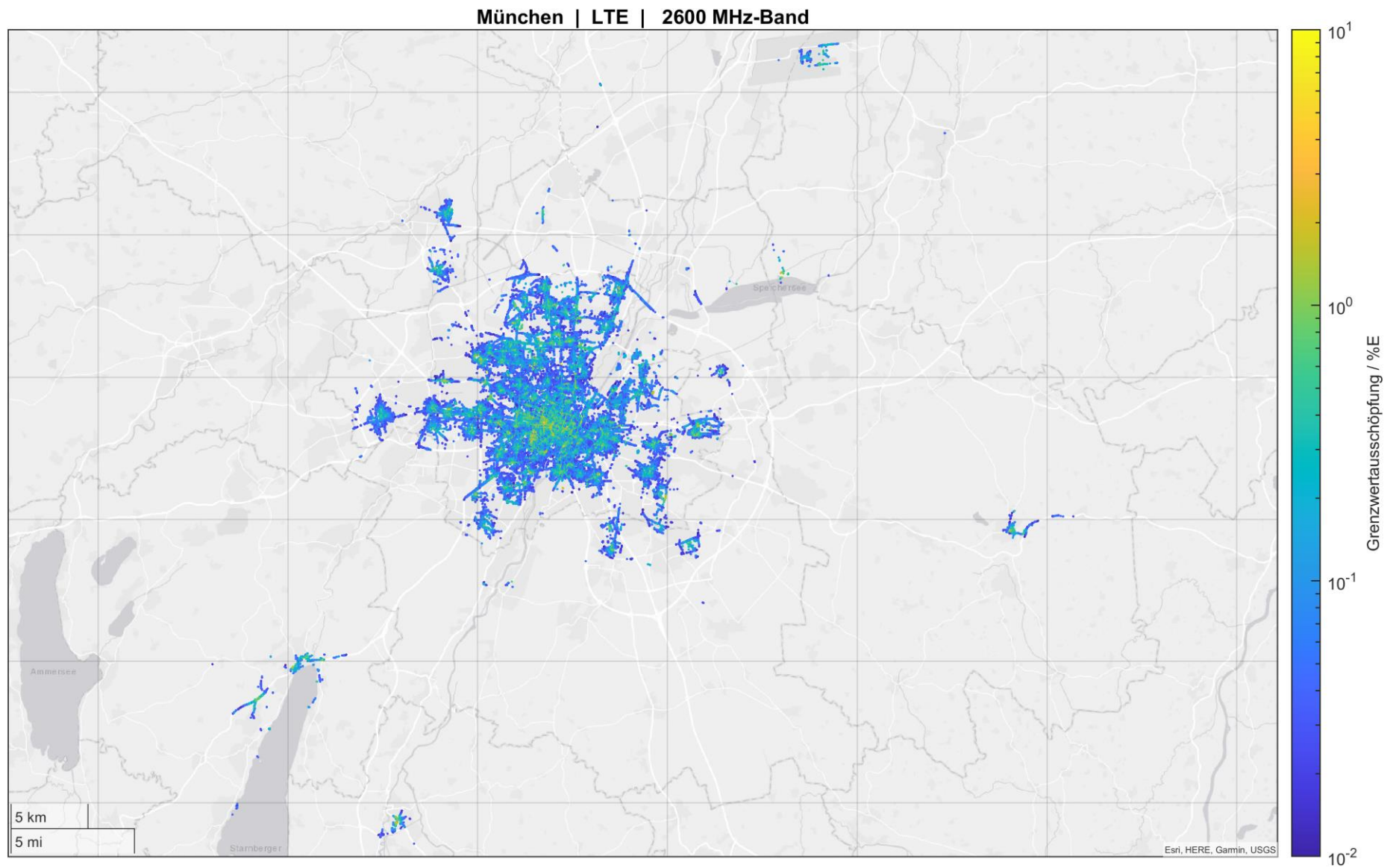


Abbildung 4-40 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 2600 MHz-Band für den Großraum München

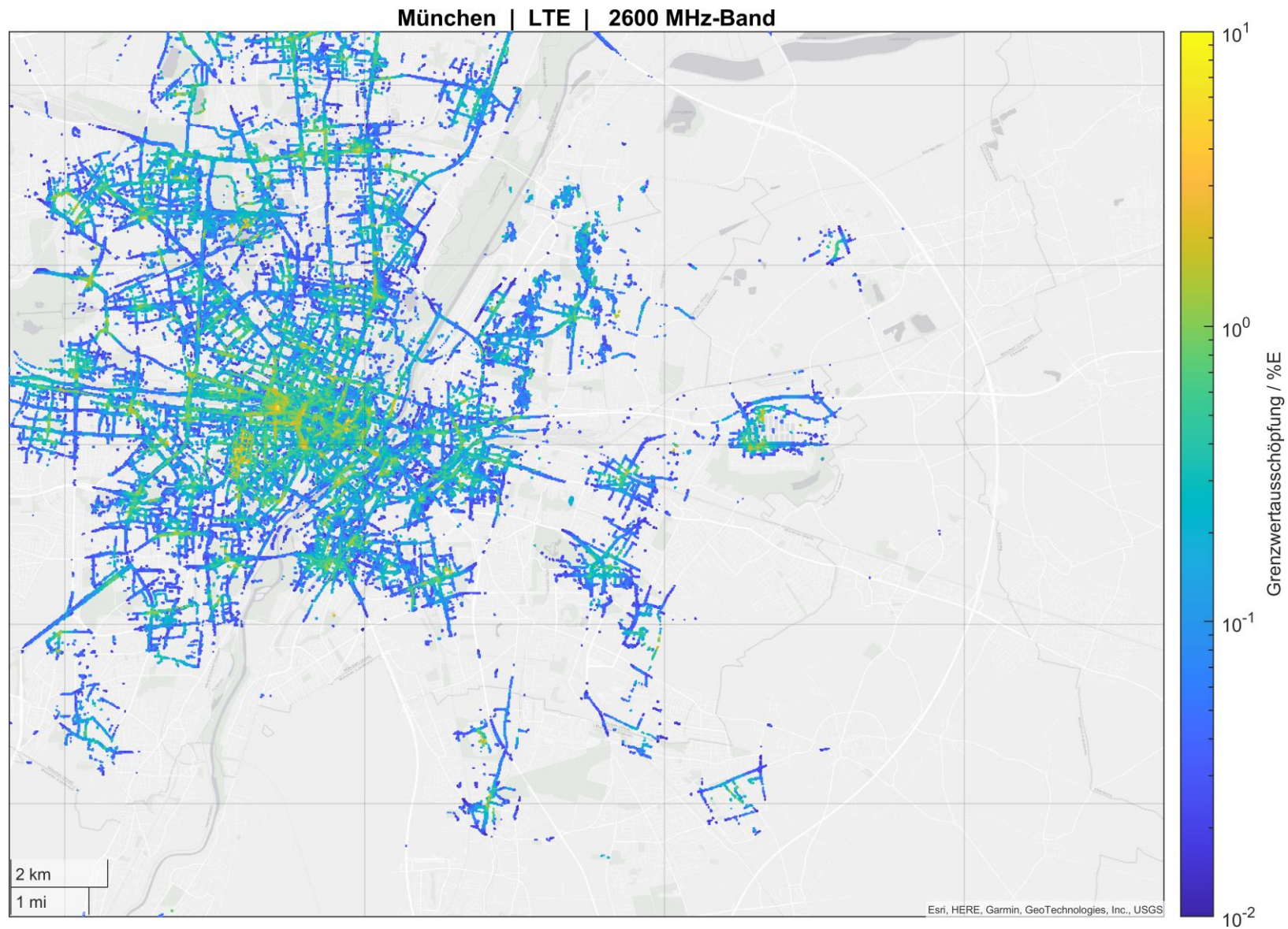


Abbildung 4-41 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Daten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks im 2600 MHz-Band für den Großraum München

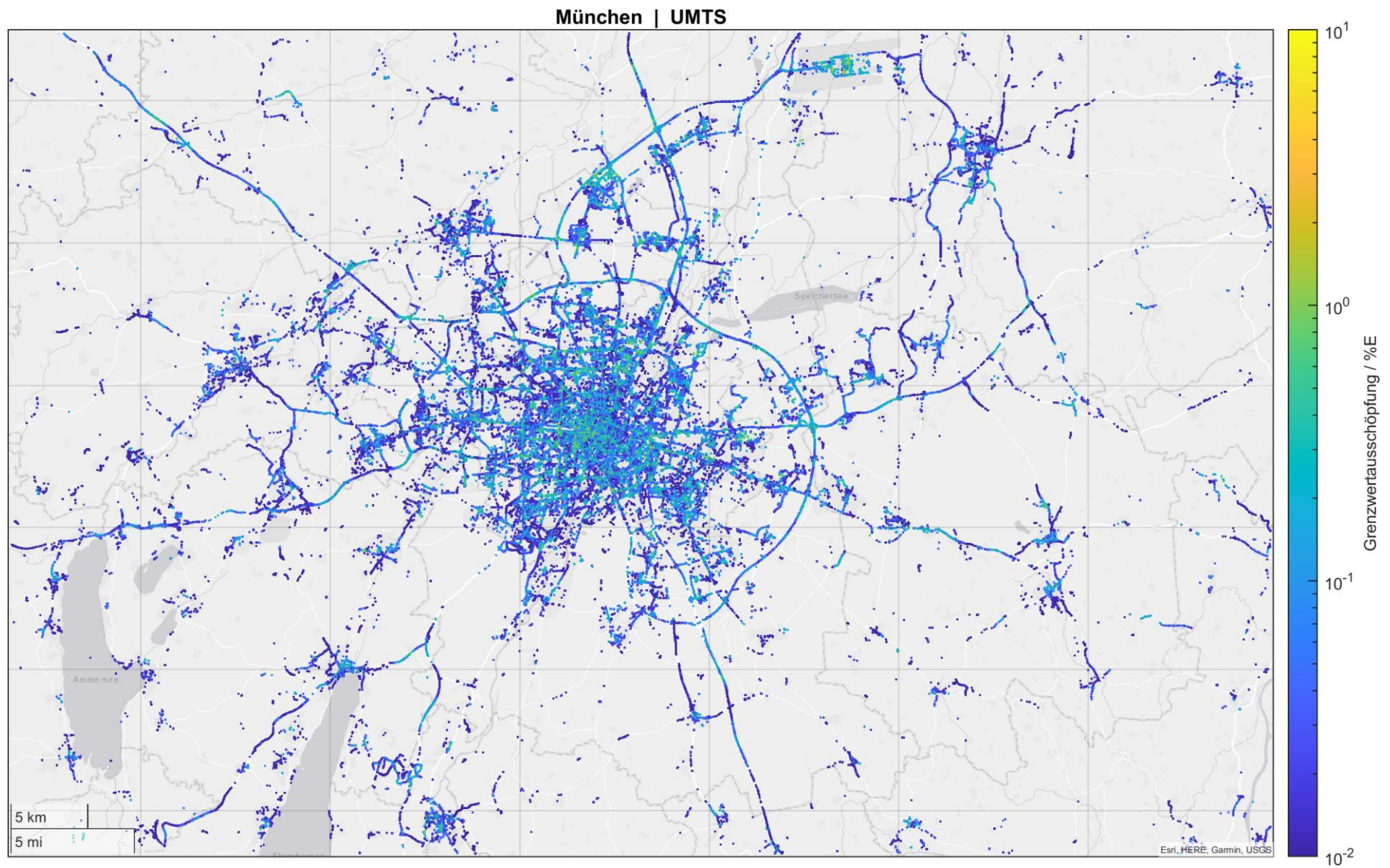


Abbildung 4-42 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des UMTS-Downlinks für den Großraum München

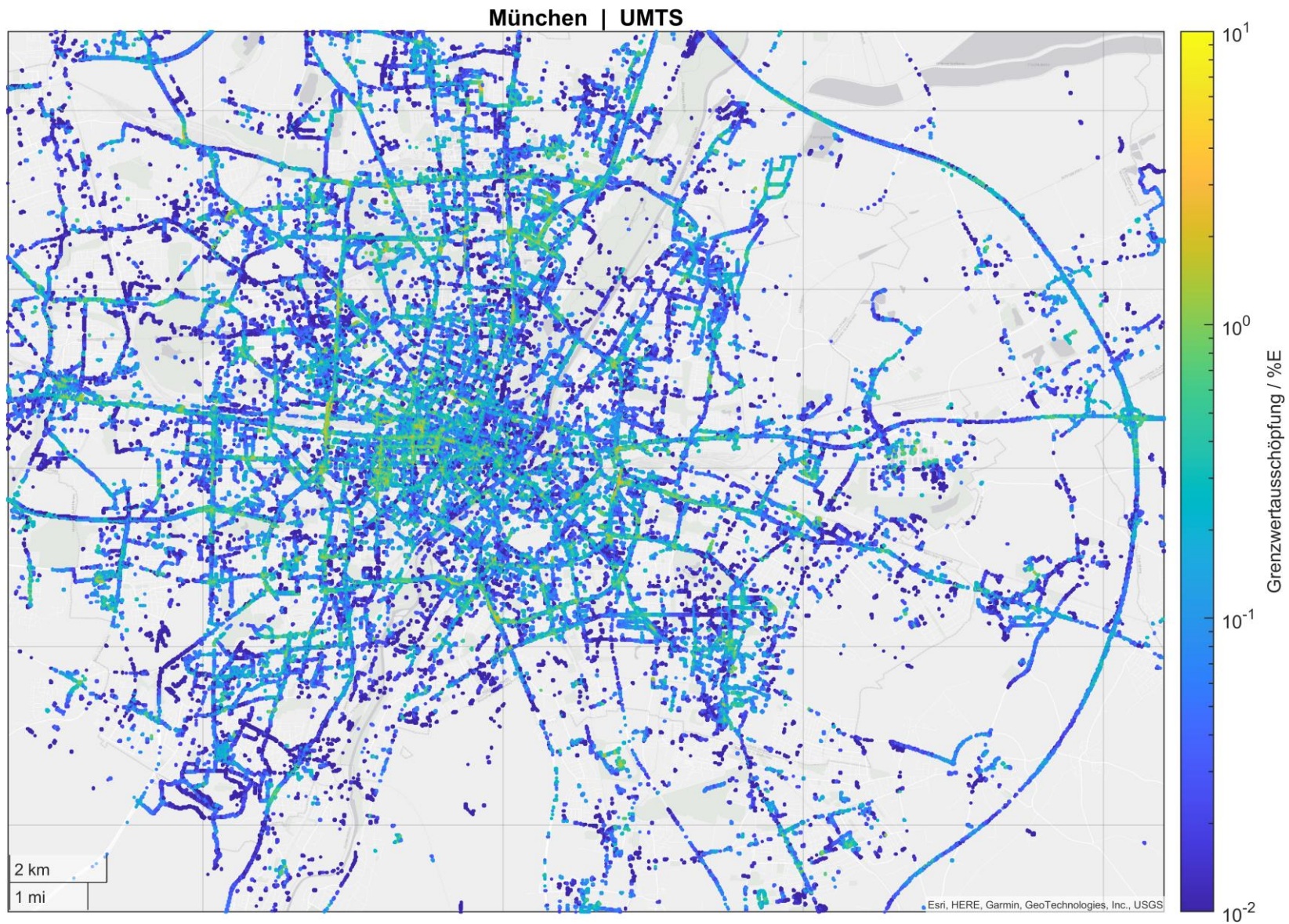


Abbildung 4-43 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des UMTS-Downlinks für den Großraum München

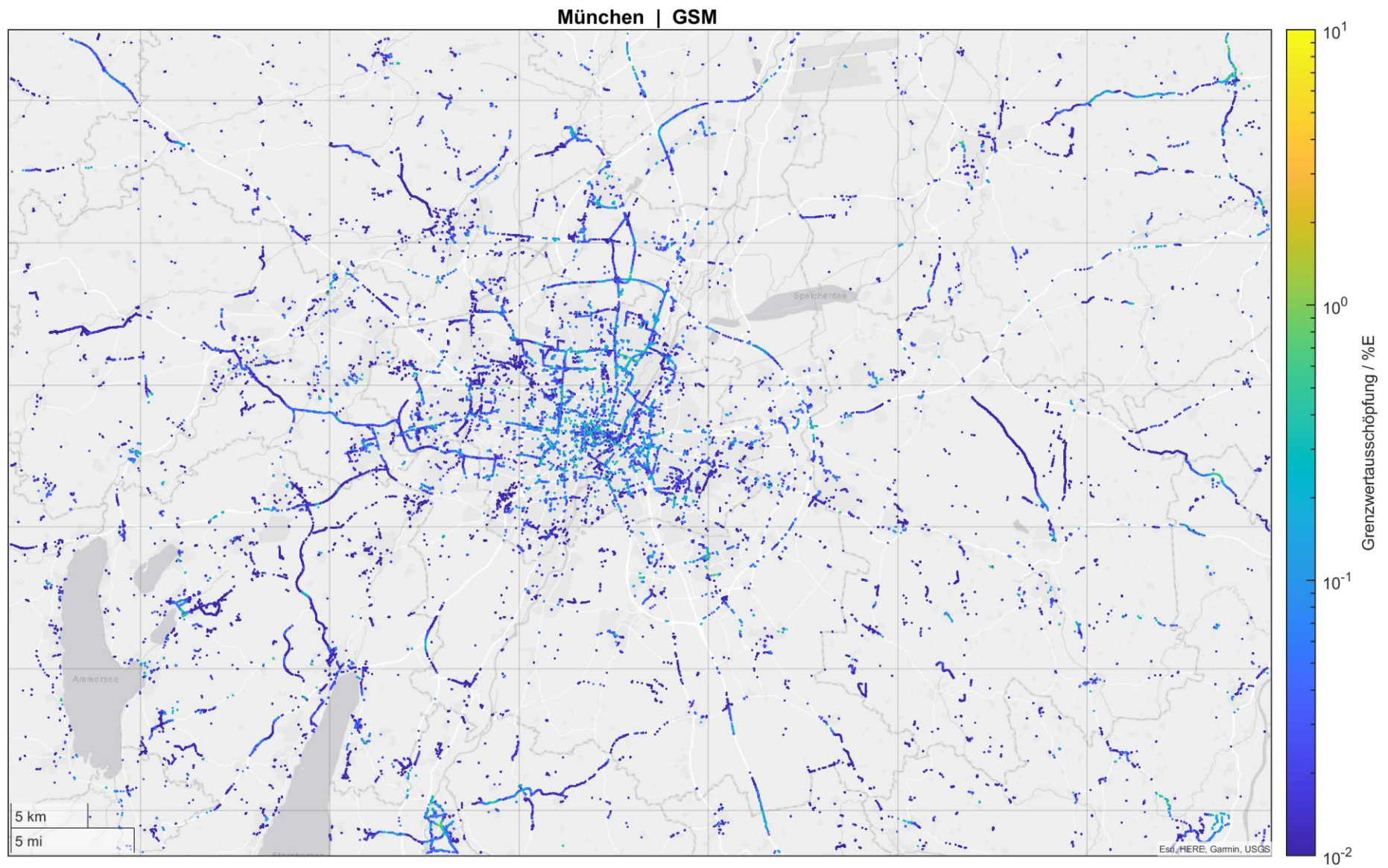


Abbildung 4-44 Gesamtkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des GSM-Downlinks für den Großraum München

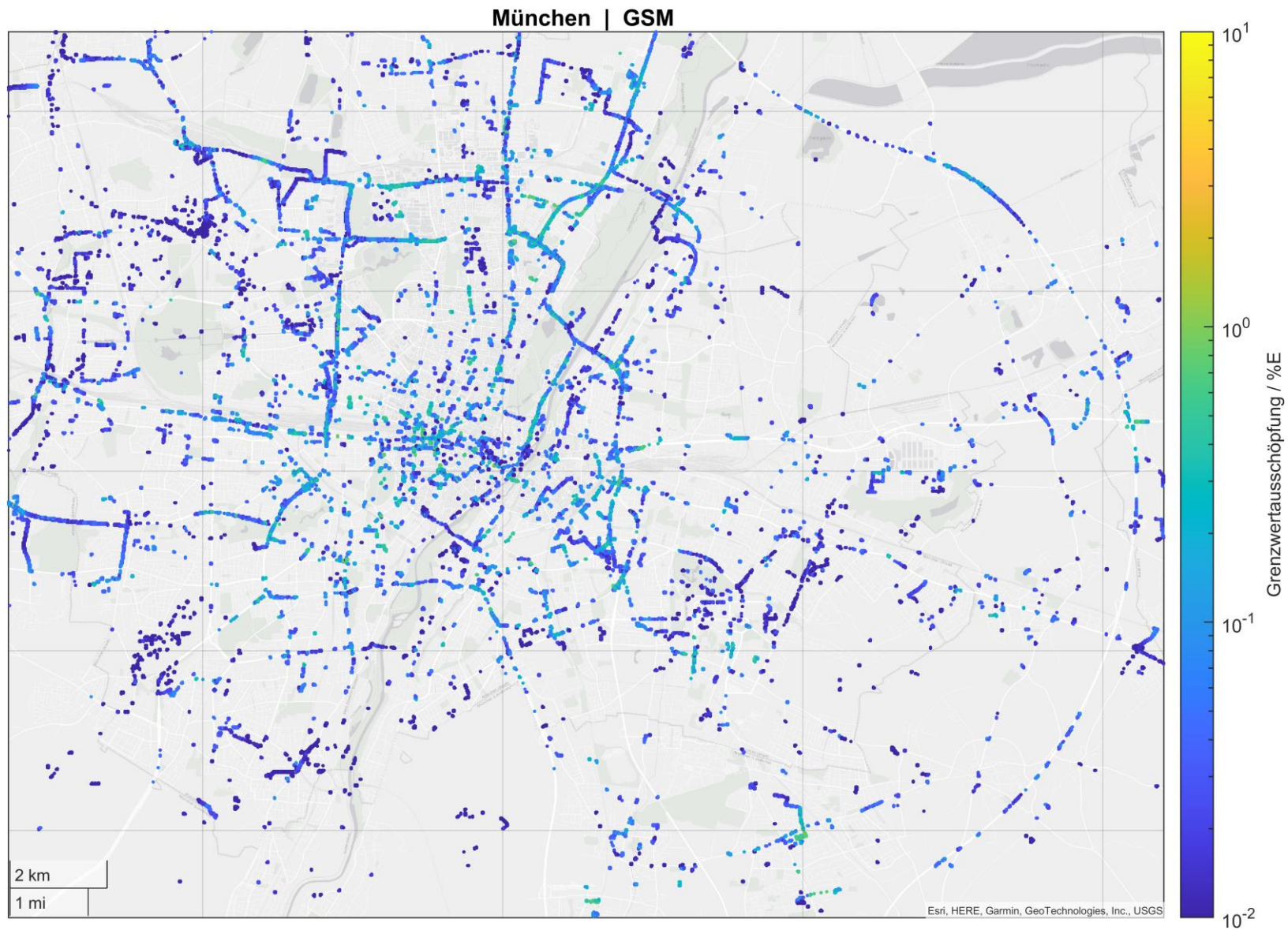


Abbildung 4-45 Teilkartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des GSM-Downlinks für den Großraum München

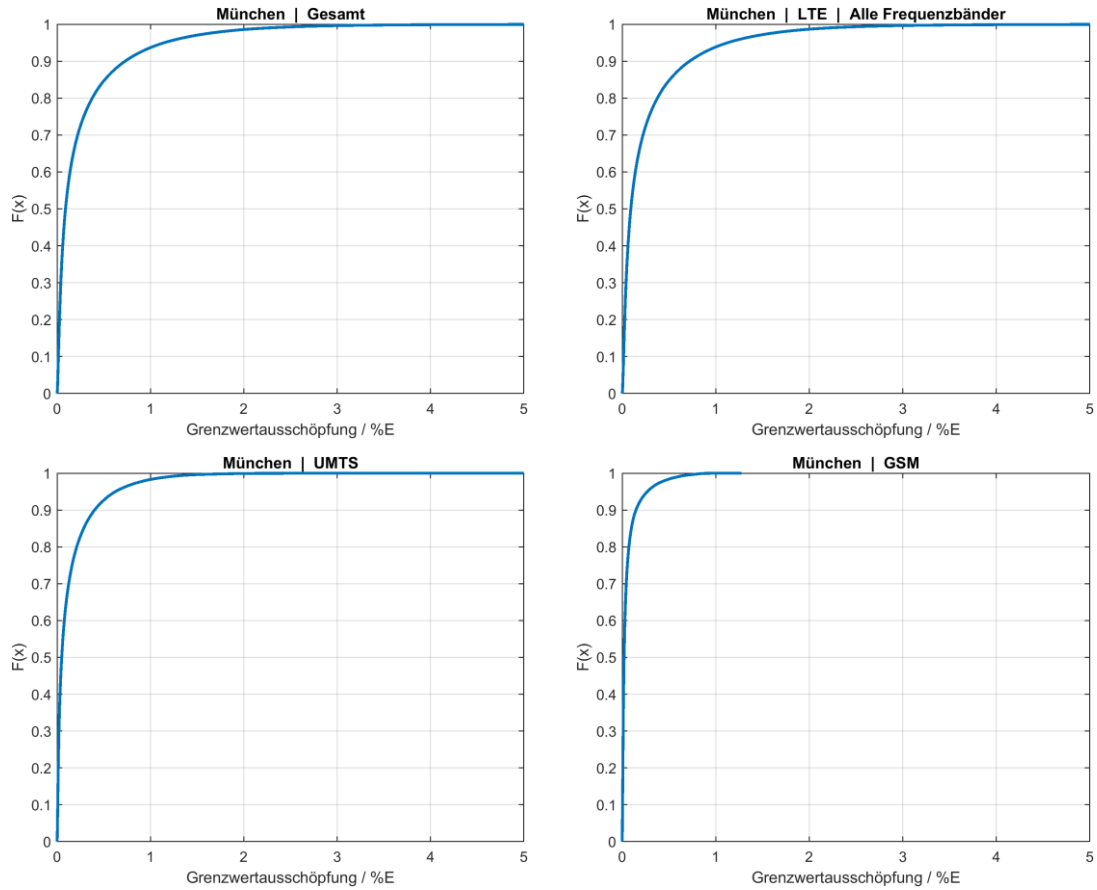


Abbildung 4-46 Verteilungen der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten maximalen Grenzwertausschöpfungen des Mobilfunk-Downlinks für die verschiedenen Mobilfunkgenerationen im Großraum München

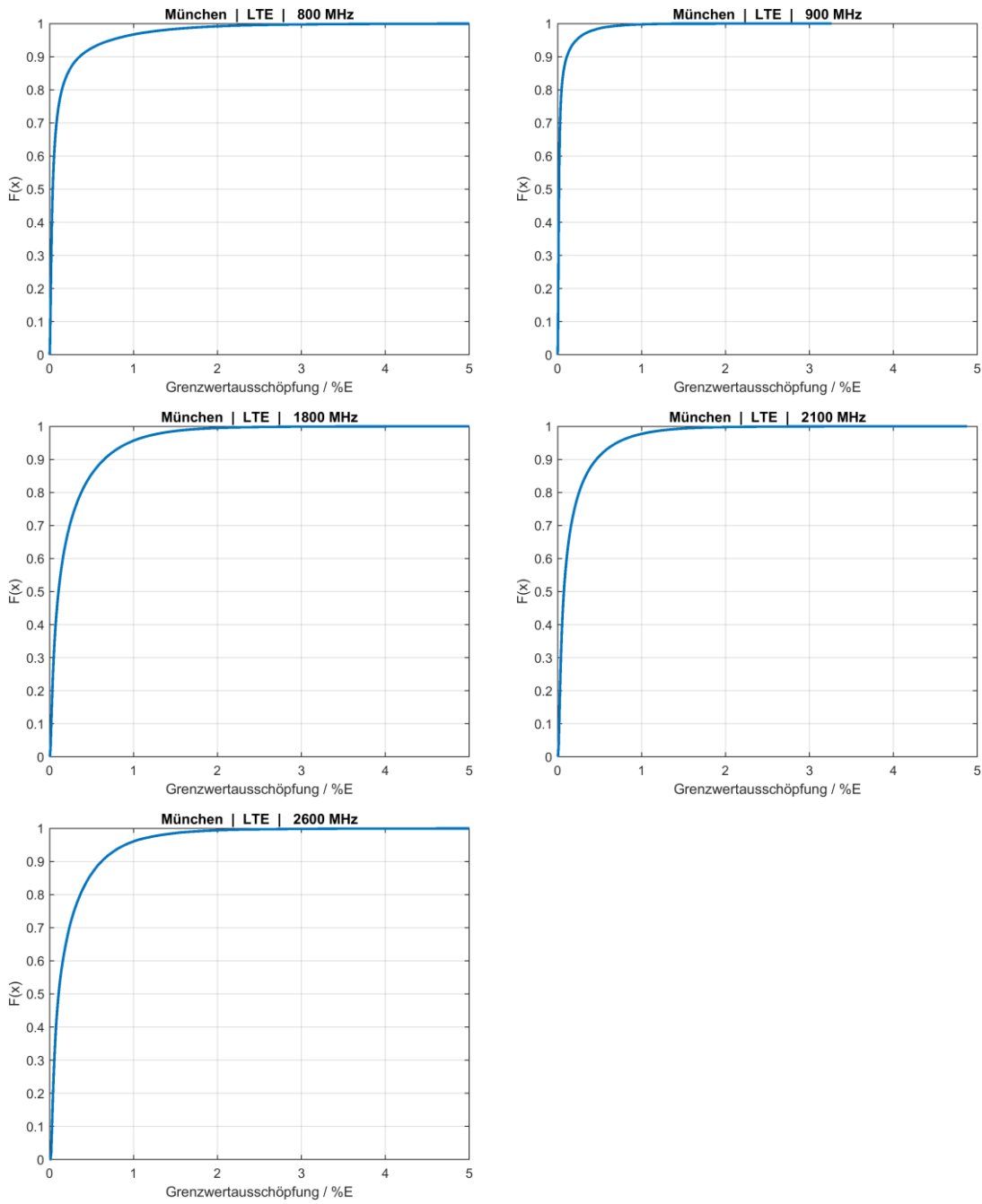


Abbildung 4-47 Verteilungen der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten maximalen Grenzwerterauschöpfungen des Mobilfunk-Downlinks für die verschiedenen LTE-Frequenzbänder im Großraum München

4.6.3 Immissionskarten für das Stadtgebiet Aachen

Die Immissionskarten für Aachen wurden nach dem gleichen Prinzip erstellt, wie es bereits für den Großraum München demonstriert wurde. Die Abbildungen 4-48 und 4-49 enthalten die Kartenansichten für die Gesamtimmission sowie die einzelnen Funkdienste und LTE-Bänder. Die Abbildungen 4-50 und 4-51 zeigen wieder die Verteilung der Grenzwertausschöpfungsgrade, die sich aus den in den Karten dargestellten Werten ergeben.

Hierbei ergibt sich wie bereits bei Darstellung der Verteilung der Messwerte in der Fläche (vgl. Abschnitt 4.4.3) festgestellt, eine unzureichende Abdeckung. Für UMTS und GSM konnten fast keine Immissionswerte ermittelt werden. Aber auch bei LTE zeigt sich bei Betrachtung der Karten der einzelnen Frequenzbänder eine über weite Strecken nur bruchstückhafte Erfassung. Das 900 MHz kam praktisch nicht vor und ist an dieser Stelle daher ausgespart worden.

Die dargestellten Immissionshöhen repräsentieren demnach nur einen Teil der tatsächlichen Immissionen und unterschätzen die Gesamtimmission sehr wahrscheinlich selbst in vielen Bereichen für die ein Immissionswert bestimmt wurde deutlich. Der Betrachtungszeitraum von nur einem Monat ist offensichtlich selbst für den am besten erfassten Standard LTE nicht ausreichend, um genügend Messdaten zu erhalten.

Auch im Stadtgebiet Aachen wurden Vergleichsmessungen durchgeführt, die weiteren Aufschluss über den Grad der Unterschätzung geben können.

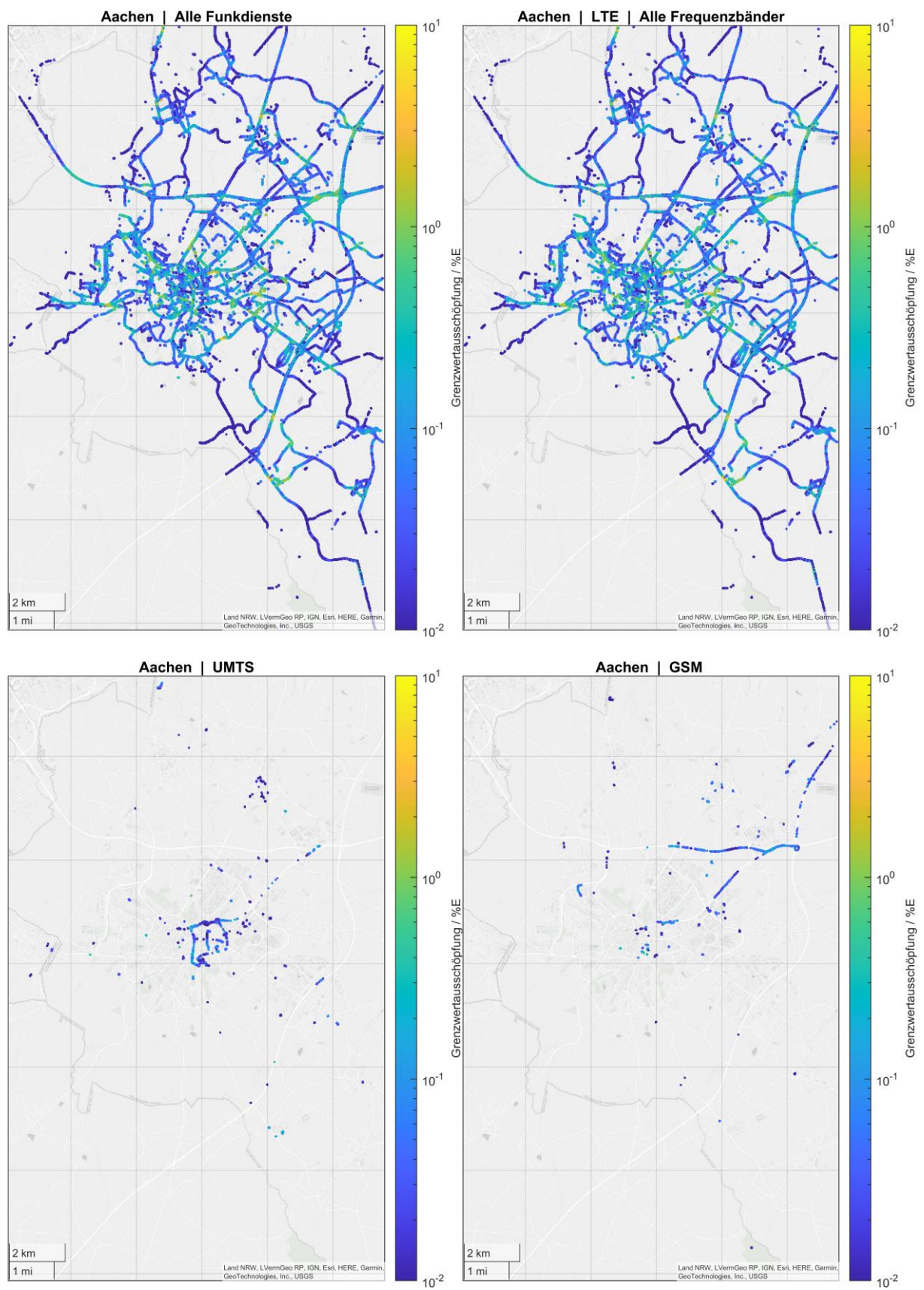


Abbildung 4-48 Kartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des gesamten Mobilfunk-Downlinks sowie der einzelnen Funkdienste für das Stadtgebiet Aachen

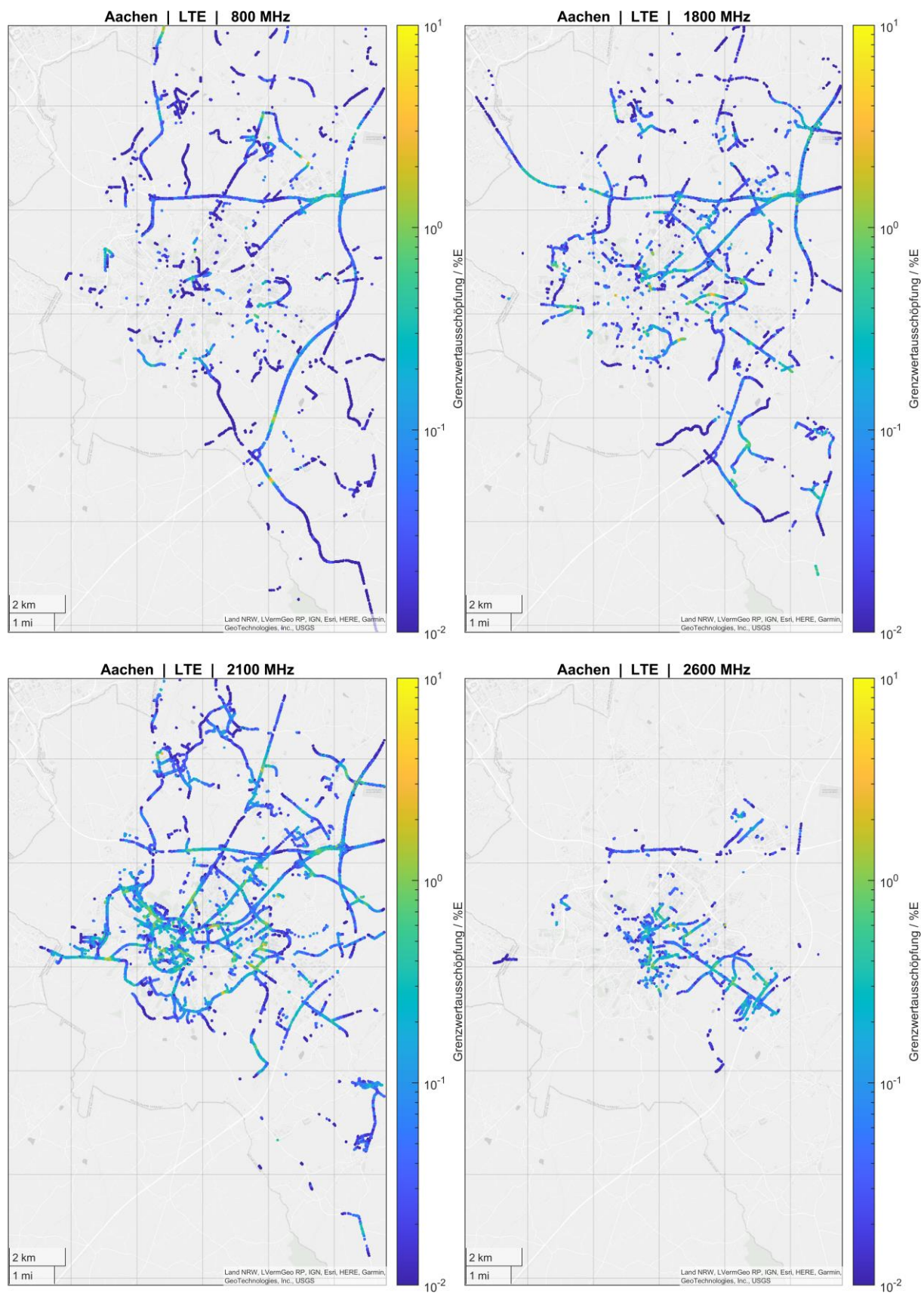


Abbildung 4-49 Kartenansicht der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten Maximalimmission des LTE-Downlinks in den einzelnen Frequenzbändern für das Stadtgebiet Aachen

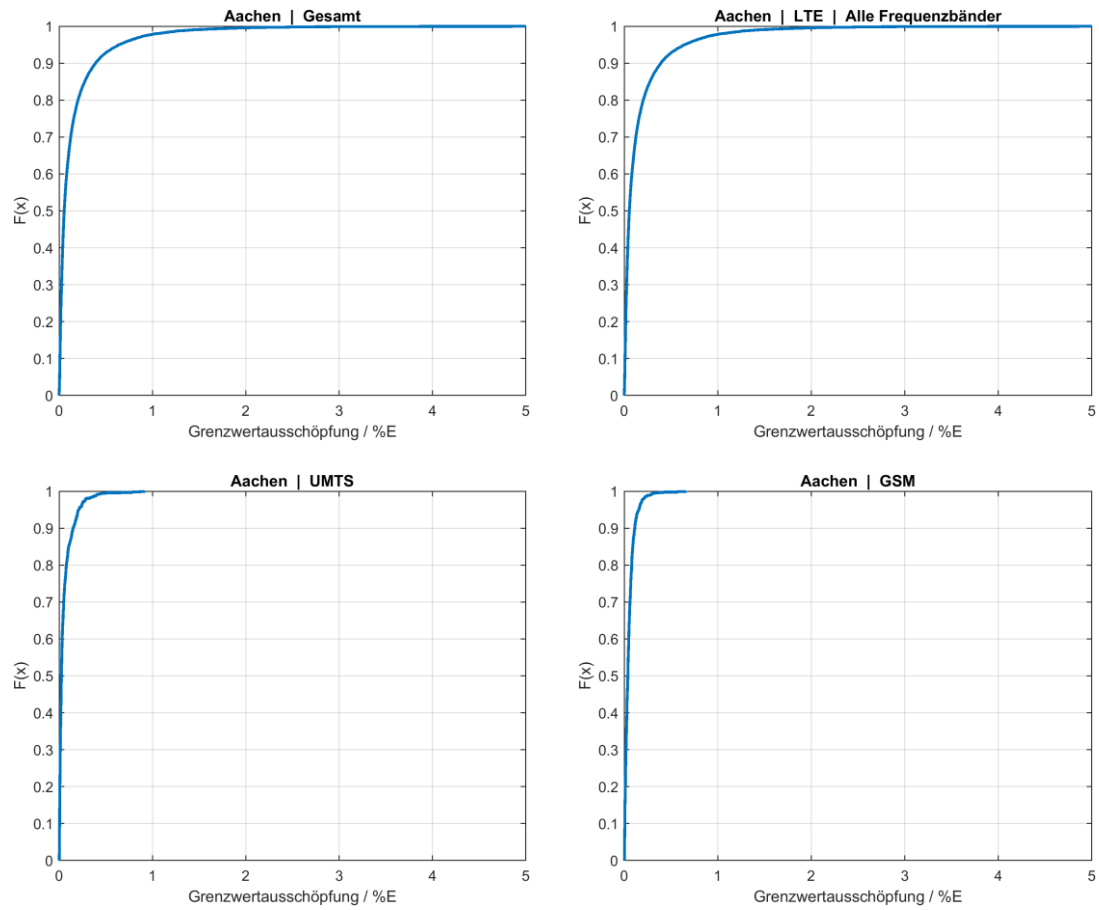


Abbildung 4-50 Verteilungen der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten maximalen Grenzwertausschöpfungen des Mobilfunk-Downlinks für die verschiedenen LTE-Frequenzbänder im Stadtgebiet Aachen

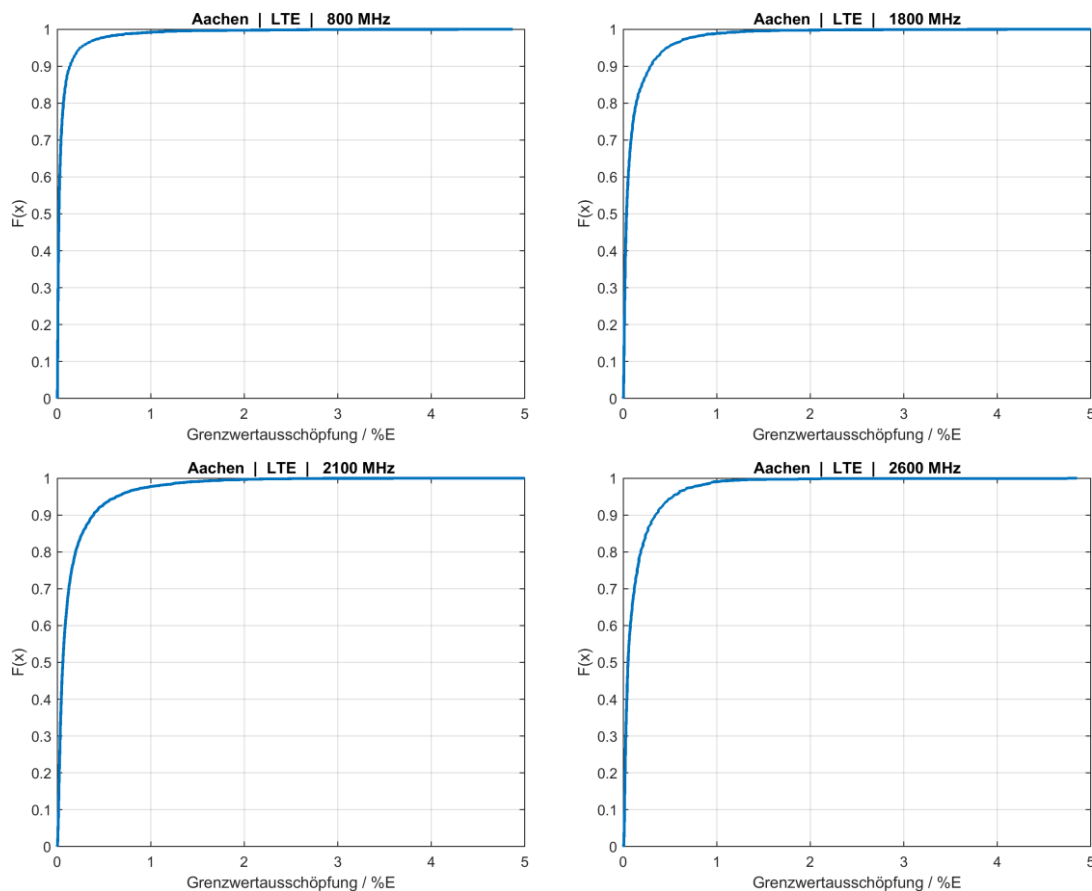


Abbildung 4-51 Verteilungen der aus Smartphone-Crowdsourcingdaten geschätzten maximalen Grenzwertausschöpfungen des Mobilfunk-Downlinks für die verschiedenen LTE-Frequenzbänder im Stadtgebiet Aachen

4.7 Exemplarische Untersuchungen zum Einfluss weiterer Informationen auf die Immissionsabschätzung

In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit weitere Parameter, die von einem Messnetzwerk erfasst werden können, potentiell Einfluss auf das Ergebnis haben und, ob es lohnenswert wäre diese Parameter zur Verbesserung der Abschätzung zu verwenden.

4.7.1 Zeitliche Stabilität

Die zeitliche Stabilität der Ergebnisse wurde beispielhaft an einer LTE-Funkzelle im 2600 MHz-Band untersucht, für die über den Erfassungszeitraum von einem Jahr an 320 Tagen Messungen vorlagen. Für die Funkzelle wurden insgesamt 30.757 Messwerte aufgezeichnet. Soweit dies Anhand von Gerätenamen und SIM-Kenndaten unterscheidbar ist, haben mindestens 168 Geräte in unterschiedlichen Anteilen zu den Messdaten in dieser Funkzelle beigetragen. Abbildung 4-52 zeigt die Rohdaten der Smartphone-Signalstärkemessungen in der Kartenansicht.

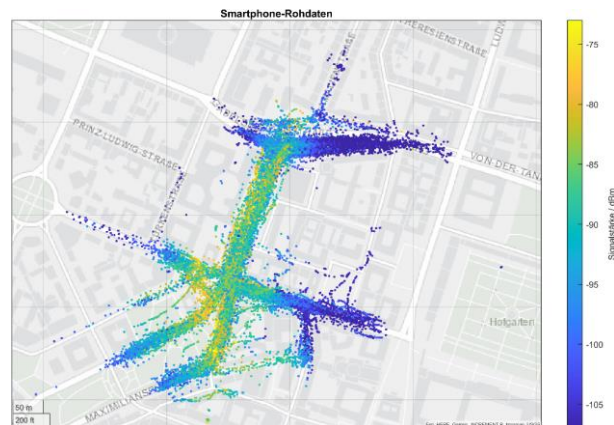


Abbildung 4-52 Kartenansicht der Signalstärke-Messungen

Aus den Smartphone-Rohdaten wurde für die Funkzelle zunächst die Interpolation aus den Daten des gesamten Zeitraums berechnet und anschließend für jeden Monat des Erhebungszeitraums einzeln. Die Ergebnisse sind den Abbildungen 4-53 bis 4-55 zu entnehmen.

Zum Teil ergeben sich zwar sichtbare Abweichungen zwischen den einzelnen Monaten insbesondere im Bereich der höheren Signalstärken, die grundlegende Verteilung der Bereiche mit höheren und niedrigeren Signalstärken bleibt jedoch unverändert. Daraus kann geschlossen werden, dass an der Antennenkonfiguration der Funkzelle während des Erhebungszeitraums keine wirksame Veränderung stattgefunden hat. Auch die Sendeleistung wurde offensichtlich nicht verändert, da sich dadurch eine Pegelveränderung in der gesamten Fläche ergeben müsste. Eine Veränderung der Sendeleistung bei gleichbleibender Antennenkonfiguration würde dazu führen, dass in der gesamten Fläche die Signalstärke ab diesem Zeitpunkt gegenüber vorher höher oder niedriger ausfallen würde.

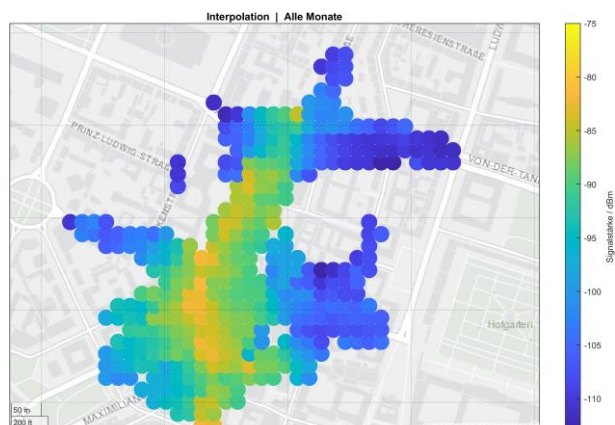


Abbildung 4-53 Interpolationsergebnis über den gesamten Zeitraum

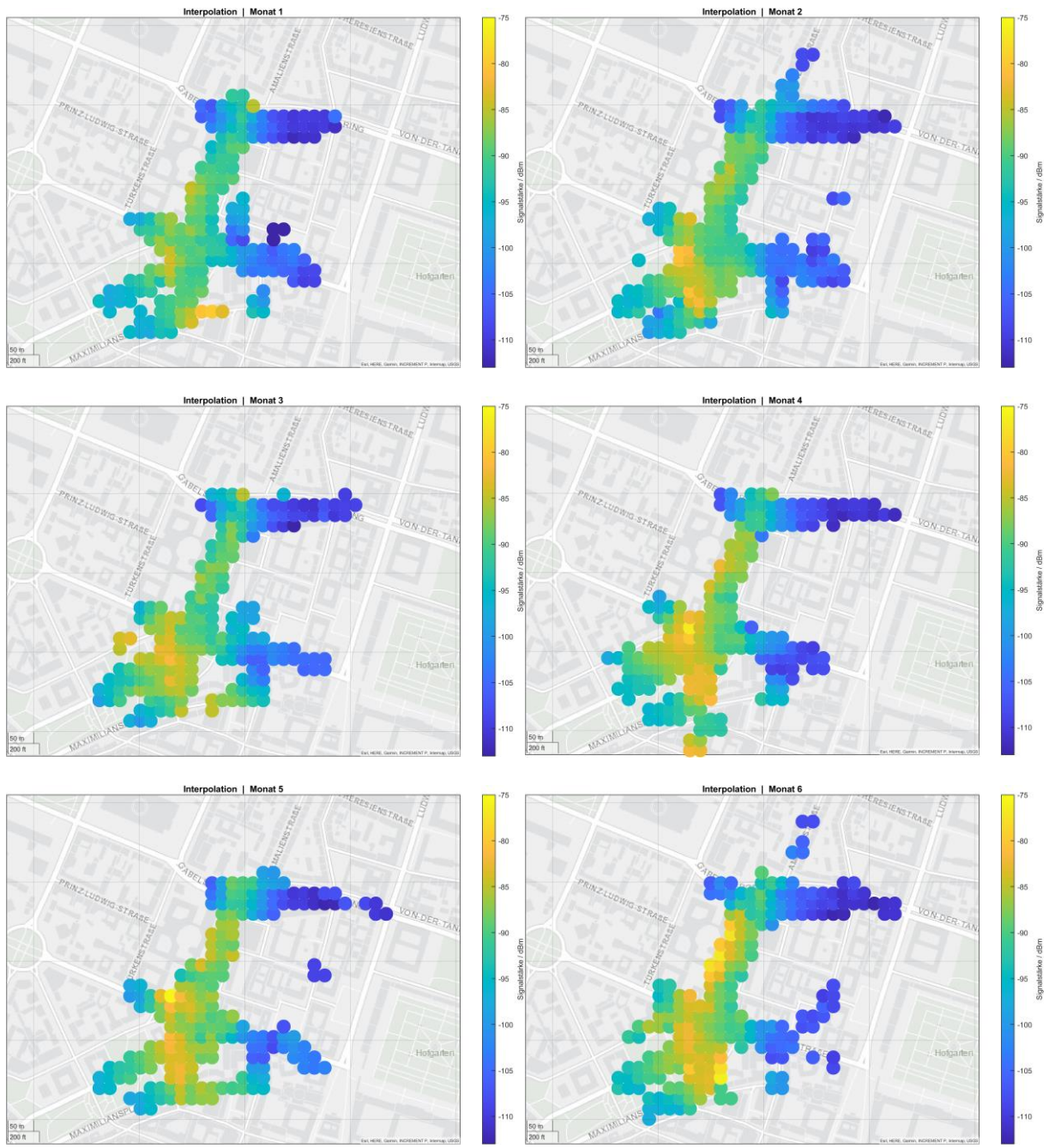


Abbildung 4-54 Interpolationsergebnisse der Monate im ersten Halbjahr der Erhebung

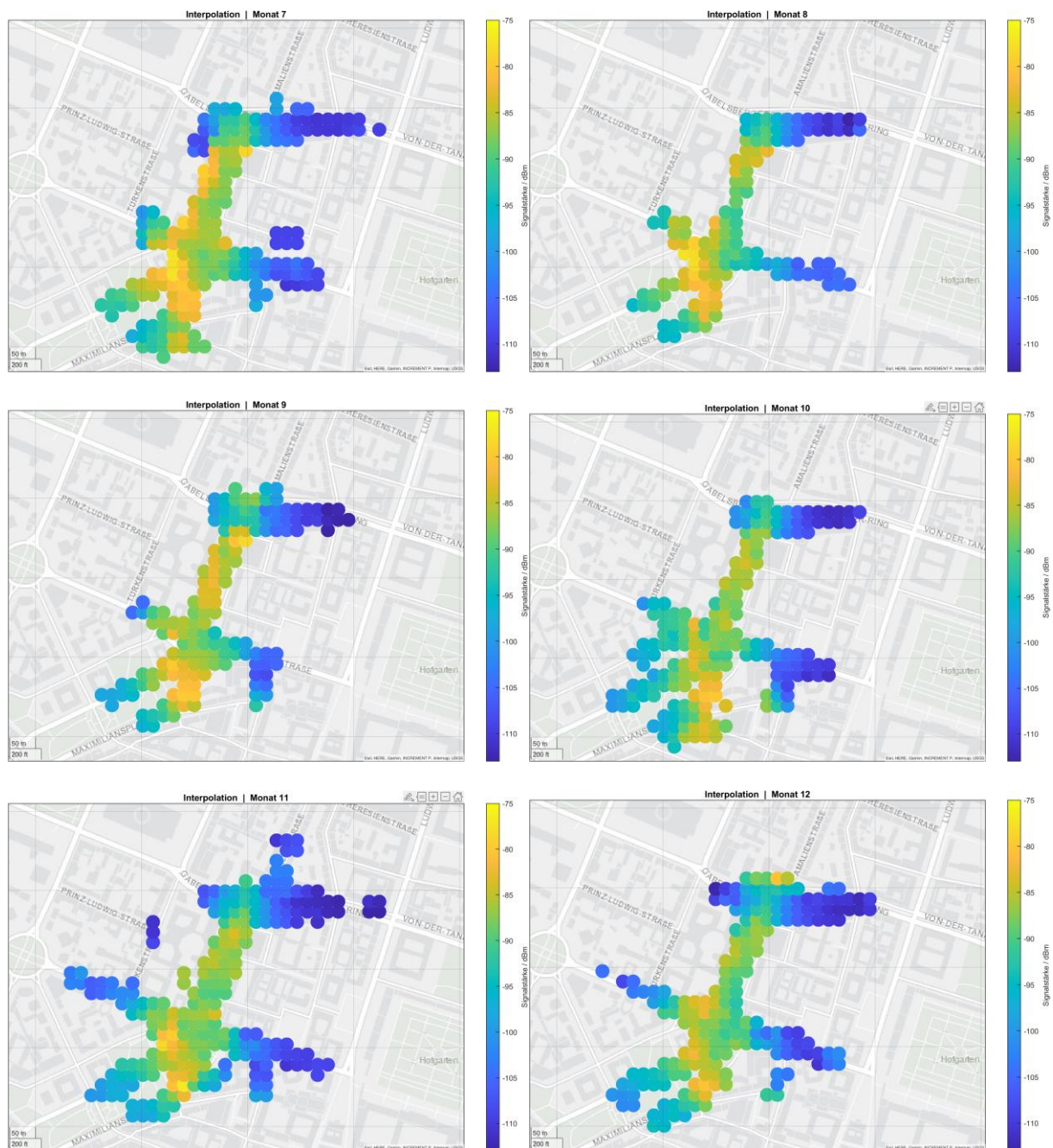


Abbildung 4-55 Interpolationsergebnisse der Monate im zweiten Halbjahr der Erhebung

Um die Unterschiede zwischen interpolierten Werten der einzelnen Monate mit dem Ergebnis für den gesamten Zeitraum sichtbar zu machen, wurden in Abbildung 4-56 die Signalpegel aller Interpolierten punkte aufgetragen. Die Punkte sind nach aufsteigendem Signalpegel der Interpolation über das gesamte Jahr geordnet (blaue Kurve). Die entsprechenden Ergebnisse aus den einzelnen Monaten sind in der gleichen Reihenfolge eingezeichnet. Je zwei aufeinanderfolgende Monate tragen die gleiche Farbe. Es wird ähnlich wie aus den Kartenansichten deutlich, dass es Abweichungen von zum Teil einigen dB zwischen den einzelnen Monaten gibt. Die Grundtendenz der Signalpegel der einzelnen Monate weist jedoch stets einen ähnlichen Verlauf auf. Die interpolierten Werte der einzelnen Monate verteilen sich gleichmäßig um diejenigen für das ganze Jahr ermittelten.

In Abbildung 4-57 wurden die Abweichungen der Interpolationsergebnisse der einzelnen Monate von den am jeweiligen Punkt für das ganze Jahr ermittelten Werte berechnet und in einem Histogramm dargestellt. Es ergibt sich annähernd eine Normalverteilung mit dem Mittelwert 0 dB und einer Standardabweichung von 2,42 dB.

Aus beiden Abbildungen ist nochmals gut zu entnehmen, dass sich weder die Antennenkonfiguration noch die Sendeleistung im Erfassungszeitraum nennenswert verändert hat. Wäre dies der Fall, müssten bei einer Sendeleistungsänderung die Kurven ab einem bestimmten Monat deutlich verschoben sein zu denen der übrigen Monate. Bei einer Änderung der Antennenkonfiguration (z.B. Änderung der Ausrichtung), müsste sich ebenso ein deutlich abweichender Verlauf ab einem gewissen Zeitpunkt ergeben.

Dieses Beispiel demonstriert, dass die Annahme von über einem längeren Zeitraum konstanter Bedingungen einer Funkzelle grundsätzlich gegeben sein kann. Eine Berechnung von Immissionsabschätzungen aus Daten über einen längeren Zeitraum erscheint somit grundsätzlich möglich. Allerdings sollten auch kürzere Zeiträume wie hier gezeigt betrachtet werden, um mögliche Änderungen detektieren zu können. Tritt eine solche Änderung auf, dürfen dann nur noch Werte von jeweils vor oder nach der Änderung für die Auswertung miteinander kombiniert werden.

Weiterhin zeigt dieses Beispiel deutlich, dass eine Mittelung der Messungen über einen längeren Zeitraum erstrebenswert ist, da bei zu kurzen Zeiträumen Einflüsse einzelner Endgeräte und Tracks für Fluktuationen sorgen können. Grundsätzlich spricht bei Überwachung von auftretenden Änderungen nichts dagegen über beliebig lange Zeiträume gesammelte Daten zu verrechnen, da durch mehr Messdaten stabilere Ergebnisse zu erwarten sind.

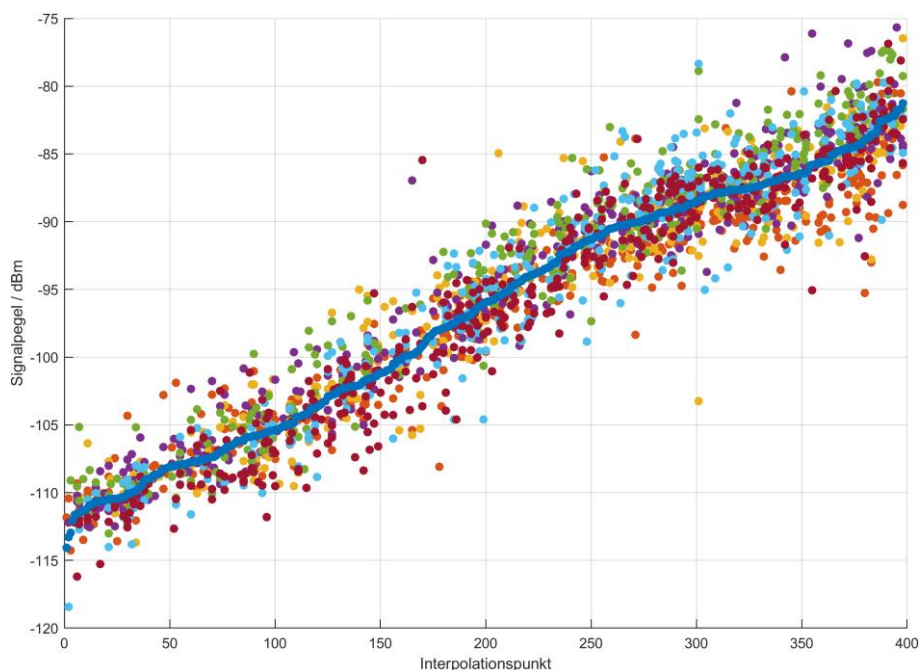


Abbildung 4-56 Interpolierte Signalpegel über den gesamten Zeitraum (blaue Kurve) sowie für die einzelnen Monate

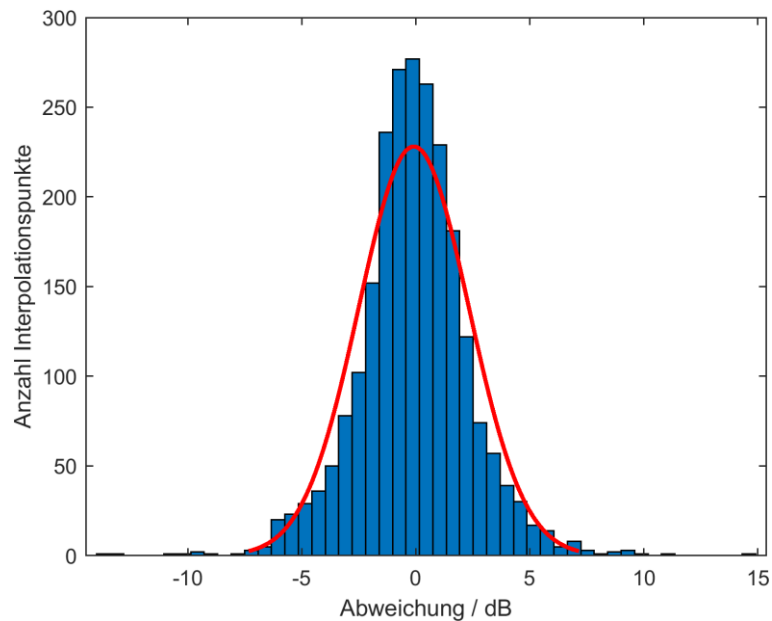


Abbildung 4-57 Abweichung zwischen den interpolierten Ergebnissen der einzelnen Monate von denen des gesamten Jahres

4.7.2 Fortbewegungsmittel

Die Fortbewegungsgeschwindigkeit kann als Indiz dafür genutzt werden, welches Transportmittel genutzt wird. Dies kann dafür interessant sein, um ggf. danach unterscheiden zu können, ob sich ein Smartphone in einem Fahrzeug befindet und deshalb womöglich stärker gedämpfte Signalstärken erfasst, als bei einem Fußgänger oder Radfahrer. Für diese Untersuchung wird erneut auf die Funkzelle aus der Untersuchung zur zeitlichen Stabilität zurückgegriffen. Zunächst werden die einzelnen Messdatensätze anhand ihrer Fortbewegungsgeschwindigkeit in die drei Fortbewegungskategorien Fußgänger, Fahrrad und Fahrzeug klassifiziert. Da auch Fahrzeuge zwischenzeitlich langsame Geschwindigkeiten aufweisen können, würde es zu kurz greifen nur den einzelnen Datensatz zu betrachten. Daher werden die Daten anhand des Gerätemodells und des SIM-Kartenbetreibers in einzelne Geräte unterschieden. Für jedes Gerät werden die Messdaten anhand des Zeitstempels wiederum in einzelne Tracks unterteilt. Mit Track sind also aufeinanderfolgende Messungen des gleichen Endgeräts gemeint. Für jeden Track wird die maximale Fortbewegungsgeschwindigkeit ermittelt und anhand dieser entschieden in welche Kategorie der gesamte Track fällt. Liegt die Fortbewegungsgeschwindigkeit unterhalb von 6 km/h wird von einem Fußgänger ausgegangen, liegt die Geschwindigkeit darüber aber unterhalb von 25 km/h wird unterstellt, dass es sich um ein Fahrrad handelt und wenn die maximale Fortbewegungsgeschwindigkeit des Tracks über 25 km/h liegt wird als Fortbewegungsmittel „Fahrzeug“ zugeordnet. Diese Kategorisierung mag im Einzelfall anhand dieses Entscheidungskriteriums nicht korrekt erfolgen, allerdings stehen keine weiteren Informationen zur Verfügung, die eine Unterscheidung unterstützen könnten. Die aus dieser Einordnung resultierenden Anzahlen von Messdatensätzen in den einzelnen Kategorien ist im Diagramm in Abbildung 4-58 dargestellt. Es gibt eine starke Dominanz von Messdatensätzen, die nach dieser Klassifizierung in Fahrzeugen aufgezeichnet wurden. Der Anteil von Fahrrad und Fußgänger ist sehr ähnlich zueinander. Dies lässt sich vermutlich erneut daraus erklären, dass Messdatensätze Schwerpunktmäßig bei der Navigation aufgezeichnet werden und diese überproportional häufig in Fahrzeugen zum Einsatz kommt.

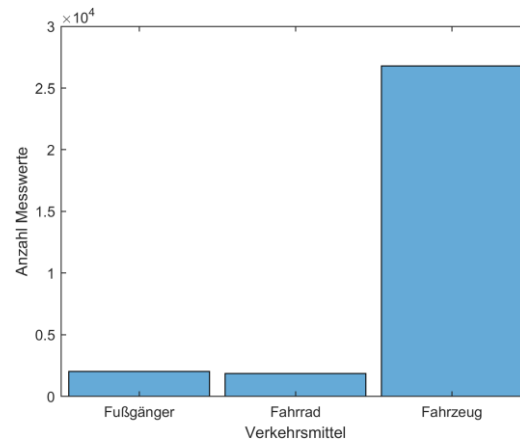


Abbildung 4-58 Verteilung der Messwerte auf die Fortbewegungskategorien

In Abbildung 4-59 sind wieder die Smartphone-Rohdaten der Signalstärke für die drei Kategorien in der Kartenansicht dargestellt. Die Abdeckung mit der Kategorie „Fußgänger“ ist hierbei auch im Kernbereich der Zelle insgesamt relativ schlecht. Die Verteilung der Signalstärken ist bei allen drei Kategorien in der Fläche jedoch sehr ähnlich.

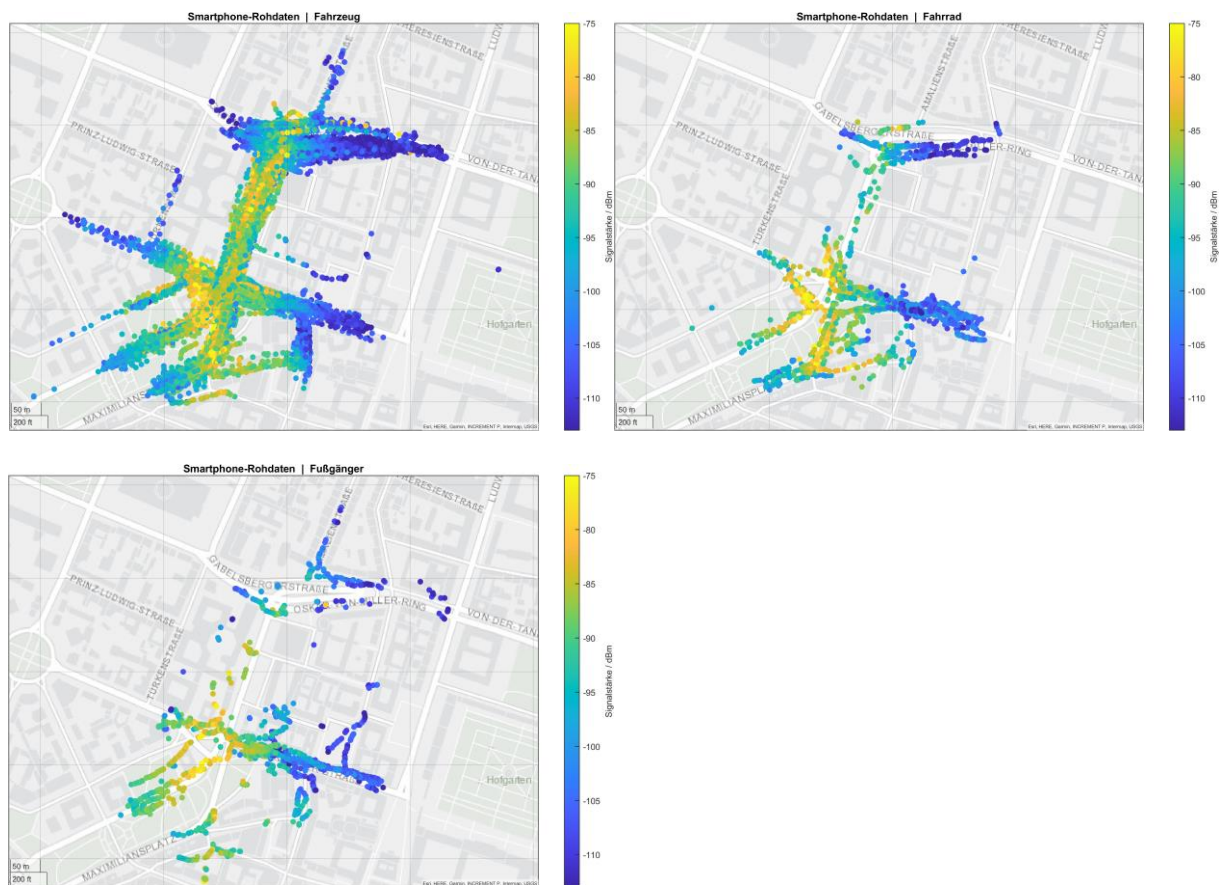


Abbildung 4-59 Kartenansicht der Signalstärkerohdaten für die verschiedenen Fortbewegungsmittel

Dies ist auch bei Betrachtung der interpolierten Ergebnisse in Abbildung 4-61 weitgehend der Fall. Die hohen und niedrigen Signalstärken liegen in den gleichen Bereichen auf der Karte für alle Verkehrsmittel. Allerdings entstehen durch die schlechtere Abdeckung bei Fußgänger und Fahrrad teilweise auch dort Lücken, wo bei der Kategorie Fahrzeug Messwerte vorliegen.

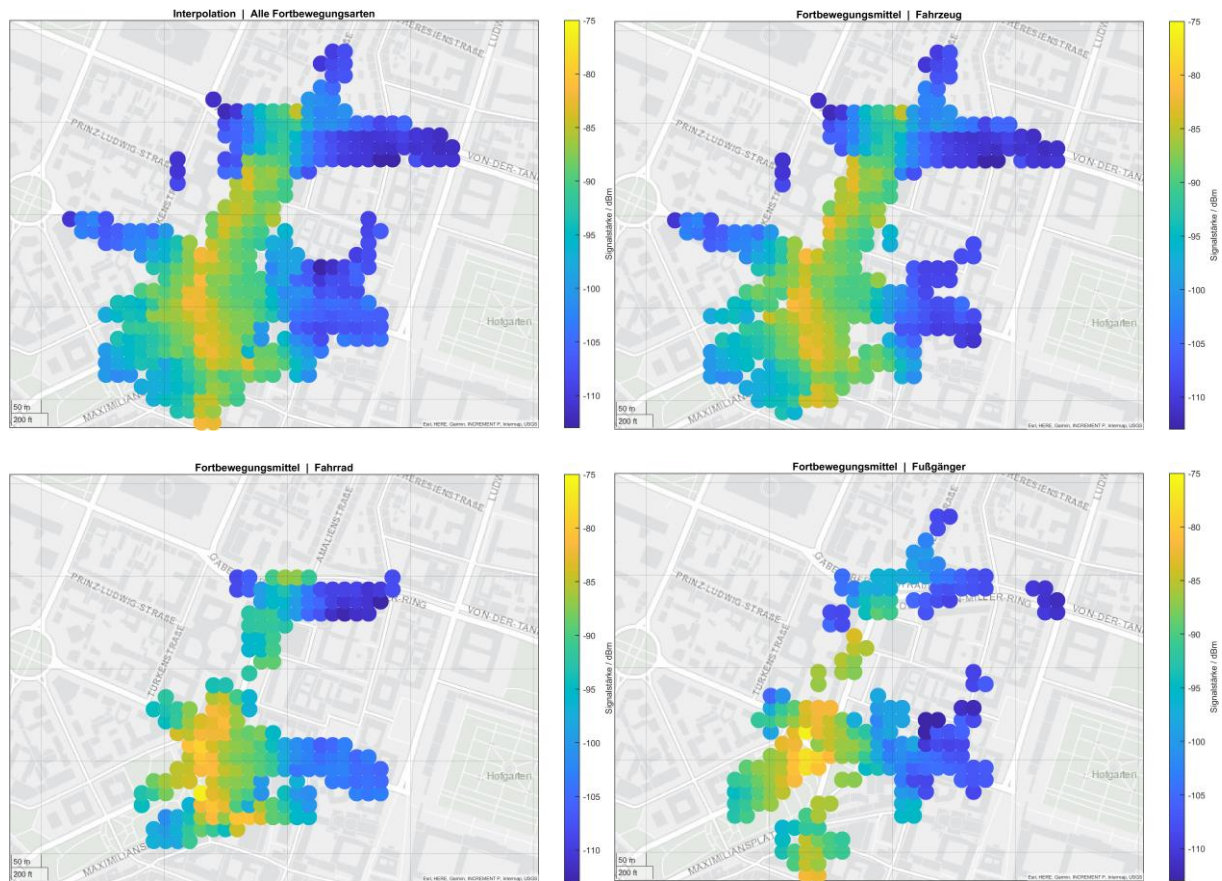


Abbildung 4-60 Interpolationsergebnisse für die verschiedenen Fortbewegungsmittel

In Abbildung 4-61 werden wiederum die ermittelten Signalstärken an allen interpolierten Punkten miteinander verglichen. Die Punkte sind erneut nach aufsteigender Signalstärke des interpolierten Ergebnisses über alle Messwerte sortiert. Wie zu erwarten liegen die Ergebnisse für die Kategorie „Fahrzeug“ wegen der großen Dominanz überwiegend auf der blauen Kurve aller Messwerte. Die aus wesentlich geringeren Anzahlen von Messungen interpolierten Signalstärkewerte für die beiden anderen Kategorien führen wiederum zu einer größeren Streuung um die aus allen Messdaten interpolierte Kurve. Aber auch hier ist kein systematischer Unterschied zwischen den Fortbewegungsarten z.B. in Form einer Verschiebung oder sonstigen Verformung der Kurve erkennbar, der es erforderlich erscheinen lässt nach derartigen Kategorien zu unterscheiden, um die Ergebnisse unterschiedlicher Fortbewegungsarten aneinander anzugleichen.

Abbildung 4-62 zeigt die Verteilung der Abweichungen der interpolierten Werte der Kategorien „Fahrrad“ und „Fußgänger“ von den jeweiligen Werten der Kategorie „Fahrzeug“ am selben Punkt. Der Mittelwert der Abweichungen liegt mit 0,16 dB sehr nahe bei null. Auf Grundlage dieser Untersuchung erscheint es keine zwingende Notwendigkeit zu geben zwischen verschiedenen Fortbewegungskategorien zwecks Anwendung von Korrekturfaktoren zu unterscheiden. Im Gesamtergebnis scheint sich eine Fahrzeugdämpfung nicht eindeutig niederzuschlagen oder aber die Klassifizierung ist fehlerhaft.

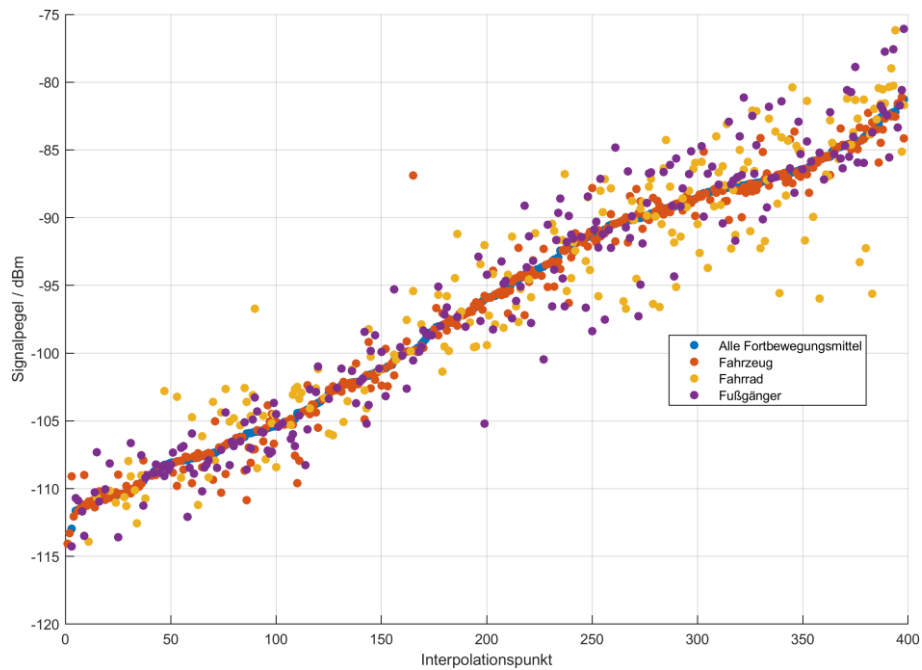


Abbildung 4-61 Vergleich der interpolierten Signalstärken für die verschiedenen Fortbewegungsmittel

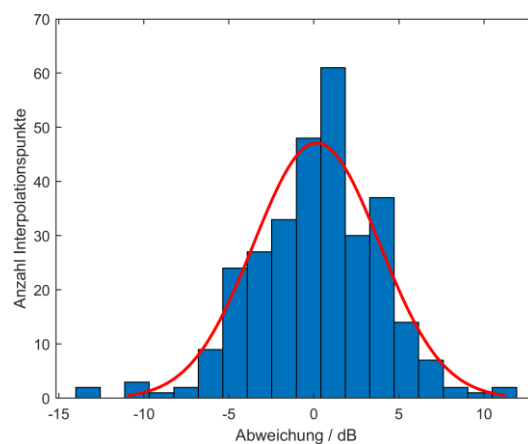


Abbildung 4-62 Abweichungen der interpolierten Werte der Kategorien „Fahrrad“ und „Fußgänger“ von den jeweiligen Werten der Kategorie „Fahrzeug“ am selben Punkt

4.7.3 Marke & Modell des Smartphones

Die im Gesamtdatensatz vorhandene Information über das Gerätemodell wurde in Verbindung mit den SIM-Informationen bereits an mehreren Stellen genutzt, um Endgeräte zu unterscheiden, damit unveränderte und somit veraltete Messwerte aussortiert werden konnten bzw. eine Klassifizierung von einzelnen Tracks in Fortbewegungskategorien erfolgen konnte.

Im Folgenden werden für die bereits bekannte Funkzelle die Daten für insgesamt sechs verschiedene Smartphones, die jeweils mindestens 2000 Messwerte in dieser Funkzelle beigetragen haben, einzeln ausgewertet und miteinander verglichen. Insgesamt stammen 60,6% der Daten dieser Funkzelle von diesen sechs Smartphones. Tabelle 4-7 listet die Smartphones mit ihren Anzahlen und Anteilen von Messwerten auf. Bei fünf der sechs Modelle handelt es sich um Geräte von Samsung. Nur ein Gerät stammt von einem anderen Hersteller, nämlich Sony. Die Beiträge von Smartphones anderer Marken waren derart gering, dass ein sinnvoller Vergleich nicht möglich gewesen wäre.

Hersteller	Modellnummer	Anzahl Messwerte	Prozentualer Anteil in Funkzelle
Sony	G3221	2.673	8,7%
samsung	SM-A600FN	2.047	6,7%
samsung	SM-G930F	3.309	10,8%
samsung	SM-G950F	4.078	13,3%
samsung	SM-G973F	4.476	14,6%
samsung	SM-N975F	2.055	6,7%

Tabelle 4-7 Liste der Smartphone-Modelle für den Vergleich

Zunächst zeigt Abbildung 4-63 wieder die Rohdaten der einzelnen Smartphones. Dabei fallen in manchen Bereichen vor allem bei höheren Signalstärken deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Smartphones auf. Diese Unterschiede schlagen sich auch in den interpolierten Ergebnissen in Abbildung 4-64 sichtbar nieder.

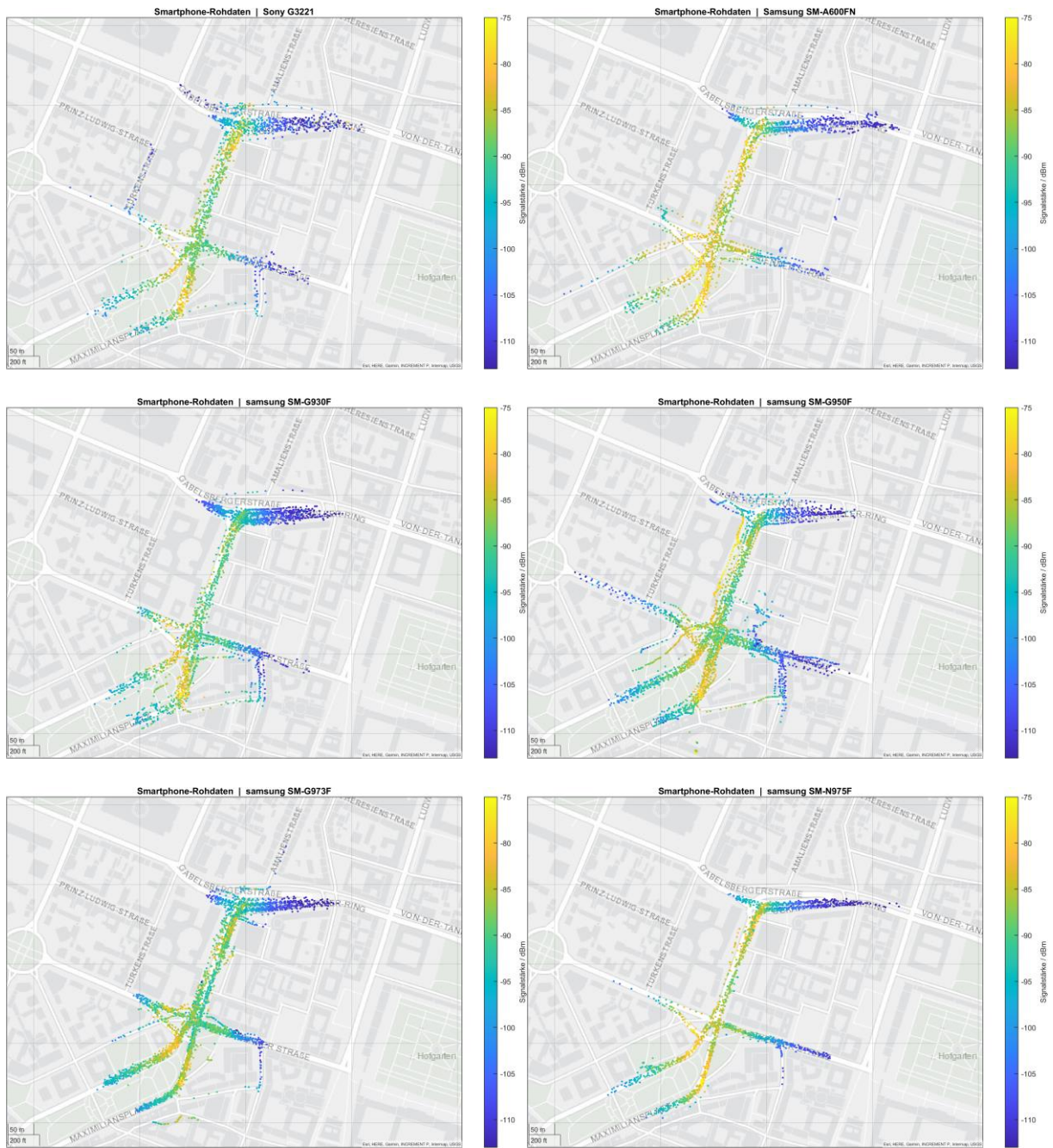


Abbildung 4-63 Kartenansicht der Signalstärkerohdaten der verschiedenen Smartphone-Modelle

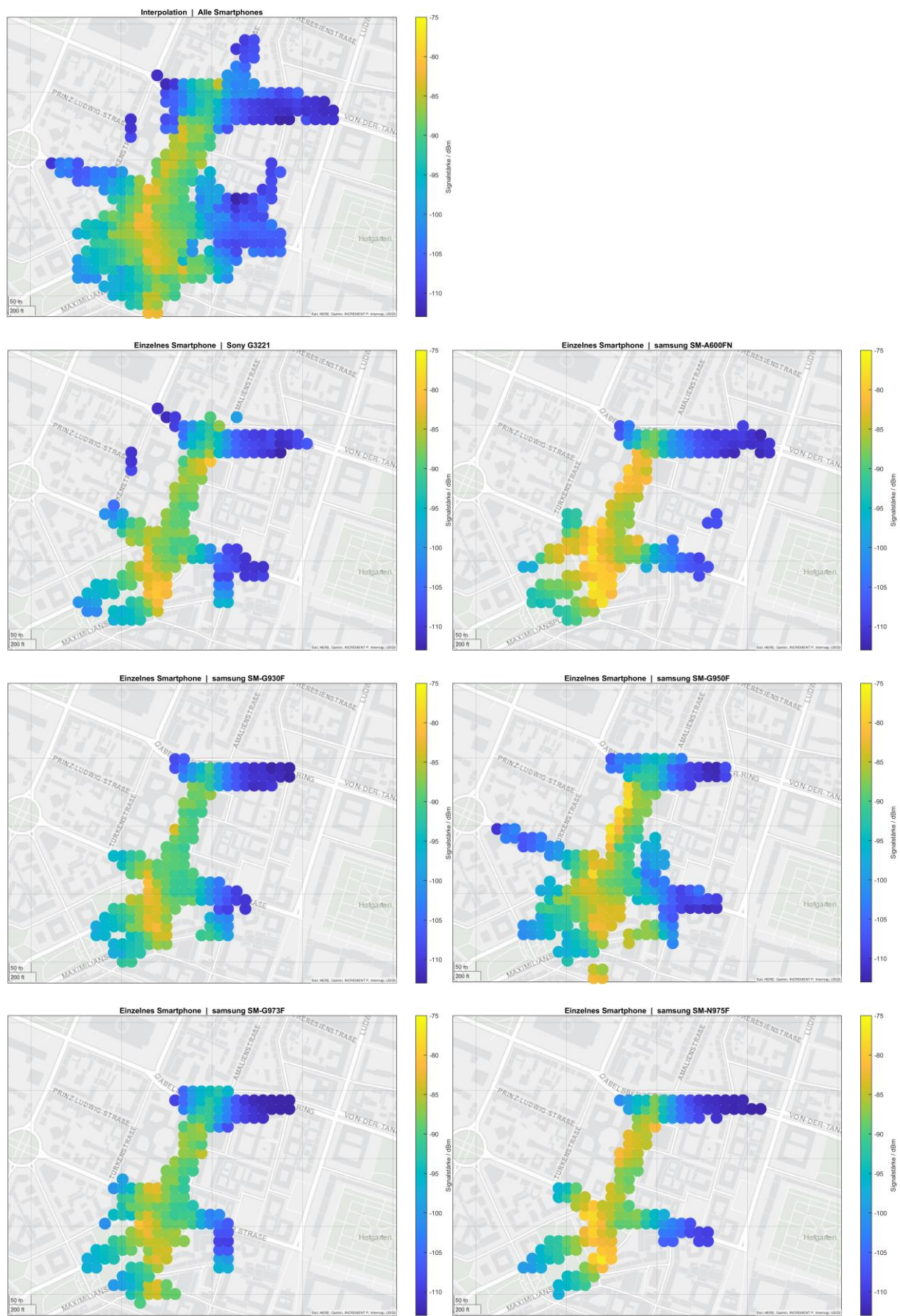


Abbildung 4-64 Interpolationsergebnisse für die verschiedenen Smartphone-Modelle

In diesem Fall ergeben sich beim Vergleich der interpolierten Signalstärken in Abbildung 4-66 erstmals deutlichere tendenzielle Abweichungen vor allem für das Modell Samsung SM-A600FN. Bei diesem liegen die Werte vor allem im oberen Signalpegelbereich durchgehend oberhalb des Durchschnitts aller Smartphones. Eine ähnliche Tendenz, wenn auch etwas geringer, weist das Samsung SM-N975F auf.

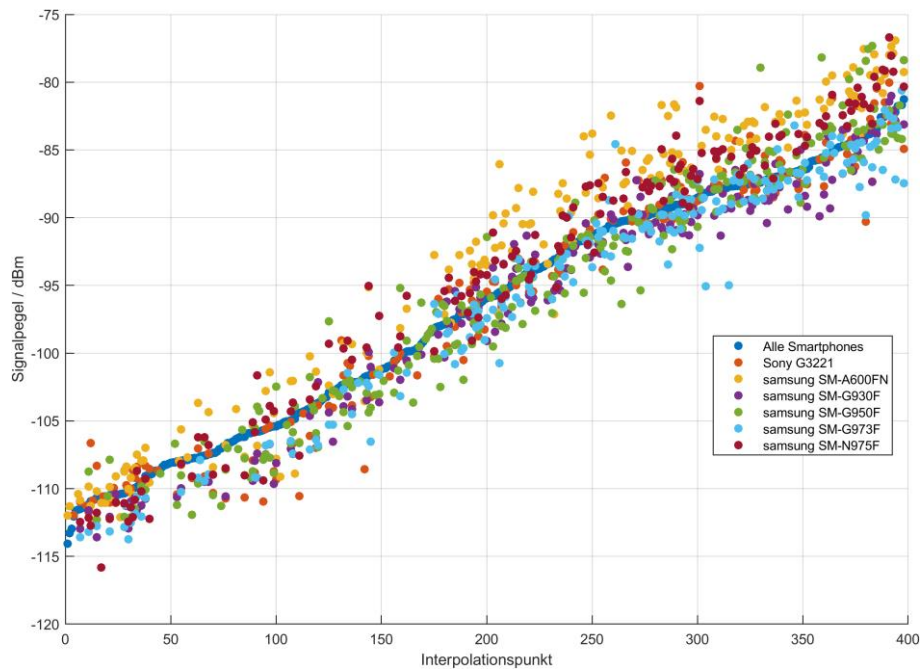


Abbildung 4-65 Vergleich der interpolierten Signalstärken für einzelne Smartphone-Modelle und alle Smartphones

In Tabelle 4-8 sind die Mittelwerte und die Standardabweichung der Differenz aus den Interpolationsergebnissen der einzelnen Smartphones vom Interpolationsergebnis aus allen Smartphone-Daten aufgeführt. Hier zeigt sich auch zahlenmäßig, dass das Samsung SM-A600FN am stärksten abweicht und das Samsung SM-N975F ebenfalls eine etwas deutlichere Abweichung aufweist. In den Histogrammen von Abbildung 4-66 ist dies auch noch einmal grafisch dargestellt.

Hersteller	Modellnummer	Mittelwert	Standardabweichung
Sony	G3221	-0,2	2,1
samsung	SM-A600FN	2,8	2,4
samsung	SM-G930F	-0,9	1,5
samsung	SM-G950F	-0,3	2,2
samsung	SM-G973F	-1,1	1,7
samsung	SM-N975F	1,5	2,0

Tabelle 4-8 Mittelwert und Standardabweichung der Abweichung der Ergebnisse der einzelnen Smartphones vom Ergebnis aller Smartphones

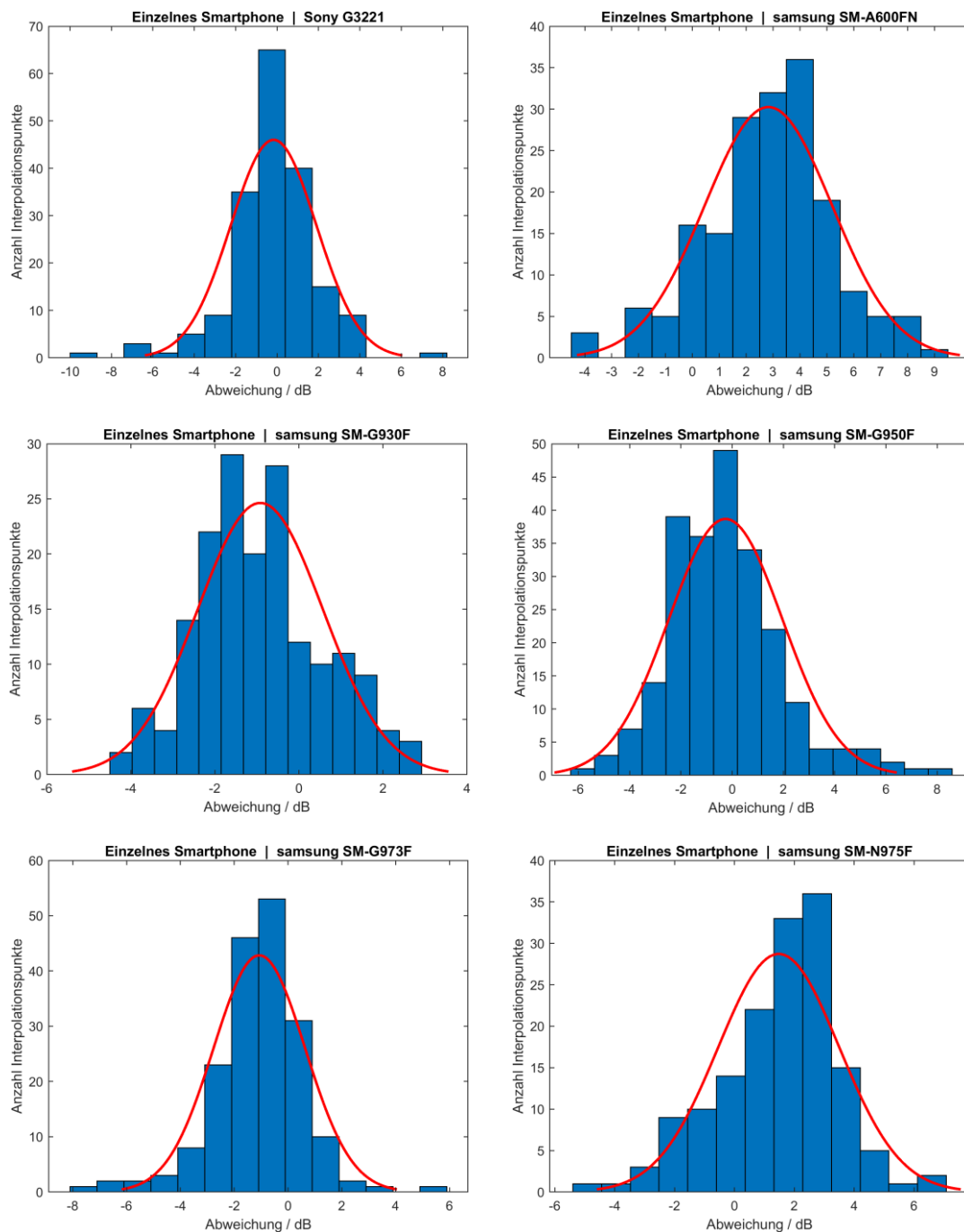


Abbildung 4-66 Abweichungen der interpolierten Signalstärkewerte der einzelnen Smartphones von den interpolierten Werten aller Smartphones

Die Ursache für die Abweichung lässt sich zwar nicht zweifelsfrei darauf zurückführen, dass es Unterschiede des Modells sind, die zu den unterschiedlichen Signalpegeln führen, da die Bedingungen unbekannt sind, unter denen die Messwerte aufgezeichnet wurden, allerdings ist es relativ wahrscheinlich, dass hier zumindest geringfügig unterschiedliche Umrechnungsfaktoren vorliegen.

Durch derartige Analysen könnte es grundsätzlich auch möglich sein eine Kalibrierung von Smartphones aus dem Pool der Messdaten vorzunehmen. Treten deutliche Unterschiede zwischen den Signalpegeln eines einzelnen Smartphones im Vergleich zum mittleren Ergebnis aller Smartphones entlang der gleichen Bereiche auf (hier wäre auch ein Vergleich funktzellenübergreifend möglich), kann ein Korrekturfaktor ermittelt werden, damit dieses Smartphone in

Bereichen, wo wenige andere Smartphones Messungen beigetragen haben, zu keiner Fehleinschätzung führt.

Ein derartiger Vergleich wurde auch für die Smartphones aus den Umrechnungsfaktormessungen aus Kapitel 3.4 versucht. Allerdings lag in keiner Funkzelle eine ausreichende Anzahl an Messwerten (mindestens 1000) von mehr als einem Smartphone vor, sodass dies nicht sinnvoll umgesetzt werden konnte.

4.7.4 Displayzustand

Zunächst wird für die bereits für die bisherigen Untersuchungen genutzte Funkzelle unterschieden, bei welchem Displayzustand die Messwerte aufgenommen wurden. Sowohl für den Zustand mit ein- und ausgeschaltetem Display wird eine eigene Auswertung mittels der Inversen Distanzwichtung vorgenommen.

In Abbildung 4-67 ist die Verteilung auf die beiden Displayzustände zu sehen. Es gibt keine Messungen mit unbekanntem Displayzustand. Es liegt ein deutliches Übergewicht bei Messungen mit eingeschaltetem Display vor. Dies könnte damit zusammenhängen, dass Aufzeichnungen bevorzugt während der Navigation entstehen und dabei meist das Display eingeschaltet ist. Auch bezogen auf den gesamten Datensatz liegt ein Übergewicht beim eingeschalteten Bildschirmzustand.

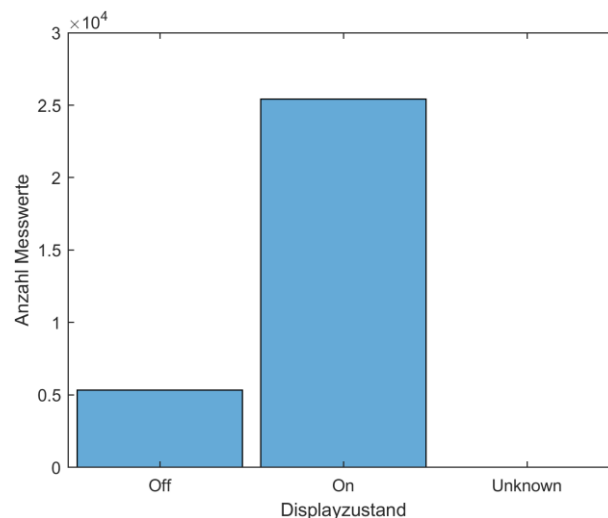


Abbildung 4-67 Histogramm der Verteilung der Messwerte auf die Displayzustände

Abbildung 4-68 zeigt die Verteilung der Messwerte jeweils für den Zustand mit ein- und ausgeschaltetem Display. Auch wenn sich die Anzahl der Messungen deutlich unterscheidet decken die Messwerte beider Zustände den gleichen Kernbereich ab.

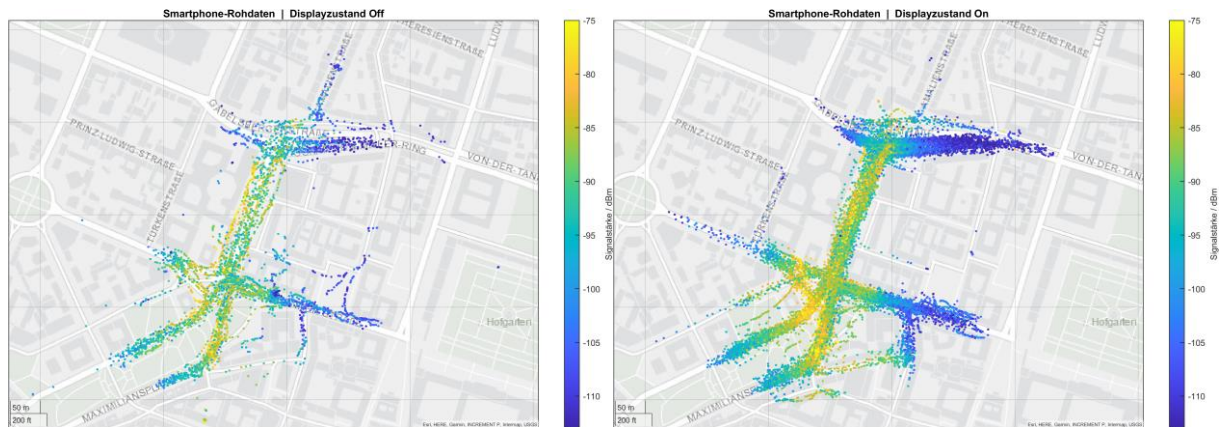


Abbildung 4-68 Kartenansicht der Signalstärkerohdaten für beide Displayzustände

Abbildung 4-69 enthält die aus den Rohdaten interpolierten Ergebnisse für die beiden Displayzustände sowie für alle Messdaten. Qualitativ sind die interpolierten Signalstärkeverteilungen in der Fläche für beide Displayzustände ähnlich zueinander und unterscheiden sich nur in Teilbereichen deutlicher voneinander. Interpolationsergebnisse für die verschiedenen Fortbewegungsmittel

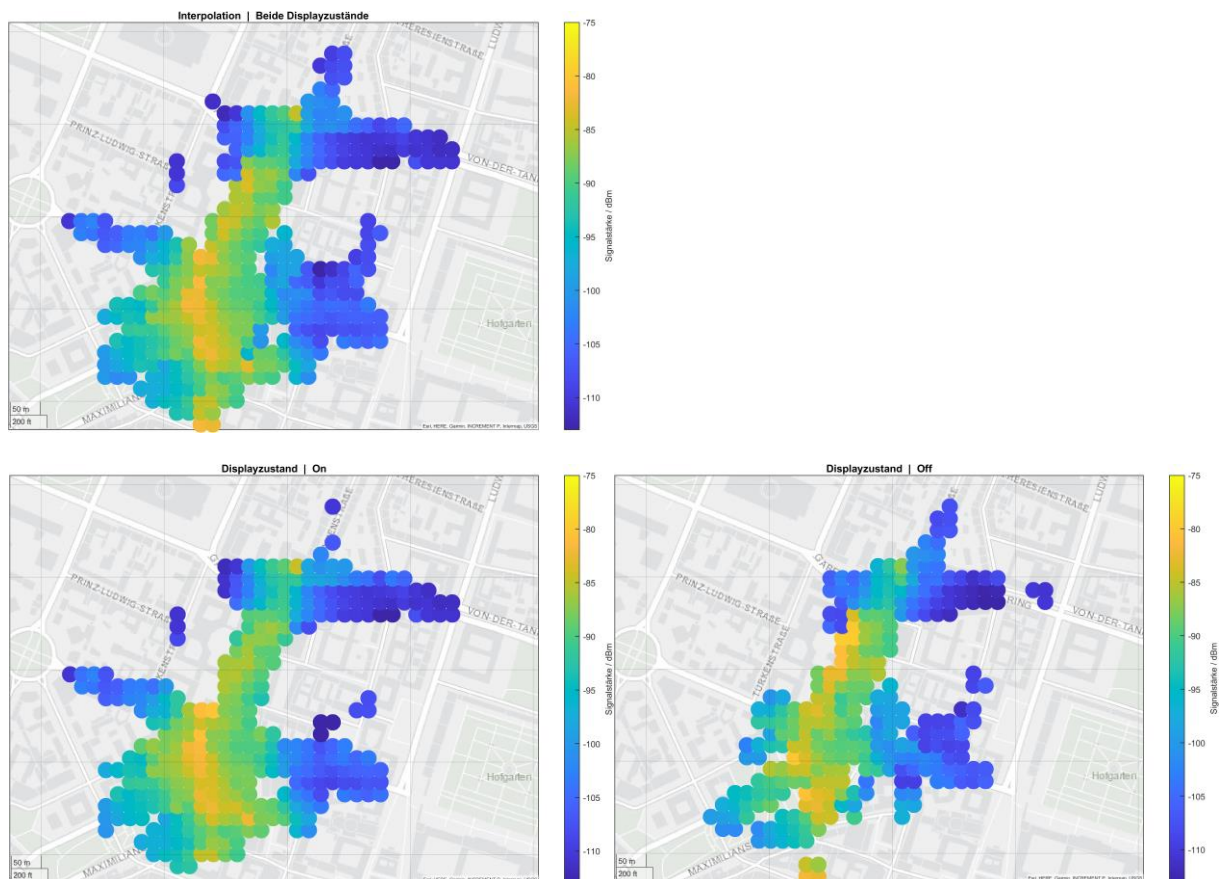


Abbildung 4-69 Interpolationsergebnisse für die beiden Displayzustände und alle Daten

In Abbildung 4-70 werden die Ergebnisse der Interpolation an jedem einzelnen Punkt für die beiden Displayzustände und für alle Messdaten miteinander verglichen. Dabei sind die Punkte nach aufsteigender Signalstärke des Interpolationsergebnisses für alle Messdaten sortiert. Die blaue Kurve für alle Messdaten wird aufgrund der hohen Ähnlichkeit mit dem Ergebnis für den

eingeschalteten Displayzustand weitgehend verdeckt. Aufgrund des Übergewichts dieses Zustands ist eine bessere Übereinstimmung mit dem Ergebnis über alle Messwerte zu erwarten. Die Ergebnisse für den eingeschalteten Displayzustand weichen hingegen stärker ab und streuen um die aus allen Messdaten ermittelte Kurve. Abgesehen von dieser Streuung ist jedoch kein eindeutiger systematischer Unterschied zu erkennen, der darauf hindeuten würde, dass anhand des Displayzustands eine Unterscheidung zu treffen wäre, durch die eine Verbesserung der Auswertungsergebnisse zu erzielen wäre.

Das Histogramm Abbildung 4-71 zeigt außerdem noch einmal die Verteilung der Abweichung zwischen den Interpolationsergebnissen von beiden Displayzuständen (Signalpegel eingeschaltet – Signalpegel ausgeschaltet). Es ergibt sich zwar eine minimale Verschiebung des Mittelwerts zu $-0,77$ dB, diese ist jedoch so schwach, dass sie das Resultat einer zufälligen Schwankung sein dürfte.

Insgesamt kann daher festgehalten werden, dass eine Unterscheidung des Displayzustandes voraussichtlich nicht zur Anwendung von Korrekturfaktoren und somit zur Verbesserung der Auswertung genutzt werden kann.

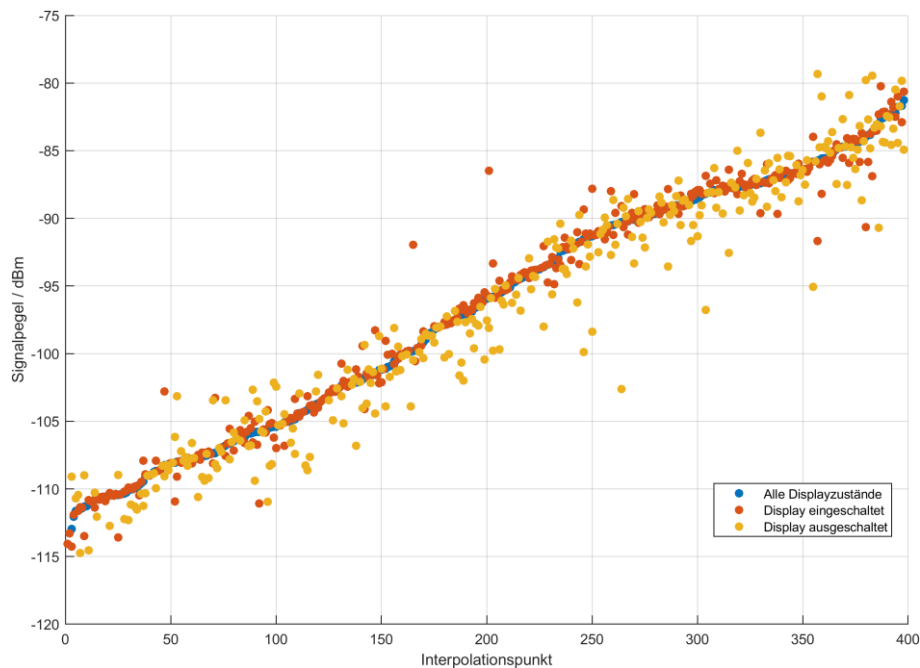


Abbildung 4-70 Vergleich der interpolierten Signalstärken für die beiden Displayzustände und alle Messdaten

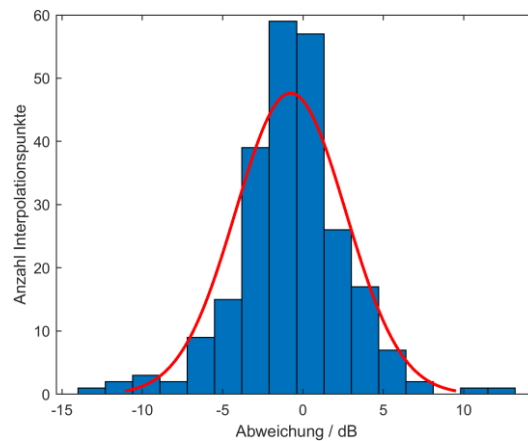


Abbildung 4-71 Abweichung zwischen den Messergebnissen bei ein- und ausgeschaltetem Display

4.8 Validierung der Immissionsabschätzung

Um die in Abschnitt 4.6 erfolgte Immissionsabschätzung zumindest punktuell mit den tatsächlich vorliegenden Feldstärkewerten abzugleichen, wurden für beide Datenpakete während der Datenerhebungsphase Feldstärkemessungen aufgenommen.

4.8.1 Genutzte Mess- und Hochrechnungsverfahren

Die Messungen wurden mit dem Narda SRM-3006 mit isotroper E-Feldsonde unter Einsatz der Schwenkmethode durchgeführt. Die für die drei berücksichtigten Mobilfunksysteme genutzten Messeinstellungen sind in Tabelle 4-9 aufgeführt.

Mobilfunk-system	Messmodus	Frequenzbereich	Weitere Einstellungen	Ablesewert
LTE	LTE FDD	Mittenfrequenz auf Kanalmitte	CBW 1,4 MHz	Max (RS _{sum})
UMTS	UMTS	Mittenfrequenz auf Kanalmitte	-	Max
GSM	Spectrum	920–960 MHz & 1835–1855 MHz	RBW 200 kHz, VBW 2 kHz	Max

Tabelle 4-9 Verwendete Messgeräteeinstellungen am Narda SRM-3006 zur Bestimmung der Maximalimmission in Abhängigkeit vom Mobilfunksystem

Der Vergleich erfolgt auf Grundlage von Maximalimmissionen, da sich aus den Smartphone-Messungen nur auslastungsunabhängige Immissionsabschätzungen ableiten lassen

Da eine Betreiberabfrage der großen Anzahl zu berücksichtigenden Funkzellen nicht erfolgen konnte, wird anhand von pauschalen Annahmen die Hochrechnung ausgeführt. Da diese für die Feldstärke und Smartphone-Messungen gleichermaßen erfolgen, stellt dies jedoch kein größeres Problem für den anzustellenden Vergleich dar.

Folgende Annahmen wurden getroffen.

- **LTE:** Bei Nutzung von 2 bzw. 4 Antennen-Ports wird davon ausgegangen, dass die Leistung des Referenzsignals um 3 dB gegenüber der Leistung pro Unterträger der

übrigen Signalanteile erhöht ist (RS-Boost). Die Kanalbandbreite entspricht der im Spektrum zu dieser Zeit beobachteten Bandbreite.

- **UMTS:** Die Leistung des Pilotkanals beträgt $\frac{1}{10}$ der gesamten Signalleistung.
- **GSM:** Neben dem Broadcast-Channel wird ein weiterer Traffic-Channel genutzt.

Die auf diese Weise für jede Funkzelle auf Anlagenvollauslastung hochgerechneten Feldstärkewerte werden auf den jeweiligen für die Frequenz anzusetzenden feldstärkebezogenen Grenzwert nach 26. BImSchV [133] bezogen und anschließend die Immissionsbeiträge aller Funkzellen quadratisch aufsummiert.

4.8.2 Verteilung der Messpunkte in den Untersuchungsgebieten

Für das Datenpaket aus dem Großraum München wurden Vergleichsmessungen an insgesamt 25 Messpunkten aufgenommen. Die Abbildungen 4-72 und 4-73 verzeichnen die Messpunkte die in der Münchener Innenstadt und im vorstädtischen Bereich aufgenommen wurden.



Abbildung 4-72 Messpunkte der Vergleichsmessungen zum Datenpaket aus München in der Gesamtansicht



Abbildung 4-73 Messpunkte der Vergleichsmessungen zum Datenpaket aus München im Bereich der Innenstadt

Abbildung 4-74 zeigt die insgesamt 50 Messpunkte, die für das Datenpaket aus dem Stadtgebiet Aachen aufgenommen wurden. Bei der Auswahl der Messpunkte wurde ein Schwerpunkt auf den Bereich der Innenstadt gelegt, da dort die beste Abdeckung mit Smartphone-Messungen zu erwarten war. In Außenbereichen besteht die Gefahr, dass wenige oder gar keine verwertbaren Messungen in der Nähe des Messpunkts liegen und dieser somit wertlos wäre. Daher wurden hier nur einzelne Messungen vorgenommen.

Die Anzahl der Messpunkte ist für das kleinere Datenpaket aus Aachen größer, weil ursprünglich nur für dieses Validierungsmessungen geplant waren. Nach Projektstart gab es jedoch Befürchtungen, dass der Datenumfang nicht für den Vergleich ausreichen würde, weshalb der Projektnehmer außerplanmäßig zusätzliche Messungen in München ausgeführt hat.



Abbildung 4-74 Verteilung der Messpunkte in Aachen zum Vergleich mit den Smartphone-Messungen

4.8.3 Ergebnisse der Vergleichsmessungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Vergleichsmessungen für beide Datenpakete aufgeführt. Dabei wird für jeden Messpunkt die aus den Smartphone-Crowdsourcingdaten ermittelte Gesamtimmissionshöhe derjenigen der Feldstärkemessung gegenübergestellt. Die Interpolation wurde in diesem Fall für die exakte vom Feldstärkemessgerät mittels GPS bestimmte Position berechnet. Da sich der Rechenaufwand aufgrund der geringen Anzahl von Punkten in Grenzen hielt, wurde die Auswertung für alle drei in Abschnitt 4.5.2 diskutierte Auswertungsvarianten vorgenommen:

- Inverse Distanzwichtung (IDW) der Signalpegel mit Exponent eins und Beschränkung auf Werte im Umkreis von 20 m
- Arithmetischer Mittelwert aus den Signalpegeln im Umkreis von 20 m
- Gaußprozessregression (GPR) mit exponentieller Kovarianzfunktion und konstanter Erwartungswertfunktion (Ordinary Kriging)

Um die Abweichung der Smartphone-Schätzungen von der durch die Feldstärkemessung bestimmte Immission besser beschreiben zu können, wird folgende Definition des Verhältnisses der beiden Grenzwertausschöpfungsgrade in Dezibel verwendet:

$$A = 20 \cdot \log_{10} \frac{GWA_{E, \text{Smartphone}}}{GWA_{E, \text{SRM}}}$$

Mit

- A Verhältnis der Grenzwertausschöpfungsgrade in Dezibel
- $GWA_{E, \text{Smartphone}}$ Auf die elektrische Feldstärke bezogener Grenzwertausschöpfungsgrad der Immission bestimmt aus den Smartphone-Messungen
- $GWA_{E, \text{SRM}}$ Auf die elektrische Feldstärke bezogener Grenzwertausschöpfungsgrad der Immission bestimmt aus den Feldstärkemessungen mit dem SRM-3006

Die Berechnung erfolgt aufgrund dessen, dass es sich bei den Grenzwertausschöpfungsgraden um auf Leistungswurzelgrößen bezogene Werte handelt, mit dem Wert zwanzig vor dem Logarithmus. Das berechnete Verhältnis lässt sich wie folgt interpretieren: Bei einem Wert von -6 dB bzw. +6 dB ist die aus den Smartphone-Messungen geschätzte Immission nur halb bzw. doppelt so groß wie die durch die Feldstärkemessung ermittelte Immission. Bei -20 dB bzw. +20 dB beträgt sie $\frac{1}{10}$ bzw. das Zehnfache.

4.8.3.1 München

Die Abbildungen 4-75 bis 4-83 präsentieren die Ergebnisse der Vergleichsmessungen in München. In je einer Abbildung werden die ermittelte Gesamtimmissionshöhe, sowie die Immissionshöhen der einzelnen Mobilfunkdienste aufgeführt. Für LTE werden die Ergebnisse auch aufgeschlüsselt nach den einzelnen Frequenzbändern in je einer Abbildung gezeigt. Jede Abbildung enthält ein Diagramm zum Vergleich der jeweiligen Immissionsschätzungen der drei Auswertungsvarianten der Smartphone-Daten mit der gemessenen Feldstärke, in dem die Messpunkte nach der Immissionshöhe der Feldstärkemessung sortiert sind, um den Trend nachvollziehen zu können. Daneben wird durch Histogramme jeweils die Abweichung der Smartphone-Schätzungen von der durch die Feldstärkemessung bestimmte Immission in Dezibel veranschaulicht.

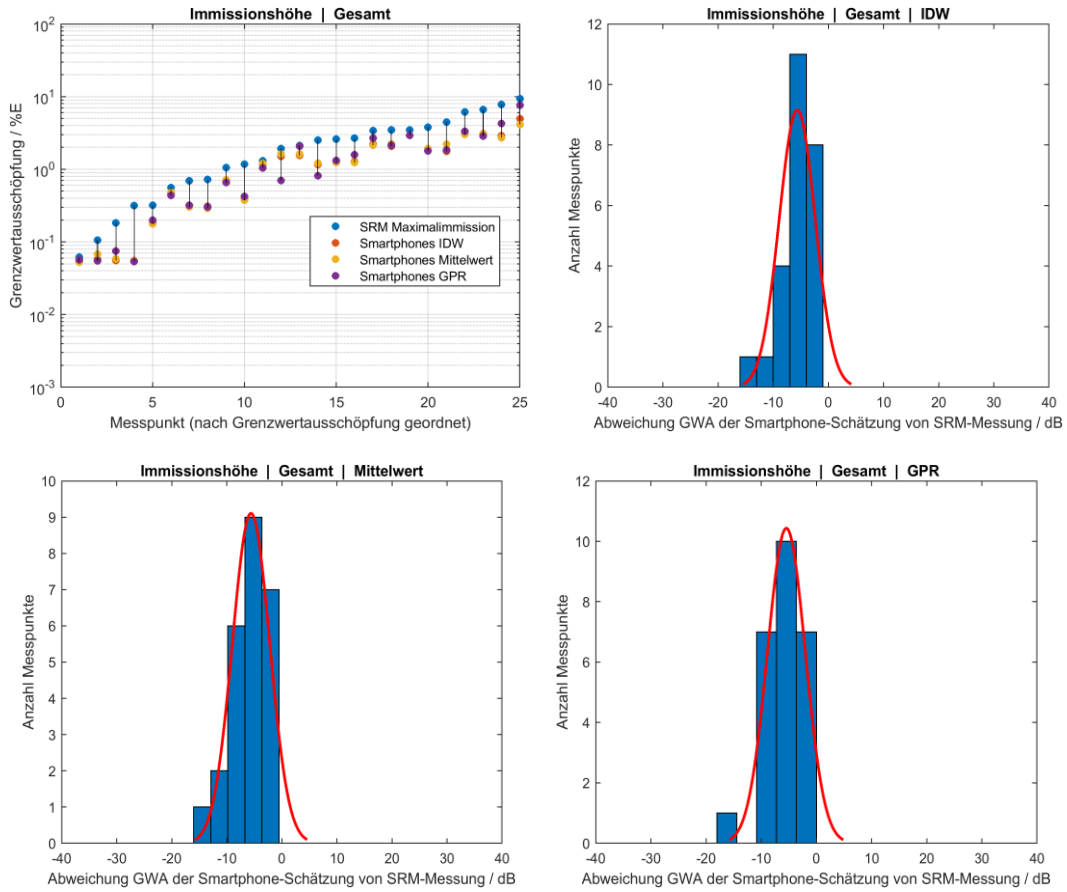


Abbildung 4-75 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Gesamtimmission

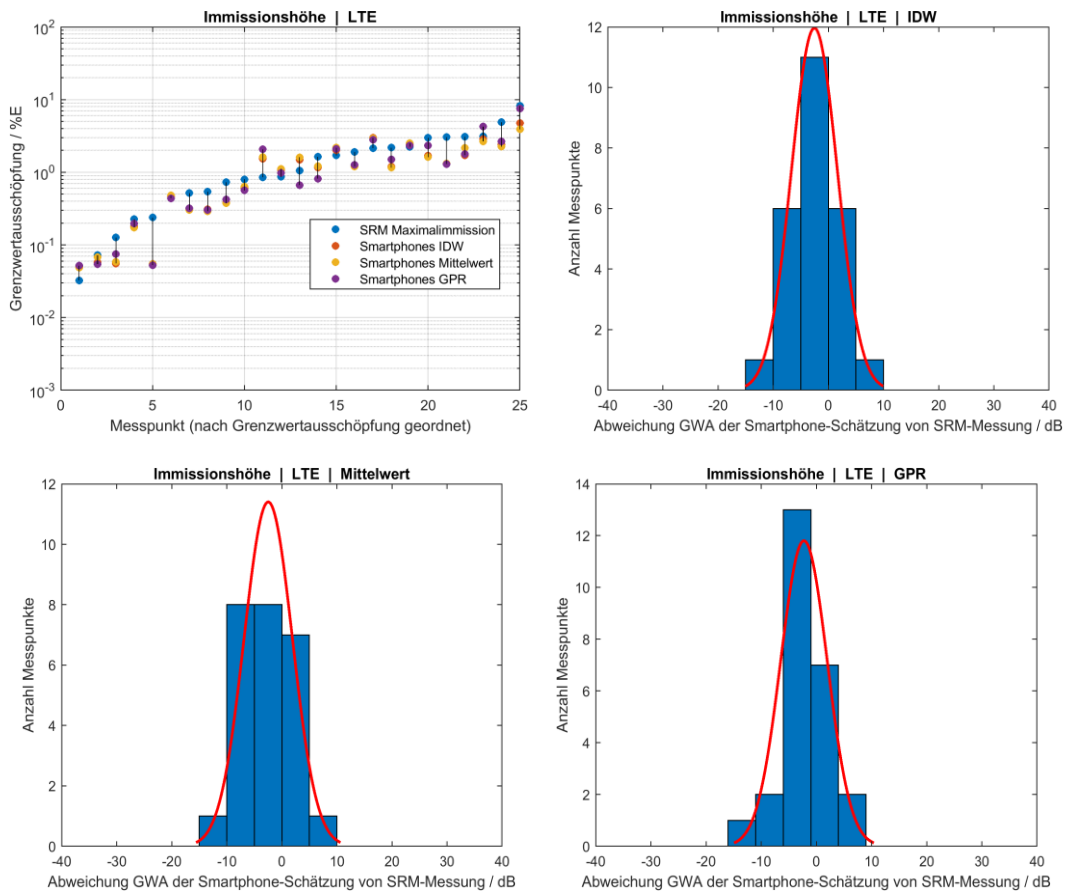


Abbildung 4-76 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch LTE

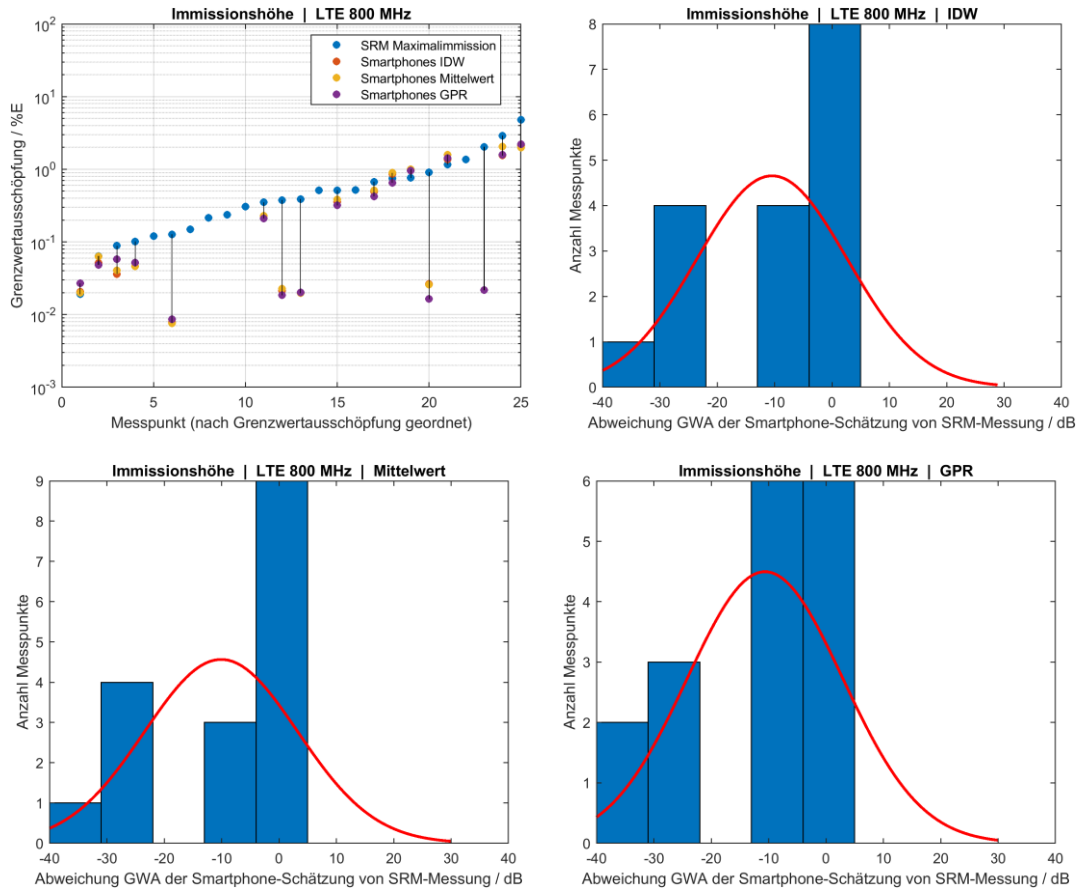


Abbildung 4-77 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch LTE im 800 MHz-Band

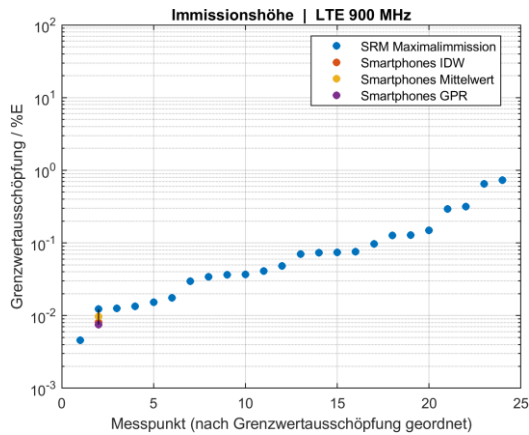


Abbildung 4-78 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch LTE im 900 MHz-Band

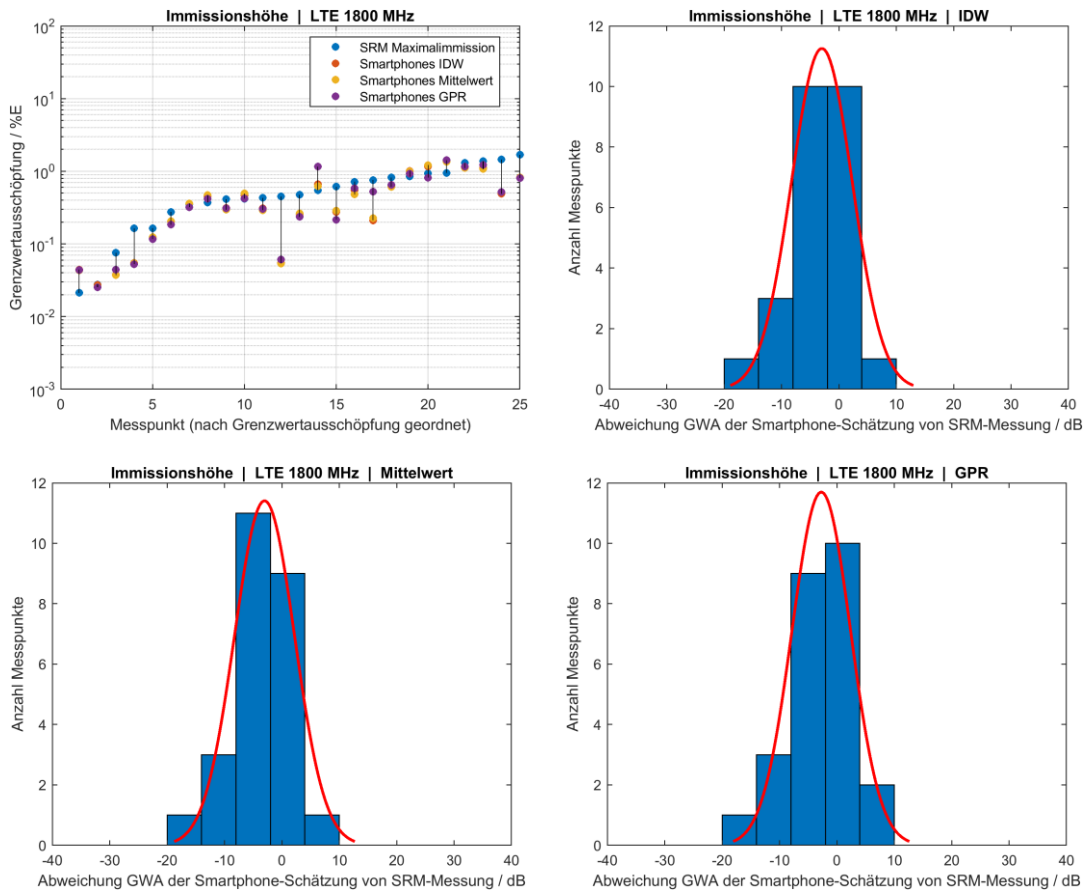


Abbildung 4-79 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch LTE im 1800 MHz-Band

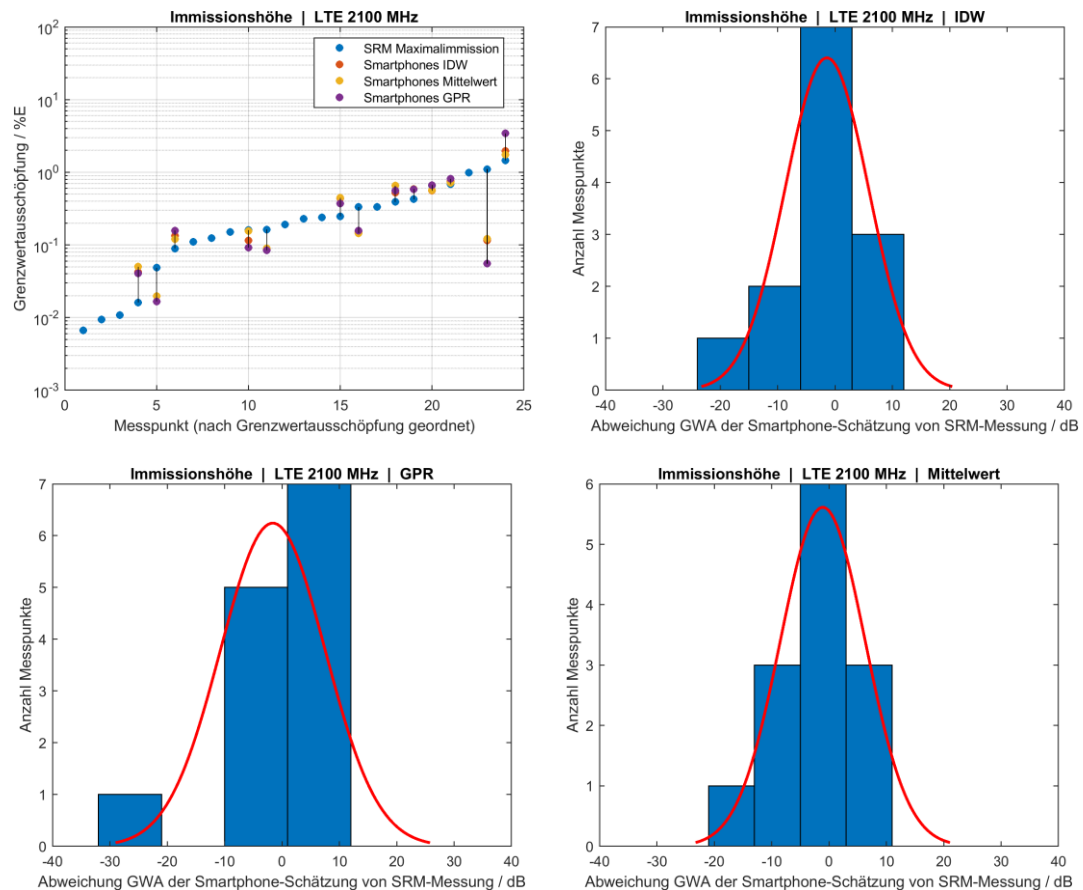


Abbildung 4-80 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch LTE im 2100 MHz-Band

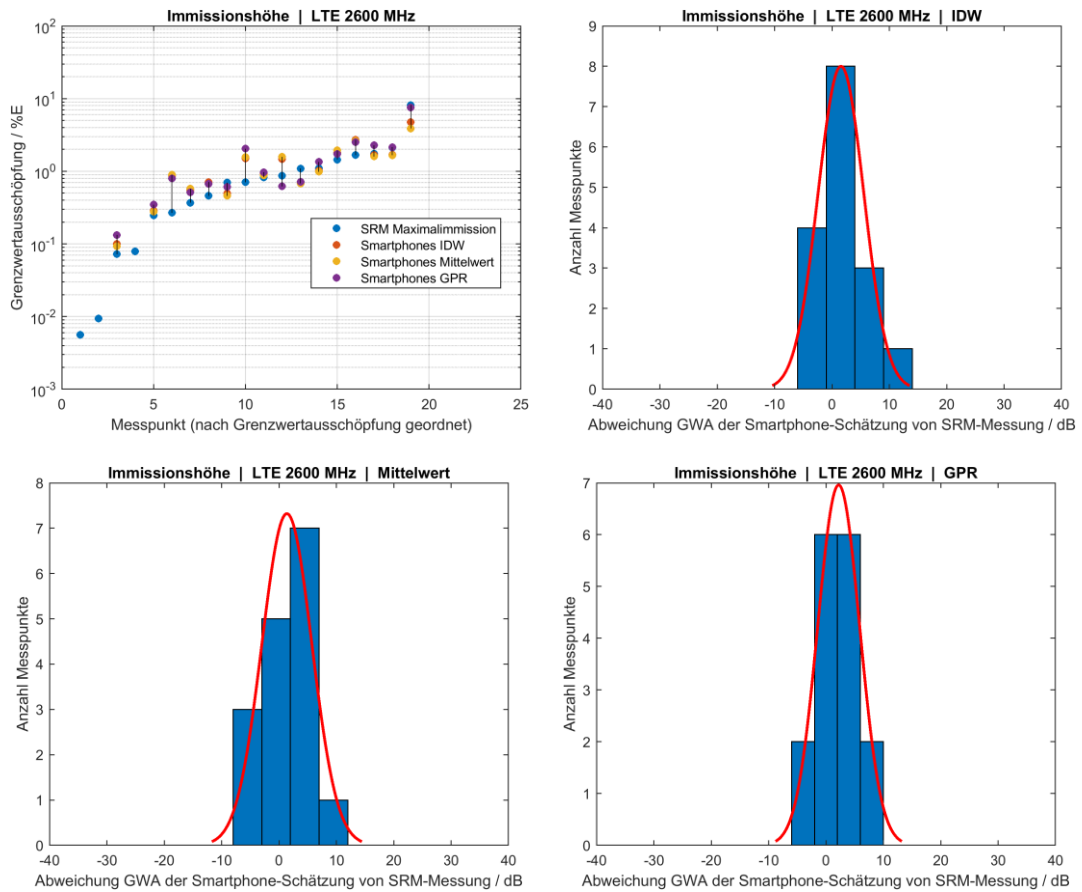


Abbildung 4-81 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch LTE im 2600 MHz-Band

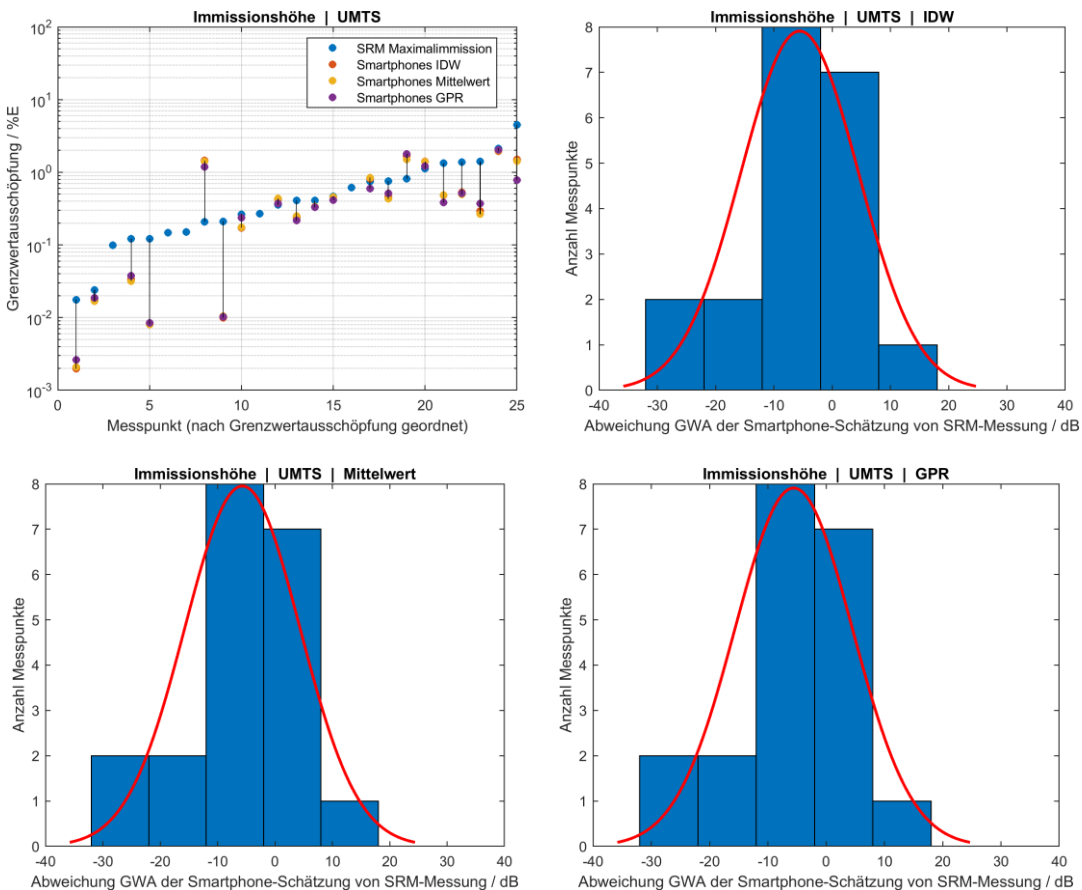


Abbildung 4-82 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch UMTS

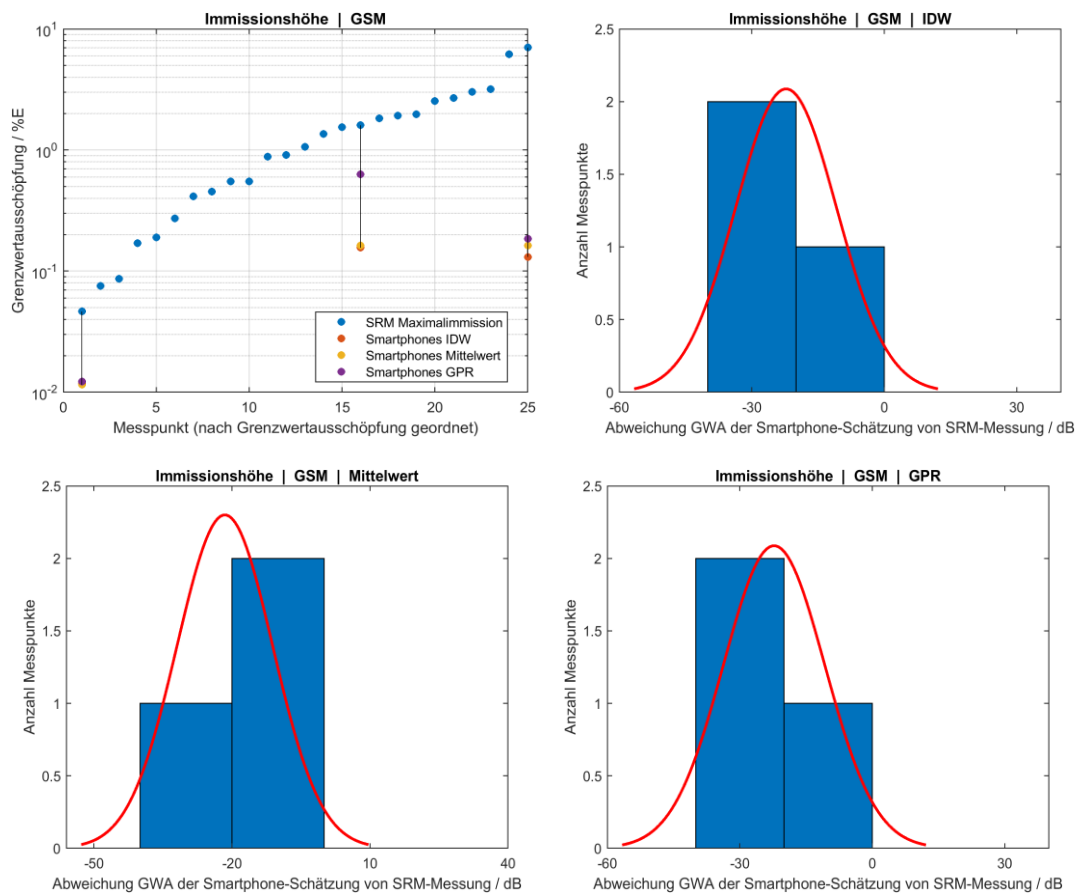


Abbildung 4-83 Ergebnis der Vergleichsmessungen in München für die Immission durch GSM

Die Gesamtimmission wird insgesamt unterschätzt, allerdings wird zumindest der Trend von niedrigen zu höheren Immissionswerten aus den Smartphone-Schätzungen tendenziell nachverfolgt. Insbesondere für GSM ist oftmals kein sinnvoll verwertbares Ergebnis durch die Immissionsschätzung erzielt worden. An den meisten Messpunkten liegen keine Messdaten für eine Auswertung vor und an allen Punkten, für die ein Immissionsbeitrag ermittelt werden konnte, liegt eine massive Unterschätzung vor. Bei UMTS sieht das Ergebnis ein wenig besser aus. Vereinzelt treten mäßige Überschätzungen bei den Teilimmissionen der Frequenzbänder und Funkdienste auf. Diese können mehrere Ursachen haben. Einerseits könnten die Smartphones eine zu hohe Signalstärke an diesem Punkt oder der Umgebung gemessen haben, sodass ein zu hoher Wert für die Immission ermittelt wird. Es kann allerdings auch sein, dass in dem Bereich mehr Funkzellen bei der Immissionsbestimmung aufsummiert wurden, als tatsächlich parallel in Betrieb waren. Dies könnte zum Beispiel durch Änderungen an der Netzkonfiguration passieren, wenn sich Cell-IDs ändern und somit die Zellen vor und nach der Änderung quasi doppelt von den Smartphones erfasst werden. Da bei der Auswertung nicht überwacht wurde, wann eine Zelle erst und letztmalig erfasst wurde, und nur für den gesamten Zeitraum ausgewertet wurde, kann eine derartige Überlagerung von Zellen, die nicht zeitgleich in Betrieb waren, nicht ausgeschlossen werden.

Für LTE ist die Übereinstimmung der geschätzten Gesamtimmission als einziges verhältnismäßig gut. Zwar gibt es auch hier deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Frequenzbändern, wo teilweise an vielen Messorten keine Schätzung erhalten wurde, allerdings sind die wesentlichen Immissionsbeiträge der Gesamtimmission durch LTE in den meisten Fällen erfasst worden.

Beim Vergleich der drei Varianten zur Auswertung der Smartphone-Daten sticht keine als den jeweils anderen eindeutig überlegene hervor. Insgesamt liegen die Ergebnisse meist dicht beieinander, wobei mal das eine und mal das andere Verfahren näher am gemessenen Wert liegt.

Als Fazit des Vergleiches für München ergibt sich damit, dass für UMTS und GSM auch mit den Messdaten über ein Jahr hinweg keine brauchbare Abdeckung erzielt werden kann, die eine verwertbare Immissionsabschätzung zulässt. Für LTE hingegen ergibt sich trotz Lücken in einzelnen Frequenzbändern eine Übereinstimmung des Grenzwertausschöpfungsgrades, die die Tendenz der Immissionshöhe grob nachzeichnen kann.

In Tabelle 4-10 ist der Prozentsatz der Messorte angegeben, für die eine Auswertung in dem jeweiligen Funkdienst bzw. dem jeweilige Frequenzband möglich war.

Funkdienst	Anteil Messorte
Gesamt	100%
LTE	100%
LTE 2100 MHz	54%
LTE 1800 MHz	100%
LTE 2600 MHz	84%
LTE 900 MHz	4%
LTE 800 MHz	68%
UMTS	80%
GSM	12%

Tabelle 4-10 Anteil der Messorte, an denen für den jeweilige Funkdienst überhaupt eine Auswertung erstellt werden konnte.

4.8.3.2 Aachen

Die Ergebnisse der Vergleichsmessungen in Aachen sind in den Abbildungen 4-84 bis 4-92 in gleicher Weise wie schon für München aufgeführt. Der Vergleich der Feldstärkemessungen mit den aus den Smartphone-Messungen gewonnenen Immissionsschätzungen ergibt eine fast durchgängige deutliche Unterschätzung durch die Smartphone-Messungen. Bei UMTS und GSM konnte sogar nur für wenige Punkte überhaupt ein Vergleich angestellt werden, da in der Umgebung des jeweiligen Messpunkts gar keine Smartphone-Messungen zur Auswertung vorlagen. Bei LTE betrifft dies insbesondere das 800 MHz- und 900 MHz-Band, aber ebenfalls das 1800 MHz- sowie 2600 MHz-Band weisen große Lücken auf. Insgesamt reicht der Datenbestand, der durch diesen einen Monat in Aachen erfasst wurde, nicht ansatzweise aus, um eine sinnvolle Schätzung der Immissionshöhe zu erhalten. Die Funkdienste und einzelnen Funkzellen werden unzureichend erfasst, sodass nur ein Teil der tatsächlichen Immissionsbeiträge und das auch nur stellenweise abgedeckt ist. Tabelle 4-11 gibt noch einmal den Prozentsatz der Messorte an, für den eine Auswertung mit der gewählten Vorgehen überhaupt möglich war.

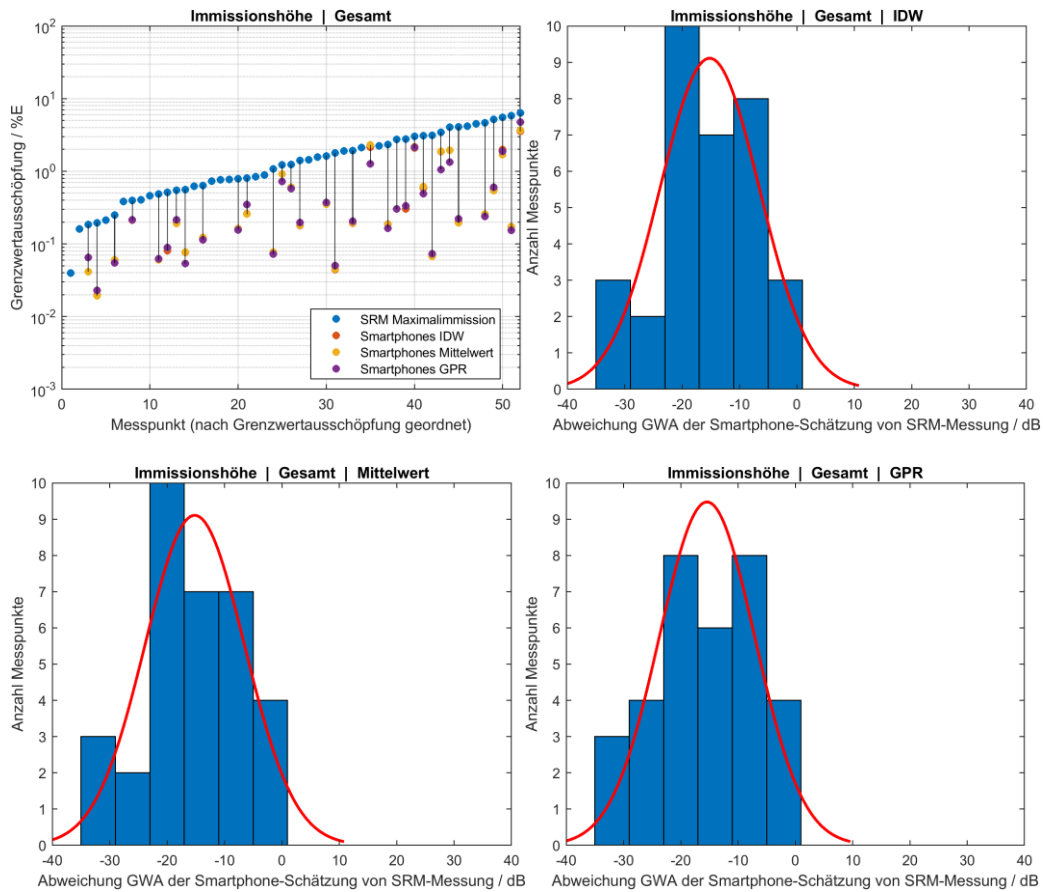


Abbildung 4-84 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Gesamtimmission

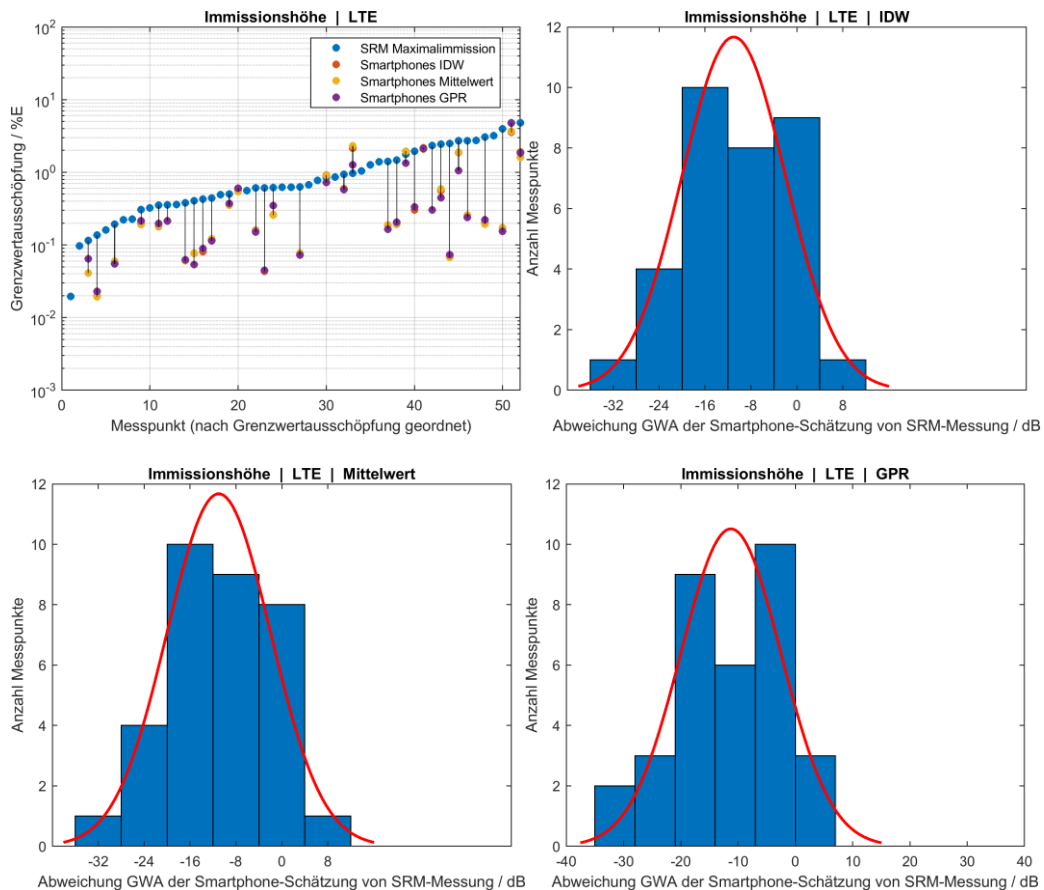


Abbildung 4-85 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch LTE

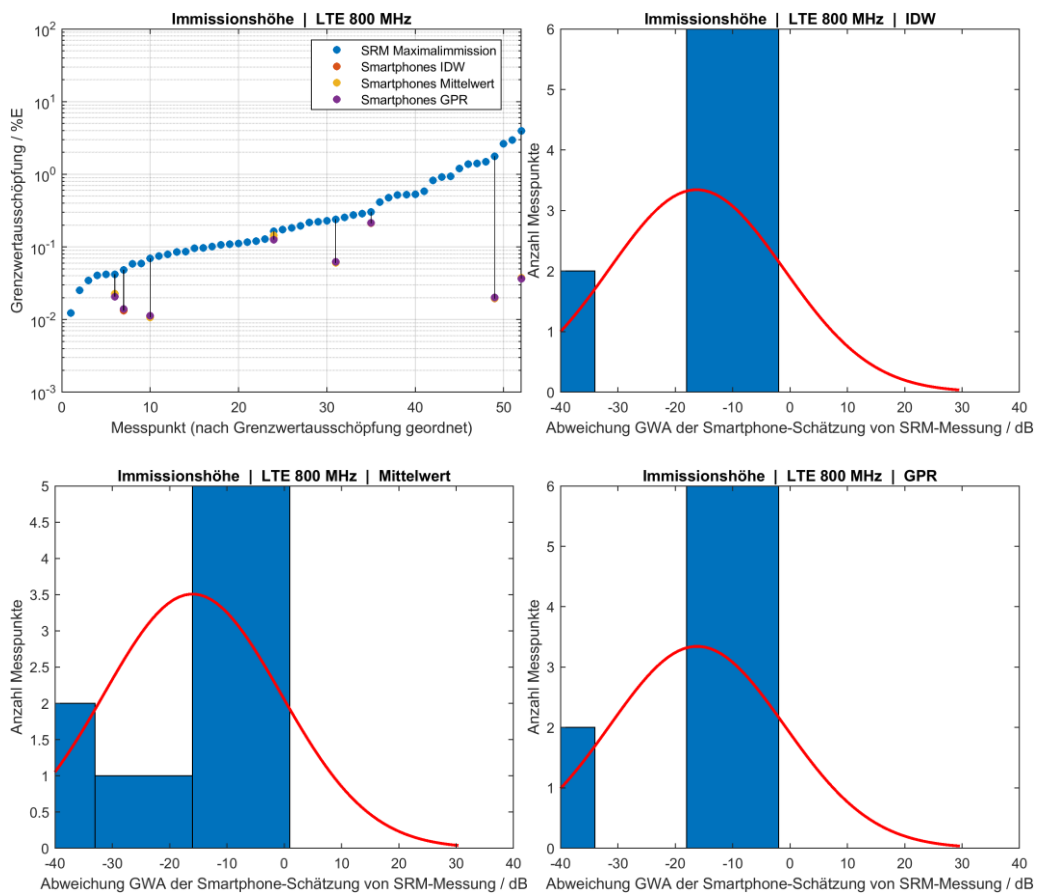


Abbildung 4-86 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch LTE im 800 MHz-Band

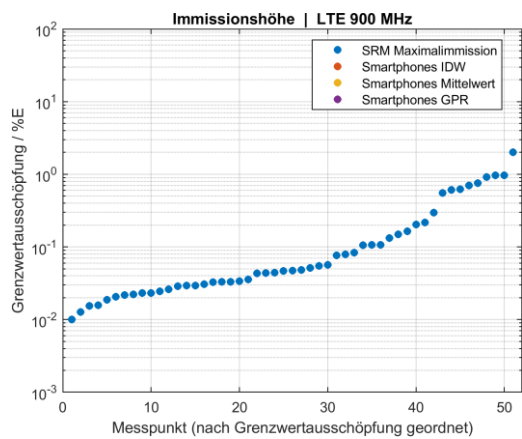


Abbildung 4-87 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch LTE im 900 MHz-Band

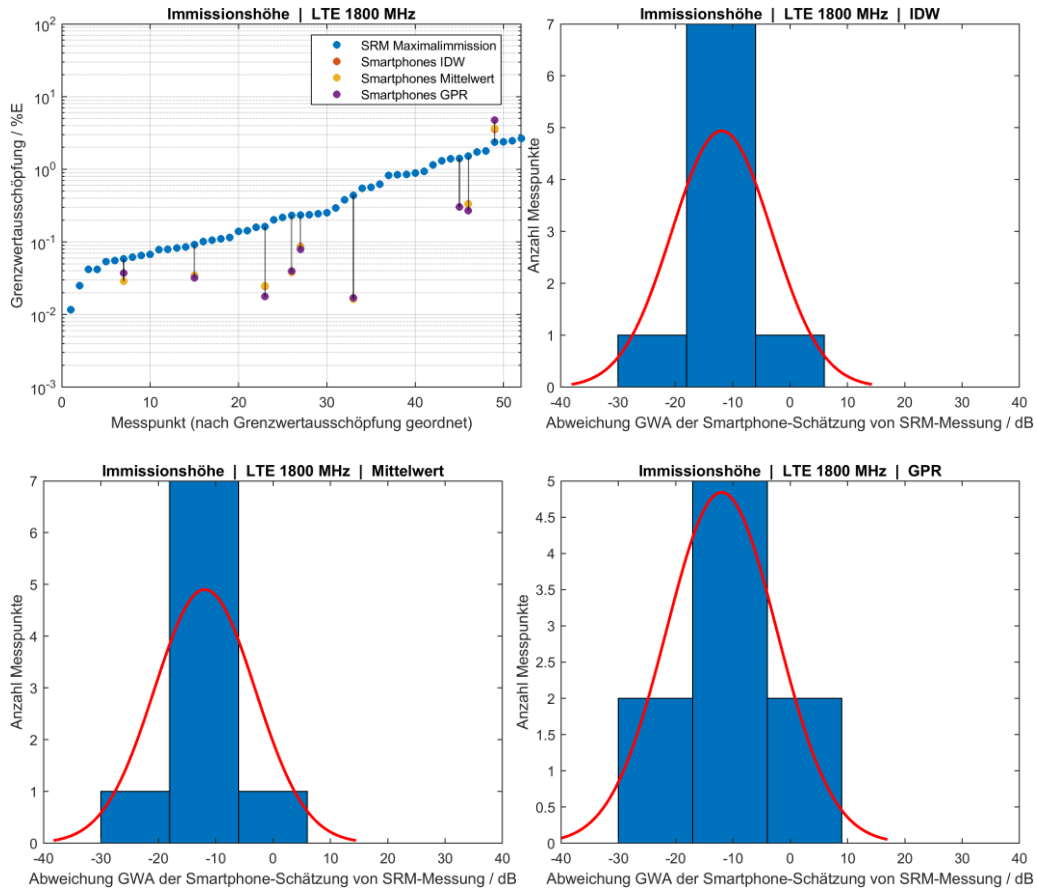


Abbildung 4-88 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch LTE im 1800 MHz-Band

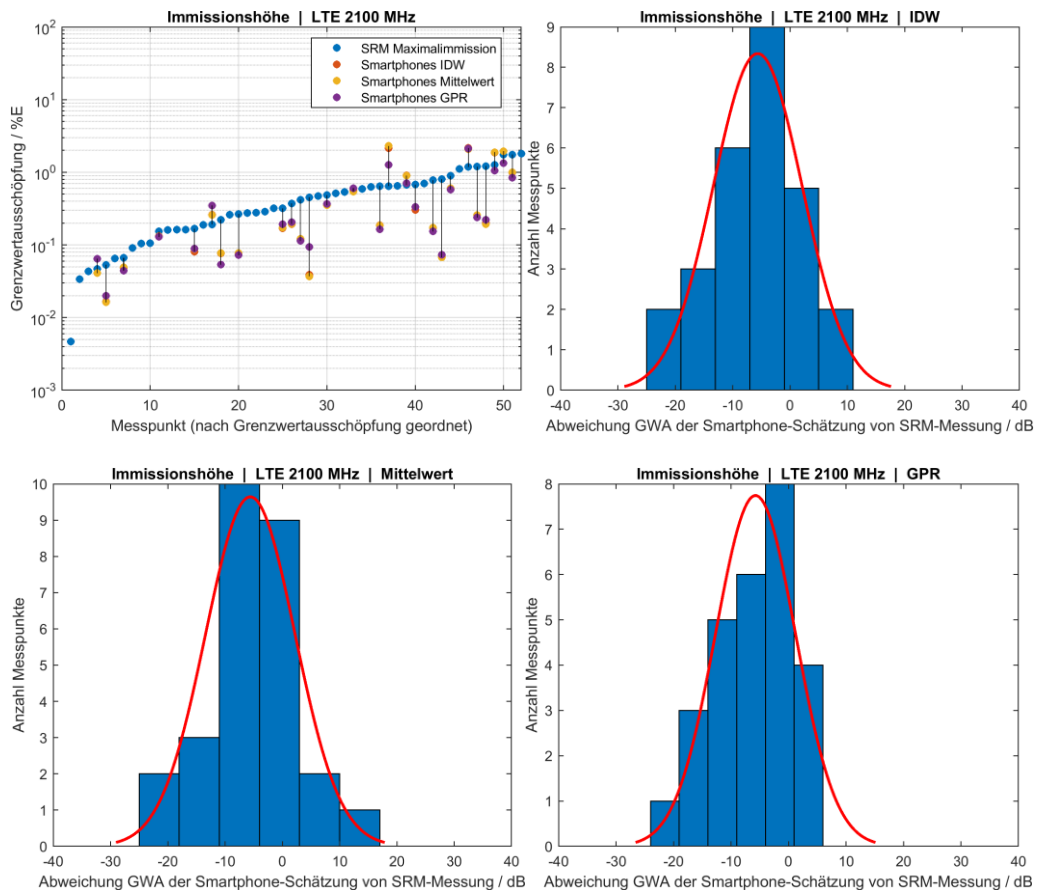


Abbildung 4-89 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch LTE im 2100 MHz-Band

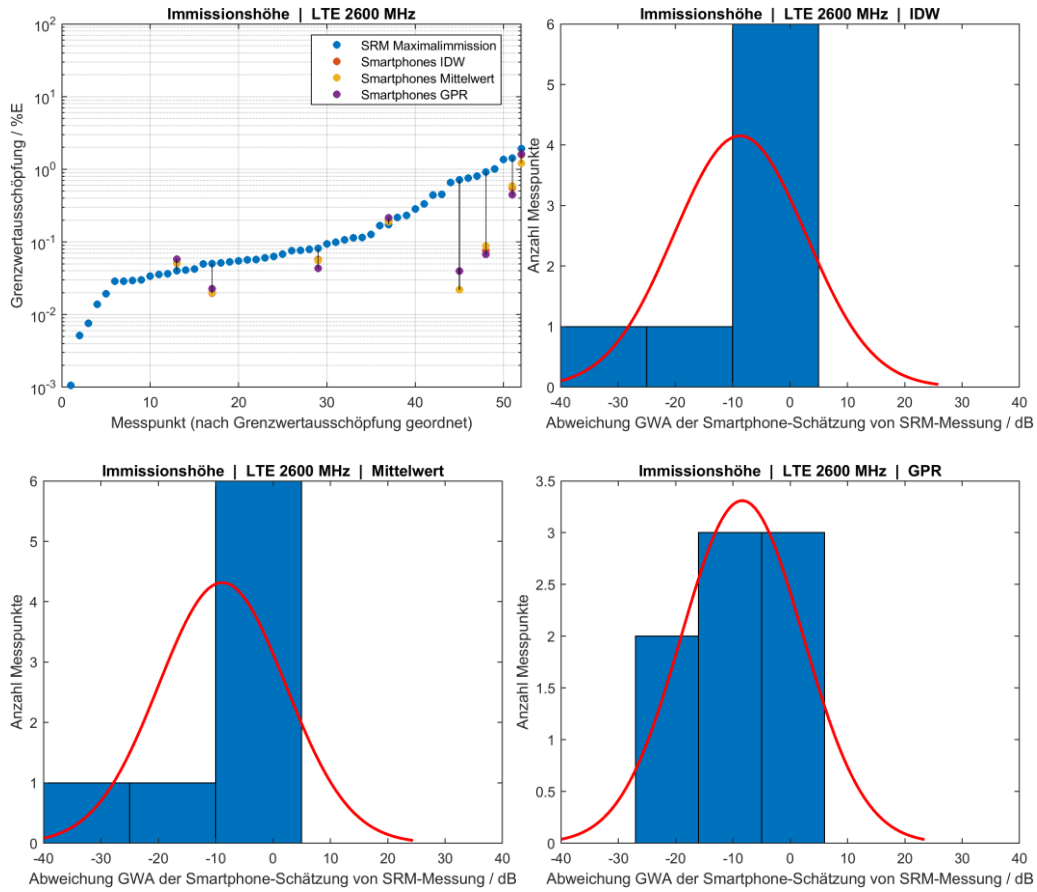


Abbildung 4-90 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch LTE im 2600 MHz-Band

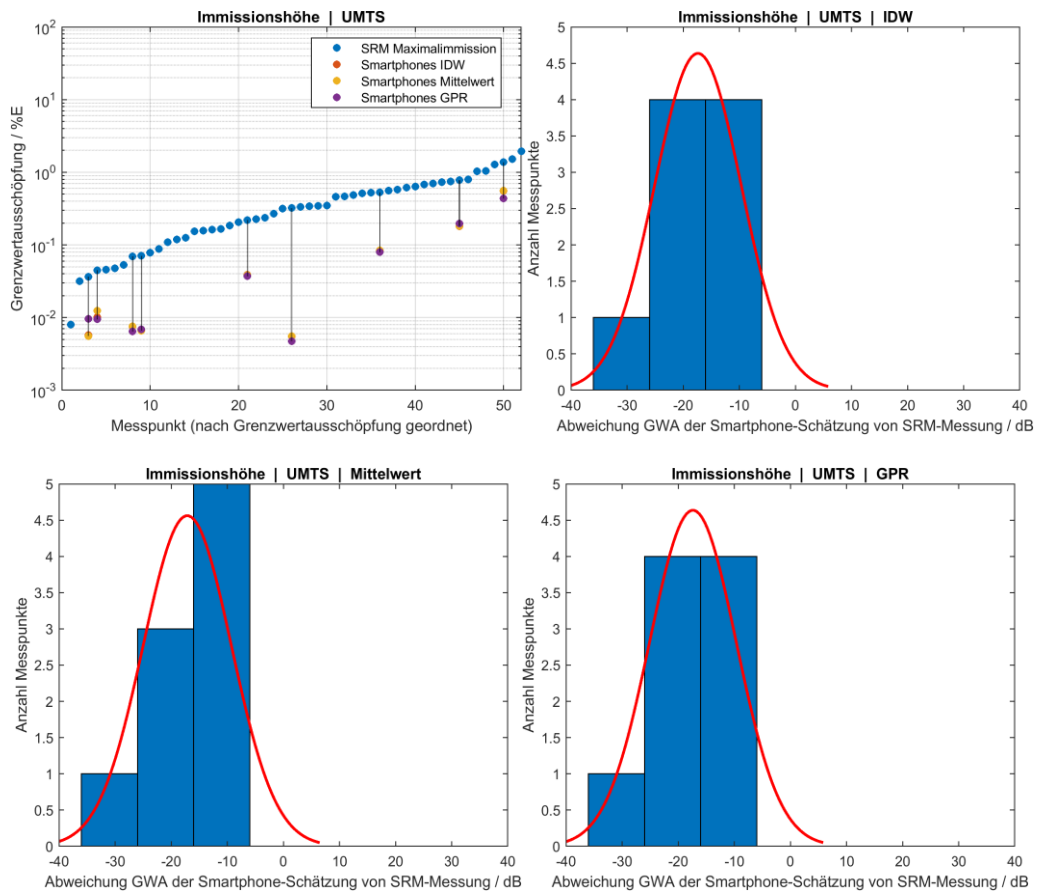


Abbildung 4-91 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch UMTS

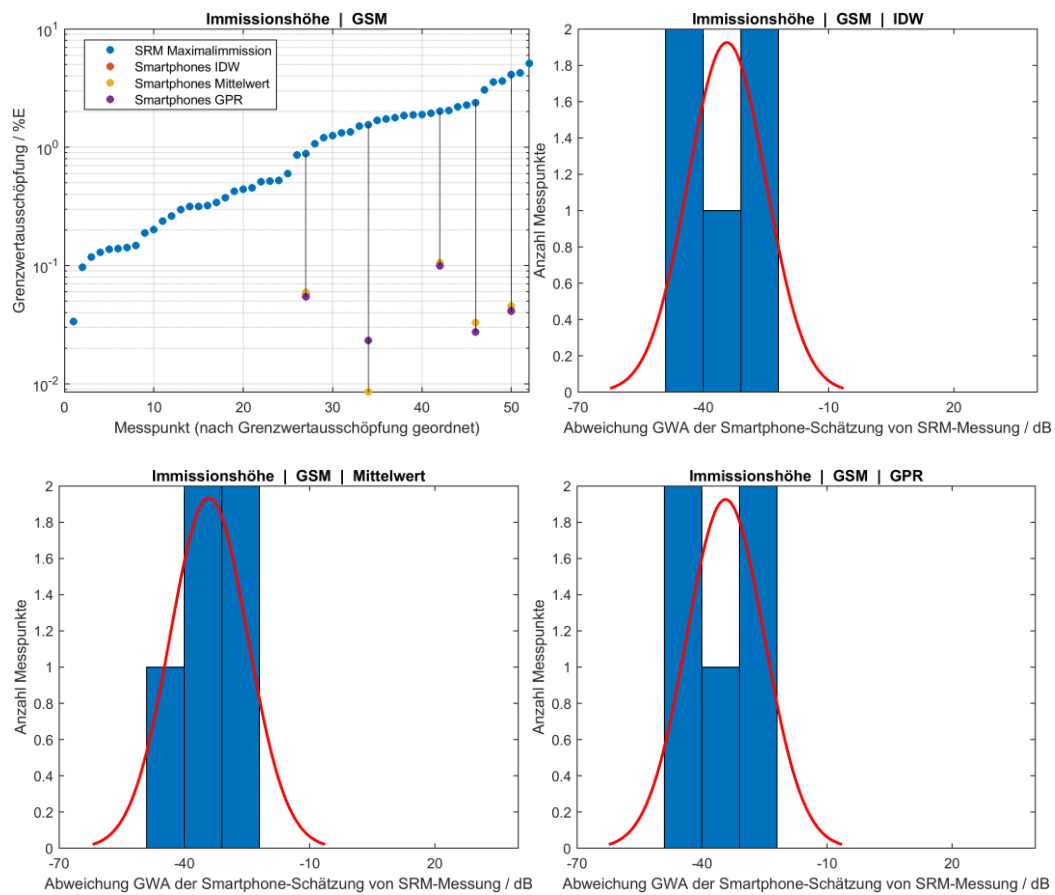


Abbildung 4-92 Ergebnis der Vergleichsmessungen in Aachen für die Immission durch GSM

Funkdienst	Anteil Messorte
Gesamt	64%
LTE	64%
LTE 2100 MHz	52%
LTE 1800 MHz	17%
LTE 2600 MHz	15%
LTE 900 MHz	0%
LTE 800 MHz	15%
UMTS	17%
GSM	10%

Tabelle 4-11 Anteil der Messorte, an denen für den jeweilige Funkdienst auf Basis der definierten Kriterien überhaupt eine Auswertung erstellt werden konnte.

Ursprünglich wurde zusätzlich zum Vergleich der Gesamtimmissionen auch ein Abgleich zwischen den Ergebnissen der Smartphone- und Feldstärkemessungen auf der Ebene einzelner Funkzellen angestrebt. Dies konnte jedoch nicht umgesetzt werden, da eine Zuordnung zwischen den Ergebnissen des SRM-3006 und der Smartphones nicht möglich war. Grund hierfür ist, dass in den zur Verfügung stehenden Crowdsourcingdaten die Physical Cell ID (PCI) nicht enthalten ist. Vom SRM wird jedoch wiederum ausschließlich diese ausgegeben, um eine Zu-

ordnung zur jeweiligen Funkzelle zu ermöglichen. Die PCI ist jedoch nur innerhalb eines begrenzten Umfelds eindeutig. Die eindeutige vollständige Zell-ID ist zwar im Datensatz enthalten, diese besitzt jedoch keinen festen Zusammenhang zur PCI.

4.8.4 Vergleich der Maximalimmission mit der Momentanimmission

An den Messorten der Vergleichsmessungen wurde neben den auslastungsunabhängigen Messungen zur Bestimmung der Maximalimmission auch die Momentanimmission des Mobilfunk-Downlinks bestimmt. Hierzu wurde im Modus „Safety Evaluation“ des Narda SRM-3006 eine einminütige Messung vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4-93 ergänzt durch die bereits gezeigten Ergebnisse für die Maximalimmission für beide Städte aufgeführt. Bei den niedrigsten Immissionshöhen liegen keine Werte zur Momentanimmission vor, da der Messwert unterhalb des Rauschlevels des SRM-3006 lag.

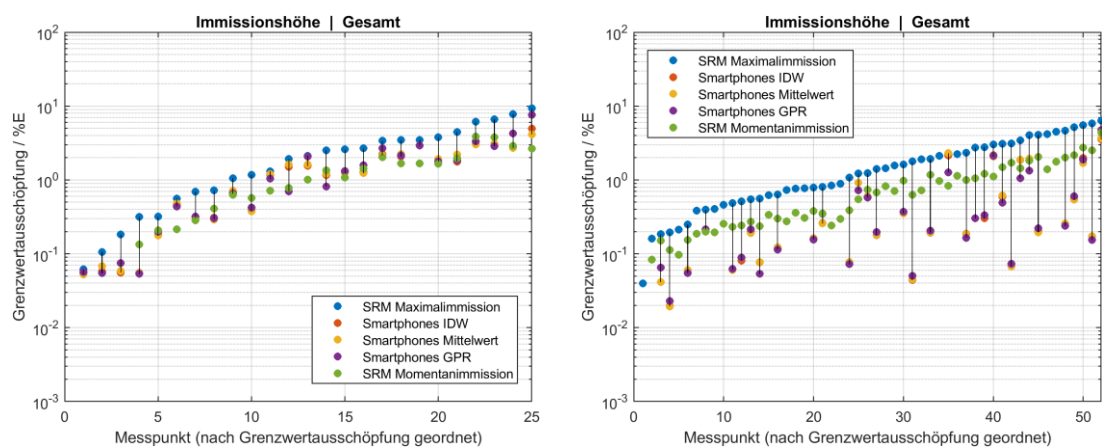


Abbildung 4-93 Vergleich der Momentanimmission mit der Maximalimmission für München (links) und Aachen (rechts)

4.9 Verbesserung der Ergebnisgenauigkeit gegenüber der Einzelmessung

Im Folgenden soll die mögliche Verbesserung der Ergebnisgenauigkeit bei gemeinsamer Auswertung von Crowdsourcing-Messungen gegenüber einer Einzelmessung eines Smartphones veranschaulicht werden. Dazu werden die Messdaten der Smartphones im Umkreis eines der Messpunkte der Validierungsmessungen in einer Kartendarstellung gezeigt und ein Histogramm der Signalstärken danebengestellt. Für acht der dort am meisten erfassten LTE-Funkzellen erfolgt eine eigene Darstellung in den beiden Abbildungen 4-94 und 4-95, wobei einmal die Funkzellen mit mehr und einmal mit weniger als 200 Messwerten enthalten sind.

Die jeweils linke Grafik zeigt eine Karte mit den Orten der Smartphone-Messungen, die für die Zelle im Umkreis von 20 m um den Messpunkt aufgezeichnet wurden, mit unterschiedlichen Farben für die einzelnen Smartphone-Tracks. Als Track werden zeitlich unmittelbar aufeinanderfolgende Messwerte des gleichen Smartphone-Modells aufgefasst. Die Tracks werden anhand von Smartphone-Modell, SIM-Betreiber und Zeitstempeln differenziert. Bei mehr als 15 verschiedenen Tracks wiederholen sich die Farben, sodass Punkte verschiedener Tracks möglicherweise je nach Lage in der Karte nicht mehr unterscheidbar sind. Der rote, etwas größere Punkt markiert den Standort für den der Umkreis betrachtet wird.

In der Mitte werden die einzelnen Smartphone-Messungen der Funkzelle in der Kartenansicht mit ihrer jeweiligen Signalstärke dargestellt. Es ist zu beachten, dass die Farbskala für jede Funkzelle auf den jeweiligen Wertebereich angepasst ist, damit unterschiedliche Signalstärken jeweils deutlich sichtbar sind.

Das rechte Diagramm zeigt das Histogramm der Signalstärken der Smartphone-Messungen aus dem Umkreis des Messpunktes. Die rote Kurve zeigt die Annäherung durch eine Normalverteilung. Senkrechte Linien markieren jeweils die Auswertungsergebnisse aus den Smartphone-Messungen bei Anwendung des arithmetischen Mittels (Mittelwert), der Inversen Distanzgewichtung (IDW) sowie der Gaußprozessregression (GPR).

Diese Darstellung soll nur demonstrieren, wie sich aus einzelnen Smartphone-Messungen durch Vergrößerung der Anzahl der Messungen ein stabiler werdender Mittelwert für die Signalstärke ergibt. Dies sagt jedoch nichts darüber aus, wie gut diese mittlere Signalstärke nach Umwandlung in einen Feldstärkewert mit der Feldstärkemessung an diesem Ort übereinstimmen wird. Auch bei einem stabilen Mittelwert könnte der Wert von dem der Feldstärkemessung deutlich abweichen. Aufgrund der bereits erläuterten Schwierigkeit bei der Zuordnung der Funkzellen zwischen den Smartphone- und den Feldstärkemessungen erfolgt an dieser Stelle kein Vergleich der Feldstärke.

Diese Betrachtung könnte prinzipiell für jeden beliebigen Standort mit Messdaten innerhalb des Untersuchungsgebietes erfolgen. Konkret wurde die Auswertung für die Standorte der Validierungsmessungen ausgeführt, wobei hier stellvertretend die Ergebnisse eines einzelnen Standortes gezeigt werden, da es keine relevanten Unterschiede zwischen den Standorten gab.

Folgende Beobachtungen lassen sich ableiten:

- Bei guter Abdeckung der Funkzelle (viele Messwerte und eine größere Anzahl verschiedener Tracks im betrachteten Umkreis) nähert sich die Verteilung der Signalstärkewerte sehr gut an eine Normalverteilung an. Bei geringen Anzahlen sind die Annäherungen teilweise erheblich schlechter. In manchen Fällen kommt es dazu, dass sich Häufungen um zwei verschiedene Werte ergeben.
- Teilweise treten deutliche Abweichungen einzelner Tracks von den Messwerten der übrigen Tracks auf. Umgekehrt sind in vielen Fällen auch die Werte verschiedener Tracks sehr ähnlich bezüglich ihres Signalstärkeverlaufs. Die Abweichungen einzelner Tracks können das Resultat eines stärker vom Mittelwert aller Smartphones abweichenden Umrechnungsfaktors von Signal- zur Feldstärke des betroffenen Endgeräts sein. Weicht die Signalstärke des Tracks speziell nach unten ab, kann es auch sein, dass das Endgerät während der Aufzeichnung des Tracks durch äußere Umstände außergewöhnlich abgeschirmt war und das Signal nur mit deutlicher Dämpfung empfangen werden konnte. Treten gehäuft Tracks eines oder mehrerer Smartphones dieser Art auf und kompensieren sich diese nicht gegenseitig, so können diese zu einer deutlichen Verzerrung der Ergebnisse in den betroffenen Bereichen führen.
- Deutliche Trends einer Signalstärkeänderung innerhalb des betrachteten Umkreises sind für diesen Beispielpunkt praktisch in keiner der Funkzellen auszumachen. Es kann aber auch Fälle geben, bei denen bereits innerhalb des Radius von 20 m um einen

Punkt eine solche erkennbar ist, wie das Beispiel in Abbildung 4-96 zeigt. Die Genauigkeit der Immissionsabschätzung kann in solchen Bereichen mit deutlicher Signalstärkeänderung insbesondere dann beeinträchtigt werden, wenn die vorhandenen Messdaten nicht gleichmäßig über die Fläche des betrachteten Umkreises verteilt sind.

- Der durch die Inverse Distanzwichtung interpolierte Wert stimmt in den Fällen mit vielen Messwerten meist sehr genau mit dem arithmetischen Mittel überein. Bei wenigen Messwerten gibt es deutlichere Abweichungen zwischen beiden Werten abhängig von der Verteilung der Messwerte und deren Signalstärken in der Fläche.
- Der durch die Gaußprozessregression bestimmte Interpolationswert weicht häufiger deutlich von demjenigen des arithmetischen Mittels und der Inversen Distanzwichtung ab, auch in den Fällen mit einer größeren Anzahl von Messungen. Welches Ergebnis am besten mit der Feldstärkemessung übereinstimmt, lässt sich an dieser Stelle nicht beurteilen.

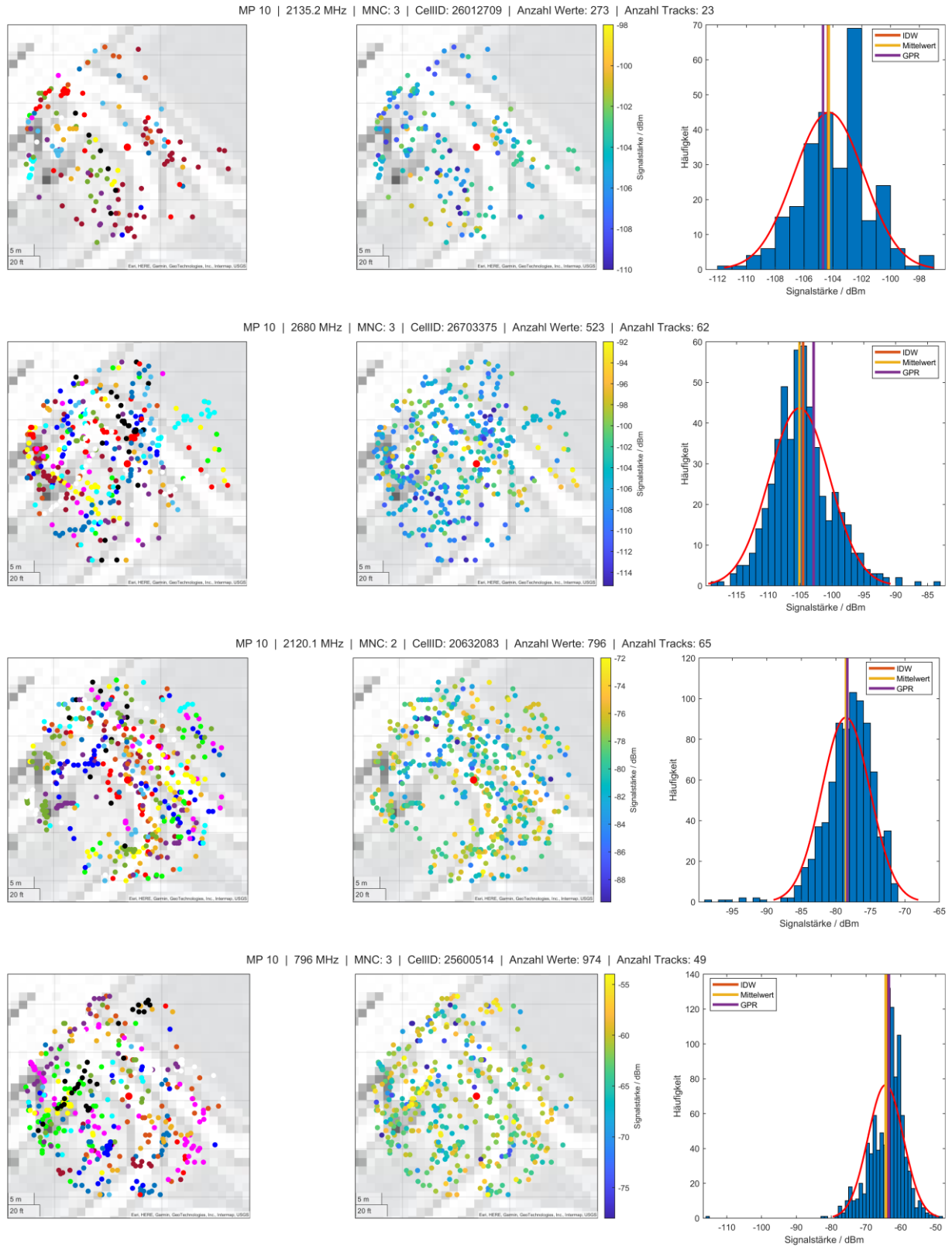


Abbildung 4-94 Demonstration der Signalstärkeverteilung für Funkzellen mit mehr als 200 Messwerten im Umkreis von 20 m um die betrachtete Position

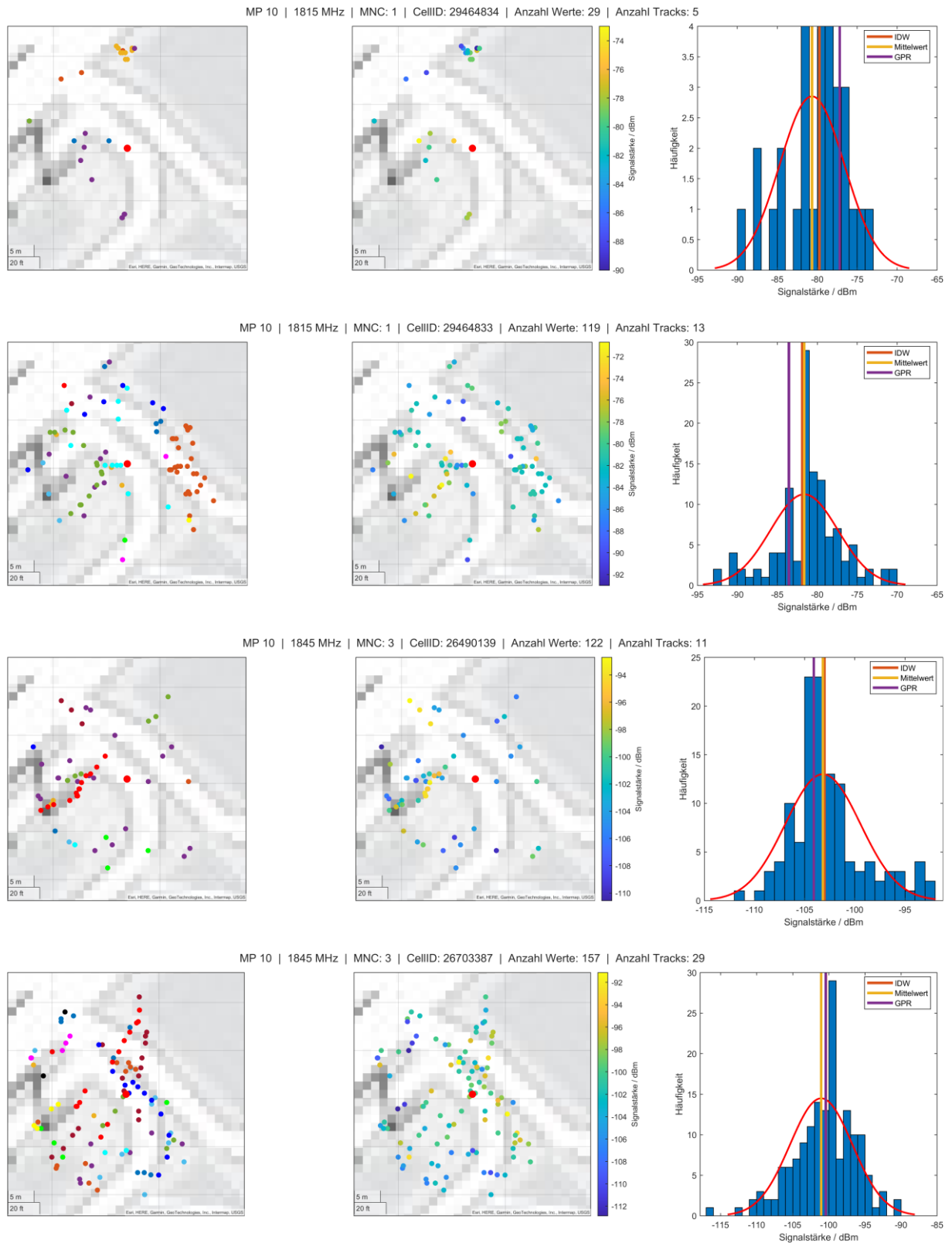


Abbildung 4-95 Demonstration der Signalstärkeverteilung für Funkzellen mit weniger als 200 Messwerten im Umkreis von 20 m um die betrachtete Position

Insgesamt kann festgehalten werden, dass mit einer zunehmenden Anzahl von Messungen und unterschiedlichen Smartphone-Tracks die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein eindeutiger stabiler Mittelwert ergibt, zunimmt. Eine Verbesserung der Aussagekraft und Genauigkeit ei-

nes auf Basis vieler Smartphone-Messungen gewonnen Ergebnisse ist daher gegenüber einer einzelnen Smartphone-Messung zu erwarten. Welches Auswertungsverfahren unter verschiedenen Umständen die beste Übereinstimmung mit einer Feldstärkemessung ergibt, muss jedoch weiter untersucht werden.

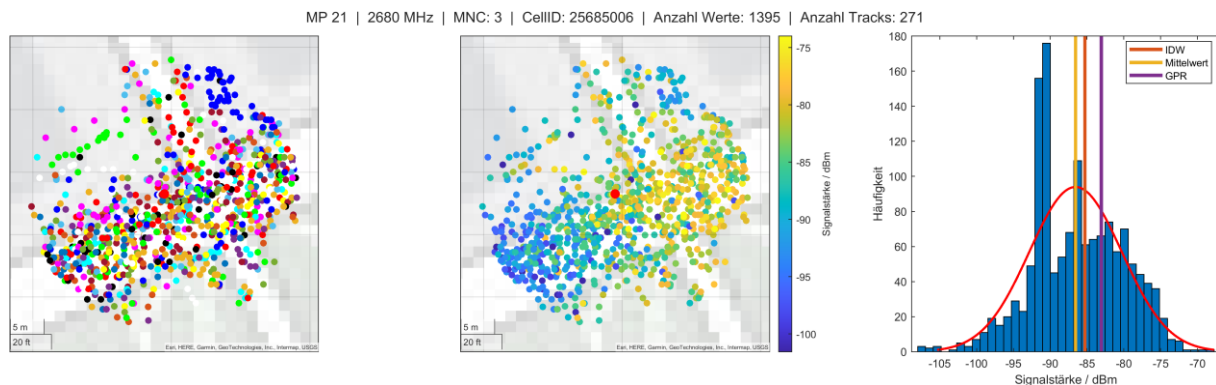


Abbildung 4-96 Beispiel einer deutlichen Signalpegeländerung im Umkreis von 20 m um einen Interpolationspunkt

4.10 Zusammenfassung & Fazit

In diesem Kapitel wurde die Ermittlung von Immissionsabschätzungen aus mittels Crowdsourcing gesammelten Smartphone-Signalstärkemessungen praktisch anhand zweier Datenpakete erprobt. Hierfür wurde eine Verarbeitungskette entworfen und umgesetzt, die die Rohdaten vorbereitet und aussortiert, die Messdaten geeignet interpoliert, die Signalstärken in Feldstärken umwandelt sowie durch Überlagerung und Extrapolation aller Immissionsbeiträge die maximale Gesamtimmission für Standorte innerhalb der Untersuchungsgebiete abschätzt. Es erfolgte eine statistische Analyse der Zusammensetzung der Datenpakete bevor geschätzte Immissionskarten für die gesamten Untersuchungsgebiete vorgestellt wurden. Ein Vergleich der Immissionsabschätzungen mit Feldstärkemessungen schloss die Untersuchungen ab.

Bei der Vorbereitung der Daten musste ein Großteil der Daten aufgrund dessen aussortiert werden, dass die Datensätze als unzuverlässig eingestuft oder unvollständig waren bzw. ungültige Werte enthielten. Die wiederholte Aufzeichnung der gleichen Modeminformation war der häufigste Grund für einen Ausschluss. In diesem Sinne wäre es vorteilhaft, wenn in einem auf die Bedürfnisse der Immissionsabschätzung zugeschnittenen Messnetzwerk von vornherein nur dann ein Wert abgespeichert wird, sobald neue Informationen aus dem Modem vorliegen. Das Fehlen der Kanalnummern bei einem Großteil der Datensätze machte ein Mapping erforderlich, was aber derart gelang, dass für die große Mehrheit der Messungen die Frequenz zugeordnet werden konnte. Die praktischen Erfahrungen mit der selbst entwickelten App „CellViewer“ lassen allerdings erwarten, dass die erforderliche Kanalnummer üblicherweise direkt aufgezeichnet werden kann. Somit sollte dies bei einer praktischen Umsetzung kein Problem sein.

Der statistische Überblick zeigte eine Ungleichverteilung der vorhandenen Messwerte auf die Netzbetreiber. Telefónica war etwa doppelt so oft vertreten wie die beiden anderen deutschen Netzbetreiber. Noch gravierender fiel der Unterschied zwischen der Anzahl von Messungen bei LTE gegenüber UMTS und vor allem GSM aus. Auf diese Netzwerkgeneration entfielen

insgesamt nur 2,3 % aller Einträge. Zusammen mit der Betrachtung der Verteilung der Messwerte in der Fläche zeigte sich bereits, dass die Abdeckung von GSM nur äußerst lückenhaft ist und nur für wenige Orte, wenn überhaupt, eine Abschätzung der Immission möglich sein würde.

Bemerkenswert war außerdem die in den nach dem Aussortieren verbliebenen Datensätzen sehr starke Konzentration der Messwerte auf wenige Gerätetypen und die Fokussierung auf den Hersteller Samsung. Dies stellt an sich kein Problem für ein Monitoring mit Smartphones dar, könnte aber ein Indiz für etwaige Schwierigkeiten bei der Datenerhebung auf anderen Geräten sein.

Die erstellten Immissionskarten zeigten für LTE, dass sich Bereiche höherer und geringerer Immission erkennen lassen. Allerdings besteht Ungewissheit darüber, ob in Gebieten mit geringerer geschätzter Immission tatsächlich niedrigere Feldstärken vorliegen oder stattdessen nicht alle Funkzellen mit relevanten Immissionsbeiträgen erfasst wurden. Zumindest für häufig frequentierte Bereiche ist jedoch zu erwarten, dass die größten Immissionsbeiträge enthalten sind. Bei UMTS und vor allem GSM ist aber durch die Lücken in der Karte und den geringen Datenbestand klar ersichtlich geworden, dass keine Abdeckung erreicht wurde, die alle Immissionsbeiträge von Mobilfunkbasisstationen enthalten dürfte.

Dies manifestierte sich schließlich auch beim Vergleich von Feldstärkemessungen mit der Immissionsabschätzung aus den Smartphone-Daten, da an kaum einem der Messorte eine Immissionsabschätzung für GSM möglich war. Dort, wo überhaupt Schätzwerte erhalten wurden unterschritten diese die durch die Feldstärke ermittelte Immission massiv. Für LTE hingegen fiel die Übereinstimmung der Messungen für das im Großraum München über die Dauer eines Jahres erhobenen Datenpaket deutlich besser aus. Zwar gibt es auch hier abhängig vom Frequenzband deutliche Unterschiede, in der Gesamtbilanz sind jedoch die wesentlichen Immissionsbeiträge erhalten. Eine leichte Tendenz zur Unterschätzung bleibt bestehen. Die Maximale Unterschätzung der Grenzwertausschöpfung liegt etwa bei Faktor vier. Gemessen daran, dass die bei der Feldstärkemessung für LTE aufgetretenen Ausschöpfungsgrade insgesamt ungefähr über den Faktor 200 variieren, ist dies jedoch noch immer eine moderate Abweichung. Es kann daher davon gesprochen werden, dass zumindest zu LTE eine grobe Orientierung für den durch diesen Funkdienst verursachten Beitrag zur Gesamtmission aus den Smartphone-Daten gewonnen werden kann.

Insgesamt lässt die unzulängliche Abdeckung aller bedeutenden Immissionsbeiträge in den vorliegenden Daten eine umfassende Immissionsermittlung des gesamten Mobilfunks nicht zu. Der Nutzen eines Messnetzwerks wäre deutlich eingeschränkt, wenn in diesem Punkt keine deutliche Verbesserung herbeigeführt werden könnte, da ansonsten nur der Immissionsbeitrag des derzeit meistgenutzten Mobilfunkstandard sinnvoll abgeschätzt werden könnte und das auch nur in sehr stark frequentierten Bereichen wie der Münchener Innenstadt.

5 Bewertung des Konzepts „Messnetzwerk“

In diesem Kapitel wird auf Grundlage der im Laufe der Studie erarbeiteten Ergebnisse eine abschließende Bewertung des Konzepts eines Smartphone-basierten Monitorings der elektromagnetischen Felder des Mobilfunks vorgenommen. Zunächst werden die zu erfüllenden Anforderungen zusammengestellt, bevor anhand der vorliegenden Ergebnisse diskutiert wird, inwieweit diese Voraussetzungen erfüllt sind. Die Vor- und Nachteile des Ansatzes werden daraufhin einander gegenübergestellt und die Schwachstellen mit Möglichkeiten zu deren Lösung benannt.

5.1 Anforderungen & Voraussetzungen für den Aufbau eines crowdsourcingbasierten Expositionsmonitorings für den Mobilfunk mittels Smartphones

5.1.1 Ziel und Anspruch eines zeitkontinuierlichen und flächendeckenden Expositionsmonitorings

Das übergeordnete Ziel besteht in der Ermittlung von potentiellen gesundheitlichen Risiken für die Bevölkerung, die von den zur Kommunikation und Datenübertragung über den Mobilfunk ausgesendeten elektromagnetischen Feldern ausgehen. Um Risikoabschätzungen vornehmen zu können, sind umfassende, belastbare Expositionsdaten notwendig. Aufgrund der Variabilität der Feldstärken und der großen Anzahl von Sendeanlagen lässt sich aus einzelnen, punktuellen Messungen, wie sie durch herkömmliche Messsysteme aufgenommen werden können, nur eine situationsspezifische aber keine großflächige orts- und zeitaufgelöste Aussage über die Expositionssituation ableiten.

Ein die Vielzahl der möglichen Expositionssituationen abdeckendes Monitoringsystem zur quantitativen Erfassung der Exposition der Allgemeinbevölkerung durch den Mobilfunk muss daher eine möglichst flächendeckende sowie zeitkontinuierliche Aufzeichnung der Feldstärkeverteilung ermöglichen. Gleichzeitig müssen alle relevanten Immissionsbeiträge des Mobilfunks eingeschlossen werden. Dazu zählt, dass alle genutzten Mobilfunkdienste sowie die einzelnen von diesen Diensten verwendeten Frequenzbänder abgedeckt werden. Letztendlich müssen idealerweise für jeden Standort zu jeder Zeit sämtliche Mobilfunkzellen mit relevanten Immissionsbeiträgen registriert und aufsummiert werden. Dabei muss zwischen dem Downlink, also den Feldern, die von den ortsfesten Mobilfunksendeanlagen emittiert werden, und dem Uplink, also den Feldern, die durch mobile Endgeräte ausgesendet werden, unterschieden werden. Diese Beiträge zur Exposition unterliegen verschiedenen rechtlichen und normativen Regelungen, da der Uplink-Beitrag im Wesentlichen durch das eigene Endgerät bestimmt wird, während die Downlink-Immission über weite Strecken relevante Höhen aufweist und somit die Bevölkerung im Allgemeinen betrifft.

Diesen allumfassenden Anspruch der vollständigen Immissionserfassung zur Expositionsabschätzung kann kein technisches System erfüllen, da dies ein engmaschiges Netz aus Messeinrichtungen erfordern würde, die die erforderlichen Parameter permanent an allen Orten aufzeichnen. Dies ist aufgrund des damit verbundenen Aufwands wirtschaftlich nicht umsetzbar

und wäre auch durch den zu erwartenden Nutzen nicht zu rechtfertigen. Eine Abschwächung der Anforderungen der Zeitkontinuität und der Flächenabdeckung stehen hierbei an erster Stelle. Anstatt tatsächlich zeitkontinuierlich die Immission zu erfassen, wären bereits häufigere Wiederholungen mit einem gewissen zeitlichen Abstand ein erheblicher Fortschritt gegenüber der Ist-Situation. Dabei ist es auch nicht zwingend erforderlich stets alle Immissionsbeiträge zugleich zu erheben. Wichtig ist, dass die Immissionsanteile im Laufe der Zeit vollständig erfasst werden und Änderungen der Beitragshöhen bzw. -zusammensetzungen festgestellt werden können.

Bei Betrachtung der zeitlichen Abhängigkeit der Immission ist zwischen der über alle Betriebszustände der Mobilfunknetze hinweg maximal möglichen Immission sowie der Momentanmission aufgrund des momentanen Betriebszustandes zu differenzieren. Maximalmission ergibt sich für den Fall, dass sämtliche an einem Ort einwirkenden Mobilfunkzellen ihre maximal im Betrieb vorgesehene Sendeleistung ausgeben. Dies ist in der Regel dann der Fall, wenn die Funkzellen hinsichtlich ihrer Übertragungskapazität voll ausgelastet sind. Dieser Zustand wird meist nur selten und nicht längerfristig erreicht, insbesondere nicht für alle am Ort vorhandenen Funkzellen gleichzeitig. Die Maximalmission hängt demnach hauptsächlich von der vorhandenen Mobilfunkinfrastruktur und deren Konfiguration ab. Langfristige, dauerhafte Veränderungen der Immissionssituation ergeben sich deshalb vor allem durch Änderungen am Mobilfunknetz durch den Auf- oder Umbau neuer Basisstationen. Dazu zählen ebenso Änderungen an der Abstrahlcharakteristik bestehender Standorte etwa durch Modifikationen an der Antennenkonfiguration wie der Ausrichtung oder Neigung der Antenne (Downtilt). Aber auch andere Parameter wie die Sendeleistung, die genutzten Kanalbandbreite und die Kanalfrequenzen können angepasst werden oder Kanäle hinzu- oder abgeschaltet werden. Auch jenseits der Basisstation können sich an einem Standort Änderungen der Immissionssituation durch Veränderungen entlang des Ausbreitungspfades der Aussendungen ergeben, wenn sich die Bebauungsstruktur durch Neubauten oder den Abbruch von Gebäuden verändert. Die meisten dieser Änderungen können sich recht abrupt vollziehen, sind aber dann in der Regel langfristig über Wochen und Monate oder gar Jahre hinweg unverändert wirksam. Es genügt also, wenn die maximal mögliche Immission so regelmäßig aufgezeichnet wird, dass typische Änderungen nach kurzer Zeit festgestellt werden.

Dementgegen stehen kurzfristige Schwankungen der Immission, die durch die Auslastung der Mobilfunknetze entstehen. Während im Leerlauf der Mobilfunkzellen ausschließlich Synchronisierungs- und Referenzsignale gesendet werden, die nur einen Teil der gesamten möglichen Leistung ausmachen, wird bei voller Auslastung der gesamten Datenübertragungskapazität der Funkzelle die maximale vorgesehene Sendeleistung ausgesendet. Weitere vorübergehende Schwankungen insbesondere lokaler Ausprägung resultieren zum Beispiel aus vorbeifahrenden oder parkenden Fahrzeugen, die zu Reflektionen oder Abschattungen führen können. Die sich auf diese Weise ergebende Momentanmission hängt also zusätzlich zur Mobilfunknetzstruktur und der Bebauung von vielen weiteren flüchtigeren Faktoren und damit vom jeweiligen Zeitpunkt der Messung ab. Einzelne Messungen, die über einen kurzen Zeitraum gemittelt werden können, um sehr kurzzeitige Schwankungen auszugleichen, können daher nur typische Werte für die Momentanmission liefern. Eine dauerhafte Überwachung an jedem Ort ist wie bereits erwähnt nicht möglich. Da sich jedoch im Tagesverlauf hinsichtlich der Auslastungssituation meist wiederkehrende Muster ergeben, kann sich durch wiederholte

Messungen, die idealerweise über verschiedene Tageszeiten hinweg verteilt sind, das typische Immissionsprofil ermitteln lassen.

Der Begriff „flächendeckend“ kann ebenfalls relativiert werden, denn bezogen auf die Gesamtfläche sind weite Teile kaum von Bedeutung, da sich dort keine oder nur selten bzw. wenige Personen aufhalten. Es kommt daher zunächst darauf an, die Immission dort zu erheben, wo sich Menschen bewegen und längere Zeit aufhalten, wo sie also tatsächlich exponiert sind. Dies ist vor allem in Wohngebieten und entlang von Verkehrswegen der Fall. Hierbei kann einerseits nach Bevölkerungsdichte priorisiert werden oder andererseits repräsentative Gebiete mit unterschiedlichen Bevölkerungs-, Bebauungs- und darauf auch entsprechend abgestimmte Mobilfunkstrukturen berücksichtigt werden.

Zuletzt sei auch erwähnt, dass der Anspruch an die Erfassung sämtlicher an einem Ort einwirkenden Funkzellen nur insofern durch ein Monitoringsystem erfüllt werden muss, dass diejenigen Funkzellen enthalten sind, die die wesentlichen Immissionsanteile in den jeweiligen Frequenzbändern beisteuern. Die im Mobilfunk vorherrschenden Feldstärken variieren meist über mehr als 60 dB, was einen Unterschied der Feldstärken um mehr als den Faktor 1000 und bezogen auf die Leistung von um den Faktor eine Million ausmacht. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass eine Nichterfassung von Funkzellen, deren Feldstärken mehr als 20 dB unterhalb derer der dominanten Funkzellen liegen, unkritisch ist und hinsichtlich der Gesamtmission kaum ins Gewicht fällt.

Während die mittels Messungen festgestellten Immissionen zunächst nur die Befeldungssituation bezogen auf den Ort bzw. die Fläche und den Zeitpunkt bzw. Zeitverlauf beschreiben, unabhängig davon, ob sich Personen im Einwirkungsbereich dieser Felder aufhalten, ergibt sich die Exposition erst daraus, dass die Immission auf eine Person einwirkt. Wenn die Immission wie beschrieben erhoben werden kann, lässt sich der entsprechende Beitrag zur Exposition aus den Bewegungsprofilen von Personen innerhalb dieser Immissionslandschaft ableiten und somit auch ein Expositionsmonitoring realisieren.

5.1.2 Anforderungen und Voraussetzungen für ein Expositionsmonitoring mittels Smartphones

Nachdem nun der Anspruch an ein technisches System zur Erfassung der Exposition des Mobilfunks formuliert wurde, sollen nun die konkreten Anforderungen an ein Expositionsmonitoring mittels Smartphones, die sich daraus ableiten, zusammengestellt werden.

Um die Exposition zu ermitteln, müssen wie im vorherigen Abschnitt erläutert ortsbezogene Immissionsdaten mit den Bewegungsprofilen von Personen kombiniert werden. Smartphones werden in den meisten Fällen am Körper oder dicht daneben zum Beispiel in einer Tasche getragen. Somit befindet sich das Smartphone dort, wo Personen elektromagnetischen Feldern des Mobilfunks ausgesetzt sind. Die Nutzung Smartphone-Signalstärkemessungen zur Immissionsabschätzung liefert daher genau für diejenigen Gebiete Informationen über die Befeldungssituation, wo es für eine Expositionserfassung relevant ist. Darüber hinaus könnten die mit einem Smartphone aufgezeichneten Bewegungsprofile genutzt werden, um ähnlich wie bei einem Exosimeter aus der von einem Messnetzwerk abgeschätzten Immissionslandschaft den Beitrag des Mobilfunks zur Gesamtexposition des individuellen Nutzers abzuleiten.

Damit die Maximalimmission abgeschätzt werden kann, müssen auslastungsunabhängige Messgrößen der Mobilfunksignale vorliegen und die notwendigen Parameter zur Hochrechnung auf Anlagenvollauslastung bekannt sein. Das Vorliegen einer auslastungsunabhängigen Bezugsgröße, die auch über einen längeren Zeitraum nahezu konstant bleibt, ist vor allem dafür relevant, dass die von vielen Smartphones erhobenen Messdaten einer Funkzelle, die nicht zur selben Zeit für den gleichen Ort gesammelt wurden, sinnvoll miteinander kombiniert werden können. Dazu gehört auch, dass die Funkzelle über ihre ID eindeutig identifiziert werden kann. Für die Momentanimmission müssten wiederum breitbandige Messungen der Leistung innerhalb der Kanalbandbreite der Funkzelle zur Verfügung stehen. Hierfür genügt es, wenn die Kanalfrequenz und dessen Bandbreite bekannt ist, da eine breitbandige Messung die Leistung aller Quellen einschließt. Um neben dem Downlink auch den Beitrag des Uplinks zur Exposition berücksichtigen zu können, müssten Informationen über die Sendeleistung und -dauer der Mobilfunkendgeräte vorliegen. Hierbei hätte allerdings auch die Abstrahlcharakteristik sowie die Position und Ausrichtung des Endgeräts bezogen auf die betroffene Person einen bedeutenden Einfluss.

Als zweite wesentliche Voraussetzung besteht darin, dass zwischen den vom Smartphone gemessenen Signalstärkewerten ein möglichst direkter Zusammenhang zur zugrundeliegenden elektrischen Feldstärke vorliegt. Dieser muss darüber hinaus über alle Signalpegel und damit Feldstärkewerte hinweg linear sein und sollte durch äußere Umstände wie dem Nutzer und der Ausrichtung zur Basisstation möglichst wenig beeinflusst werden. Außerdem muss die Anpassung an Pegeländerungen, die sich zum Beispiel bei Fortbewegung des Endgeräts ergeben, schnell genug sein, dass keine Diskrepanz zwischen der gemessenen und tatsächlich am Ort vorherrschenden Signalstärke entsteht. Der Zusammenhang zwischen den Signal- und Feldstärkewerten sollte sich darüber hinaus von Smartphone zu Smartphone nicht zu sehr unterscheiden, da ansonsten für zu viele Smartphones der Faktor zur Umrechnung bestimmt werden müsste. Bei der enormen Anzahl von unterschiedlichen Smartphone-Modellen ist die Ermittlung eines Umrechnungsfaktors für jedes an einem Messnetzwerk beteiligte Smartphone nicht sinnvoll möglich. Idealerweise sollte die Streubreite der Umrechnungsfaktoren daher nicht allzu hoch sein, damit nach Möglichkeit ein pauschaler Faktor für alle Smartphones ermittelt und angewendet werden kann.

Die genannten Informationen müssen dabei nicht nur innerhalb des Modems des Smartphones vorliegen, sondern müssen innerhalb des Smartphone-Betriebssystem für eine einfach zu installierende App abrufbar sein. Nur indem eine niederschwellige Verbreitung durch einfache Installation einer App möglich ist, kann eine für einen Crowdsourcingansatz notwendige Anzahl von Nutzern für eine ausreichende Datensammlung angesprochen werden. Aufwendigere Modifikationen der Soft- oder gar der Hardware kommen daher nicht in Betracht. Neben den Signalstärkemesswerten und Daten zur Funkzelle aus dem Modem sind zusätzliche Informationen zum Standort des Endgeräts sowie zum Zeitpunkt der Messung vonnöten. Sämtliche Informationen müssen durch die App auf dem Gerät zwischengespeichert werden und gelegentlich über eine Internetverbindung an einen Server zur weiteren Auswertung übertragen werden können.

Die Verbreitung der App zur Datenerfassung ist ein entscheidender Faktor beim Aufbau eines Messnetzwerkes. Es ist eine ausreichende Nutzerbasis aufzubauen, damit die Messwertdichte sowohl in der Fläche als auch über die Zeit hinweg hoch genug ist. Es muss sichergestellt

sein, dass die Nutzer nicht nur regional gehäuft, sondern derart in der Fläche verteilt sind, dass sie mit ihren zurückgelegten Strecken die Messungen über alle relevanten Gebiete hinweg aufzeichnen. Darüber hinaus ist bei der Zusammensetzung der Nutzerschaft darauf zu achten, dass sämtliche Mobilfunknetzbetreiber in allen Gebieten abgedeckt werden. Auch die Zusammensetzung der beteiligten Endgeräte muss derart ausfallen, dass sämtliche Frequenzbänder abgedeckt werden können. Nicht alle Endgeräte unterstützen bei LTE beispielsweise alle Frequenzbänder, sodass bei einer ungünstigen Konstellation von Geräten womöglich nicht alle Frequenzen gut repräsentiert werden können. Zur allgemeinen Förderung der Verbreitung der Anwendung sind neben einer breiten Bekanntmachung möglicherweise weitere Anreize zu schaffen, die Smartphone-Nutzer zu einer Installation und Beteiligung an der Datensammlung bewegen.

Die Serverinfrastruktur zur Sammlung, Speicherung und Verarbeitung der Smartphone-Daten stellt eine weitere notwendige Komponente für ein Smartphone-basiertes Expositionsmonitoring dar. Die Daten vieler Smartphones müssen hier zusammengeführt und sicher aufbewahrt werden. Dies betrifft sowohl den Schutz vor Datenverlust als auch den Schutz vor unberechtigtem Zugriff auf die Daten und die Umsetzung von rechtlichen Vorgaben hinsichtlich des Datenschutzes. Die Speicherkapazität muss ausreichend sein, um für ganz Deutschland die Messdatensätze von sehr vielen Smartphones auch über einen längeren Zeitraum speichern und bereithalten zu können. Die Daten müssen hinsichtlich Datenformaten, -strukturen und Datenbanken derart abgelegt sein, dass Teile des gesamten Datenbestands, wie zum Beispiel alle Messdaten zu einer Funkzelle, effizient aufgerufen werden können. Weiterhin müssen Rechenkapazität und Arbeitsspeicher ausreichend dimensioniert sein, um die Daten des Gesamtgebiets für einen längeren Zeitraum prozessieren zu können. Geeignete Auswertungsverfahren und -algorithmen zur Zusammenfassung und Interpolation der Messdaten sind an diesem Punkt als weitere softwarebezogene Voraussetzungen zu benennen. Am Ende der gesamten Datenerhebungs- und Verarbeitungskette steht außerdem das Erfordernis einer entsprechenden Plattform, die die erzielten Ergebnisse der Forschung und der interessierten Öffentlichkeit in geeigneter Weise zugänglich macht. Ein derart komplexes Gesamtsystem erfordert außerdem eine fachliche Betreuung, um den Betrieb aufrechtzuerhalten und notwendige Anpassungen rechtzeitig zu erkennen.

5.1.3 Abgleich der erarbeiteten Erkenntnisse mit den Anforderungen an ein Expositionsmonitoring mittels Smartphones

Im Folgenden werden die zuvor definierten Anforderungen an ein Expositionsmonitoring mit Smartphones mit den im Laufe der Studie erarbeiteten Ergebnissen abgeglichen, um zu beurteilen, inwieweit die notwendigen Voraussetzungen für ein derartiges System erfüllt sind.

In Kapitel 2 konnte gezeigt werden, dass Smartphones Signalstärkeparameter messen, die zur Abschätzung der Immission grundsätzlich geeignet sind. Bei LTE und UMTS werden gemäß den Mobilfunkstandards auslastungsunabhängige und auslastungsabhängige Parameter, die sowohl die Bestimmung der Maximal- als auch der Momentanimmission prinzipiell ermöglichen können, erfasst. Es wurde deutlich, dass diese Parameter mit den in der Immissionsmesstechnik genutzten Messgrößen korrespondieren und sich auf die gleichen Signalanteile beziehen. Für GSM wiederum konnte nur eine auslastungsunabhängige Messgröße iden-

tifiziert werden. Bei 5G gibt es sowohl auslastungsabhängige wie auch -unabhängige Signalstärkeindikatoren, die jedoch beim Einsatz von Massive MIMO nach derzeitigem Stand keine einfache Extrapolation auf die Maximalimmission bzw. die Momentanimmission des gesamten Kanals erlauben. Für Funkzellen, in denen hingegen passive Antennen zum Einsatz kommen, wäre zumindest die Bestimmung der Maximalimmission voraussichtlich möglich.

Bei Betrachtung der Zugriffsmöglichkeiten im Android-Betriebssystem wurde festgestellt, dass die wichtigsten Parameter wie die auslastungsunabhängige Signalstärke, die Cell-ID zur eindeutigen Identifikation von Funkzellen sowie die Kanalnummer, aus der sich die Frequenz des Kanals ableiten lässt, abgerufen werden können. Durch die Umsetzung einer Mess-App und durch Betrachtung weiterer über den Google Play Store verfügbarer Apps konnte außerdem verifiziert werden, dass diese Informationen für die verbundene Funkzelle fast ausnahmslos zur Verfügung gestellt werden. Hinsichtlich der auslastungsabhängigen Messung musste jedoch bemerkt werden, dass bei LTE trotz der Möglichkeit der Abfrage in neueren Android-Versionen häufig kein Messwert für den hierfür erforderlichen Signalstärkeindikator RSSI ausgegeben wird oder der ausgegebene Wert in keinem sinnvollen Verhältnis zum RSRP-Wert steht und somit nicht plausibel ist. Obwohl mittels eines Smartphones mit der Spezialsoftware QualiPoc Android gezeigt werden konnte, dass die auslastungsabhängige Leistung des Kanals unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften dieser Messgröße mit Smartphones sinnvoll gemessen werden könnte, ist es nach derzeitigem Stand nicht möglich die Momentanimmission zu ermitteln. Dies liegt jedoch ausschließlich daran, dass die benötigte Information nicht im Android-System zu erhalten ist, nicht aber daran, dass die Endgeräte den entsprechenden Parameter nicht messen. Bei UMTS ist der notwendige Parameter gar nicht zugänglich. Eine weitere Einschränkung ergibt sich für die Uplink-Immission, da es über Android bislang keine Möglichkeit gibt, die Sendeleistung und den Sendezustand des Endgeräts zu erhalten. Nur Smartphones mit Spezialsoftware oder aber spezielle vorinstallierte Service-Modes der Hersteller, können auf diese Informationen zugreifen. Ein Monitoring mit einem Crowdsourcingansatz kann daher den Beitrag des Uplinks zur Exposition nach derzeitigem Stand nicht einschließen.

Zur Bestimmung der Maximalimmission stehen die notwendigen Parameter für die Extrapolation und Bewertung der Immission nur eingeschränkt zur Verfügung. Die Frequenz, die zur korrekten Ansetzung der frequenzabhängigen Grenzwerte erforderlich ist, steht zwar immer zur Verfügung, aber die Bandbreite, die bei LTE-Kanälen prinzipiell verschiedene Werte aufweisen kann, wird nur in neueren Betriebssystemversionen angegeben und auch dort nicht von allen Herstellern. Dies stellt jedoch nur eine mäßige Einschränkung dar, da die Bandbreiten verhältnismäßig statisch sind und meist über weite Teile des Netzes und über längere Zeit hinweg gleich genutzt werden. Es ist daher sinnvoll möglich, den einzelnen Kanalfrequenzen eine feste Kanalbandbreite zuzuordnen. Außerdem kann den Funkzellen durch diejenigen Smartphones, die die Bandbreite doch erfassen können, die Bandbreite zugeordnet werden. Als problematischer stellt sich das Fehlen der Information über die Anzahl der genutzten Antennen-Ports (1,2,4) bei LTE dar, da diese Information überhaupt nicht zugänglich ist. Hier kann nur eine pauschale Annahme für die Extrapolation getroffen werden, da es nicht realistisch ist, diese Information für jede Funkzelle durch die Netzbetreiber bereitgestellt zu bekommen. Auch die Konfiguration für ein Boosting des Referenzsignals kann nicht erkannt werden.

Hierfür kann ebenfalls nur auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Weitere Einschränkungen zeigen sich im Detail bei den Signalstärkeindikatoren. So musste für UMTS und GSM über alle Geräte hinweg beobachtet werden, dass die Signalstärken nur in 2 dB-Schritten aufgelöst werden, obwohl im Modem die Messergebnisse mindestens auf 1 dB genau gemessen werden und an die Basisstation gemeldet werden können. Weiterhin wurde beobachtet, dass die Wertebereiche bei UMTS und GSM nur bis maximal -51 dBm ausgegeben werden, obwohl der Wertebereich eigentlich bis -48 dBm (GSM) bzw. -24 dBm (UMTS) reicht. Da bei Feldmessungen mehrfach die Situation aufgetreten ist, dass dieser obere Wert von -51 dBm erreicht wird, wird offensichtlich der Wertebereich derart beschnitten, dass relevante Information verlorengeht. Es kommt infolgedessen zu einer Unterschätzung der Immission, die sich auch nicht kompensieren lässt, sobald diese Obergrenze erreicht wurde.

Trotz einiger Einschränkungen sind die wichtigsten Voraussetzungen zur grundsätzlichen Erhebung der Daten auf der Endgeräteseite somit zumindest hinsichtlich der Abschätzung der Maximalimmission gewährleistet. Daher wurde durch weitere Untersuchungen in Kapitel 3 analysiert, wie gut der Zusammenhang zwischen Signalstärke und Feldstärke sowie die Messeigenschaften der Smartphones ausfallen. Da bei den Signalstärkemessungen der Smartphones die Leistung am Antennenanschluss anstelle von Feldstärken gemessen werden und die Antennenfaktoren der Smartphones unbekannt sind, müssen Umrechnungsfaktoren bestimmt werden, die die Umwandlung ermöglichen. Diese wurden im Rahmen der messtechnischen Untersuchungen für mehrere Smartphones ermittelt. Es konnte einerseits festgehalten werden, dass die gemessenen Signalpegel überwiegend lineares Verhalten über die verschiedenen Feldstärken hinweg zeigen. Andererseits traten unter Laborbedingungen mehrfach Sprünge im ansonsten linearen Verlauf auf, sodass die gemessenen Signalpegel auf einer parallelen Geraden fortgesetzt wurden. Bei ähnlichen Messungen im freien Feld wurden derartige Sprünge nicht direkt sichtbar. Die Messergebnisse beim Vergleich des mittleren von einem Smartphone gemessenen Signalstärkewertes an einem Ort mit dem dortigen maximalen Feldstärkewert streuten um eine Gerade, die den Umrechnungsfaktor dieses Geräts beschreibt. Auch bei Betrachtung der Messungen aller Smartphones, die im Rahmen der Messreihe berücksichtigt wurden, wurde festgestellt, dass diese um einen mittleren Umrechnungsfaktor streuen. Während die Unterschiede zwischen den Funkdiensten gering ausfielen, konnte für die verschiedenen Frequenzbänder beobachtet werden, dass die Umrechnungsfaktoren bei höheren Frequenzbändern tendenziell größer ausfallen als in den niedrigeren Frequenzbändern. Es ist daher empfehlenswert an den jeweiligen Frequenzbereich angepasste Umrechnungsfaktoren zu verwenden.

Hinsichtlich der Einflüsse auf die Messung durch Ausrichtung des Endgeräts und den Nutzer, konnte in den Labormessungen für den Fall des Einfalls eines Signals aus nur einer Richtung eine sehr starke Richtungsabhängigkeit festgestellt werden. Diese dürfte im praktischen Einsatz im freien Feld, wo statt dieses Extremfalls nahezu immer Mehrwegeausbreitung vorliegt, wesentlich geringeren Einfluss haben. Dies bestätigte sich auch durch die Messungen im freien Feld, bei denen eine wesentlich geringere Richtungsabhängigkeit beobachtet wurde. Ein ähnliches Bild ergab sich für die Einflüsse durch den Nutzer des Endgeräts. Im freien Feld fielen diese wieder geringer aus als unter Laborbedingungen. Zusammengefasst wurde unter Berücksichtigung aller Einflüsse auf das Messergebnis eines Smartphones inklusive der

Umrechnung unter konservativen Annahmen eine erweiterte Gesamtunsicherheit der aus einer einzelnen Signalstärkemessung ermittelten Feldstärke von $\pm 16,7$ dB abgeschätzt. Diese Messunsicherheit kann, so der Ansatz, jedoch durch wiederholte Messungen unter verschiedenen Bedingungen und durch die Mittelung der Ergebnisse von verschiedenen Smartphones verringert werden.

Zu den weiteren wichtigen Aspekten der Messeigenschaften gehörte, dass sich die gemessene Signalstärke schnell an veränderte Signalpegel anpasst und die Messergebnisse nicht durch Signale außerhalb des Funkkanals beeinflusst werden. Dies konnte im Rahmen der Untersuchungen ebenfalls bestätigt werden. Die Voraussetzung, dass ein ausreichend stabiler mittlerer Zusammenhang zwischen Signal- und Feldstärke bestehen muss, kann daher insoweit als erfüllt angesehen werden.

Aufgrund der Analyse zweier Crowdsourcingdatenpakete konnten in Kapitel 4 wichtige Erkenntnisse über die Möglichkeiten zur Immissionsabschätzung bei der Kombination der Daten vieler Smartphones gewonnen werden. Zunächst demonstriert die Verfügbarkeit derartiger Crowdsourcingdaten die grundsätzliche technische, rechtliche und wirtschaftliche Realisierbarkeit eines Smartphone-basierten Messnetzwerks. Dazu gehört einerseits die Umsetzung und Verbreitung von entsprechenden Apps zur Datenerfassung unter den Smartphone-Nutzern und andererseits der Aufbau der erforderlichen Serverinfrastruktur zur Sammlung, Speicherung und Verwertung der aufgezeichneten Daten. Dass es mit der Firma umlaut oder auch der Firma Net Check Beispiele für in Deutschland ansässige Unternehmen gibt, die Crowdsourcing-Netzwerke betreiben, belegt außerdem die Vereinbarkeit mit den hiesigen Normen und Datenschutzstandards. Aufgrund der in den vergangenen Jahren allgemein enorm gewachsenen Umfänge der Datenerhebung, -verarbeitung und Analyse sind die notwendigen Lösungen hinsichtlich des Speicherplatzes und der Rechenkapazität preisgünstig und leicht verfügbar. Sie können mitunter bei einschlägigen Anbietern heutzutage oftmals als fertige Dienstleistung eingekauft werden.

Bei Betrachtung der Rohdaten von Funkzellen wurde ersichtlich, dass sich bei wiederholten Messungen entlang der gleichen Strecke – auch durch unterschiedliche Smartphones – ähnliche Signalverläufe ergeben. Auch Signalpegeländerungen über eine räumlich kurze Distanz werden deutlich sichtbar. Auflösungen in der Größenordnung von etwa 20 m scheinen bei Vorliegen von vielen Messwerten damit prinzipiell erreichbar zu sein.

Bezüglich des Datenumfanges hat sich gezeigt, dass die Abdeckung bei weitem nicht flächendeckend ist. Sie ist konzentriert entlang von Wegen und in Gebieten, wo sich Personen entlangbewegen und aufhalten. Dies ist für einen Ansatz mit dem Anspruch der Möglichkeit zu einer Expositionsabschätzung zunächst einmal ausreichend, wobei jedoch eingeschränkt werden muss, dass in den konkret vorliegenden Datenpaketen ein dominierender Anteil der Daten mutmaßlich im Auto aufgezeichnet wurde. Allerdings stellte sich bei differenzierter Betrachtung der Funkdienste vor allem die Erfassung der älteren Mobilfunkgenerationen als hochproblematisch heraus. So sind UMTS und vor allem GSM gegenüber LTE nur gering in den Datenpaketen vertreten und erreichen nicht die Messpunktdichten, die erforderlich sind, um alle Funkzellen abzudecken oder gar eine Mittelung über mehrere Messungen vorzunehmen. Dies wurde nicht nur aus den Kartenansichten zur Veranschaulichung der Verteilung der Messungen in der Fläche ersichtlich, sondern zeigte sich auch bei den Validierungsmessungen, bei

denen zu GSM nur an wenigen Orten überhaupt eine Abschätzung möglich war. Die wenigen Messpunkte mit einer Abschätzung für GSM wiesen darüber hinaus deutliche Unterschätzungen der tatsächlichen Immission auf. Bei UMTS sah das Ergebnis sowohl bezüglich der Unterschätzung als auch der Anzahl der Punkte mit Vergleichsergebnissen etwas besser aus. Die beste Übereinstimmung ergab sich für LTE. Hier konnten die wesentlichen Immissionsbeiträge oftmals recht gut erfasst werden. Allerdings zeigten sich hier auch große Unterschiede zwischen den einzelnen Frequenzbändern. Die Abhängigkeit von der verbundenen Funkzelle führt dazu, dass weniger genutzte Bänder vor allem in weniger frequentierten Gebieten nicht oder nicht ausreichend erfasst werden.

Darüber hinaus zeigte die unterschiedliche Aufzeichnungsdauer der beiden analysierten Datenpakete, dass der Zeitraum von einem Monat nicht ausreicht, um eine ausreichende Datenbasis für eine umfassende Immissionsabschätzung aufzubauen. Die Daten müssen also über einen längeren Zeitraum gesammelt werden. Die exemplarische Untersuchung zur Stabilität der vorherrschenden Immissionsbedingungen an einer Funkzelle lässt es grundsätzlich möglich erscheinen, über längere Zeiträume hinweg zu mitteln. Die Verfolgung etwaiger Änderungen ist wichtig und erscheint bei Zeitabschnittsweiser Analyse und Auswertung der Daten möglich zu sein.

Für die Auswertung der Daten konnten sinnvolle Methoden gefunden und eine vollständige Verarbeitungskette vom Datenimport bis zur Visualisierung aufgebaut werden. Eine eindeutige Präferenz für eines der untersuchten Interpolationsverfahren kann jedoch auf Basis der Ergebnisse nicht ausgesprochen werden. Die tatsächliche Verbesserung mit zunehmender Datenmenge konnte aufgrund der fehlenden Zuordnung einzelner Funkzellen aus den Datenpaketen zu denen aus den Feldstärkemessungen nicht nachgewiesen werden. Nur die in Abschnitt 4.9 betrachtete Verteilung der Signalstärken im Umkreis um einen festen Standort deutet diesen Effekt grundsätzlich an. Ob der sich daraus ergebende Mittelwert oder daraus anders interpolierte Wert gut mit der tatsächlichen Feldstärke übereinstimmt, ist hingegen unklar.

Während die Grundvoraussetzungen für die Aufzeichnung der mindestens notwendigen Informationen für ein Monitoring der Maximalimmission des Mobilfunks erfüllt sind und auch ein ausreichender Zusammenhang zwischen den Signalstärkewerten und der zugrundeliegenden Feldstärke nachgewiesen werden konnte, stellt die unzureichende Erfassung der Immissionsbeiträge aller Funkdienste und Funkzellen das größte Hindernis zu einer erfolgreichen Umsetzung eines Messnetzwerks dar. Ein vollständiges Immissionsmonitoring für den gesamten Mobilfunk ist auch mit der Einschränkung auf den Mobilfunk-Downlink auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse offensichtlich nicht möglich. Für LTE erscheint unter den gegebenen Umständen der erzielbaren Abdeckung und den pauschalen Möglichkeiten zur Hochrechnung brauchbare Ergebnisse mit Abstrichen im Detail erzielbar zu sein. Die Schwächen werden in Abschnitt 5.3 zusammengestellt und Möglichkeiten zu deren Lösung aufgezeigt.

5.2 Vor- & Nachteile eines Smartphone-basierten Expositionsmonitorings

Zu den wesentlichen Vorteilen eines crowdsourcingbasierten Messansatzes mit Smartphones zählt, dass kein teures Messequipment angeschafft und unterhalten werden muss. Es wird auf

die bereits vorhandene Hardware (Smartphones) der sich an der Datensammlung beteiligenden Nutzer zurückgegriffen. Diese Hardware wird darüber hinaus durch die Nutzer mit der regelmäßigen Anschaffung neuer Geräte auf einem aktuellen Stand gehalten. Damit werden neue Mobilfunktechnologien kurz nach der Markteinführung prinzipiell erfassbar. Grundsätzlich sind Smartphones hochempfindlich und empfangen Mobilfunkzellen oft noch, wenn sie von Immissionsmessgeräten nicht mehr detektiert werden können. Für den Betrieb der Messeinrichtungen, also den Smartphones, selbst wird kein geschultes Personal wie bei anderen Messgeräten benötigt. Lediglich zur Überwachung des Betriebs und die Kontrolle der Auswertung wird Fachpersonal benötigt. Abgesehen davon lässt sich mit einer vorhandenen Smartphone-Anwendung der Ansatz durch eine Vergrößerung der Nutzerbasis ohne großen Aufwand skalieren. Im Verhältnis zur erzielbaren Menge von Immissionsdaten wird somit wenig Expertenarbeit benötigt.

Neben den hardwarebezogenen Vorteilen stellt die Möglichkeit des erheblich größeren Datenumfangs, der sich auf diese Weise erheben lässt, eine bedeutende Chance dar. Durch die hohe Anzahl an bewegten Messsonden lässt sich eine erheblich größere Fläche abdecken und das auch mit einer wesentlich größeren Dichte, als es mit punktbasierten Messungen der Fall ist. Darüber hinaus läuft die Datenerhebung quasi-kontinuierlich und erlaubt das Verfolgen der Änderungen im Laufe der Zeit. Prinzipiell sind Messungen an jedem Ort möglich, selbst dort, wo der Zugang im Allgemeinen beschränkt ist. Letztendlich werden die Messungen dort aufgezeichnet, wo sich die Smartphones befinden, also zugleich dort, wo sich Personen aufhalten und entlangbewegen. Die Schwerpunkte liegen dadurch an Orten, Wegen und Gebieten, die eine gewisse Relevanz aufweisen. Bisherige Langzeitmesssysteme mussten oftmals an Stellen montiert werden, wo sie vor unbefugtem Zugriff und Vandalismus geschützt sind, sodass sie in Höhen oder an Standorten platziert werden müssen, deren Immission nicht mit derjenigen an den umliegenden Aufenthaltsbereichen übereinstimmen muss. Zusätzlich zu den genannten Vorteilen, können die Bewegungsprofile von Smartphones ähnlich wie bei Expositometern genutzt werden, um aus der mit einem Messnetzwerk erfassten Immission den Beitrag des Mobilfunks zur Exposition zu ermitteln.

Einer der größten Nachteile des untersuchten Ansatzes stellt die Ungewissheit darüber dar, ob sämtliche Funkzellen und Funkdienste mit relevanten Immissionsbeiträgen an einem Ort erfasst wurden. Verlässliche quantitative Immissionsschätzungen sind insbesondere für den gesamten Mobilfunk daher in der Gesamtfläche kaum möglich. Die Unterscheidung in Gebiete mit einer für einigermaßen verlässliche Ergebnisse ausreichenden Abdeckung und Bereiche mit hoher Unsicherheit oder keiner Aussagefähigkeit ist ein noch ungelöstes Problem. Vor allem da der Grad der Abdeckung von der Anzahl der Nutzer und deren Bewegungsprofilen abhängt, sind ungleichmäßige Verteilungen der Messungen unvermeidlich. Die Kopplung der Aufzeichnung an die Standorterfassung führt zur Konzentration entlang von Straßen und Wegen, was die Immission zwar in Bereichen, wo sich Menschen im Freien bewegen und aufhalten, berücksichtigt, nicht aber in Innenbereichen, wo die meiste Zeit verbracht wird.

Zu den weiteren Nachteilen gehören die Einschränkungen, die hinsichtlich der erfassbaren Immissionsarten und Beiträge zur Exposition bestehen. So ist wie bereits mehrfach erwähnt nur die Erfassung des Beitrags zur Maximalimmission, nicht aber der Momentanimmission unter den derzeitigen Randbedingungen möglich. Für Worst-Case-Betrachtungen ist zwar die Maximalimmission hilfreich, für eine realistischere Abschätzung der tatsächlichen Exposition

der Bevölkerung hingegen nicht ausreichend. Hinzu kommt, dass momentan nur der Downlink-Anteil und nicht auch der Uplink berücksichtigt werden kann, was den potentiell größten Beitrag zur Exposition unberücksichtigt lässt. Abschließend ist auch die Beschränkung auf den Mobilfunk ein Nachteil des Ansatzes, da er nur einen Teil der Immission abdeckt und somit lediglich ein unvollständiges Bild der insgesamt vorliegenden HF-Immissionslandschaft zeichnen kann. Weitere Immissionsbeiträge müssten wiederum durch zusätzliche Systeme erfasst und mit den Ergebnissen des Smartphone-basierten Ansatzes zusammengeführt werden.

5.3 Schwachstellen des Ansatzes & Lösungsmöglichkeiten zu deren Überwindung

Im Rahmen der Untersuchungen haben sich verschiedene Schwachstellen des Ansatzes eines Smartphone-basierten Expositionsmonitorings offenbart, die auch bereits in der bisherigen Diskussion angeklungen sind. An dieser Stelle werden die wesentlichen Schwachstellen noch einmal benannt und Möglichkeiten aufgezeigt, wie diese überwunden werden könnten.

Die Schwäche, dass nur die Maximalimmission abgeschätzt werden kann, was für die Bestimmung der Exposition eine zu den meisten Zeiten deutliche Überschätzung bedeutet, könnte dadurch gelöst werden, dass die Kennzahlen zur Auslastung der Funkzellen durch die Netzbetreiber zur Verfügung gestellt werden. Diese Daten werden zur Überwachung des Netzbetriebes und zur Planung des Ausbaus und der Netzentwicklung ohnehin erhoben und könnten daher prinzipiell mit mäßigem Aufwand bereitgestellt werden. Damit ließen sich je nach Detailgrad sowohl tageszeitabhängige Immissionen abschätzen oder die mittlere Gesamtauslastung der Zellen ansetzen, um eine realistischere Schätzung der typischen Immissionshöhen zu erhalten. Der Aufwand zur Umsetzung besteht vor allem darin die Daten aufseiten der Netzbetreiber aus bestehenden Systemen auszulesen und zur Auswertung zu übergeben. Eine regelmäßige Erneuerung der Daten ist erforderlich, um Änderungen zu berücksichtigen. Die Zahlen müssten in das bestehende Auswertungssystem des Messnetzwerks eingespeist werden. Die Anwendung dieser Angaben ist nur mit geringem Aufwand verbunden, da bloß eine einfache Skalierung der zur Bestimmung der Maximalimmission verwendeten Hochrechnungsfaktoren entsprechend der Auslastungsgrade vorzunehmen ist.

Dadurch, dass die Uplink-Sendeleistung des Endgeräts über die Schnittstellen des Android-Betriebssystems nicht abgerufen werden kann, fehlt ein entscheidender Parameter für eine Abschätzung des Beitrags der Endgeräte zur Exposition. Eine mögliche Lösung dieses Problems könnte dadurch erreicht werden, dass durch exemplarische Untersuchungen an Smartphones mit Spezialsoftware (z. B. QualiPoc Android von Rohde & Schwarz) oder entsprechenden Service-Modus des Herstellers, die das Auslesen der Sendeleistung ermöglichen, die typische Sendeleistung abhängig von der jeweiligen Empfangssituation bestimmt wird. Zwar ist dies nicht der einzige Einfluss auf die Sendeleistung, jedoch ein in der Regel wesentlicher. Zusammen mit Informationen über den momentanen Zustand der Datenübertragung und der Telefonie aus dem Android-System ließe sich somit eine grobe Schätzung für die zu erwartende Exposition durch den Uplink des Endgeräts ableiten.

In den zur Untersuchung verwendeten Crowdsourcingdatenpaketen zeigte sich als eine Schwäche, dass nur die Informationen zu derjenigen Funkzelle aufgezeichnet wurden, mit der

das Smartphone verbunden war. Dadurch sind insbesondere in wenig frequentierten Bereichen keine hinreichenden Anzahlen von Messungen zur Abdeckung aller Funkzellen und Frequenzbänder zusammengekommen. Durch die Beschränkung auf die verbundene Zelle werden wiederholte Aufzeichnungen am gleichen Ort benötigt, bis aufgrund unterschiedlicher Umstände sämtliche Funkzellen einmal als verbundene Funkzelle genutzt wurden. Vor allem, wenn durch Netzauslastungsstrategien bestimmte Frequenzbänder bevorzugt zugewiesen werden, ist die vollständige Erfassung erschwert oder nahezu nicht erreichbar. Beispielsweise werden höhere Frequenzbänder favorisiert zugeteilt, solange der Signalpegel für eine Verbindung ausreicht, selbst wenn in einem niedrigeren Frequenzband eine höhere Signalstärke vorliegt, da die niedrigen Frequenzbänder aufgrund der besseren Durchdringung von Gebäuden für die Versorgung im Innenbereich freigehalten werden. Eine erhebliche Verbesserung kann daher erzielt werden, wenn auch die Signalstärkemessungen für die benachbarten Funkzellen miteinbezogen werden, mit denen das Endgerät derzeit keine aktive Verbindung unterhält. Diese werden abhängig von der derzeitigen Empfangssituation, Netzkonfiguration und Fähigkeiten des Endgeräts in unterschiedlichem Umfang und in variierenden Häufigkeiten ausgeführt und aktualisiert. Hierbei ist besonders zu beachten, dass eine Überwachung der tatsächlichen Aktualisierung der in Android ausgegebenen Werte zwingend erforderlich ist. Das heißt, nur wenn der Signalstärkewert einer Funkzelle eine Änderung zeigt, kann von einem neuen Messwert ausgegangen werden. Die Modemzeitstempel zeigen, obwohl diese individuell zu jeder Zelle vorliegen, immer nur an, dass überhaupt neue Modeminformationen vorliegen. Dies betrifft erfahrungsgemäß zwar immer die verbundene Zelle, aber nicht notwendigerweise auch die Nachbarzellen. Diese Überwachung ist bereits Endgeräteseitig leicht vorzunehmen und kann ebenso wie die Aufzeichnung der Nachbarzellen mit geringem Aufwand in eine App zur Datenerfassung integriert werden. Der Einsatz der Nachbarzellen erfordert jedoch aufseiten der Auswertung einen zusätzlichen Arbeitsschritt: Es ist ein Mapping der vollständigen Cell-IDs zu den Messdaten der Nachbarzellen erforderlich, da bei allen bislang betrachteten Geräten die Angaben fast immer auf die Kanalnummer und die primären Cell-IDs (PCI, PSC, BSIC) beschränkt sind, die jedoch nur lokal eindeutig sind. Über die Messungen, die als verbundene Funkzelle aufgenommen werden, kann die vollständige und eindeutige Cell-ID erhalten werden. Bei wiederholten Messungen verschiedener Smartphones ist es sehr wahrscheinlich, dass jede Funkzelle irgendwann einmal als verbundene Funkzelle genutzt wurde, sodass eine Zuordnung über entsprechend generierte Listen von Funkzellen, die auch den Standort miteinbeziehen, umgesetzt werden kann. Die Nutzung von Nachbarzellmessungen wurde vom Projektnehmer im Rahmen von [132] demonstriert.

Die unzureichende Abdeckung der älteren Mobilfunkstandards, die von Smartphones nur noch genutzt werden, wenn keine andere Verbindung möglich ist, könnte potentiell ebenfalls durch die Nutzung der Messung von Nachbarzellen verbessert werden. Auch für gerade nicht verbundene Funkdienste werden mitunter Zellen gelistet, allerdings ist es so, dass die Signalstärken nicht korrekt ausgegeben werden. Stattdessen wird immer der niedrigste Signalstärkewert vom Ende der Signalstärkeskala zurückgegeben. Die Messungen sind somit derzeit wertlos. Die Beschränkung liegt allerdings ausschließlich darin, dass die Hersteller die entsprechende im Modem vorliegende Information nicht an das Android-System weitergeben, das die passenden API-Funktionen für die Ausgabe bereitstellt. Eine Behebung dieses Problems wäre daher nur unter Mitwirkung der Smartphone-Hersteller möglich. Jedoch ist nicht zu erwarten, dass hier eine Veränderung zum Zweck des Immissionsmonitorings herbeigeführt werden

kann. Die alternative Lösung, die vom Smartphone genutzte Mobilfunkgeneration zu beschränken, um in alten Mobilfunkstandards Daten zu sammeln, dürften aufgrund der erforderlichen aktiven Mitwirkung der Endgerätenutzer und der damit einhergehenden Einschränkungen hinsichtlich der Übertragungskapazität kaum infrage kommen und dementsprechend nicht zu einer ausreichenden Aufbesserung der Datenausbeute für diese Standards führen.

Das bisher genutzte Verfahren zur Bestimmung von Umrechnungsfaktoren ist mit großem Aufwand verbunden und lässt sich nicht ohne weiteres für eine sehr große Anzahl von Smartphones anwenden. Zwar können auch mittlere Umrechnungsfaktoren für alle Smartphones eingesetzt werden, dies führt jedoch in Bereichen, wo nur wenige Smartphones oder nur wiederholt das gleiche Smartphone-Modell zur Datenerhebung beigetragen haben, möglicherweise zu größeren Fehlern in der Immissionsabschätzung, wenn eine stärkere Abweichung vom mittleren Umrechnungsfaktor vorliegt. Ein weiter zu prüfender Ansatz könnte darin bestehen, eine Kalibrierung von Endgeräten aus den Messdaten heraus vorzunehmen. Hierfür werden zunächst Auswertungen der Daten aller Smartphones vorgenommen, um das mittlere Ergebnis über alle Geräte hinweg zu bestimmen. Anschließend werden Auswertungen für einzelne Smartphones erstellt und den Ergebnissen auf der Basis aller Daten gegenübergestellt. Aus der mittleren Differenz der korrespondierenden Signalpegel, könnten sich Korrekturfaktoren ermitteln lassen, die für individuelle Smartphones oder Smartphone-Modelle eingesetzt werden könnten. Auf ähnliche Weise könnte auch eine Kalibrierung des Gesamtsystems durch Vergleich von Feldstärkemessungen mit den interpolierten Signalstärkemessungen einzelner oder aller Smartphones vorgenommen werden. Der Abgleich muss hierbei auf Ebene der einzelnen Funkzellen vorgenommen werden. Hierzu ist wie auch zur Verwertung der Nachbarzellen die zusätzliche Speicherung der primären Cell-IDs (PCI, PSC, BSIC) gegenüber den bisher genutzten Datenpaketen notwendig, um bei Nutzung des SRM-3006 die notwendige Zuordnung vornehmen zu können.

5.4 Zukunftsfähigkeit des Konzeptes

Die Einrichtung eines Smartphone-basierten Immissionsmonitoringsystems ist nur dann sinnvoll, wenn ein längerer Betrieb auch unter zukünftigen Bedingungen nützlich ist. Daher wird an diesem Punkt die Zukunftsfähigkeit des Konzepts beleuchtet.

Die Verbreitung des Android-Systems wird auf absehbare Zeit hoch bleiben, sodass ein auf diesem Betriebssystem basierendes Monitoring auch in Zukunft eine große potenzielle Nutzerschaft behalten dürfte. Bislang gab es bei den abrufbaren Daten zu den Signalstärkemessungen und Informationen der Funkzellen mit steigender Android-Version zahlreiche Verbesserungen, sodass auch zu neuen Funkstandards die Verfügbarkeit der notwendigen Informationen zu erwarten ist. Allerdings werden die Hintergrundaktivitäten von Apps durch neuere Android-Versionen und die Bemühungen der Hersteller zur Reduktion des Stromverbrauchs für längere Akkulaufzeiten immer weiter eingeschränkt. Um ohne regelmäßige Öffnung der App signifikante Anzahlen von Messungen zu erhalten, ist es erforderlich, dass die Nutzer aktiv in den Einstellungen die App zur Datenaufzeichnung aus der sogenannten Akku-Optimierung ausnehmen. Andernfalls wird die App in der Ausführung behindert oder ganz beendet (vgl. Abschnitt 2.2.6). Ebenso ist die Erfassung der zwingend notwendigen Standortinformation mit neueren Android-Versionen erschwert worden. Die Berechtigung zum Standortzugriff

im Hintergrund kann über den Standard-Dialog nicht mehr zugelassen werden, sondern lediglich für die aktive App-Nutzung. Stattdessen ist eine manuelle Freigabe über die Systemeinstellungen vorzunehmen. Beide Punkte setzen ein aktives Mitwirken des Nutzers voraus, was die Erfolgsaussichten zumindest schmälert. Darüber hinaus ist ungewiss inwiefern weitere zukünftige Restriktionen die Datenerfassung weiter behindern werden. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Apps im Google Play Store irgendwann nicht mehr zugelassen werden, wenn sie derartige Einstellungen vom Nutzer anfragen.

Eine große Herausforderung hinsichtlich der Anwendung des Konzepts in der Zukunft ergibt sich aus der Komplexität neuer Mobilfunkstandards, die immer variabler und adaptiver werden. Dies stellt auch die klassische Immissionsmesstechnik vor zum Teil große Probleme, da zum Beispiel beim Einsatz von Massive MIMO bei 5G kein zellweit abgestrahltes auslastungsunabhängiges Referenzsignal mehr vorliegt, das zur einfachen Hochrechnung auf Maximallimmission genutzt werden kann. Durch den unterschiedlichen Abdeckungsbereich von Broadcast- und Traffic-Beams ist eine pauschale Hochrechnung nicht mehr möglich. Die Berücksichtigung des Gewinnunterschieds beider Antennendiagramme scheidet in der Fläche aufgrund des Aufwands und der dafür benötigten detaillierten Informationen aus. Zwar ist der Einsatz von Massive MIMO nicht in allen Frequenzbändern zu erwarten, sodass zumindest ein Teil der Immission durch 5G auch mit Smartphone-Daten abgeschätzt werden könnte, allerdings würde dies die Gesamtaussagekraft wiederum erheblich senken. Vor diesem Hintergrund der bereits bei 5G schwierigen Anwendbarkeit ist es fragwürdig, ob auf lange Sicht ein Immissionsmonitoring auf dieser Basis eine Zukunft hat.

5.5 Einschätzung des Implementierungsaufwandes

Grundsätzlich sind alle Komponenten für ein System zur Abschätzung der Immission aus Smartphone-Signalstärkemessungen vorhanden bzw. sind rudimentär im Rahmen dieser Studie implementiert worden. Für eine Umsetzung eines Messnetzwerkes wäre daher im Wesentlichen die konsequente Ausformulierung und Optimierung dieser Bausteine auf die Bedürfnisse der Immissionsabschätzung erforderlich.

Aus technischer Sicht ist eine Umsetzung daher mit vertretbarem Aufwand möglich. Entsprechende Crowdsourcingnetzwerke existieren bereits und werden von verschiedenen Firmen betrieben. Die erforderlichen Daten können von diesen Anbietern erworben werden, wobei die Kosten vom jeweiligen Datenumfang abhängig sind. Der wesentliche Vorteil beim Rückgriff auf etablierte Crowdsourcingnetzwerke besteht darin, dass nicht erst eine Nutzerbasis akquiriert werden muss, wie es zum Aufbau eines neuen, speziell zur Immissionsabschätzung genutzten Netzwerkes erforderlich wäre. Die Verbreitung einer Anwendung und die Bewerbung dieser über entsprechende Kanäle ist mitunter mit erheblichen finanziellen Aufwendungen verbunden. Eine langfristige Kooperation mit einem bestehenden Crowdsourcinganbieter ist daher voraussichtlich die kostengünstigere Variante und lässt womöglich auch Anpassungen für die verbesserte Datenerhebung zum Zweck der Immissionsabschätzung zu (z. B. Einbeziehung von Nachbarzellen). Die fachliche Begleitung und Betreuung eines Messnetzwerkes und der Auswertung lässt sich mit wenigen Mitarbeitern oder ebenfalls durch geeignete Dienstleister abwickeln.

5.6 Zusammenfassung & abschließende Bewertung

Die Untersuchungen im vorliegenden Projekt haben zeigen können, dass die grundsätzliche technische Machbarkeit für ein auf Smartphones basierendes Messnetzwerk zur Immissionsabschätzung gegeben ist. Diese ergibt sich aus den folgenden Punkten:

- Die wichtigsten erforderlichen Parameter werden von Smartphones erfasst und sind im Betriebssystem Android für eine App abrufbar.
- Die Messeigenschaften der Smartphones ergeben einen ausreichend stabilen Zusammenhang zwischen den gemessenen Signalstärken und den vorliegenden Feldstärken.
- Die benötigte technische Infrastruktur (App, Serverinfrastruktur, Speicherplatz, Rechenleistung) lassen sich mit den heutigen Möglichkeiten leicht umsetzen.

Allerdings haben sich auch erhebliche Schwachpunkte herausgestellt, die einer erfolgreichen Anwendung als System zum Monitoring der Exposition entgegenstehen:

- Die Abdeckung aller relevanten Immissionsbeiträge des Mobilfunks ist nicht zu gewährleisten. Insbesondere die ausreichende Erfassung aller Mobilfunkstandards ist nach derzeitigem Stand nicht zu erreichen. Auch der Beitrag des Uplinks zur Exposition, der im ungünstigsten Fall den größten Beitrag darstellt, kann nicht erfasst werden.
- Es bleibt stets ungewiss, ob sämtliche Immissionsanteile für einen Ort ermittelt werden konnten oder nicht. Dies ist vor allem in weniger frequentierten Gebieten ein großes Problem.
- Die zukünftige Anwendbarkeit bei 5G und darüber hinaus, erscheint aufgrund der hohen Komplexität und erschwerten Bedingungen hinsichtlich einer pauschalen Extrapolation auf Maximalimmission beim Einsatz von aktiven Antennen schwierig oder unmöglich zu sein.

Dem Anspruch eines vollumfänglichen Monitoringsystems zur quantitativen Abschätzung der Exposition kann ein Messnetzwerk mit Smartphones daher nicht gerecht werden. Folgenden Nutzen könnte ein derartiges System dennoch entfalten:

- Für den derzeit gebräuchlichsten Funkstandard, LTE, ist eine einigermaßen verlässliche Aussage zur Immission auch quantitativ in Gebieten mit vielen messenden Smartphones zu erreichen.
- Die ableitbaren Immissionskarten können einen Eindruck darüber vermitteln, wie die Immission in der Fläche verteilt ist.
- Die abgeschätzte Immission kann näherungsweise als Mindestimmission angesehen werden, die bei Vollausslastung aller Funkzellen mindestens an dem jeweiligen Ort vorliegt.
- Die Immissionskarten können zur Auswahl von Messpunkten für Messkampagnen mit Feldstärkemessgeräten dienen, wenn zum Beispiel vor allem Orte mit zu erwartenden erhöhten Immissionen berücksichtigt werden sollen.

Unter der hypothetischen Annahme, dass eine große Anzahl von Smartphone-Nutzern aktiv an der Datenerhebung partizipieren würde und die Messungen durch diese auch gezielt in den verschiedenen Mobilfunkgenerationen ausgeführt würden, wären auf Grundlage der erzielten Erkenntnisse verwertbare Ergebnisse für eine Abschätzung der Gesamtimmission zu erwarten. Da dies jedoch nicht realistisch erscheint und die Anwendbarkeit auf zukünftige Mobilfunkstandards ungewiss ist, bleibt der Nutzen einer Umsetzung gering und rechtfertigt daher vermutlich die erforderlichen Aufwendungen langfristig nicht.

Danksagung

An dieser Stelle sei all jenen Personen und Organisationen gedankt, die einen Anteil am Gelingen des vorliegenden Vorhabens hatten. Dieser Dank gilt vor allem

- dem Bundesamt für Strahlenschutz für die Finanzierung des Vorhabens,
- Herrn Kuhne vom Bundesamt für Strahlenschutz für die kompetente und konstruktiv kritische fachliche Begleitung des Projekts,
- der Firma umlaut für die Ermöglichung der Arbeit an zwei Crowdsourcingdatenpaketen,
- Herrn Dessouky von umlaut für die organisatorische Abwicklung der Datenbereitstellung und die Erläuterungen zu Fragen bezüglich der Datenpakete,
- Herrn Gerhardes von Anritsu für die kostenlose Zurverfügungstellung des für die Labormessungen verwendeten Basisstationssimulators,
- Herrn Nakarmi von Anritsu für die hervorragende Unterstützung bei Fragen zur Verwendung des bereitgestellten Basisstationssimulators.

Abkürzungsverzeichnis

2G	Mobilfunktechnologie der zweiten Generation
3G	Mobilfunktechnologie der dritten Generation
3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	Mobilfunktechnologie der vierten Generation
5G	Mobilfunktechnologie der fünften Generation
ASCII	American Standard Code for Information Interchange, Zeichenkodierung
AVG	Average (Mittelwert)
API	Application Programming Interface, Programmierschnittstelle
ARFCN	Absolute Radio Frequency Channel Number, Kanalnummer bei GSM
ART	Android Runtime
ASU	Arbitrary Strength Unit
BCCH	Broadcast Control Channel
CP	Cyclic Prefix (zyklischer Präfix)
CSV	Comma-separated Values
CPICH	Common Pilot Channel
CSI-RS	Channel State Information Reference Signal
DM-RS	Demodulation Reference Signal
EARFCN	E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number, Kanalnummer bei LTE
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIRP	Equivalent Isotropic Radiated Power (äquivalente isotrope Strahlungsleistung)
EMF	Elektromagnetische Felder
EPRE	Energy per Resource Element
FDD	Frequency Division Duplex (Frequenzduplexverfahren)
FR	Frequency Range
GPRS	General Packet Radio Service, Dienst zur Datenübertragung in GSM-Netzen
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications (2G)
HAL	Hardware Abstraction Layer
HF	Hochfrequenz
HF-EMF	Hochfrequente elektromagnetische Felder

ID	Identifizier
LTE	Long Term Evolution (4G)
MATLAB	MATrix LABoratory
MAX	Maximum
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MCC	Mobile Country Code
MNC	Mobile Network Code
MP	Messpunkt
NR	New Radio (Synonym für die 5G-Funkschnittstelle)
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing (Orthogonales Frequenzmultiplexverfahren)
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OTA	Over-the-Air
PBCH	Physical Broadcast Channel
PC	Personal Computer
PCI	Physical Cell ID
P-CPICH	Primary Common Pilot Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PRB	Physical Resource Block
PSC	Primary Scrambling Code
P-SS	Primary Synchronization Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
RB	Resource Block
RBW	Resolution Bandwidth (Auflösebandbreite bei der Spektrumanalyse)
RE	Resource Element
RIL	Radio Interface Layer
RMS	Root Mean Square (quadratischer Mittelwert/Effektivwert)
RS	Reference Signal
RSCP	Received Signal Code Power
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Quality

RSSI	Received Signal Strength Indicator
SMS	Short Message Service
SS	Synchronization Signal
SSB	Synchronization Signal Block (abgekürzte Form von SS/PBCH)
SS-RSRP	Synchronisation Signal Reference Signal Received Power
SS-RSRQ	Secondary Synchronization Signal Reference Signal Received Quality
S-SS	Secondary Synchronization Signal
TAC	Type Allocation Code
TCH	Traffic Channel
TDD	Time Division Duplex
UARFCN	UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number, Kanalnummer bei UMTS
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System (3G)
USB	Universal Serial Bus, Schnittstelle der Computertechnik
VBW	Video Bandwidth (Videobandbreite)
W-CDMA	Wideband Code Division Multiple Access
WLAN	Wireless Local Area Network, drahtloses lokales Netzwerk

Literaturverzeichnis

- [1] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation*. 2020 (3GPP TS 36.211 version 15.8.1 Release 15)
- [2] BORNKESSEL, Christian ; HEIN, Matthias ; WUSCHEK, Matthias: Measurement of human exposure to LTE base stations present status and future challenges in measurement methodology. In: *2015 European Microwave Conference (EuMC)*, 2015, S. 881–884
- [3] SAUTER, Martin: *Grundkurs mobile Kommunikationssysteme : LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth*. 7. Auflage. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2018 (SpringerLink Bücher)
- [4] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*. 2020 ((3GPP TS 36.213 version 15.8.0 Release 15))
- [5] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer; Measurements*. 2020 (3GPP TS 36.214 version 15.5.0 Release 15)
- [6] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management*. 2020 (3GPP TS 36.133 version 15.9.0 Release 15)
- [7] LOPEZ-PEREZ, David ; GUVENC, Ismail ; CHU, Xiaoli: *Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks*. In: *IEEE Communications Magazine* 50 (2012), Nr. 12, S. 70–78. URL <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6384454>
- [8] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2*. 2020 (3GPP TS 36.300 version 15.8.0 Release 15)
- [9] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*. 2020 (3GPP TS 36.331 version 15.8.0 Release 15)
- [10] WUSCHEK, Matthias: *Measuring RF electromagnetic fields at mobile communications base station and broadcast transmitter sites*. Praxishandbuch für selektive EMF Messungen mit dem SRM-3006. 1. Aufl. Pfullingen : Narda Safety Test Solutions GmbH, 2019
- [11] BORNKESSEL, Christian: *Immissionsmessungen in der Umgebung von LTE-Basisstationen : Teil 1: Grundlagen*. Application Note. Pfullingen, 2013
- [12] BORNKESSEL, Christian: *Immissionsmessungen in der Umgebung von LTE-Basisstationen : Teil 2: Messmethoden*. Application Note. Pfullingen, 2013
- [13] BORNKESSEL, Christian ; ASGHAR, Muhammad Ehtisham ; HEIN, Matthias A.: Einfluss der Dekodierbandbreite auf die Genauigkeit von LTE-Immissionsmessungen. In: GARBE, Heyno (Hrsg.): *Elektromagnetische Verträglichkeit emv : Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*. Frankfurt/Main : mesago, 2018, S. 490–496
- [14] KELLER, Helmut: Bewertung rauschartiger Impulse moderner Kommunikationssysteme. In: *NIR 2011 - Nichtionisierende Strahlung in Arbeit und Umwelt : 43. Jahrestagung des Deutsch-Schweizerischen Fachverbandes für Strahlenschutz e. V.*, 2011 (Fortschritte im Strahlenschutz), S. 209–223

- [15] SCHIEßL, Sascha ; KOPACZ, Thomas ; HEBERLING, Dirk: Interpretation of the Physical Layer Measurements of Smartphones as Measures of Exposure to Electromagnetic Fields. In: *2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP) (EuCAP 2020)*, 2020
- [16] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Physical channels and mapping of transport channels onto physical channels (FDD)*. 2018 (3GPP TS 25.211 version 15.0.0 Release 15)
- [17] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL); BUNDESAMT FÜR METROLOGIE UND AKKREDITIERUNG (METAS): *Mobilfunk-Basisstationen (UMTS - FDD) Messempfehlung*. Bern, 17.9.2003
- [18] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Requirements for support of radio resource management (FDD)*. 2018 (3GPP TS 25.133 version 15.2.0 Release 15)
- [19] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Services provided by the physical layer*. 2018 (3GPP TS 25.302 version 15.0.0 Release 15)
- [20] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification*. 2018 (3GPP TS 25.331 version 15.4.0 Release 15)
- [21] BUNDESAMT FÜR UMWELT, WALD UND LANDSCHAFT (BUWAL); BUNDESAMT FÜR METROLOGIE UND AKKREDITIERUNG (METAS): *Mobilfunk-Basisstationen (GSM) Messempfehlung*. Bern, 2002 (Vollzug Umwelt VU-5800-D)
- [22] BORNKESSEL, Christian ; SCHUBERT, Markus: *Entwicklung von Mess- und Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Exposition der Bevölkerung durch elektromagnetische Felder in der Umgebung von Mobilfunk-Basisstationen*. 2005 (Schriftenreihe Reaktorsicherheit und Strahlenschutz BMU-2005-658)
- [23] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); GSM/EDGE Radio subsystem link control*. 2019 (3GPP TS 45.008 version 15.5.0 Release 15)
- [24] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Base Station (BS) radio transmission and reception*. 2020 (3GPP TS 38.104 version 15.8.0 Release 15)
- [25] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Overall description; Stage-2*. 2020 (3GPP TS 38.300 version 15.8.0 Release 15)
- [26] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Physical channels and modulation*. 2020 (3GPP TS 38.211 version 15.8.0 Release 15)
- [27] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Physical layer procedures for control*. 2020 (3GPP TS 38.213 version 15.8.0 Release 15)
- [28] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Multiplexing and channel coding*. 2020 (3GPP TS 38.212 version 15.8.0 Release 15)
- [29] BORNKESSEL, Christian ; KOPACZ, Thomas ; SCHIEßL, Sascha ; HEBERLING, Dirk ; HEIN, Matthias: Challenges to assess Human Exposure to 5G massive MIMO Base Stations. In: *The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European Bioelectromagnetics Association (BioEM 2019)*, 2019, S. 244–248
- [30] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Physical layer procedures for data*. 2020 (3GPP TS 38.214 version 15.8.0 Release 15)
- [31] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Physical layer measurements*. 2020 (3GPP TS 38.215 version 15.6.0 Release 15)

- [32] THE 3RD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT (3GPP): *5G; NR; Requirements for support of radio resource management*. 2020 (3GPP TS 38.133 version 15.8.0 Release 15)
- [33] KOPACZ, Thomas ; BORNKESSEL, Christian ; WUSCHEK, Matthias: *Berücksichtigung aktueller Mobilfunkantennentechnik bei der HF-EMF-Expositionsbestimmung*. 2021
- [34] STATISTA: *Marktanteil von Android am Absatz von Smartphones weltweit vom 1. Quartal 2009 bis zum 4. Quartal 2019*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/246456/umfrage/marktanteil-von-googles-android-am-weltweiten-smartphone-absatz-nach-quartalen/> – Überprüfungsdatum 2020-03-29
- [35] STATISTA: *Marktanteile der mobilen Betriebssysteme am Absatz von Smartphones in Deutschland von Januar 2012 bis Dezember 2019*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/225381/umfrage/marktanteile-der-betriebssysteme-am-smartphone-absatz-in-deutschland-zeitreihe/> – Überprüfungsdatum 2020-03-29
- [36] *Android Platform Architecture*. URL <https://developer.android.com/guide/platform/> – Überprüfungsdatum 2020-03-29
- [37] *Radio Layer Interface : Android Open Source*. URL <https://wladimir-tm4pda.github.io/porting/telephony.html> – Überprüfungsdatum 2020-03-29
- [38] ROHDE & SCHWARZ: *QualiPoc Android : The premier handheld troubleshooter*. Produktbroschüre. München, 2020
- [39] *Android Befehlsreferenz : Das android.telephony-API-Package*. URL <https://developer.android.com/reference/android/telephony/package-summary> – Überprüfungsdatum 2020-03-29
- [40] *Android Befehlsreferenz : Das android.location-API-Package*. URL <https://developer.android.com/reference/android/location/package-summary> – Überprüfungsdatum 2022-03-22
- [41] *Cellraid : RF Exposure and SAR*. URL <https://arimas.com/cellraid/> – Überprüfungsdatum 2020-06-25
- [42] CELLRAID LTD: *Beschreibung von Quanta Monitor im Google Play Store*. URL <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.cellraid.app.quantamonitor> – Überprüfungsdatum 2020-06-25
- [43] NIEMI, Pasi ; KANKAALA, Markku: *Determining and controlling radiation exposure*. 2018-10-17. Veröffentlichungsnr. EP2950469B1
- [44] NIEMI, Pasi ; KANKAALA, Markku: *Determining and controlling radiation exposure*. Cellraid Ltd. 2018-10-17. Veröffentlichungsnr. EP2950597B1
- [45] NIEMI, Pasi ; KANKAALA, Markku: *Determining radiation exposure*. 2017-03-08. Veröffentlichungsnr. EP2950468B1
- [46] *XMobiSense app*. URL <http://www.thecosmosproject.org/xmobisense-app/> – Überprüfungsdatum 2022-05-12
- [47] SCHIEßL, Sascha ; TA, Tam ; KOPACZ, Thomas ; HEBERLING, Dirk: Konzept und Messungen für ein Smartphone-basiertes Immissions-Monitoring-System. In: *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)*, 2020
- [48] SCHIEßL, Sascha ; KOPACZ, Thomas ; HEBERLING, Dirk: Smartphone measurements as a basis for a crowdsourcing-based monitoring of EMF exposure. In: *The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM 2019)*, 2019, S. 388–391
- [49] FRÖHLICH, Jürg ; ZAHNER, Marco ; SCHNEIDER, Fabian ; BACHMANN, Philipp: *Machbarkeitsstudie für ein Monitoring von Mobilfunkstrahlung mithilfe von Smartphones : Bericht im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt BAFU*. Zürich, 2016

- [50] BHATT, Chhavi Raj ; REDMAYNE, Mary ; ABRAMSON, Michael J. ; BENKE, Geza: *Instruments to assess and measure personal and environmental radiofrequency-electromagnetic field exposures*. In: *Australasian physical & engineering sciences in medicine* 39 (2016), Nr. 1, S. 29–42
- [51] GOEDHART, Geertje ; VRIJHEID, Martine ; WIART, Joe ; HOURS, Martine ; KROMHOUT, Hans ; CARDIS, Elisabeth ; EASTMAN LANGER, Chelsea ; LLOBET VILADOMS, Patricia de ; MASSARDIER-PILONCHERY, Amelie ; VERMEULEN, Roel: *Using software-modified smartphones to validate self-reported mobile phone use in young people: A pilot study*. In: *Bioelectromagnetics* 36 (2015), Nr. 7, S. 538–543
- [52] AGENCE NATIONALE DE SÉCURITÉ SANITAIRE DE L'ALIMENTATION, DE L'ENVIRONNEMENT ET DU TRAVAIL (Anses): *Appels à projets de recherche sur la santé environnement et la santé au travail 2015 : Résumés des dossiers retenus pour financement*. 2015
- [53] GEOMOD: *VigiExpo, or couple smartphone measurements with simulations*. URL <https://www.geomod.fr/en/vigixpo-couple-smartphone-measurements/>. – Aktualisierungsdatum: 2018-06-08 – Überprüfungsdatum 2020-03-04
- [54] GAUDAIRE, François: Résumé VigiExpo. In: *Appels à projets de recherche sur la santé environnement et la santé au travail 2015 : Résumés des dossiers retenus pour financement*, 2015, S. 74–75
- [55] GAUDAIRE, François: Un outil de monitoring pour caractériser l'exposition des populations aux radiofréquences : Système autonome de caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences issus des stations de base de téléphonie mobile, hybridant acquisition collaborative sur smartphones et simulation numérique. In: *Radiofréquences et santé*, 2017 (Les Cahiers de la Recherche – Sante, Environnement, Travail, No 9).
- [56] N. NOE ; S. JOURMESSI ; F. GAUDAIRE ; P. COMBEAU: *Système autonome et collaboratif pour la caractérisation de l'exposition aux champs électromagnétiques radiofréquences : Poster présenté au congrès de la SFRP, section "rayonnements non-ionisants"*. congrès national de radioprotection
- [57] NOE, N. ; GAUDAIRE, F. ; LO-NDIAYE, M. Diarra Bousso ; COMBEAU, P.: Toward a stand-alone monitoring system for mobile telephony base stations exposure using simulations and smartphones crowdsourcing. In: *2015 1st URSI Atlantic Radio Science Conference (URSI AT-RASC)*.
- [58] *Lexnet Website*. URL <http://www.lexnet.fr/> – Überprüfungsdatum 2020-03-06
- [59] VARSIER, Nadège (Hrsg.): *LEXNET – Low EMF Exposure Future Networks : D2.6 Global Wireless Exposure Metric Definition*. 2014
- [60] DIEZ, L. (Hrsg.); RODRIGUEZ DE LOPE, L. (Hrsg.); AGÜERO, R. (Hrsg.): *LEXNET – Low EMF Exposure Future Networks : D6.1 Validation platform framework and initial assessment*. 2014 (LEXNET D6.1)
- [61] VERMEEREN, Günter (Hrsg.): *LEXNET – Low EMF Exposure Future Networks : D3.3 Exposure Index assessment v2*. 2014 (LEXNET D3.3)
- [62] VERMEEREN, Günter (Hrsg.): *LEXNET – Low EMF Exposure Future Networks : D3.1 Exposure Index assessment v1*. 2013 (LEXNET D3.1)
- [63] CORRE, Yoann (Hrsg.): *LEXNET – Low EMF Exposure Future Networks : Deliverable D6.2: Report on validation, Part-A*. 2014 (LEXNET D6.2)
- [64] BORIES, Serge (Hrsg.): *LEXNET – Low EMF Exposure Future Networks : D3.2 Wide-band dosimeter design study & performances characterization Release 2*. 2014 (LEXNET D3.2)
- [65] BORIES, Serge (Hrsg.): *LEXNET – Low EMF Exposure Future Networks : D3.2 release 2 Appendices*. 2014 (LEXNET D3.2)

- [66] KOPRIVICA, Mladen ; NESKOVIC, Aleksandar ; NESKOVIC, Natasa: *Conversion from mono-axial to isotropic measurements for assessing human exposure to electromagnetic fields of GSM/DCS/UMTS base stations*. In: *ANNALS OF TELECOMMUNICATIONS-ANNALES DES TELECOMMUNICATIONS* 70 (2015), 9-10, S. 407–414
- [67] AUMOND, Pierre ; LAVANDIER, Catherine ; RIBEIRO, Carlos ; BOIX, Elisa Gonzalez ; KAMBONA, Kennedy ; D'HONDT, Ellie ; DELAITRE, Pauline: *A study of the accuracy of mobile technology for measuring urban noise pollution in large scale participatory sensing campaigns*. In: *APPLIED ACOUSTICS* 117 (2017), S. 219–226
- [68] PÓDÖR, Andrea ; RÉVÉSZ, András ; ÓCSAI, Attila ; LADOMERSZKI, Zoltán: *Testing some Aspects of Usability of Crowdsourced Smartphone Generated Noise Maps*. In: *GI_Forum* 1 (2015), S. 354–358
- [69] HARA, Sunao ; HATAKEYAMA, Asako ; KOBAYASHI, Shota ; ABE, Masanobu: *Sound sensing using smartphones as a crowdsourcing approach*. In: *2017 Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA ASC)*, S. 1328–1333
- [70] RUWANPATHIRANA, S. ; PERERA, I.: *CDME — crowd-sourced data mapping engine system that analyzes, maps & publishes crowd-sourced data on environment facts*. In: *2015 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, S. 271–276
- [71] DROSTE, A. M. ; PAPE, J. J. ; OVEREEM, A. ; LEIJNSE, H. ; STEENEVELD, G. J. ; VAN DELDEN, A. J. ; UIJLENHOET, R.: *Crowdsourcing Urban Air Temperatures through Smartphone Battery Temperatures in Sao Paulo, Brazil*. In: *JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND OCEANIC TECHNOLOGY* 34 (2017), Nr. 9, S. 1853–1866
- [72] BALCERAK, Ernie: *Crowdsourcing urban air temperature measurements using smartphones*. In: *Eos, Transactions American Geophysical Union* 94 (2013), Nr. 41, S. 372
- [73] OVEREEM, A. ; ROBINSON, J. C. R. ; LEIJNSE, H. ; STEENEVELD, G. J. ; HORN, B. K. P. ; UIJLENHOET, R.: *Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures*. In: *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 40 (2013), Nr. 15, S. 4081–4085
- [74] KONG, Qingkai ; LV, Qin ; ALLEN, Richard M.: *Earthquake early warning and beyond: Systems challenges in smartphone-based seismic network*. In: *HotMobile 2019 - Proceedings of the 20th International Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 2019, S. 57–62
- [75] KONG, Qingkai ; MARTIN-SHORT, Robert ; ALLEN, Richard M.: *Toward Global Earthquake Early Warning with the MyShake Smartphone Seismic Network, Part 2: Understanding MyShake Performance around the World*. In: *Seismological Research Letters* 91 (2020), Nr. 4, S. 2218–2233
- [76] INBAL, Asaf ; KONG, Qingkai ; ALLEN, Richard M. ; SAVRAN, William: *On the feasibility of using the dense myshake smartphone array for earthquake location*. In: *Seismological Research Letters* 90 (2019), Nr. 3, S. 1209–1218
- [77] KONG, Qingkai ; ALLEN, Richard M. ; SCHREIER, Louis: *MyShake: Initial observations from a global smartphone seismic network*. In: *GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS* 43 (2016), Nr. 18, S. 9588–9594
- [78] KONG, Qingkai ; PATEL, Sarina ; INBAL, Asaf ; ALLEN, Richard M.: *Assessing the sensitivity and accuracy of the MyShake smartphone seismic network to detect and characterize earthquakes*. In: *Seismological Research Letters* 90 (2019), Nr. 5, S. 1937–1949
- [79] ALLEN, Richard M. ; KONG, Qingkai ; MARTIN-SHORT, Robert: *The MyShake Platform: A Global Vision for Earthquake Early Warning*. In: *Pure and Applied Geophysics* 177 (2020), Nr. 4, S. 1699–1712

- [80] KONG, Qingkai ; INBAL, Asaf ; ALLEN, Richard M. ; LV, Qin ; PUDER, Arno: *Machine learning aspects of the myshake global smartphone seismic network*. In: *Seismological Research Letters* 90 (2019), 2 A, S. 546–552
- [81] ALAVI, Amir H. ; BUTTLAR, William G.: *An overview of smartphone technology for citizen-centered, real-time and scalable civil infrastructure monitoring*. In: *FUTURE GENERATION COMPUTER SYSTEMS-THE INTERNATIONAL JOURNAL OF ESCIENCE* 93 (2019), S. 651–672
- [82] SATTAR, Shahram ; LI, Songnian ; CHAPMAN, Michael: *Road Surface Monitoring Using Smartphone Sensors: A Review*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18 (2018), Nr. 11
- [83] ERIKSSON, Jakob ; GIROD, Lewis ; HULL, Bret ; NEWTON, Ryan ; MADDEN, Samuel ; BALAKRISHNAN, Hari: *The Pothole Patrol: Using a mobile sensor network for road surface monitoring*. In: *MobiSys'08 - Proceedings of the 6th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*, 2008, S. 29–39
- [84] CHEN, Hanshen ; YAO, Minghai ; GU, Qinlong: *Pothole detection using location-aware convolutional neural networks*. In: *International Journal of Machine Learning and Cybernetics* 11 (2020), Nr. 4, S. 899–911
- [85] DAVID, Joachim ; PESSEMIER, Toon ; DEKONINCK, Luc ; COENSEL, Bert ; JOSEPH, Wout ; BOTTELDOOREN, Dick ; MARTENS, Luc: *Detection of road pavement quality using statistical clustering methods*. In: *Journal of Intelligent Information Systems* 54 (2020), Nr. 3, S. 483–499
- [86] DU, Ronghua ; QIU, Gang ; GAO, Kai ; HU, Lin ; LIU, Li: *Abnormal Road Surface Recognition Based on Smartphone Acceleration Sensor*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (2020), Nr. 2, S. 451
- [87] BASAVARAJU, Akanksh ; DU, Jing ; ZHOU, Fujie ; JI, Jim: *A Machine Learning Approach to Road Surface Anomaly Assessment using Smartphone Sensors*. In: *IEEE Sensors Journal* (2019), S. 1
- [88] KYRIAKOU, Charalambos ; CHRISTODOULOU, Symeon E. ; DIMITRIOU, Loukas: *Smartphone-Based Pothole Detection Utilizing Artificial Neural Networks*. In: *Journal of Infrastructure Systems* 25 (2019), Nr. 3
- [89] NGUYEN, Teron ; LECHNER, Bernhard ; WONG, Yiik Diew: *Response-based methods to measure road surface irregularity: a state-of-the-art review*. In: *European Transport Research Review* 11 (2019), Nr. 1
- [90] SONY, Sandeep ; LAVENTURE, Shea ; SADHU, Ayan: *A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring*. In: *Structural Control and Health Monitoring* 26 (2019), Nr. 3
- [91] OZER, Ekin ; FENG, Maria Q. ; FENG, Dongming: *Citizen Sensors for SHM: Towards a Crowdsourcing Platform*. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 15 (2015), Nr. 6, S. 14591–14614
- [92] FIDA, Mah Rukh ; MARINA, Mahesh K.: *Impact of Device Diversity on Crowdsourced Mobile Coverage Maps*. In: *2018 14th International Conference on Network and Service Management (CNSM)*, 2018, S. 348–352
- [93] MOLINARI, Massimiliano ; FIDA, Mah Rukh ; MARINA, Mahesh K. ; PESCAPE, Antonio: *Spatial interpolation based cellular coverage prediction with crowdsourced measurements*. In: *C2B(I)D 2015 - Proceedings of the 2015 ACM SIGCOMM Workshop on Crowdsourcing and Crowdsharing of Big (Internet) Data, Part of SIGCOMM 2015*, 2015, S. 33–38
- [94] ENAMI, Rita ; SHI, Yan ; RAJAN, Dinesh ; CAMP, Joseph: *Pre-crowdsourcing: Predicting wireless propagation with phone-based channel quality measurements*. In: *Computer Communications* 132 (2018), S. 96–110

- [95] SHAMISI, Hazza Al ; SHAMSI, Humaid Al ; KOSTANIC, Ivica ; ZEC, Josko: Verifying Measurements of Reference Signal Received Power (RSRP) on LTE Network using an App on Android Smartphones. In: *2018 IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*, 2018, S. 372–377
- [96] LAURIDSEN, Mads ; RODRIGUEZ, Ignacio ; MIKKELSEN, Lars Møller ; GIMENEZ, Lucas Chavarria ; MOGENSEN, Preben: Verification of 3G and 4G received power measurements in a crowdsourcing Android app. In: *2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2016, S. 1–6
- [97] MA, Lin ; JIN, Ningdi ; ZHANG, Yongliang ; XU, Yubin: *RSRP difference elimination and motion state classification for fingerprint-based cellular network positioning system*. In: *Telecommunication Systems* 71 (2019), Nr. 2, S. 191–203
- [98] HENNING, Maximilian: *Weitere Studie belegt Lüge „anonymer“ Daten*. In: *Netzpolitik.org* (2019-07-25)
- [99] FOCUS ONLINE GROUP GMBH: *Datenschutzerklärung für die Webseite www.focus.de*. URL https://www.focus.de/intern/datenschutzerklaerung-datenschutzerklaerung-fuer-die-webseite-www-focus-de_id_6846331.html#hbmpp-toc-II-section-17331. – Aktualisierungsdatum: 2020-03-27 – Überprüfungsdatum 2020-03-31
- [100] WEKA MEDIA PUBLISHING GMBH: *connect-App - Datenschutzbestimmungen*. URL <https://www.connect.de/ratgeber/connect-app-datenschutzbestimmungen-2511046.html>. – Aktualisierungsdatum: 2017-09-27 – Überprüfungsdatum 2020-03-31
- [101] ALKHARASHI, Abdulwhab ; RENAUD, Karen: Privacy in Crowdsourcing: A Systematic Review, Bd. 11060. In: Chen L., Manulis M., Schneider S. (Hrsg.): *Information Security (ISC 2018) : Lecture Notes in Computer Science*. Cham : Springer, 2018 (vol 11060), S. 387–400
- [102] DIAMANTOPOULOU, Vasiliki ; ANDROUTSOPOULOU, Aggeliki ; GRITZALIS, Stefanos ; CHARALABIDIS, Yannis: An assessment of privacy preservation in crowdsourcing approaches: Towards GDPR compliance. In: *2018 12th International Conference on Research Challenges in Information Science (RCIS)*, 2018, S. 1–9
- [103] GUARDA, Teresa ; AUGUSTO, Maria Fernanda ; LOPES, Isabel: Mobile CrowdSensing Privacy. In: *New Knowledge in Information Systems and Technologies* : Springer, 2019 (3).
- [104] KANDAPPU, Thivya ; MISRA, Archan ; CHENG, Shih-Fen ; LAU, Hoong-Chuin ; IEEE: *Privacy in Context-aware Mobile Crowdsourcing Systems*. In: *2019 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERVASIVE COMPUTING AND COMMUNICATIONS WORKSHOPS (PERCOM WORKSHOPS)* (2017)
- [105] LIN, Xiaodong ; NI, Jianbing ; SHEN, Xuemin: Location Privacy Protection in Mobile Crowdsensing. In: *Privacy-Enhancing Fog Computing and Its Applications* : Springer.
- [106] ZAFACO GMBH: *Die Breitbandmessung aus Sicht des Endkunden*. URL https://download.breitbandmessung.de/Beschreibung-Die_Breitbandmessung_aus_Sicht_des_Endkunden.pdf – Überprüfungsdatum 2020-06-09
- [107] TAGA, T.: *Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments*. In: *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY* 39 (1990), Nr. 2, S. 117–131. URL <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=54228>
- [108] GLAZUNOV, A. Alayon ; MOLISCH, A. F. ; TUFVESSON, F.: *Mean effective gain of antennas in a wireless channel*. In: *IET Microwaves, Antennas & Propagation* 3 (2009), Nr. 2, S. 214–227. URL <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4797764>
- [109] KALLIOLA, K. ; SULONEN, K. ; LAITINEN, H. ; KIVEKAS, O. ; KROGERUS, J. ; VAINIKAINEN, P.: *Angular power distribution and mean effective gain of mobile antenna in different propagation environments*. In: *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY*

- 51 (2002), Nr. 5, S. 823–838. URL <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=1105924>
- [110] ANDO, Atsuya ; TAGA, Tokio ; KONDO, Akira ; KAGOSHIMA, Kenichi ; KUBOTA, Shuji: *Mean Effective Gain of Mobile Antennas in Line-of-Sight Street Microcells With Low Base Station Antennas*. In: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* 56 (2008), Nr. 11, S. 3552–3565. URL <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=4685875>
- [111] OGAWA, Koichi ; UWANO, Tomoki: *Mean effective gain analysis of a diversity antenna for portable telephones in mobile communication environments*. In: *ELECTRONICS AND COMMUNICATIONS IN JAPAN PART I-COMMUNICATIONS* 83 (2000), Nr. 3, S. 88–97
- [112] NIELSEN, J. Ø. ; YANAKIEV, B. ; BONEV, I. B. ; CHRISTENSEN, M. ; PEDERSEN, G. F. ; LUXEY, C. ; DIALLED, A. ; DICMM, I.: *User influence on the mean effective gain for data mode operation of mobile handsets*. In: *2012 6th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2012, S. 2759–2763
- [113] COMMISSION FOR COMMUNICATIONS REGULATION: *Mobile Handset Performance (Data)*. 2019 (ComReg19/67)
- [114] COMMISSION FOR COMMUNICATIONS REGULATION (Hrsg.): *Mobile Handset Performance (Voice)*. 2019 (ComReg19/110)
- [115] COMMISSION FOR COMMUNICATIONS REGULATION: *Mobile Handset Performance - Data*. 2018 (ComReg18/82)
- [116] COMMISSION FOR COMMUNICATIONS REGULATION: *Mobile Handset Performance (Voice) - Technical Report*. 2018 (ComReg18/109)
- [117] COMMISSION FOR COMMUNICATIONS REGULATION: *Mobile Handset Performance (Voice) & The Effect of Building Materials on Indoor Mobile Performance*. 2018 (ComReg18/78)
- [118] BOLTE, John F. B.: *Lessons learnt on biases and uncertainties in personal exposure measurement surveys of radiofrequency electromagnetic fields with exposimeters*. In: *Environment international* 94 (2016), S. 724–735
- [119] CTIA – THE WIRELESS ASSOCIATION: *Test Plan for Wireless Device Over-the-Air Performance : Method of Measurement for Radiated RF Power and Receiver Performance*. April 2019 (Version 3.8.2)
- [120] JCGM 100:2008. 2008. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*
- [121] LÄNDERAUSSCHUSS FÜR IMMISSIONSSCHUTZ (LAI): *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV)*. 22.10.2014
- [122] FORKEL, Ingo ; RIIHIJARVI, Janne ; GERWIG, Olaf: *Studie: LTE-Mobilfunkversorgung in Deutschland*. Aachen, 15.01.2020
- [123] RÜGHEIMER, Hannes: *Mobilfunk-Netztest 2020 : So testen wir das beste Handy-Netz*. URL <https://www.connect.de/ratgeber/mobilfunk-netztest-2020-so-testen-wir-3200120.html>. – Aktualisierungsdatum: 2019-12-03 – Überprüfungsdatum 2020-06-10
- [124] *OpenStreetMap – Urheberrecht und Lizenz*. URL <https://www.openstreetmap.org/copy-right> – Überprüfungsdatum 2022-04-20
- [125] STATISTA: *Marktanteile der einzelnen Netzbetreiber an den Mobilfunkanschlüssen in Deutschland von 1998 bis 2021*. URL <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/3028/umfrage/marktanteile-der-netzbetreiber-am-mobilfunkmarkt-in-deutschland-seit-1998/> – Überprüfungsdatum 2021-11-15

- [126] RASMUSSEN, Carl Edward ; WILLIAMS, Christopher K. I.: *Gaussian processes for machine learning*. 3. print. Cambridge, Mass. : MIT Press, 2008 (Adaptive computation and machine learning)
- [127] MONTERO, José-María ; FERNÁNDEZ-AVILÉS, Gema ; MATEU, Jorge: *Spatial and Spatio-Temporal Geostatistical Modeling and Kriging*. Chichester, UK : John Wiley & Sons, Ltd, 2015
- [128] PANIAGUA, Jesus M. ; RUFO, Montaña ; JIMENEZ, Antonio ; ANTOLIN, Alicia: *The spatial statistics formalism applied to mapping electromagnetic radiation in urban areas*. In: *Environmental monitoring and assessment* 185 (2013), Nr. 1, S. 311–322
- [129] AERTS, S. ; DESCHRIJVER, D. ; JOSEPH, Wout ; VERLOOCK, L. ; DHAENE, T. ; MARTENS, Luc: *Response to comments by Beekhuizen et al. on "exposure assessment of mobile phone base station radiation in an outdoor environment using sequential surrogate modeling"*. In: *Bioelectromagnetics* 34 (2013), Nr. 7, S. 570
- [130] AERTS, Sam ; JOSEPH, Wout ; MASLANYJ, Myron ; ADDISON, Darren ; MEE, Terry ; COLUSSI, Loek ; KAMER, Jos ; BOLTE, John: *Prediction of RF-EMF exposure levels in large outdoor areas through car-mounted measurements on the enveloping roads*. In: *Environment international* 94 (2016), S. 482–488
- [131] SCHIEBL, Sascha ; KOPACZ, Thomas ; HEBERLING, Dirk: *Towards a Crowdsourcing-Based EMF Exposure Monitoring: Evaluation of Smartphone Measurements Using Kriging*. In: *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, 2021, S. 1–5
- [132] SCHIEBL, Sascha ; KOPACZ, Thomas ; SCHIFFARTH, Anna-Malin ; HEBERLING, Dirk: *Estimation of Exposure Levels from Crowdsourcing-based Smartphone Measurements*. In: *The Joint Annual Meeting of The Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM 2021)*, 2021
- [133] BUNDESUMWELTMINISTERIUM (BMUB): *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes* (idF v. 14. 8. 2013) (2013-08-14)

Anhang A Android Apps zum Auslesen von Signalstärkeindikatoren

Allgemeine Funktionen	CellViewer	CellMapper	Network Cell Info (Lite)	NetMonster	NetMonitor Cell Signal Logging	NetMonitor	G-NetTrack	RF Signal Tracker	Rx Monitor	Cell Signal Monitor	Network Info II	Netzabdeckung	Network Signal Info	ElektroSmart	Cell Tower Location	Signal Check	Network Monitor	LTE Discovery
Aufzeichnen von Messungen / Ausgabe in eine Datei	X			X	X	X	X	X		X	X	X	X			X	X	
Darstellung von Messparametern in einem Graphen	X		X	X	X	X	X	X	X	X			X			X		
Messung von Nachbarzellen	X	X	X	X	X	X	X		X		X	X		X		X		X
Unterstützung mehrere SIM-Karten	X		X			X	X		X	X					X	X		
Hochladen von Messdaten in eine Crowdsourcing Datenbank		X	X	X														X
Anzeige/Aufzeichnung von Geräte-Informationen	X		X			X	X	X			X		X					X
Explizite Aufzeichnung von Zellwechseln und entsprechenden Zeitpunkten	X						X		X	X								
GPS Standort	X			X	X	X	X	X	X		X	X	X		X		X	X

LTE Parameter	CellViewer	CellMapper	Network Cell Info	NetMonster	NetMonitor Cell Signal Logging	NetMonitor	G-NetTrack (Lite)	RF Signal Tracker	Rx Monitor	Cell Signal Monitor	Network Info II	Netzabdeckung	Network Signal Info	ElectroSmart	Cell Tower Location	Signal Check	Network Monitor	LTE Discovery
Provider	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
MCC	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MNC	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cell-ID	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
PCI	X		X	X	X	X	X		X			X		X	X	X	X	X
Kanalnummer EARFCN	X	X		X	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	
Kanalfrequenz	X	X							X						X	X		
LTE-Bandnummer	X		X	X	X	X	X		X	X			X			X		X
Bandname		X		X	X	X	X		X	X			X		X			
Kanalbandbreite	X	X							X					X		X		X
ASU	X		X					X					X				X	X
Level	X																	X
RSRP	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
RSRQ	X		X	X	X	X	X		X	X		X	X	X	X			X
RSSI	X	X		X			X							X				

UMTS Parameter	CellViewer	CellMapper	Network Cell Info (Lite)	NetMonster	NetMonitor Cell Signal Logging	NetMonitor	G-NetTrack (Lite)	Rf Signal Tracker	Rx Monitor	Cell Signal Monitor	Network Info II	Netzabdeckung	Network Signal Info	ElectroSmart	Cell Tower Location	Signal Check	Network Monitor	LTE Discovery
Provider	X		X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X
MNC	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
MCC	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Cell-ID	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
PSC	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X*	X	X	X	X	X		X
Kanalnummer UARFCN	X	X		X	X	X	X		X	X		X		X	X	X		
Band	X		X	X	X	X	X		X	X					X			
Kanalfrequenz	X	X							X						X			
Bandnummer		X				X	X		X	X					X			
Bandname		X			X	X	X		X	X					X			
ASU	X		X					X			X		X				X	X
Level	X																	X
RSCP	X			X			X		X		X*					X		
RSSI	X	X	X		X	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X	X

