

# Hochfrequenz-Immissionsmessungen an Mobilfunk-Kleinzellenanlagen in Berlin

Regensburg, 24. Februar 2022  
Projektnummer: 21/004  
Version: 1.4

EM-Institut GmbH  
Carlstraße 5  
93049 Regensburg

## **Auftragnehmer**

EM-Institut GmbH  
Carlstraße 5  
93049 Regensburg

## **Autoren**

Prof. Dr.-Ing. Matthias Wuschek  
EM-Institut GmbH  
Carlstraße 5  
93049 Regensburg  
Tel: 0941/29836-51  
matthias.wuschek(at)em-institut.de

Dr.-Ing. Christian Bornkessel  
Technische Universität Ilmenau  
Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
Tel: 03677/69-1592  
E-Mail: christian.bornkessel(at)tu-ilmenau.de

M. Sc. Anna-Malin Schiffarth  
Institut für Hochfrequenztechnik  
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen  
Melatener Straße 25  
52074 Aachen  
Tel: 0241/80-27943  
E-Mail: schiffarth(at)ihf.rwth-aachen.de

## **Auftraggeber**

Vodafone GmbH (federführend)  
Herr Dirk Schulz  
Attilastraße 61-67  
12105 Berlin  
Tel: 030/75475-7013  
E-Mail: dirk.schulz@vodafone.com

gemeinsam mit:  
Deutsche Telekom Technik GmbH  
Telefónica Germany GmbH & Co. OHG  
Drillisch Netz AG

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Aufgabenstellung .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Kurzübersicht zu Personenschutzgrenzwerten .....</b>	<b>7</b>
2.1 26. BImSchV .....	7
2.2 ICNIRP 1998 .....	8
2.3 Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EG .....	9
2.4 ICNIRP 2020 .....	9
<b>3 Typisierung von Mobilfunk-Kleinzellenanlagen .....</b>	<b>11</b>
3.1 Typisierung der deutschen Mobilfunknetzbetreiber .....	11
3.2 Vorschlag des Small Cell Forum .....	12
3.3 Kategorisierung nach van Wyk et al. ....	13
<b>4 Literaturrecherche .....</b>	<b>14</b>
4.1 Wissenschaftliche Publikationen mit Qualitätssicherung .....	14
4.2 Forschungsberichte .....	16
4.3 Fazit der Literaturstudie .....	19
<b>5 Immissionsmessungen an Kleinzellenanlagen .....</b>	<b>22</b>
5.1 Untersuchte Anlagenstandorte .....	22
5.2 Eingesetzte Messausrüstung .....	23
5.3 Messverfahren .....	23
5.3.1 <i>Grundsätzliche Vorgehensweise</i> .....	23
5.3.2 <i>Bestimmung der maximalen Immission bei Basisstationen</i> .....	25
5.3.3 <i>Bestimmung der Momentanimmission</i> .....	26
5.3.4 <i>Messunsicherheit</i> .....	26
5.4 Messdurchführung .....	27
<b>6 Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse .....</b>	<b>28</b>
6.1 Allgemeine Eigenschaften der Messpunkte .....	28
6.2 Immissionen durch die Kleinzellenanlagen .....	28
6.2.1 <i>Größenverteilung und Entfernungsabhängigkeit</i> .....	28
6.2.2 <i>Ergebnisse der Linienmessungen</i> .....	30

<b>6.2.3</b>	<b><i>Dämpfungswirkung von Glasscheiben</i></b> .....	<b>34</b>
<b>6.3</b>	<b>Anlagenkategorien A, B und C und deren Immissionen</b> .....	<b>35</b>
<b>6.4</b>	<b>Vergleich der Maximalimmission mit der aktuellen Immission</b> .....	<b>37</b>
<b>6.5</b>	<b>Immissionen durch benachbarte Mobilfunkanlagen</b> .....	<b>38</b>
<b>6.6</b>	<b>Immissionen durch "sonstige" Funksendeanlagen</b> .....	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>Untersuchung der Leistungsregelung im LTE-Uplink</b> .....	<b>42</b>
<b>7.1</b>	<b>Verwendete Messgeräte</b> .....	<b>42</b>
<b>7.2</b>	<b>Messverfahren und Messobjekte</b> .....	<b>42</b>
<b>7.3</b>	<b>Zeitlicher Verlauf von Empfangspegel und Sendeleistung</b> .....	<b>43</b>
<b>7.4</b>	<b>Messergebnisse</b> .....	<b>44</b>
<b>7.4.1</b>	<b><i>Statische Messungen</i></b> .....	<b>44</b>
<b>7.4.2</b>	<b><i>Dynamische Messungen</i></b> .....	<b>49</b>
<b>7.5</b>	<b>Vergleich zwischen Kleinzellen- und Makrostandort</b> .....	<b>52</b>
<b>7.6</b>	<b>Messungen zur Leistungsregelung im LTE-Uplink: Fazit</b> .....	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>62</b>
<b>10</b>	<b>Detaildokumentation der Messorte und -ergebnisse</b> .....	<b>64</b>
<b>10.1</b>	<b>Standort 1: Straße des 17. Juni 100</b> .....	<b>64</b>
<b>10.2</b>	<b>Standort 2: Potsdamer Straße 59</b> .....	<b>70</b>
<b>10.3</b>	<b>Standort 3: Potsdamer Straße 88</b> .....	<b>73</b>
<b>10.4</b>	<b>Standort 4: Eislebener Straße 10</b> .....	<b>76</b>
<b>10.5</b>	<b>Standort 5: Trautenaustraße 6</b> .....	<b>81</b>
<b>10.6</b>	<b>Standort 6: Babelsberger Straße 45</b> .....	<b>84</b>
<b>10.7</b>	<b>Standort 7: Alexanderstraße</b> .....	<b>87</b>
<b>10.8</b>	<b>Standort 8: Wörther Straße 13</b> .....	<b>92</b>
<b>10.9</b>	<b>Standort 9: Kollwitzstraße 6</b> .....	<b>96</b>
<b>10.10</b>	<b>Standort 10: Wittenbergplatz 2</b> .....	<b>101</b>
<b>10.11</b>	<b>Standort 11: Grolmannstraße 48</b> .....	<b>104</b>
<b>10.12</b>	<b>Standort 12: Kurfürstendamm 213 - 216</b> .....	<b>108</b>

# 1 Aufgabenstellung

Zur Steigerung der Übertragungskapazität für mobile Breitbanddienste werden vermehrt Kleinzellen, so genannte "Small Cells" in Betrieb genommen. Dabei handelt es sich um Funkzellen, deren Antennen nicht auf hohen Masten oder Gebäudedächern, sondern in deutlich geringerer Höhe beispielsweise auf Litfaßsäulen, Telefonsäulen, in Fernmeldemultifunktionsgehäusen oder an Gebäudewänden montiert sind.

Um ein genaueres Bild über die Größe und die räumliche Verteilung der von Kleinzellensendeanlagen verursachten Hochfrequenzimmissionen zu erhalten, wurde die EM-Institut GmbH von den deutschen Mobilfunknetzbetreibern (Deutsche Telekom, Vodafone, Telefónica und 1&1 Drillisch) beauftragt, in der Umgebung von verschiedenen aktuell in Betrieb befindlichen Outdoor-Kleinzellenstandorten umfangreiche Hochfrequenzfeldstärkemessungen vorzunehmen. Um den Zeit- und Kostenaufwand für Reisen möglichst gering zu halten, befinden sich alle untersuchten Standorte im Stadtgebiet von Berlin. Wichtig ist hierbei, dass verschiedene Kategorien von Kleinzellenstandorten in die Untersuchungen einbezogen wurden (Näheres zu dieser Klassifizierung findet sich in Abschnitt 3.1 dieses Berichts).

Durchgeführt wurden die Untersuchungen von der EM-Institut GmbH in Zusammenarbeit mit dem Institut für Hochfrequenztechnik der RWTH Aachen.

Die Messergebnisse sollen insbesondere der Klärung folgender Fragestellungen dienen:

- *Wie groß sind die von der Kleinzellenanlage bei Maximalauslastung verursachten hochfrequenten Immissionen an verschiedenen Punkten in der näheren Umgebung des Antennenstandortes (typisch zehn Messpunkte pro Anlagenstandort)?*
- *Wie stark unterscheiden sich typisch die auf Maximalauslastung der Kleinzellenanlage hochgerechnete und die aktuell zum Zeitpunkt der Messung vorhandene Immission?*
- *Wie verändert sich die Immission mit dem Abstand zum Anlagenstandort?*
- *Wie stark ist die Kumulation der Immission bei zwei Kleinzellenanlagen ausgeprägt, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu einander befinden?*
- *Wie groß sind im Vergleich die Immissionen, verursacht durch andere in der näheren Umgebung befindliche GSM-, TETRA-, UMTS- und LTE-Mobilfunksendeanlagen (vornehmlich Dachstandorte)?*
- *Welche Immissionswerte werden im Umfeld des Kleinzellenstandortes durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-Rundfunk, DAB+, DVB-T2) generiert?*
- *Mittels Messungen vor und innerhalb von benachbarten Ladengeschäften oder Gastronomiebetrieben soll zusätzlich der dämpfende Einfluss von Fensterscheiben auf die von der Kleinzellenanlage erzeugten Hochfrequenzimmissionen quantifiziert werden.*

Durchführung und Ergebnisse der Messungen und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen sind in diesem Bericht dokumentiert (Kapitel 5, 6 und 10).

Einleitend erfolgt zunächst eine Kurzübersicht zu den Personenschutzgrenzwerten nach 26. BImSchV, ICNIRP 1998, ICNIRP 2020, und EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (Allgemeinbevölkerung). Hier wird insbesondere auf wichtige Unterschiede hinsichtlich der Kategorien "Basisgrenzwerte / Referenzwerte" sowie "Ganzkörperreferenzwerte / Teilkörperreferenzwerte" eingegangen (Kapitel 2).

Mittels einer Literaturrecherche wurde eruiert, ob in der aktuellen Literatur Ansätze für Typisierungen bzw. Kategorisierungen von Mobilfunk-Kleinzellenanlagen im Außenbereich enthalten sind. Diese werden mit den vom Auftraggeber für dieses Messprojekt vorgeschlagenen Kategorien A bis C verglichen und bewertet (Kapitel 3).

Ergänzt werden die Untersuchungen durch eine Literaturrecherche zu neueren, relevanten Immissionsmessungen an Mobilfunk-Kleinzellen im öffentlichen Outdoorbereich, in welcher auch der aktuelle Stand der Messtechnik beschrieben und eine Zusammenstellung und Bewertung der relevanten Messergebnisse erfolgt (Kapitel 4).

Weiterhin beinhaltet das hier dokumentierte Projekt Untersuchungen zum Einfluss einer Kleinzellenanlage auf die durch das Endgerät beim Nutzer generierte Hochfrequenzimmission (Kapitel 7). Hierzu wurden an verschiedenen Messpunkten an zwei der betrachteten Kleinzellenstandorte die Empfangspegel des Basisstationssignals sowie die Sendeleistung eines Endgerätes bei Verbindung mit der Kleinzellenanlage aufgenommen und mit dem Fall verglichen, wenn das Endgerät mit einer konventionellen Makrobasisstation (Dachstandort) kommuniziert.

Eine Zusammenfassung sowie ein Literaturverzeichnis finden sich in den Kapiteln 8 und 9.

## 2 Kurzübersicht zu Personenschutzgrenzwerten

In diesem Kapitel erfolgt eine Kurzübersicht zu Personenschutzgrenzwerten mit speziellem Bezug zu Mobilfunk-Kleinzellenanlagen im Außenbereich.

### 2.1 26. BImSchV

Für den Schutz der Allgemeinheit und der Nachbarschaft vor sowie zur Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder besteht in Deutschland seit dem 16. Dezember 1996 mit der "Sechszwanzigsten Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)" und den darin festgelegten Grenzwerten eine gesetzliche Regelung. Diese Verordnung wurde im Jahr 2013 novelliert [26. BImSchV]. Sie gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen, Niederfrequenzanlagen und Gleichstromanlagen.

Im Hochfrequenzbereich gilt die 26. BImSchV für ortsfeste Sendeanlagen mit einer Sendeleistung von 10 Watt EIRP (äquivalente isotrope Strahlungsleistung) oder mehr, die elektromagnetische Felder im Frequenzbereich von 9 kHz bis 300 GHz erzeugen. Sie gilt ebenfalls für Anlagen mit einer Sendeleistung von weniger als 10 Watt EIRP, wenn diese an einem Standort errichtet werden, an dem unter Berücksichtigung der neuen Anlage die Grenze von 10 Watt EIRP überschritten wird.

Obwohl Mobilfunk-Kleinzellenanlagen im Außenbereich in der Regel mit einer EIRP von weniger als 10 Watt betrieben werden, haben die deutschen Mobilfunknetzbetreiber im Jahr 2020 ihre freiwillige Selbstverpflichtung gegenüber der Bundesregierung auch für Kleinzellenanlagen im Bereich zwischen 2 Watt (EIRP) und <10 Watt (EIRP) fortgeschrieben und bezüglich der Einhaltung der Vorgaben der 26. BImSchV folgende Passagen aufgenommen [SB 20]:

*"Bei Montagehöhen der Kleinzellen-Antenne von über 2,30 Meter über jeglichem Grund ist die Sicherheit der Bevölkerung im darunterliegenden öffentlichen Raum durch die Unterschreitung des Grenzwertes der 26. BImSchV in jedem Fall sichergestellt.*

*Die Mobilfunkbetreiber sagen - unabhängig von der Montagehöhe der Antennen - zu, Kleinzellen-Sendeanlagen im öffentlich zugänglichen Bereich außerhalb von Gebäuden so zu errichten und zu betreiben, dass an allen Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, die Grenzwerte der 26. BImSchV sicher eingehalten werden."*

Durch diese Zusagen erhalten die Grenzwertvorgaben der 26. BImSchV auch für den Bereich der Kleinzellenanlagen mit weniger als 10 Watt EIRP im Außenbereich Gültigkeit.

Laut 26. BImSchV sind zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen die unter die Verordnung fallenden Hochfrequenzanlagen so zu errichten und zu betreiben, dass in ihrem Einwirkungsbereich an Orten, die zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung die nachfolgend

bestimmten Grenzwerte für den jeweiligen Frequenzbereich unter Berücksichtigung von Immissionen durch andere ortsfeste Hochfrequenzanlagen sowie Niederfrequenzanlagen nicht überschritten werden.

Frequenz $f$ in MHz	Grenzwerte, quadratisch gemittelt über 6-Minuten-Intervalle	
	Elektrische Feldstärke $E_{\text{eff}}$ in V/m	Magnetische Feldstärke $H_{\text{eff}}$ in A/m
0,1 - 1	87	0,73 / $f$
1 - 10	$87 / f^{1/2}$	0,73 / $f$
10 - 400	28	0,073
400 - 2000	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$
2000 - 300000	61	0,16

Tabelle 2.1: Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV. Für  $f$  ist der Zahlenwert in MHz einzusetzen. Der für Mobilfunk-Kleinzellenanlagen relevante Frequenzbereich ist farblich hervorgehoben.

Elektrische und magnetische Feldstärken sind im *Fernfeld* einer Strahlungsquelle über den Feldwellenwiderstand des Freiraumes,  $Z_0 \approx 377 \Omega$ , ineinander überführbar und beinhalten dieselbe Information. Deswegen ist es hier ausreichend, lediglich die Größe des elektrischen Feldes zu messen und anzugeben. Der prozentuale Grenzwert-Ausschöpfungsgrad ist das mit 100 Prozent multiplizierte Verhältnis von Messwert und Grenzwert.

Die Grenzwerte der 26. BImSchV können als örtliche Maximalwerte (und nicht als Ganzkörpermittelwerte) interpretiert werden: In den die 26. BImSchV erläuternden LAI-Empfehlungen [LAI 14] wird für frequenzselektive Messungen im Hochfrequenzbereich die Schwenkmethode mit der Einstellung "Max-Hold" am Spektrumanalysator empfohlen, wodurch im durchschwenkten Messvolumen der örtliche Maximalwert der Feldstärke, jedoch kein Mittelwert im Volumen bestimmt wird. Auch die DIN EN 50413 Ausgabe 2009 [50413:2009], auf die die 26. BImSchV hinsichtlich Mess- und Berechnungsverfahren verweist, enthält keine Angaben zu einer räumlichen Mittelung. Zwar darf in der derzeit gültigen Ausgabe dieser Norm von 2020 [50413:2020] eine räumliche Mittelung in Betracht gezogen werden; der Verweis in der 26. BImSchV ist aber ausdrücklich ein datierter Verweis auf die Fassung von 2009.

Die Grenzwerte der 26. BImSchV basieren auf den Referenzwerten der Empfehlungen der Internationalen Kommission zum Schutz von nichtionisierender Strahlung (ICNIRP) zur Begrenzung der Exposition durch zeitveränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder aus dem Jahr 1998 [ICNIRP 1998].

## 2.2 ICNIRP 1998

In den Empfehlungen der ICNIRP aus dem Jahr 1998 wird ein Konzept zur Begrenzung elektrischer, magnetischer und elektromagnetischer Felder vorgestellt; dieses besteht aus Basisgrenzwerten und Referenzwerten. Die Basisgrenzwerte adressieren im Hochfrequenzbereich direkte Wirkungen der Felder im Körper (d.h. Wärmewirkungen), wohingegen die Referenzwerte einfache und außerhalb des Körpers messbare physikalische Größen darstellen. Die Basisgrenzwerte sind für den Hochfrequenzbereich als spezifische Absorptionsrate



(SAR) definiert, und zwar sowohl gemittelt über das gesamte Körpervolumen, als auch speziell für lokale Exposition gemittelt über 10 Gramm zusammenhängendes Gewebevolumen. Die Referenzwerte für das elektrische Feld E, das magnetische Feld H und die äquivalente Leistungsdichte S sind aus den Basisgrenzwerten für maximale Kopplungsbedingungen des einfallenden elektromagnetischen Feldes auf den Menschen abgeleitet. Die Referenzwerte für das elektrische Feld und das magnetische Feld für die Allgemeinbevölkerung sind im für Mobilfunk-Kleinzellenanlagen relevanten Frequenzbereich von etwa 700 MHz bis 3,7 GHz identisch zu den in Tabelle 2.1 dargestellten Grenzwerten der 26. BImSchV. Im Unterschied zu ICNIRP 1998 definiert die 26. BImSchV jedoch keine Grenzwerte für die äquivalente Leistungsdichte sowie keine Basisgrenzwerte.

### 2.3 Europäische Ratsempfehlung 1999/519/EG

In der "Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz)" empfiehlt die Europäische Kommission den Mitgliedsstaaten, "im Interesse eines hohen Gesundheitsschutzniveaus hinsichtlich der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern ... ein System von Basisgrenzwerten und Referenzwerten ... ein[zuf]ühren" [1999/519/EG]. Da die Ratsempfehlung unmittelbar auf den Basisgrenzwerten und Referenzwerten der ICNIRP 1998 Empfehlungen basiert, sind die Referenzwerte der Allgemeinbevölkerung für die elektrischen und magnetischen Feldstärken im für Mobilfunk-Kleinzellenanlagen relevanten Frequenzbereich von etwa 700 MHz bis 3,7 GHz identisch zu den in Tabelle 2.1 dargestellten Grenzwerten der 26. BImSchV.

### 2.4 ICNIRP 2020

Die ICNIRP hat in den letzten Jahren ihre Empfehlungen zur Begrenzung der Exposition in hochfrequenten elektromagnetischen Feldern überarbeitet. Im Jahr 2020 ist mit [ICNIRP 2020] ein Dokument herausgegeben worden, das die früheren Empfehlungen aus dem Jahr 1998 [ICNIRP 1998] für den Hochfrequenzbereich (hier: 100 kHz bis 300 GHz) ablöst. Im Hinblick auf die Thematik der Kleinzellen sind folgende Aspekte der ICNIRP 2020 in Vergleich zur ICNIRP 1998 besonders relevant:

- Das Grenzwertkonzept der ICNIRP 2020 bleibt im Wesentlichen im Vergleich zur ICNIRP 1998 unverändert.
- Der Ganzkörper-gemittelte Basisgrenzwert (SAR-Wert) wird bis zu einer Frequenzobergrenze von 300 GHz festgelegt.
- Die "Übergangsfrequenz", d.h. die Frequenzgrenze für den Übergang von einem volumenbasierten Basisgrenzwert (SAR-Wert) zu einem flächenbezogenen Basisgrenzwert (Leistungsflussdichte), wird für die lokale Exposition von 10 GHz auf 6 GHz verändert.
- Oberhalb von 6 GHz wird für die lokale Exposition als Basisgrenzwert nicht mehr die Teilkörper-SAR, sondern die *absorbierte* Leistungsflussdichte verwendet.
- Die Mittelungszeit für die Ganzkörper-SAR beträgt 30 Minuten. Die Mittelungszeit für die lokale SAR und die lokal absorbierte Leistungsflussdichte beträgt 6 Minuten.

- Die Ganzkörper-gemittelten Referenzwerte sind oberhalb einer Frequenz von 2 GHz als einfallende Leistungsflussdichte definiert. Im Fernfeld darf die einfallende Leistungsflussdichte durch die äquivalente Leistungsflussdichte ebener Wellen ersetzt werden. Die sich daraus ergebenden Werte für die elektrische und magnetische Feldstärke sind identisch zu den Referenzwerten aus ICNIRP 1998.
- Zusätzlich zu den Ganzkörper-gemittelten Referenzwerten werden auch Referenzwerte für lokale Exposition definiert.
- Die Ganzkörper-gemittelten Referenzwerte sind über 30 Minuten und die Referenzwerte für lokale Exposition über 6 Minuten zu mitteln.
- Bei der Konformitätsbewertung spielt die Feldregion (Fernfeld, strahlendes Nahfeld, reaktives Nahfeld) eine Rolle. Oberhalb von 2 GHz darf im reaktiven Nahfeld die Konformität nicht mehr mittels der Referenzwerte nachgewiesen werden, sondern muss über die Basisgrenzwerte erfolgen.

Da die Empfehlungen von ICNIRP 2020 bislang noch keine Umsetzung in die deutsche Gesetzgebung gefunden haben, werden sie im weiteren Verlauf des Berichtes nicht weiter betrachtet.

Der Wissenschaftliche Ausschuss „Gesundheit, Umwelt und neu auftretende Risiken“ (Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks, SCHEER) hat von der EU-Kommission (u.a. Generaldirektion Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, DG Sante) ein Mandat bekommen, über die Notwendigkeit einer (technischen) Überarbeitung der Anhänge der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG und der Anhänge der Richtlinie 2013/35/EU in Anbetracht der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse, insbesondere der im Jahr 2020 überarbeiteten ICNIRP-Richtlinien in Bezug auf den Hochfrequenzbereich 100 kHz bis 300 GHz, zu beraten [EU 2021].

## 3 Typisierung von Mobilfunk-Kleinzellenanlagen

### 3.1 Typisierung der deutschen Mobilfunknetzbetreiber

Im Rahmen der in Kapitel 4 vorgestellten Literaturstudie zu Messverfahren und Messergebnissen war auch zu eruieren, ob in der recherchierten Literatur Ansätze zu Typisierungen bzw. Kategorisierungen zu Mobilfunk-Kleinzellenanlagen im Außenbereich enthalten sind. Diese sollte mit den vom Auftraggeber für dieses Messprojekt vorgeschlagenen Kategorien A bis C verglichen und bewertet werden.

Ziel einer Typisierung ist es dabei, durch eine pauschalisierte Vorgabe von installationstechnischen oder funktechnischen Randbedingungen eine vereinfachte regulatorische Behandlung von Kleinzellenstandorten zu erreichen. Kann durch die Randbedingungen für einen Großteil der zu installierenden Kleinzellenanlagen pauschal gezeigt werden, dass an jeglichen Orten zum dauerhaften oder vorübergehenden Aufenthalt von Menschen die Personenschutzgrenzwerte der 26. BImSchV sicher eingehalten werden, könnten diese einem vereinfachten Bewertungsverfahren unterzogen werden. Eine Einzelfallbetrachtung müsste dann nur noch an solchen Anlagen vorgenommen werden, die diese Randbedingungen nicht einhalten.

Randbedingungen können beispielsweise sein:

- **Installationshöhe der Antenne der Mobilfunk-Kleinzellenanlage:** Wird die Kleinzellenanlage zum Beispiel in einer Höhe von 5 Meter auf einer Ampel oder einem Lichtmast installiert und beträgt der Sicherheitsabstand in Hauptstrahlrichtung 0,5 Meter, dann kann ohne weitere Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass im darunterliegenden Bereich bis zu einer Höhe von 2,30 Meter über jeglichem Grund umfasst, die Personenschutzgrenzwerte sicher eingehalten werden.
- **Sendeleistung der Mobilfunk-Kleinzellenanlage:** Ist die abgegebene Leistung kleiner als 20 mW, dann kann vereinfachend angenommen werden, dass die Basisgrenzwerte (2 W/kg für die lokale Exposition entspricht im normativ vorgegebenen Mittelungsvolumen von 10 g genau 20 mW) per se eingehalten werden (in Anlehnung an die IEC 62479). Ist die abgegebene Leistung größer, kann der dann notwendige Sicherheitsabstand beispielsweise durch eine geeignete Einhausung der Antenne sichergestellt werden.

Für die Typisierung haben die deutschen Mobilfunknetzbetreiber folgende drei Kategorien vorgesehen, die diesen Gedankengängen folgen:

- **Kategorie A:** Zugang von Personen ist aufgrund der Montagehöhe ausgeschlossen. Oberhalb der Antenne befinden sich keine öffentlich zugänglichen Orte.  
Diese Kategorie setzt die Überlegungen zu einer Mindestinstallationshöhe um.

- Kategorie B:** Antenne mit Vor-Wand-Montage. Zugang von rechts/links, oben/unten, vorne/hinten ist zu betrachten.  
 Diese Kategorie umfasst Anlagen, die im Detail untersucht werden müssen, da sie nicht in die Kategorien A oder C passen.
- Kategorie C:** Intrinsisch sicher. Zugang/Zugriff von Personen ist aufgrund der Grenzwerteinhaltung außerhalb des Gehäuses gewährleistet.  
 Diese Kategorie setzt die Überlegung zu einer Begrenzung der abgegebenen Leistung um.

### 3.2 Vorschlag des Small Cell Forum

Ein Vorschlag zu einer alternativen Typisierung findet sich beim Small Cell Forum [SCF 20] und ist in der IEC 62232 detailliert begründet [IEC 62232]: Hierbei handelt es sich um die in Bild 3.1 dargestellten "vereinfachten Installationsregeln". Die zu errichtende Mobilfunkanlage wird mit Ausnahme der Installationsklasse E0 hinsichtlich ihrer äquivalenten isotropen Strahlungsleistung (EIRP) klassifiziert. Für Mobilfunk-Kleinzellenanlagen in Deutschland sind die Installationsklassen E0, E2 und E10 relevant.

From IEC 62232:2017	© Small Cell Forum Ltd				
Installation must be done according to instructions from the manufacturer or entity putting into service					
Installation class	E0	E2	E10	E100	E+
Total EIRP	N/A	$\leq 2\text{ W}$	$\leq 10\text{ W}$	$\leq 100\text{ W}$	No limit
Minimum height above walkway	None	None	2.2 m	2.5 m	$H_m$ (calculation)
Exclusion zone	None, touch compliant	Provided in manufacturer's instructions Small $D_m$ not shown on the picture		Provided in manufacturer's instructions $D_m$ in main lobe direction	
Check pre-existing RF sources	N/A	N/A	N/A	$5D_m$ in main lobe direction $D_m$ in other directions	

Bild 3.1: Vereinfachte Installationsregeln für Kleinzellenanlagen, nach [SCF 20].

Für diese drei Klassen gelten in Anlehnung an IEC 62232 folgende vereinfachten Regeln:

- E0:** Das Produkt entspricht den Vorgaben der IEC 62479 oder die Abmessungen der Konformitätsgrenze des Produkts sind null. Es bestehen daher keine spezifischen Anforderungen an die Produktinstallation. Anmerkung: Die IEC 62479 regelt die Expositionsbewertung für Geräte kleiner Leistung.
- E2:** Das Produkt wird in Übereinstimmung mit den Anweisungen des Herstellers und/oder der Körperschaft, welche die Inbetriebnahme durchführt, installiert. Die Übereinstimmung mit den Expositionsgrenzwerten wird im Allgemeinen im Abstand null oder innerhalb von wenigen Zentimetern erreicht.

**E10:** Das Produkt wird in Übereinstimmung mit den Anweisungen des Herstellers und/oder der Körperschaft, welche die Inbetriebnahme durchführt, installiert und der niedrigste abstrahlende Teil der Antenne(n) befindet sich in einer Mindesthöhe von 2,2 m über einem Gehweg für die Allgemeinbevölkerung.

Im Vergleich zu der von den deutschen Mobilfunknetzbetreibern vorgeschlagene Typisierung lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Die Installationsklasse E0 entspricht der Kategorie C "intrinsisch sicher" und folgt der Idee einer Begrenzung der abgegebenen Leistung auf ein Maß, bei dem entweder der Sicherheitsabstand Null ist oder ein vorhandener Sicherheitsabstand durch eine entsprechend große Einhausung der Antenne gewährleistet wird.
- Die Installationsklasse E2 findet kein Äquivalent in der Typisierung der deutschen Netzbetreiber. Es ist zu prüfen, ob diese Klasse für gängige Kleinzelleninstallationen in Deutschland überhaupt relevant ist. Ein typisches Beispiel für diese Klasse ist ein WLAN-Router.
- Die meisten Kleinzellenanlagen im Außenbereich werden in Deutschland in der Klasse E10 liegen, da diese Klasse explizit die Begrenzung der EIRP auf 10 Watt in der 26. BImSchV anspricht. Die Mindestinstallationshöhe von 2,2 Meter in dieser Klasse weist Ähnlichkeiten zur Kategorie A auf, nach der der Zugang von Personen aufgrund der *Montagehöhe* ausgeschlossen ist.

### 3.3 Kategorisierung nach van Wyk et al.

In [WVR 19] werden für Kleinzellenanlagen im Außenbereich zwei verschiedene Installationsstypen vorgestellt:

- **External 2-4 m:** Die Antenne ist zwischen 2 und 4 Meter über dem Boden installiert.
- **External 4 m+:** Die Antenne ist mehr als 4 Meter über dem Boden installiert.

Im Vergleich zu der von den deutschen Mobilfunknetzbetreibern vorgeschlagene Typisierung lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Beide Typisierungen beziehen sich ausschließlich auf die Installationshöhe der Antenne und berücksichtigen im Gegensatz zu dem Vorschlag des Small Cell Forum [SCF 20] keine Leistungsklassen.
- Bei der Klasse "External 4 m+" kann davon ausgegangen werden, dass der Zugang von Personen aufgrund der Installationshöhe ausgeschlossen ist. Dies entspricht Kategorie A der deutschen Mobilfunk-Netzbetreiber.

## 4 Literaturrecherche

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse einer Literaturstudie zu neueren, relevanten Immissionsmessungen an Kleinzellenanlagen dokumentiert. Die Literaturstudie umfasst allgemein verfügbare wissenschaftliche Publikationen mit Qualitätssicherung der Jahre 2017 bis 2021 (Stichtag 01.08.2021). Die relevante Literatur wurde über eine Suche in den Datenbanken "Google Scholar" und CIEEE Xplore" identifiziert, wobei als Deskriptoren die Begriffe "small cell" und "EMF exposure" verwendet wurden. Die Literaturstudie konzentriert sich auf Kleinzelleninstallationen im öffentlichen Bereich (d.h. Outdoorbereich); Indoor-Installationen oder Installationen in Verkehrsmitteln wurden nicht berücksichtigt. Als Fazit der Literaturstudie wird die eingesetzte Messtechnik beschrieben und eine Zusammenstellung und Bewertung der relevanten Messergebnisse vorgenommen. Neben den Immissionen durch die Kleinzellenanlage wird auch - soweit zutreffend - die Auswirkungen der Kleinzellenanlage auf die Größe der Exposition durch die Endgeräte betrachtet.

Neben wissenschaftlichen Publikationen mit Qualitätssicherung werden auch öffentlich verfügbare Forschungsberichte zur gegenständlichen Thematik in die Literaturstudie einbezogen. Hierbei handelt es sich z.B. um Berichte von Regulierungsbehörden oder öffentlichen Einrichtungen. Diese Berichte wurden über die Suchmaschine "Google" mit den oben beschriebenen Deskriptoren, zusätzlich jedoch auch in deutscher Sprache, identifiziert.

### 4.1 Wissenschaftliche Publikationen mit Qualitätssicherung

In diesem Bereich wurden sechs Arbeiten identifiziert. Zwei Arbeiten beschäftigen sich primär mit den durch die Kleinzellenanlage verursachten elektromagnetischen Immissionen, die restlichen vier Arbeiten stellen die Uplink-Immission des Endgerätes in den Vordergrund und vergleichen diese zwischen Kleinzellen- und Makrozellenstandorten.

[WVK 19] beschreibt Feldstärkemessungen an 98 Kleinzellenstandorten in drei südafrikanischen Metropolregionen sowie zwei europäischen Städten (Amsterdam und Turin). Pro Anlage wurden typischerweise drei allgemein zugängliche Messpunkte vermessen, wobei der erste sich in mindestens 1 Meter Abstand zur Anlage und die anderen im Umkreis bis zu 50 Meter befanden. Für die Messungen wurde das frequenzselektive Messgerät Narda SRM-3006 mit Isotropantenne verwendet, das sich auf einem Holzstativ befand; gemessen wurde in drei verschiedenen Höhen mit nachfolgender räumlicher Mittelung. Gemessen wurde einerseits im gesamten Frequenzbereich von 27 MHz bis 3 GHz (kumulativ); zusätzlich wurden verschiedene Frequenzbänder selektiv definiert, die auch die Uplink- und Downlinkfrequenzbänder der Mobilfunkdienste umfassten. Obwohl nicht explizit erwähnt, liegt die Vermutung nahe, dass der Messmode "Safety Evaluation" am SRM-3006 verwendet wurde, wobei offenbleibt, ob pro Unterband der gemittelte oder der maximale Wert ausgewertet wurde. Während der Messung wurde mit einem Endgerät ein aktiver Download durchgeführt, der sicherstellen sollte, dass die Kleinzellenanlage aktiv ist. Nicht beschrieben sind das gewählte Frequenzband und die Art des Downloads (Browsen, Streamen oder FTP-Download). Die Ergebnisse zeigen in den Downlink-Bereichen des Mobilfunks Feldstärken zwischen etwa 0,1 und 2,4 V/m mit einem Medianwert von 0,5 V/m. Der niedrigste Medianwert von 0,4 V/m wurde bei Indoorinstallationen; der höchste mit 0,7 V/m bei Installationen im Außenbereich bei einer Antennenhöhe zwischen 2 und 4 Meter ermittelt. Höher installierte

Antennen im Außenbereich erreichten einen Medianwert von knapp 0,5 V/m. Alle gemessenen Immissionen in den Downlinkbändern liegen weit unterhalb der ICNIRP-Empfehlungen, wobei sich der angegebene Medianwert von 0,01 Prozent nicht auf die Feldstärke-Referenzwerte, sondern auf die Leistungsflussdichtewerte beziehen dürfte. Dies entspricht einer feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfung von 1 Prozent. Die Messwerte liegen laut den Autoren in derselben Größenordnung wie diejenigen aus Messreihen an Makrozel-lenbasisstationen und Kleinzellenanlagen, die in den Jahren 2006 bis 2018 in Frankreich und Südafrika durchgeführt wurden.

In [HO 19] werden Expositionsmessungen an einer in einen Schacht unter dem Bodenniveau installierten Kleinzellenanlage vorgestellt. Untersucht wurde eine LTE-Kleinzellenanlage im 1,5 GHz Band, bei denen 2 Antennen jeweils mit 1 Watt EIRP gespeist wurden. Gemessen wurde auf einem zylinderförmigen Gitter über dem Erdbodenniveau von 0,1 bis 2,0 Meter Höhe in 10 cm Schritten und einem Radius von 3 Meter. Die Messwerte wurden mit dem Narda SRM-3006 aufgenommen, wobei konstante Signalisierungskanäle gemessen wurden und auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert wurde. Die Ergebnisse zeigen eine maximale Leistungsflussdichte von etwa 2 W/m<sup>2</sup> in 0,1 Meter Höhe, die mit der Höhe abnimmt und in 2,0 Meter noch etwa 0,02 W/m<sup>2</sup> erreicht. Aus diesen Messergebnissen lässt sich schlussfolgern, dass bei einer maximalen EIRP von insgesamt 10 Watt eine maximale Immission von 10 W/m<sup>2</sup> resultieren würde (entsprechend 61,4 V/m), die nach 26. BImSchV bei 1,5 GHz über den Grenzwerten läge. Diese Anlage müsste dann also mit reduzierter Sendeleistung (< 10 Watt) betrieben werden.

[MAJ+ 18] dokumentiert Messungen an LTE-Kleinzellenanlagen in Annecy (Frankreich) und Amsterdam und vergleicht die Verhältnisse von Up- und Downlinkimmissionen zwischen Kleinzellen- und Makrozellenanlagen. Als Maß für die Downlinkimmission wurde der RSRP-Wert verwendet, die Uplinkimmission wurde über die Sendeleistung des verwendeten Endgerätes und den Datendurchsatz erfasst. Diese drei LTE-Netzwerkparameter wurden über zwei verschiedene Drive Testlösungen (Viavi JDSU, Azenqos), die auf zwei Mobiltelefonen (Samsung Galaxy S4, LG Nexus 5) installiert waren, erfasst. Während der Messungen wurde eine Datenverbindung zu einem FTP-Server aufgebaut. Die untersuchten Kleinzellenantennen in Amsterdam befanden sich in einer Höhe von etwa 3 Meter an Buswartehäuschen und Werbetafeln; die Antennen der zwei in Annecy untersuchten Kleinzellenanlagen waren ebenfalls an einem Buswartehäuschen und in einer Werbetafel installiert. Während der Messungen lief die Messperson jeweils viermal einen definierten Weg um die Kleinzellenanlage ab, während über das mitgeführte Mobiltelefon eine 10 bzw. 100 MB große Datei an den FTP-Server abgesendet wurde. Während des Umherlaufens wurden Abstände bis zu 100 Meter (Annecy) bzw. 50 Meter (Amsterdam) von der Kleinzellenanlage erreicht. Bei den Messungen in Annecy wurde die Kleinzellenanlage auch abgeschaltet, wodurch sich das Mobiltelefon in die nächstgelegene Makrozelle einbuchte. Bei den Messungen in Amsterdam waren an zwei Standorten die Kleinzellenanlagen nicht aktiv; an anderen Standorten buchte sich das Mobiltelefon entweder in eine oder wechselseitig in zwei Kleinzellenanlagen ein. Bei diesen Messungen wurden keine Immissionswerte in Volt pro Meter gemessen; aus den erfassten Parametern RSRP und Sendeleistung des Mobiltelefons kann eine solche Immission nicht unmittelbar berechnet werden. Für die Immissionsbetrachtung ist lt. Autoren jedoch relevant, dass LTE-Kleinzellenanlagen die Downlinkexposition im Vergleich zu Makrobasisstationen um einen leistungsbezogenen Faktor von bis zu 7-46 steigern können,

wohingegen sie die Uplinkexposition um einen Faktor von 5-17 verringern. Ein dichtes Netzwerk wie in Amsterdam ist mit einer geringen Abdeckung pro Zelle, dafür aber geringer Uplinkexposition und hoher Downlinkexposition verbunden.

In [CHM+ 19] werden Messergebnisse aus [MAJ+ 18] dazu verwendet, um ein statistisches Path-Loss Modell zu entwickeln. Der Fokus liegt hier jedoch auf Simulationen, die Messergebnisse werden nur zur Eichung des Modells verwendet.

Eine Arbeit unter Beteiligung derselben Autoren [MFE+ 17] beschreibt Immissionsuntersuchungen an fünf Kleinzellenanlagen in vier Stadtmöbeln (Buswartehäuschen, Werbetafel), wobei jede Kleinzellenanlage mit maximal 4 W gespeist wurde. Die Durchführung der Untersuchungen ist ähnlich wie in [MAJ+ 18]. Der Fokus liegt allerdings auf Uplink-Untersuchungen im Vergleich zwischen Kleinzellen- und Makrozellenanlagen. Es wurde festgestellt, dass Kleinzellenstandorte die Uplink-Exposition um etwa 6 dB (Mittelwert) bzw. 9 dB (Median) im Vergleich zu Makrozellenstandorten verringern. Das entspricht leistungsbezogenen Faktoren von 4 bzw. 8 und liegt in derselben Größenordnung wie in [MAJ+ 18] beschrieben.

Eine weitere Arbeit zum Vergleich der Uplink-Exposition zwischen Kleinzelle und Makrozelle ist [KBH 17]. Hierbei wurde die Sendeleistung des eigenen Mobiltelefons in Abhängigkeit des RSRP-Wertes durch die Basisstation (Kleinzelle oder Makrozelle) an einem Messort in Köln untersucht; beides wurde mit einer Monitoring-App auf einem Samsung Galaxy S5 gemessen. Insgesamt 28 Messpunkte befanden sich in der unmittelbaren Nähe von 8 Kleinzellenantennen, die in Höhen zwischen 3,5 und 5 Meter installiert waren. Eine Makrobasisstation mit zwei Makrozellen befand sich in unmittelbarer Nähe; alle Anlagen arbeiteten im 1800-MHz-Band mit LTE. Während der Messungen wurde eine 700 MB große Datei über das Smartphone hochgeladen. Über die Monitoring-App konnte das Mobiltelefon gezielt in eine bestimmte Kleinzelle oder in eine Makrozelle eingebucht werden. Als Ergebnis der Messungen wurde festgestellt, dass ab einer Empfangs-RSRP von etwa -90 dBm die aktive Sendeleistungsregelung das Smartphone veranlasste, mit einer niedrigeren Sendeleistung zu senden. Solange Sichtverbindung zur Kleinzellenanlage bestand (hier etwa bis 65 m), war die Sendeleistung des Smartphones um etwa 5 bis 15 dB (Leistungsfaktoren 3 bis 31) geringer als beim Einbuchen in die Makrozelle. Bei größeren Entfernungen lag keine Sichtverbindung zur Kleinzellenanlage vor, wodurch die Empfangspegel der Kleinzellenanlage stark zurückgingen und die Ausleuchtung durch die Makrozelle besser war. Hier war die Sendeleistung des Smartphones in der Kleinzellenanlage dann etwa 0 bis 6 dB (Faktor 1 bis 4) größer als in der Makrozelle. Diese Zahlenwerte liegen in derselben Größenordnung wie in [MFE+ 17] und [MAJ+ 18].

## 4.2 Forschungsberichte

In diesem Bereich wurden vier Arbeiten identifiziert.

Im Jahr 2020 hat die TU Ilmenau im Auftrag der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe Berlin Immissionsmessungen an einer LTE-Kleinzellenanlage bei einer Frequenz von 2.650 MHz durchgeführt, deren Antenne in einer Trägerstruktur in etwa 4 Meter Höhe installiert war [BS 20]. Die Messungen wurden sowohl als Downlink-, als auch als Uplinkmessungen durchgeführt. Bei den Downlinkmessungen wurden die Feldstärken durch



LTE-Signalisierungssignale an 5 Messpunkten im Abstand von 0,8 bis 30 Meter von der Kleinzellenantenne gemessen und auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert. Der Messpunkt im Abstand von 0,8 Meter befand sich in einem neben der Kleinzellenantenne stehenden Doppelstockbus auf gleicher Höhe. Die Messungen wurden mit dem Narda SRM-3006 durchgeführt; zur Erfassung der lokalen Maximalwerte wurde die Schwenkmethode verwendet. Es wurden Feldstärken im Bereich von 4,2 bis 14,5 Prozent der Grenzwerte der 26. BImSchV gemessen (entspricht 2,6 bis 8,8 V/m). Die höchsten Immissionen ergaben sich beim Messpunkt mit kürzestem Abstand auf gleicher Höhe wie die Sendeantenne im Bus. Bei den Uplinkmessungen wurde mit Hilfe eines softwaremodifizierten Mobiltelefons an mehreren Messpunkten im direkten Umfeld der Kleinzellenanlage die Empfangsleistung RSRP und die Sendeleistung des Mobiltelefons gemessen, während eine 100 MB große Datei vom Mobiltelefon zu einem Server hochgeladen wurde. Das Mobiltelefon wurde alternativ zur Kleinzellenanlage auch in einen etwa 815 Meter entfernten Makrozellenstandort mit LTE eingebucht und die identischen Messungen wiederholt. Bei diesen Messungen konnte gezeigt werden, dass ein schlechter Mobilfunkempfang zu einer höheren Sendeleistung des Mobiltelefons führt: An einem Messpunkt direkt an der Kleinzellenanlage war die Sendeleistung des Mobiltelefons um etwa den Faktor 700 geringer als bei Einbuchung in die Makrozelle. Die Autoren schlussfolgern, dass Kleinzellenanlagen ein Mittel zur Minimierung der persönlichen Gesamtimmission sein können, da das eigene Mobiltelefon aufgrund seiner Nähe zum Körper die Hauptquelle der persönlichen Gesamtexposition darstelle.

In [BV 21] werden Mobilfunkmessungen an einer Kleinzellenanlage in Zürich beschrieben, die für das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft durchgeführt wurden. Die Messungen wurden mit dem Narda SRM-3006 an einer Kleinzellenantenne durchgeführt, die auf einem Mast in 6 m Höhe installiert war und im Frequenzband bei 2600 MHz mit maximal 6 Watt ERP (d.h. 9,84 Watt EIRP) betrieben wurde. Die isotrope Messsonde des SRM-3006 war auf ein Holzstativ montiert. Die Messungen erfolgten an insgesamt 5 Messpunkten im Abstand von 2 bis 60 Meter vom Antennenmast über einen Zeitraum von 30 Minuten, wobei alle 6 Sekunden ein Messwert aufgezeichnet wurde. Es liegen keine Daten über eine provozierte Auslastung der Anlage vor, vielmehr wurden durch die Messungen offenbar Momentanwerte der Immission über das gesamte Frequenzband von 2.620 bis 2.690 MHz aufgenommen. Am zur Anlage nächsten Messpunkt wurde eine maximale Feldstärke von 2,2 V/m über 30 Minuten ermittelt (Mittelwert 1,1 V/m); in 60 Meter Entfernung betrug die Feldstärke noch 0,3 V/m (Mittelwert 0,2 V/m). Die Messungen wurden in einer späteren Wiederholungsmessung validiert und mit einer rechnerischen Feldstärkeabschätzung verglichen.

[ACMA 20] fasst die Ergebnisse von Messungen zusammen, die an 59 LTE-Kleinzellenanlagen im Januar und Februar 2020 in Australien durchgeführt wurden. Als Messgerät kam das Narda SRM-3006 zum Einsatz, die Messpunkte befanden sich "an oder so nah wie praktisch möglich zum Ort der maximalen abgeschätzten oder berechneten Immission" der Anlage. Das SRM-3006 war in 1,5 Meter Höhe auf einem Stativ befestigt. Gemessen wurde die über 6 Minuten gemittelte Momentanimmission in allen öffentlichen Frequenzbändern der Mobilkommunikation von 420 MHz bis 6 GHz, d.h. nicht nur die Immissionen durch die Kleinzellenstandorte. Die Kleinzellenanlage wurde während der Messung weder durch einen provozierten Datenverkehr ausgelastet, noch wurde auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert. Die Messwerte verstehen sich also als reine Momentanimmissionen. Die Messergebnisse lagen im Bereich von 0,001 bis 0,74 Prozent der australischen ARPANSA

Grenzwerte; der Median betrug 0,14 Prozent. Die ARPANSA-Grenzwerte sind im o.g. Frequenzbereich bezüglich der elektrischen Feldstärke identisch zu den Grenzwerten der 26. BImSchV; die Prozentangaben beziehen sich jedoch auf die quadratische Aufsummierung der gemessenen Einzelimmissionen und entsprechen somit einer Ausschöpfung eines Leistungsflussdichtegrenzwertes. Bezieht man die Messwerte auf die Grenzwerte der 26. BImSchV, wurden Immissionen zwischen 0,3 und 8,6 Prozent der Grenzwerte gemessen mit einem Medianwert von 3,7 Prozent. Eine Rückrechnung auf die elektrische Feldstärke in V/m ist nicht möglich, da die Grenzwerte im o.g. Frequenzbereich frequenzabhängig sind.

Eine ähnliche Pilotstudie zur Immission von LTE-Kleinzellenanlagen wurde in den Jahren 2017 und 2018 in drei französischen Städten (Annecy, Montreuil, Le Kremlin Biçetre) durchgeführt und ist in [ANFR 18] beschrieben. In der Umgebung von insgesamt 13 Kleinzellenstandorten, die bei LTE-1800 oder LTE-2600 arbeiteten, wurden durch akkreditierte Prüflabore Immissionsmessungen im Frequenzbereich 100 kHz bis 6 GHz durchgeführt, wobei pro Standort etwa 20 bis 30 Messpunkte in einem Bereich von 100 Meter um die Kleinzellenanlage untersucht wurden. Innerhalb einer 20-Meter-Zone um die Anlage wurde ein feineres Messraster verwendet. Die Kleinzellenanlagen waren in einer Höhe von 3 und 5 Meter an Stadtmöbeln (Werbetafel, Litfaßsäule, Buswartehäuschen) installiert. Die Messpunkte befanden sich in 1,5 Meter Höhe; zur Art der eingesetzten Messtechnik liegen keine Angaben vor. Während der Messungen wurden die Kleinzellenanlagen wahlweise aus- und angeschaltet, um einen Unterschied in der Immission zu quantifizieren. Als Ergebnis schlussfolgert der Bericht, dass die in unmittelbarer Nähe der Kleinzellenanlagen vorliegende kumulative Immission mit etwa 0,7 bis 2,7 V/m in derselben Größenordnung liege wie die von Makrobasisstationen ausgehenden Immissionen. In einem größeren Umkreis von 100 Meter um die Kleinzellenanlage würde die vorhandene durchschnittliche Immission nicht verändert; sie liege bei etwa 0,7 V/m.

Die Immissionsmessungen wurden durch Expositionsuntersuchungen des Mobiltelefons ergänzt. Hierzu wurde ein Mobiltelefon (Samsung Galaxy S7 edge) mit einer Tracing Software (Anite Nemo) verwendet, das Sende- und Empfangsleistungen sowie Datenraten erfasste. Mit dem Mobiltelefon wurde entweder eine Sprachverbindung zur Kleinzellenanlage aufgebaut oder eine 100 MB große Datei auf einen FTP-Server hochgeladen. Auch hier wurde die Kleinzellenanlage wahlweise abgeschaltet, so dass sich das Mobiltelefon in die nächstgelegene Makrozelle einbuchte. Während der Messungen wurde in einer 100-Meter-Zone um die Kleinzellenanlage eine Wegstrecke entlang der Hauptstraßen abgelaufen, um den Weg eines Fußgängers nachzubilden. Die Autoren stellen fest, dass je nach Abdeckung und Auslastung des Mobilfunknetzes durch die Kleinzellenanlagen entweder die Sendeleistung des Mobiltelefons unter Beibehaltung des Datendurchsatzes verringert werden könne oder bei gleicher Sendeleistung der Datendurchsatz erhöht würde. Dadurch sei die Exposition des Nutzers durch das Mobiltelefon im Durchschnitt geringer oder dauere kürzer als beim Einbuchten in die Makrozelle.

Abschließende sei noch erwähnt, dass in [IEC 62669] zwei Messkampagnen im Umfeld von Kleinzellenanlagen beschrieben sind. Da diese jedoch die Ergebnisse aus [ANFR 18] (allerdings nur für Annecy und Montreuil) sowie [WVR 19] repetieren, werden sie hier nicht nochmals diskutiert.

### 4.3 Fazit der Literaturstudie

In Tabelle 4.1 sind die Ergebnisse der Literaturstudie zusammengefasst. Es ergeben sich folgende Schlussfolgerungen:

Die messtechnischen Untersuchungen an Kleinzellen-Basisstationen im Außenbereich lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Einerseits wurden die durch die Kleinzellenanlagen erzeugten Immissionen gemessen, andererseits wurde der Einfluss der Kleinzellenanlagen auf die Uplinkimmission, d.h. die Sendeleistung des eigenen Mobiltelefons, untersucht.

#### *Durch Kleinzellenanlagen erzeugte Immissionen*

- Die messtechnische Immissionsbestimmung im Umfeld von Kleinzellenanlagen wurde primär mit dem Messgerät Narda SRM-3006 und Isotropantenne durchgeführt.
- Bei den Messungen wurden entweder mittels eines Mobiltelefons Verkehrsauslastung durch Herunterladen einer Datei über die Kleinzellenanlage erzwungen, die Signalisierungssignale der Anlage gemessen und auf maximale Anlagenauslastung extrapoliert, oder der momentane Immissionswert ohne Provozierung von Datenverkehr gemessen. Diese unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Immissionsbestimmung erschweren die Vergleichbarkeit der Messergebnisse der einzelnen Untersuchungen.
- Bei den Messungen wurden entweder die Schwenkmethode verwendet oder das Messgerät mit Isotropsonde auf einem Holzstativ installiert, so dass an einem Messpunkt entweder in einer Höhe oder in drei unterschiedlichen Höhen mit anschließender Mittelung gemessen wurde.
- Die Messergebnisse erreichen nur geringe Ausschöpfungen des Grenzwertes der 26. BImSchV. Keine der Untersuchungen berichtet über eine Überschreitung des Grenzwertes. Die größten Immissionen wurden in 0,8 Meter Abstand auf gleicher Höhe zur Kleinzellenantenne (8,8 V/m bzw. 14,5 %E) und in 0,1 Meter Höhe über einer in einen Schacht verbauten Kleinzellenantenne (2 W/m<sup>2</sup> bzw. 27,5 V/m) gemessen.

#### *Einfluss der Kleinzellenanlage auf die Uplink-Immission*

- Bei den Untersuchungen zur Uplinkimmission wurden primär softwaremodifizierte Mobiltelefone eingesetzt. Dabei wurde sowohl die Empfangsleistung der Signalisierungskanäle der Kleinzellenanlage, als auch die Sendeleistung und stellenweise auch der Datendurchsatz des eigenen Mobiltelefons gemessen.
- Bei allen diesbezüglichen Untersuchungen wurde eine Datei vom eigenen Mobiltelefon über die Kleinzellenantenne hochgeladen (Upload).
- Streckenweise wurden die Untersuchungen mit Messungen an einer benachbarten Makrozellenstandorten verglichen. Die wahlweise Einbuchung des Mobiltelefons in die Kleinzellen- oder in die Makrozellenanlage wurde entweder durch temporäres Abschalten des Kleinzellenstandortes oder durch forciertes Einbuchung in eine bestimmte Zelle erreicht.
- Bei den Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass die Kleinzellenanlage zwar die Downlinkimmission vergrößern kann, aber in weitaus größere Maße zu einer Reduktion der Immissionen durch das eigene Mobiltelefon führt.

Referenz	Was wurde gemessen?	Wie wurde gemessen?		Ergebnisse	Bemerkungen
		Messtechnik	Messverfahren		
[WVK 19]	Elektrische Feldstärke an 98 Kleinzellenstandorten in Südafrika und Europa	Narda SRM-3006	Ortsfester Messpunkt mit Mittelung über drei Messhöhen. Aktiver Download an Kleinzelle.	Median Indooranlagen: 0,4 V/m Median Outdooranlagen: 2-4 m: 0,7 V/m Median Outdooranlagen: 4 m+: 0,5 V/m Alle Immissionen <1 %E	Gemessene Immissionen liegen in vergleichbarer Größenordnung wie Messreihen der Jahre 2006-2018 in Frankreich und Südafrika
[HO 19]	Leistungsflussdichte bei einer in einen Bodenschacht verbauten Kleinzellenanlage, 2x1 W EIRP	Narda SRM-3006	Kombination Punktraster-/Schwenkmethode; alle Messpunkte auf Zylinder mit Radius 3 m und Höhe 2 m. Messung von Signalisierung und Hochrechnung auf maximale Immission.	Maximale Leistungsflussdichte von 2 W/m <sup>2</sup> in 10 cm Höhe	
[MAJ+ 18]	Vergleich von Up- und Downlink-immissionen bei Kleinzellen und Makrozellen LTE	Softwaremodifizierte Mobiltelefone	Messung von RSRP als Maß für Downlinkimmission und Sendeleistung bzw. Datendurchsatz wähen eines Uploads als Maß für Uplinkimmission	Kleinzellenanlagen können im Vergleich zu Makrozellen zu einer Erhöhung der Downlinkimmission um einen leistungsbezogenen Faktor 7-46 führen; verringern aber die Uplinkimmission um einen Faktor 5-17	Keine Immissionswerte als Feldstärken oder Leistungsflussdichten
[MFE+ 17]	Vergleich von Uplinkimmissionen bei Kleinzellen und Makrozellen LTE	Softwaremodifizierte Mobiltelefone	Messung Sendeleistung bzw. Datendurchsatz wähen eines Uploads als Maß für Uplinkimmission	Kleinzellenanlagen verringern im Vergleich zu Makrozellen die Uplinkimmission um einen leistungsbezogenen Faktor 4 (Mittelwert) bzw. 8 (Median)	Keine Immissionswerte als Feldstärken oder Leistungsflussdichten
[KBH 17]	Vergleich der Uplink-Immission zwischen Kleinzelle und Makrozelle an 28 Messpunkten auf einem öffentlichen Platz in Köln	Softwaremodifiziertes Mobiltelefon	Messung RSRP als Empfangsparameter und Sendeleistung bei einem aktiven Upload	Bei Sicht zur Kleinzellenanlage verringern sich die Uplinkimmissionen um einen leistungsbezogenen Faktor 3-31 im Vergleich zur Makrozelle. Ohne Sicht erhöht sich die Uplinkimmission um einen Faktor von 1-4.	Keine Immissionswerte als Feldstärken oder Leistungsflussdichten
[BS 20]	Elektrische Feldstärke an 5 Messpunkten an einer LTE-Kleinzelle in 4 m Höhe	Narda SRM-3006	Messung der LTE-Signalisierung mit Schwenkmethode, Extrapolation auf maximale Anlagenauslastung.	Feldstärken zwischen 2,6 V/m bis 8,8 V/m (entsprechend 4,2 % bis 14,5 % der Grenzwerte der 26. BImSchV).	Zusätzliche vergleichende Untersuchungen zur Uplink-Immission bei Einbuchung in Kleinzelle und Makrozelle

Referenz	Was wurde gemessen?	Wie wurde gemessen?		Ergebnisse	Bemerkungen
		Messtechnik	Messverfahren		
[BV 21]	Elektrische Feldstärke an 5 Messpunkten an einer LTE-Kleinzellenanlage in 6 m Höhe	Narda SRM-3006	Messung der Gesamtimmission im Frequenzbereich der LTE-Zelle von 2.620 bis 2.690 MHz. Isotrope Antenne auf Stativ. Messung über 30 min	Maximale Feldstärken von 0,3 V/m in 60 m Abstand bis 2,2 V/m in 1 m horizontalem Abstand.	Validierung durch Wiederholungsmessung und rechnerische Abschätzung.
[ACMA 20]	Elektrische Feldstärke an 59 Kleinzellenanlagen in Australien	Narda SRM-3006	Isotrope Messsonde 420 MHz – 6 GHz auf Stativ in 1,5 m Höhe; Momentanwerte in Mobilfunkbändern im gesamten Frequenzbereich.	Feldstärkeausschöpfungen zwischen 0,3 und 8,6 % der Grenzwerte der 26. BImSchV; Median 3,7 %	Keine provozierte Auslastung, keine Hochrechnung.
[ANFR 18]	Elektrische Feldstärke an 13 Kleinzellenstandorten in drei französischen Städten.	Keine Angaben	Messraster mit 20-30 Punkten in einer Höhe von 1,5 m in einer 100 m-Zone um die Kleinzellenanlage; in einer inneren 20 m-Zone feineres Raster. Messung der kumulativen Immission im Frequenzbereich 100 kHz – 6 GHz.	In 100 m-Zone wird kumulative Immission durch das An- und Abschalten der Kleinzellenanlage kaum beeinflusst und liegt durchschnittlich bei 0,7 V/m. Im näheren Umkreis von 20 m wurden kumulative Maximalpegel von 0,7 bis 2,7 V/m erreicht.	Ergänzende Messungen der Uplinkexposition zeigen, dass durch Kleinzellenanlagen die Sendeleistung des Mobiltelefons bei gleichem Datendurchsatz reduzieren oder den Datendurchsatz bei gleicher Sendeleistung erhöhen.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Literaturstudie.

## 5 Immissionsmessungen an Kleinzellenanlagen

### 5.1 Untersuchte Anlagenstandorte

Die untersuchten Standorte befinden sich alle im Stadtgebiet von Berlin und wurden aus einer Liste mit etwa 40 Standortvorschlägen der Betreiber Telekom und Vodafone ausgewählt, wobei darauf geachtet wurde, dass von allen drei Kategorien (A, B, C) Standorte in die Messungen einbezogen werden.

Die Messungen fanden an den folgenden zwölf Kleinzellenstandorten statt:

lfd. Nr.	Betreiber-ID	Kategorie (siehe Abschnitt 3.1)	Montageort der Antennen	Anschrift
1	BX-0260 VF-3839	A	Telefonsäule bzw. Laternenmast	Straße des 17. Juni 100
2	BX-0213	A	Telefonsäule	Potsdamer Straße 59
3	BX-0274	A	Telefonsäule	Potsdamer Straße 88
4	BX-0428	A	Litfaßsäule	Eislebener Straße 10
5	BX-0004	A	Telefonsäule	Trautenaustraße 6 (Nikolsburger Platz)
6	BX-0442	A	Litfaßsäule	Babelsberger Straße 45
7	VF-1962	A	Mast	Alexanderstraße / Magazinstraße
8	BY-8102	C	Fernmelde- Multifunktionsgehäuse	Wörther Straße 13 (Kollwitzplatz)
9	BY-8104	C	Fernmelde- Multifunktionsgehäuse	Kollwitzstraße 6
10	VF-1793	B	Wandmontage	Wittenbergplatz 2
11	BY-8304	B	Wandmontage	Grolmannstraße 48 (Savignyplatz)
12	BY-8307	B	Wandmontage	Kurfürstendamm 213-216

Tabelle 5.1: Betrachtete Kleinzellenstandorte in Berlin (BX- bzw. BY-Kennung: Telekom; VF-Kennung: Vodafone).

An den Standorten der Telekom sind jeweils LTE-Anlagen im Frequenzband MB26 in Betrieb. Bei den Standorten von Vodafone handelt es sich hingegen Anlagen für den GSM-900-Mobilfunk. Am Standort Nr. 1 wird von beiden Netzbetreibern in unmittelbarer Nachbarschaft jeweils eine Kleinzellenanlage betrieben, so dass dort die Überlagerung der Immissionen beider Feldquellen studiert werden kann.

## 5.2 Eingesetzte Messausrüstung

Im Rahmen der Hochfrequenz-Immissionsmessungen wurden folgende Messausrüstung eingesetzt:

Gerät	Hersteller	Art	Seriennummer	Letzte Kalibrierung
<b>Team 1 (EM-Institut)</b>				
SRM-3006	Narda STS	Tragbarer Spektrumanalysator 9 kHz - 6 GHz mit codeselektiver Messoption (UMTS, LTE, 5G NR)	C-0034	07/2021
3AX 27M-3G	Narda STS	Isotrope Messantenne (27 MHz - 3 GHz)	D-0043	07/2021
3AX 350M-6G	Narda STS	Isotrope Messantenne (350 MHz - 6 GHz)	B-0090	10/2019
<b>Team 2 (RWTH Aachen)</b>				
SRM-3006	Narda STS	Tragbarer Spektrumanalysator 9 kHz - 6 GHz mit codeselektiver Messoption (UMTS, LTE, 5G NR)	G-0258	11/2019
3AX 27M-3G	Narda STS	Isotrope Messantenne (27 MHz - 3 GHz)	K-1259	03/2020
3AX 420M-6G	Narda STS	Isotrope Messantenne (420 MHz - 6 GHz)	E-0133	07/2020
Galaxy S8 QualiPoc	Samsung SwissQual Rohde & Schwarz	Smartphone-basierte Applikation zum Monitoring und zur Optimierung von Mobilfunknetzen	354626/09 /634873/9	-

Tabelle 5.2: Verwendete Messausrüstung.

## 5.3 Messverfahren

### 5.3.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Mittels des Feldanalysators und einer geeigneten Messantenne wurden Frequenz und Stärke der einzelnen am Messort vorhandenen Funksignale festgestellt. Unter Einbezug der Kalibrierdaten der verwendeten Messantenne sowie der Dämpfung der gegebenenfalls verwendeten Leitung zwischen Messantenne und Feldanalysator kann damit die am Messort herrschende Feldstärke bestimmt werden.

Bei den Messungen wurde die "Schwenkmethode" praktiziert: Hierbei wird mit der Antenne das Messvolumen abgetastet (Messhöhe zirka 0,8 bis 2,0 Meter, Durchmesser mindestens 1 Meter). Der Spektrumanalysator wird dabei in der Betriebsart "Max Hold" betrieben. Gemessen wurde jeweils so lange, bis keine Änderungen der Messwertanzeige mehr zu beobachten waren. Damit wird zuverlässig die jeweils stärkste im Messvolumen vorhandene Immission detektiert. Beim Schwenken wurde ein Mindestabstand von 0,5 Meter zu Boden, Decke, Wänden und metallischen Objekten eingehalten [LAI 14], [BNetzA 20].

Zusätzlich ist sicherzustellen, dass die verschiedenen Funksignale mit Messbandbreiten und Detektoren zu erfassen sind, die an die Signalstruktur angepasst sind [LAI 14], was im Rahmen der durchgeführten Messungen geeignet berücksichtigt wurde.

Ist nur einzelnes Hochfrequenzsignal der Frequenz  $f$  zu bewerten, erfolgt die Bestimmung der *prozentualen feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfung*  $GA_E$  mit folgender Formel:

$$GA_E = \frac{E_G}{E_L} \cdot 100\% \quad (5.1)$$

$E_G$  gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz  $f$ .

$E_L$  anzuwendender Grenzwert bei der Frequenz  $f$  für die elektrische Feldstärke nach Tabelle 2.1.

$GA_E$  prozentuale feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung

Da alle Messungen an Punkten im *Fernfeld* der Antennen durchgeführt wurden, ist in dem hier relevanten Frequenzbereich eine zusätzliche Messung und Bewertung der Magnetfelder nicht notwendig. Bei Einhaltung der Grenzwertvorgaben für das elektrische Feld bleibt automatisch auch das Magnetfeld unterhalb des Grenzwertes.

Wirken hingegen gleichzeitig Felder unterschiedlicher Frequenzen zusammen, sind die grenzwertbezogenen Ausschöpfungsgrade geeignet zu summieren. Im hier relevanten Frequenzbereich oberhalb von 10 MHz ist eine leistungsbezogene (quadratische) Summation anzuwenden, um die gesamte *prozentuale feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfung*  $GA_{E,tot}$  zu erhalten:

$$GA_{E,tot} = \sqrt{\sum_{10\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{E_{G,i}}{E_{L,i}} \right)^2} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

$E_{G,i}$  gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz  $f_i$ .

$E_{L,i}$  anzuwendender Grenzwert bei der Frequenz  $f_i$  für die elektrische Feldstärke nach Tabelle 2.1.

$GA_{E,tot}$  gesamte prozentuale feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung.

Geht es nur um den Nachweis, ob die Vorgaben der 26. BImSchV eingehalten sind, kann auf die Wurzel in Formel (5.2) verzichtet werden, da nur gezeigt werden muss, dass  $GA_{E,tot}$  100 Prozent nicht überschreitet. Es ergibt sich dann nach [26. BImSchV] bzw. [1999/519/EG] die in Formel (5.3) dargestellte *prozentuale leistungsdichtebezogene Grenzwertausschöpfung*  $GA_{S,tot}$ .

$$GA_{S,tot} = \sum_{10\text{MHz}}^{300\text{GHz}} \left( \frac{E_{g,i}}{E_{L,i}} \right)^2 \cdot 100\% \quad (5.3)$$

$E_{g,i}$  gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz  $f_i$ .

$E_{L,i}$  anzuwendender Grenzwert bei der Frequenz  $f_i$  für die elektrische Feldstärke nach Tabelle 2.1.

$GA_{S,tot}$  gesamte prozentuale leistungsdichtebezogene Grenzwertausschöpfung.



Es gibt also grundsätzlich zwei Möglichkeiten der Darstellung der prozentualen Grenzwertausschöpfung, entweder feldstärke- oder leistungsdichtebezogen. Wobei sich bei einer leistungsbezogenen Darstellung und Werten unter 100 Prozent immer kleinere prozentuale Grenzwertausschöpfungen ergeben, als bei einer Ergebnisdarstellung relativ zur Feldstärke. Beide Darstellungsweisen sind in der Praxis gebräuchlich. In [LAI 14] werden sie vergleichend diskutiert.

In diesem Bericht wird die feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung, also eine Auswertung gemäß Formel (5.1) und (5.2) verwendet, um den direkten Vergleich zwischen einrequenten (LTE-Kleinzellenanlage) und multifrequenten Immissionen (Kumulation zweier Kleinzellenanlagen bzw. Hintergrundimmissionen) zu gewährleisten.

### **5.3.2 Bestimmung der maximalen Immission bei Basisstationen**

Die Intensität der von Mobilfunk-Basisstationen erzeugten elektromagnetischen Felder ist zeitlich nicht konstant, sondern schwankt in Abhängigkeit von Verkehrsauslastung und Verbindungsqualität. Nachts kann die Immission aufgrund des geringen Verkehrsaufkommens auf einen Minimalwert absinken, der nur durch die permanent abgestrahlten Signalisierungssignale erzeugt wird. Nach 26. BImSchV bzw. EU-Ratsempfehlung ist die bei höchster betrieblicher Anlagenauslastung entstehende Immission für die Bewertung heranzuziehen ("Worst Case" Betrachtung). Dies wird im Rahmen der hier durchgeführten Messungen folgendermaßen sichergestellt:

#### **GSM-Anlagen:**

Bei GSM-Anlagen wird ein spezielles Signalisierungssignal permanent mit konstanter Sendeleistung abgestrahlt. ("Broadcast Carrier", "BCCH-Träger"). Die von diesem Referenzsignal erzeugte Feldstärke wird mit dem Feldanalysator ermittelt. Um daraus die entstehenden Felder bei maximaler Anlagenauslastung zu erhalten, werden die Messergebnisse mittels der von den Betreibern zur Verfügung gestellten technischen Anlagendaten (bei den Kleinzellenanlagen von Vodafone: installierte Kanalzahl; bei den Dachstandorten der Umgebung: aktuell eingestellte Sendeleistung des BCCH-Trägers und von der Bundesnetzagentur maximal für die jeweilige Funkzelle genehmigte GSM-Sendeleistung) hochgerechnet [WUS 19].

#### **UMTS-Anlagen:**

Auch bei UMTS-Anlagen ändert sich die abgegebene Sendeleistung und damit die Immission in der Umgebung mit der momentanen Auslastung der Station. Hier existiert ebenfalls ein Signalisierungssignal (der "Primary Common Pilot Channel", kurz "P-CPICH"), das ähnlich wie der BCCH-Träger bei GSM mit definierter, konstanter Leistung abgestrahlt wird. Daher wird mit der im Feldanalysator implementierten "CPICH Demodulation" an jedem Messpunkt die vorhandene Feldstärke, welche die P-CPICH-Signale dort erzeugen, gemessen. Mittels von den Betreibern zur Verfügung gestellten technischen Anlagendaten (von der Bundesnetzagentur maximal für die jeweilige Funkzelle genehmigte UMTS-Sendeleistung im Ver-

hältnis zur aktuellen Leistung der P-CPICH-Signale) werden die Messergebnisse entsprechend hochgerechnet [WUS 19]. Zum Zeitpunkt der Messungen wurden in der Umgebung der Messpunkte nur noch von Telefónica UMTS-Anlagen betrieben. UMTS-Signale von Vodafone und Telekom waren nicht mehr messbar.

### **LTE-Anlagen:**

Bei LTE-Anlagen existieren ebenfalls Signalisierungssignale ("Reference Signal", kurz "RS"), die mit definierter, konstanter Leistung abgegeben werden. Die Feldstärke der RS-Signale werden mittels des Feldanalysators bestimmt (sogenannte "codeselektive Messung"). Die Maximalimmission ergibt sich durch Multiplikation der gemessenen RS-Feldstärkewerte mit einem Faktor, der sich aus der vom Betreiber aktuell eingestellten Leistung der RS-Signale und der aktuell festgelegten Maximalleistung des Senders (bei den Kleinzellenanlagen) beziehungsweise (bei Dachstandorten in der Umgebung) den für den Standort von der Bundesnetzagentur maximal genehmigten Sendeleistungen ergibt [WUS 19].

Durch diese Vorgehensweisen ist gewährleistet, dass am jeweils betrachteten Messpunkt die durch die Anlagen erzeugbare Maximalimmission ermittelt wird. Die dokumentierten Immissionswerte beim Mobilfunk sind somit auf den aus Sicht des Immissionsschutzes ungünstigsten Betriebszustand der Anlagen bezogen.

Die für die Bestimmung der bei Maximalauslastung herrschenden Immissionswerte notwendigen technischen Daten der Kleinzellen-Basisstationen sowie in unmittelbarer Umgebung der Messpunkte vorhandener Dachstandorte wurden von den Betreibern zur Verfügung gestellt. Falls Immissionen von weiter entfernten Standorten in nennenswerter Stärke messbar waren, wurden diese mittels typischer Hochrechnungsfaktoren auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnet.

### **5.3.3 Bestimmung der Momentanimmission**

Zusätzlich zur Maximalimmission wurde an einigen Punkten in der Umgebung von zwei LTE-Kleinzellenanlagen auch die aktuell vorhandene Immission ("Momentanimmission") gemessen. Die aktuell vorhandene Immission wurde hierbei durch Mittelung der Resultate von mindestens 50 aufeinander folgende Messungen der aktuellen Leistung im betrachteten LTE-Kanal bestimmt, während die isotrope Messantenne in einem Höhenbereich von etwa 1,0 m bis 1,9 m über dem Boden auf und ab bewegt wurde (Dauer der Messung: ca. 30 Sekunden).

### **5.3.4 Messunsicherheit**

Die Messunsicherheit für derartige Hochfrequenz-Immissionsmessungen im Frequenzbereich des Mobilfunks beträgt typisch  $\pm 3$  dB (erweiterte Messunsicherheit für  $K = 2$ , d.h. Vertrauensintervall = 95%). Hierbei sind sowohl die Unsicherheitsbeiträge für die Kalibrie-

rung von Messantenne und Spektrumanalysator, als auch die Unsicherheit der Probennahme (z.B. Reproduzierbarkeit der Messung am Messpunkt) berücksichtigt [LAI 14].

Geht es nur darum, die an einem Ort vorhandene Feldstärke beziehungsweise prozentuale Grenzwertausschöpfung zahlenmäßig zu dokumentieren, wird die Messunsicherheit gewöhnlich nicht auf das Messergebnis aufgeschlagen.

Will man jedoch mittels der Messergebnisse auch den Nachweis der Einhaltung eines Grenzwertes mit hinreichender Sicherheit führen, müssen alle Messwerte *zuzüglich* der Messunsicherheit unterhalb des Grenzwertes liegen [LAI 14]. Wenn also bei der hier herrschenden Messunsicherheit von typisch 3 dB die messtechnisch ermittelte prozentuale feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung  $GA_{E,tot}$  maximal 70,7 Prozent erreicht, ist die Einhaltung der Grenzwertvorgaben nach 26. BImSchV mit hinreichender Sicherheit nachgewiesen.

## 5.4 Messdurchführung

Die Messungen erfolgten zwischen dem 02. und dem 04. August 2021. Gearbeitet wurde mit zwei Messteams (bestehend jeweils aus zwei Personen), auf die - nach einer gemeinsamen Einarbeitungsphase am Standort 1 - die verbleibenden elf Standorte zur Messung aufgeteilt wurden. Eine Mitarbeiterin der Netzbetreiber (Deutsche Telekom) war zeitweise bei den Messungen zugegen.

Die Wetterbedingungen waren an den drei Tagen nahezu identisch (sonniges, trockenes Sommerwetter).

Nach Auskunft der Betreiber befanden sich alle zwölf untersuchten Kleinzellenstandorte zum Zeitpunkt der Messungen in ihrem gewöhnlichen Betriebszustand.

Am 20. Dezember 2021 erfolgten noch einige Zusatzmessungen (Messung der aktuell vorhandenen Immission an zwei Kleinzellenstandorten).

## 6 Zusammenfassende Darstellung der Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Messungen zusammenfassend wiedergegeben und ausgewertet. Eine ausführliche Dokumentation der Lage der Messpunkte und der ermittelten Immissionswerte findet sich in Kapitel 10 dieses Berichtes.

### 6.1 Allgemeine Eigenschaften der Messpunkte

Insgesamt wurden an 202 Punkten in der Umgebung der Outdoor-Kleinzellenanlagen Messungen durchgeführt. Davon befanden sich 71 Punkte auf Messlinien, denn bei insgesamt fünf der zwölf Standorte wurden - zusätzlich zu den Messungen im näheren Umfeld der Anlagen - auch systematische Messungen entlang von Linien mit zunehmendem Abstand zum Anlagenstandort durchgeführt.

Die 202 untersuchten Messpunkte können wie folgt charakterisiert werden:

Lage der Messpunkte	Davon mit Sicht zur Kleinzellenanlage	Davon ohne bzw. mit stark eingeschränkter Sicht zur Kleinzellenanlage
Indoor (9 Punkte)	5	4
Outdoor (193 Punkte)	184	9

Tabelle 6.1: Eigenschaften der Messpunkte

Die Horizontalentfernung der Messpunkte zur jeweiligen Kleinzellenanlage betrug zwischen 0,5 und 102 Meter, im Mittel waren es 21 Meter.

### 6.2 Immissionen durch die Kleinzellenanlagen

#### 6.2.1 Größenverteilung und Entfernungsabhängigkeit

Die Ergebnisse der Messungen an den einzelnen Anlagenstandorten sind in Kapitel 10 im Detail dokumentiert. In den folgenden Abschnitten findet sich eine zusammenfassende Auswertung und Darstellung der Messergebnisse.

In Bild 6.1 sind für alle untersuchten Punkte die ermittelten Mobilfunk-Immissionswerte als prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der Feldstärkegrenzwerte der 26. BImSchV in Abhängigkeit von der Horizontalentfernung zur Kleinzellenanlage grafisch dargestellt. Hierbei ist der Wert angegeben, der sich bei Maximalauslastung und der aktuell für die Anlage eingestellten Maximalleistung an den Messpunkten ergibt.

Die vier GSM-Kleinzellenanlagen von Vodafone werden aktuell mit einer maximalen EIRP zwischen etwa 6,1 und 10 Watt betrieben. Bei den LTE-Anlagen der Telekom liegt die aktuell eingestellte maximale EIRP zwischen 1,7 und 10 Watt.

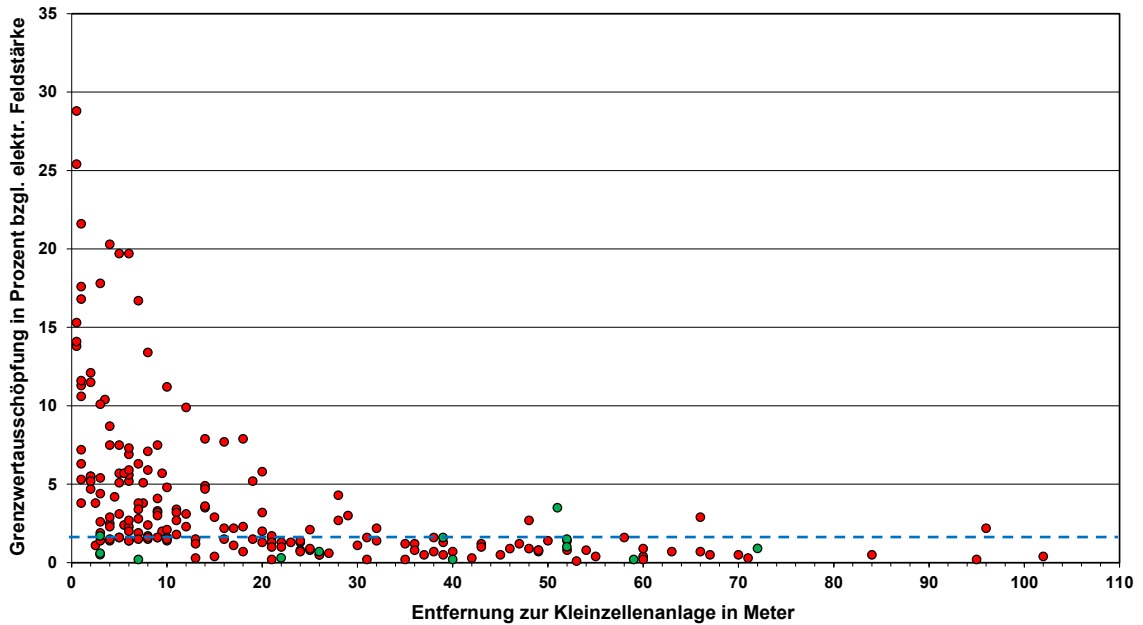


Bild 6.1: Immissionen, verursacht durch die Kleinzellenanlagen: Abhängigkeit der Immission von der Horizontalentfernung zum Standort. Prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für eine Abstrahlung mit der aktuell maximal möglichen EIRP der Anlagen (Rot: Messpunkte im Freien; Grün: Innenraummesspunkte; Gestrichelte blaue Linie: Median über alle Messergebnisse).

Als größter Immissionswert wurde eine feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfung von 28,8 Prozent gefunden, die kleinste ermittelte Immission betrug 0,1 Prozent. Als Median über alle 202 Punkte ergab sich eine Grenzwertausschöpfung von 2,0 Prozent (siehe blaue Linie in Bild 6.1).

An allen untersuchten Punkten werden somit die Grenzwertvorgaben der 26. BImSchV, auch unter Einbezug der in Abschnitt 5.3.4. angegebenen Messunsicherheit (3 dB beziehungsweise 41 Prozent Aufschlag), eingehalten.

Aufgrund der verwendeten feldstärkebezogenen Ergebnisdarstellung bedeutet eine Grenzwertausschöpfung von maximal 28,8 Prozent, dass die Leistung der verursachenden Anlage theoretisch noch um den Faktor 12 vergrößert werden könnte, bevor es am Messpunkt zu einer Grenzwertausschöpfung von mehr als 100 Prozent kommen würde.

In Bild 6.2 ist die größenmäßige Verteilung der Messergebnisse als Balkendiagramm wiedergegeben. Allerdings sind hier nicht alle 202 Messergebnisse, sondern nur die 184 Resultate im Freien mit direkter Sicht zum Anlagenstandort eingeflossen.

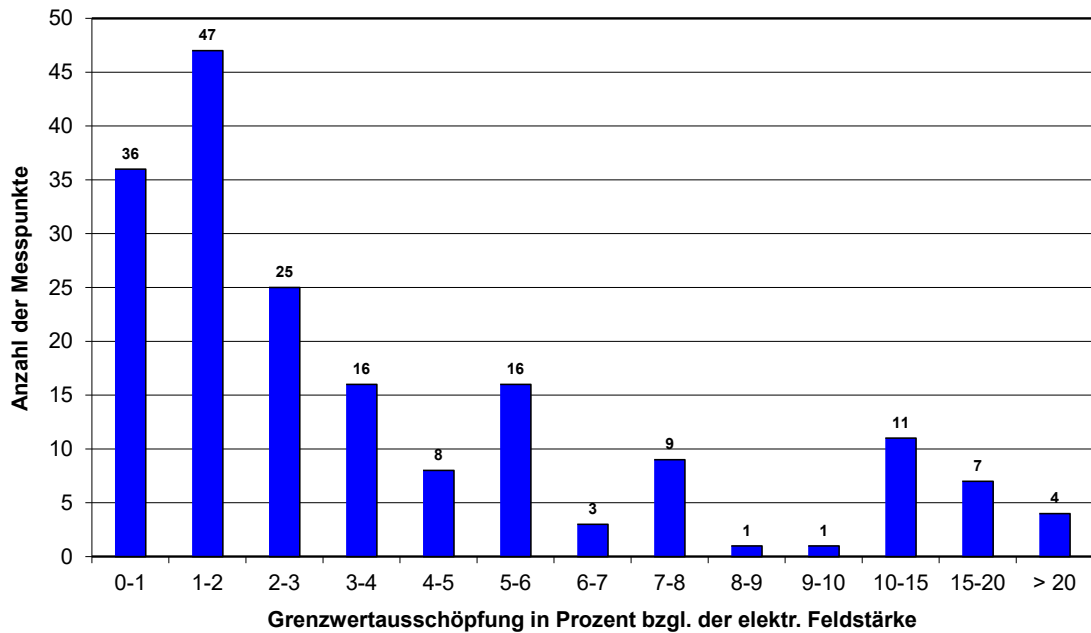


Bild 6.2: Verteilung der ermittelten Immissionswerte an Punkten im Freien mit direkter Sicht zum Anlagenstandort in 13 Grenzwertklassen (Prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für eine Abstrahlung mit der aktuell maximal möglichen EIRP der Anlagen).

Bild 6.2 verdeutlicht, dass an der überwiegenden Anzahl der Messpunkte Immissionen kleiner als drei Prozent Grenzwertausschöpfung vorhanden sind. An einigen Punkten mit besonders geringem Abstand zu den Antennen finden sich auch Grenzwertausschöpfungen größer als zehn Prozent (maximal: 28,8 Prozent).

### 6.2.2 Ergebnisse der Linienmessungen

An fünf der zwölf Standorte wurden auch Messungen entlang von Linien mit zunehmendem Abstand zum Kleinzellenstandort vorgenommen, um die Entfernungsabhängigkeit der Immissionen systematisch zu untersuchen. Der genaue Verlauf der einzelnen Messlinien kann der Detaildokumentation in Kapitel 10 entnommen werden. Die Resultate von neun der zehn Messlinien sind in den Bildern 6.3 und 6.4 in Grafiken zusammenfassend dargestellt. Zusätzlich ist dort jeweils zum Vergleich auch die theoretische Abnahme der prozentualen Grenzwertausschöpfung mit dem Abstand zur Sendeantenne unter Annahme einer idealen Freiraumausbreitung (Friis-Formel) in Hauptstrahlrichtung einer fiktiven Antenne mit einer EIRP von 10 Watt eingezeichnet. Hierzu finden sich in Bild 6.4 zwei unterschiedliche Kurven, da dort sowohl Anlagen, die LTE-2.600 abstrahlen, was mit einem Grenzwert von 61 V/m bewertet werden muss, als auch ein GSM-900-Standort (Grenzwert: 42 V/m) dargestellt sind. In Bild 6.3 strahlen alle Standorte LTE-2.600 ab, daher ist dort als Vergleich die Kurve für 61 V/m ausreichend.

Bild 6.3 zeigt die Entfernungsabhängigkeit der Messwerte für zwei Standorte mit Antennenhöhen von weniger als 2,5 Meter (Standort 1: Telefonsäule; Standort 9: Multifunktionsgehäuse). Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurde für Linie 2 am Standort 1 nur die von der Telefonsäule verursachte Immission herangezogen. Die durch die unmittelbar benachbarte Anlage von Vodafone zusätzlich erzeugten Felder sind hier ausgeklammert.

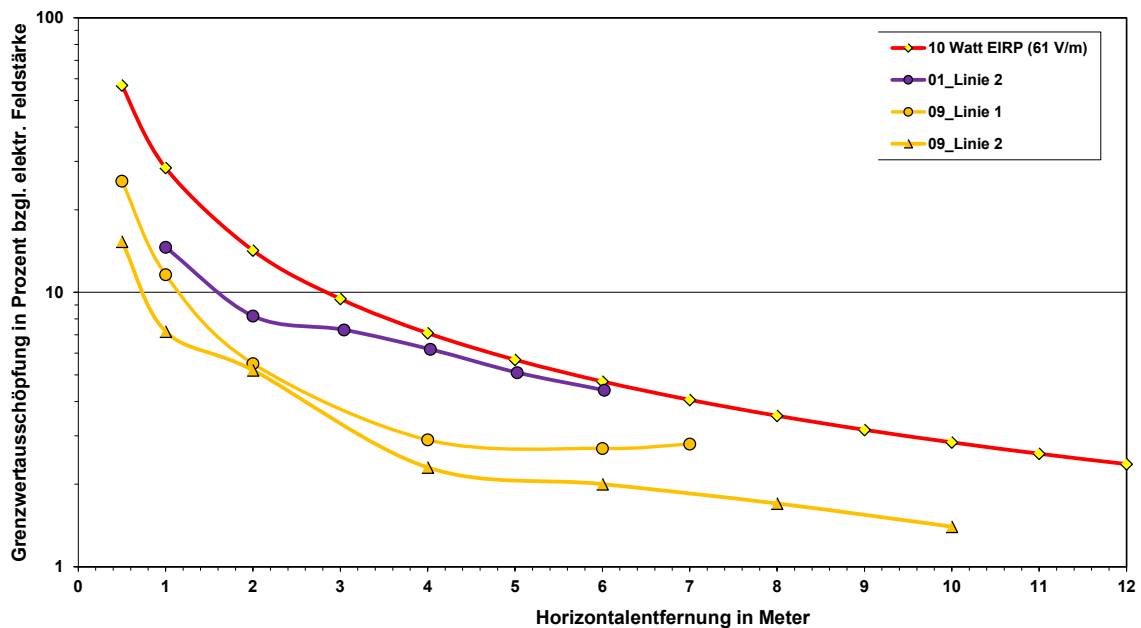


Bild 6.3: Ergebnisse der Linienmessungen an zwei Anlagenstandorten mit Montagehöhen der Antennen kleiner als 2,5 Meter. (Prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für eine Abstrahlung mit der aktuell maximal möglichen EIRP der Anlagen). Zusätzlich ist eine theoretische Linie eingezeichnet, welche die Abnahme der Grenzwertausschöpfung für 10 Watt EIRP und idealer Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne für den bei LTE-2.600 abzuwendenden Grenzwert verdeutlicht. Messentfernungen kleiner 0,5 bzw. 1 Meter waren aufgrund der Gegebenheiten vor Ort (Nähe zu Objekten) nicht möglich.

Man erkennt, dass für diese beiden Anlagentypen bei horizontalen Messpunktabständen kleiner zwei Meter zur Antenne Grenzwertausschöpfungen größer als zehn Prozent auftreten können.

Die (gelben) Messlinien für Standort 9 (Kollwitzstraße) bleiben für den gesamten betrachteten Entfernungsbereich deutlich unterhalb der theoretischen Kurve für 10 Watt EIRP, was nicht verwunderlich ist, da der Standort nur mit einer EIRP von 2,2 Watt betrieben wird.

Die (violette) Messlinie von Standort 2 (Straße des 17. Juni) nähert sich mit zunehmendem Abstand hingegen der theoretischen Kurve für 10 Watt EIRP an, da dieser im Vergleich zu Standort 9 mit deutlich größerer EIRP (8 Watt) betrieben wird.

Mit geringer werdender Horizontaldistanz zum Anlagenstandort nimmt die entlang der violetten Linie gemessene Immission zwar zu, jedoch vergrößert sich gleichzeitig der Abstand zur theoretischen (roten) Kurve, was sich folgendermaßen begründen lässt: Die Immissionen wurden nur im realistischen Aufenthaltsbereich von Personen ermittelt (Bodennähe, d.h. bis zirka zwei Meter über der Straße bzw. dem Gehweg), die Mobilfunkantennen sind jedoch in der Spitze der Telefonsäule auf einer Höhe von etwa 2,3 Meter montiert und senden bevorzugt horizontal nach vorne. Im unmittelbaren Nahbereich befinden sich die Messorte somit nicht mehr optimal im vertikalen Strahlungskegel der Antenne, was die geringeren Immissionen bedingt.

Bei Standort 9 befinden sich die Messpunkte wegen der geringeren Montagehöhe der Antenne (1,85 Meter) auch im Nahbereich noch innerhalb des vertikalen Strahlungskegels. Allerdings ist auch dort aufgrund der geringeren EIRP noch ein deutlicher Abstand zur

theoretischen Linie gewährleistet. Ein zusätzlicher feldreduzierender Einfluss aufgrund der vertikalen Antennencharakteristik ist hier bei geringen Entfernungen jedoch nicht vorhanden.

In Bild 6.4 sind die Ergebnisse der Linienmessungen an Standorten mit Montagehöhen der Antennen zwischen 3,6 und 4,2 Meter dargestellt (Standort 4: Litfaßsäule; Standort 7: freistehender Mast; Standort 7: Wandmontage). Es ergeben sich dadurch radiale Mindestabstände zwischen Antenne und den Messpunkten in Bodennähe von mindestens etwa zwei Meter.

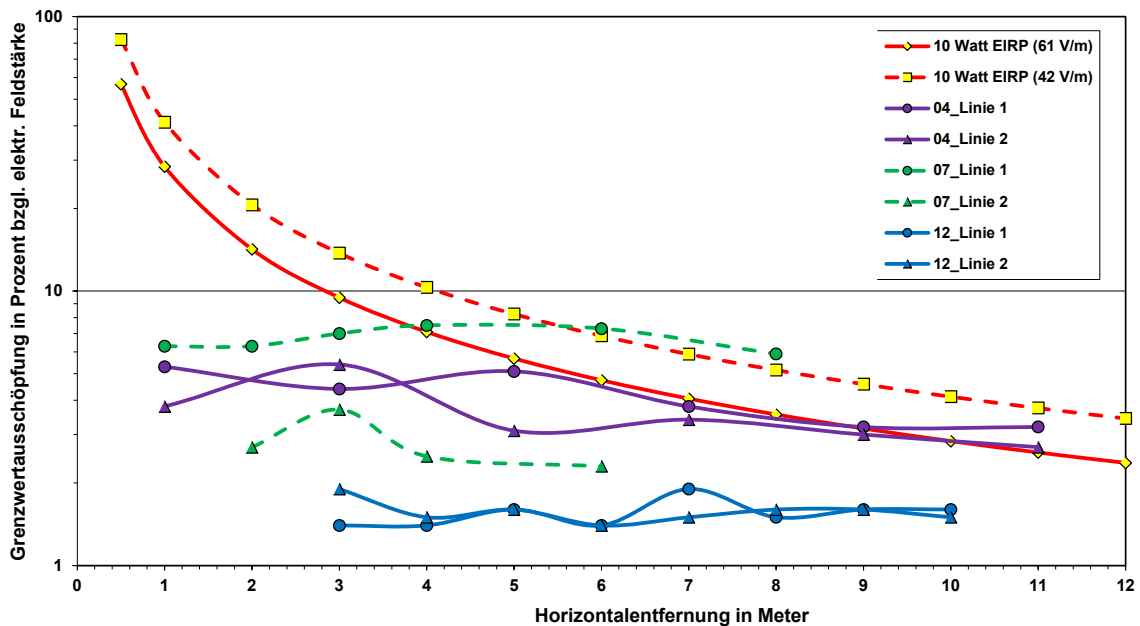


Bild 6.4: Ergebnisse der Linienmessungen an drei Anlagenstandorten mit Montagehöhen der Antennen größer als drei Meter. (Prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke für eine Abstrahlung mit der aktuell maximal möglichen EIRP der Anlagen). Zusätzlich sind zwei theoretische Linien eingezeichnet, welche die Abnahme der Grenzwertausschöpfung für 10 Watt EIRP und idealer Freiraumausbreitung in Hauptstrahlrichtung der Antenne für zwei unterschiedliche Grenzwerte (gestrichelt: GSM-900; durchgehend: LTE-2.600) verdeutlichen. Aufgrund der baulichen Gegebenheiten konnte bei Standort 12 erst ab einem Horizontalabstand von drei Meter gemessen werden.

Aus Bild 6.4 wird ersichtlich, dass bei diesen Standorten die gemessenen Immissionen in keiner Entfernung zehn Prozent Grenzwertausschöpfung überschreiten und im Nahbereich deutlich geringer ausfallen, als es in Bild 6.3 der Fall ist. Aufgrund der größeren Montagehöhen der Antennen ergeben sich bei den in Bild 6.4 untersuchten Standorten keine Messpunkte in Bodennähe mit radialen Entfernungen kleiner als etwa zwei bis drei Meter zur Antenne. Zudem resultiert aus der größeren Montagehöhe der Antennen, dass sich die Messpunkte im Nahbereich noch deutlicher außerhalb des vertikalen Strahlungskegels der Antennen befinden, als es bei der Telefonsäule in Bild 6.3 der Fall ist.

Standort Nr. 4 (Babelsberger Straße) wird mit 10 Watt EIRP betrieben. Daher nähern sich auch mit zunehmender Entfernung die Messwerte an die (rote) theoretische Kurve für 10 Watt EIRP an. Man gelangt also mehr und mehr in den vertikalen Strahlungskegel der auf der Litfaßsäule montierten Antennen.



Auch die Ergebnisse entlang der (gestrichelten grünen) Messlinie im Bereich der horizontalen Hauptstrahlrichtung der GSM-900-Antennen (Linie 1) am Standort Nr. 7 (Alexanderstraße) liegen ab einer bestimmten Entfernung sehr nahe an der theoretischen Kurve für 10 Watt EIRP (gestrichelte rote Linie). Dies ist ebenfalls nicht verwunderlich, da auch dieser Standort mit 10 Watt EIRP betrieben wird. Die zweite am Standort aufgenommene Messlinie (Linie 2) liefert im Vergleich mit Linie 1 deutlich geringere Immissionswerte, da diese horizontal gesehen senkrecht zu Linie 1 verläuft (siehe Bild 10.7.2) und die am Standort verwendeten Antennen horizontal gesehen keinen Rundstrahlcharakteristik, sondern eine ausgeprägte horizontale Richtcharakteristik in Richtung von Messlinie 1 besitzen.

Geringfügige Überschreitungen der theoretischen Kurven für 10 Watt EIRP sind insbesondere in etwas größeren Abständen zum Standort nicht verwunderlich, da im innerstädtischen Umfeld niemals ideale Freiraumbedingungen herrschen, sondern es beispielsweise durch Reflexionen an Gebäudewänden zu lokalen Feldstärkeüberhöhungen kommen kann.

Die an den beiden (blauen) Linien am Standort 12 (Kurfürstendamm) vorhandenen vergleichsweise geringen Immissionswerte sind hauptsächlich auf die geringe EIRP der Antennen von etwa 1,7 Watt zurückzuführen.

Die Ergebnisse der Messungen entlang Linie 1 am Standort Nr. 1 (Straße des 17. Juni) fallen deutlich anders aus. Dies erklärt sich aus der Tatsache, dass an diesem Standort zwei Kleinzellenanlagen in geringem Abstand zu einander (4,7 Meter) von Telekom und Vodafone betrieben werden. Näheres dazu findet sich in der Detaildokumentation (Kapitel 10). In den Bildern 6.5 und 6.6 sind der Verlauf von Messlinie 1 (L1) und die Ergebnisse der Messungen dargestellt.

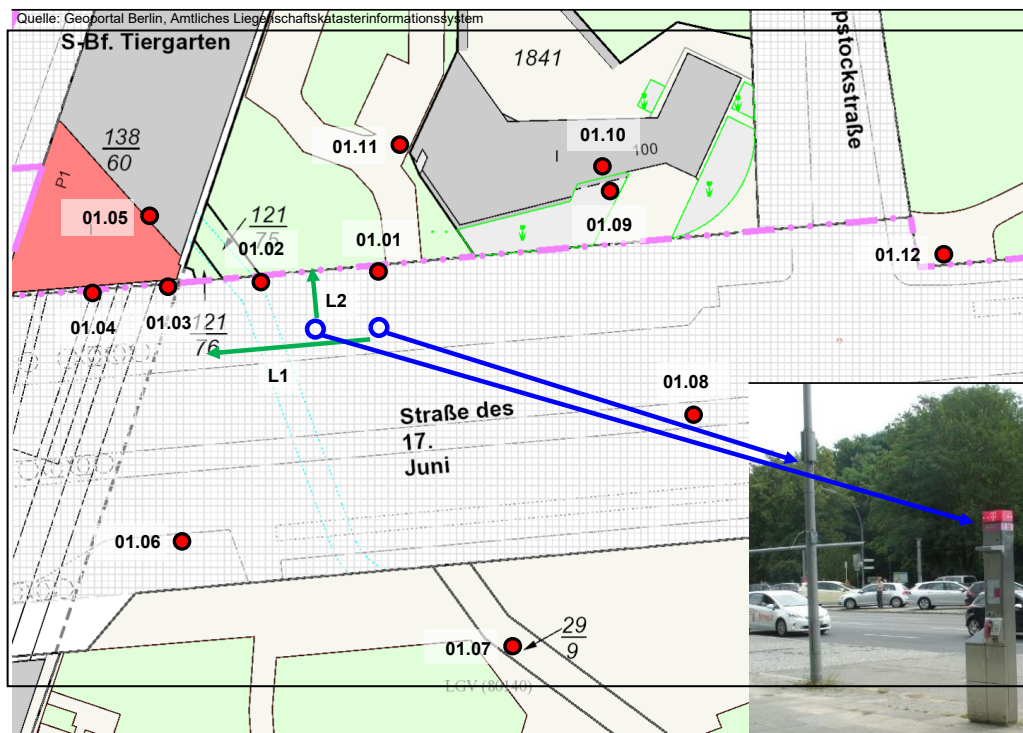


Bild 6.5: Umgebung von Standort 1: Anlagenstandorte und Lage der Messlinien bzw. Messpunkte.

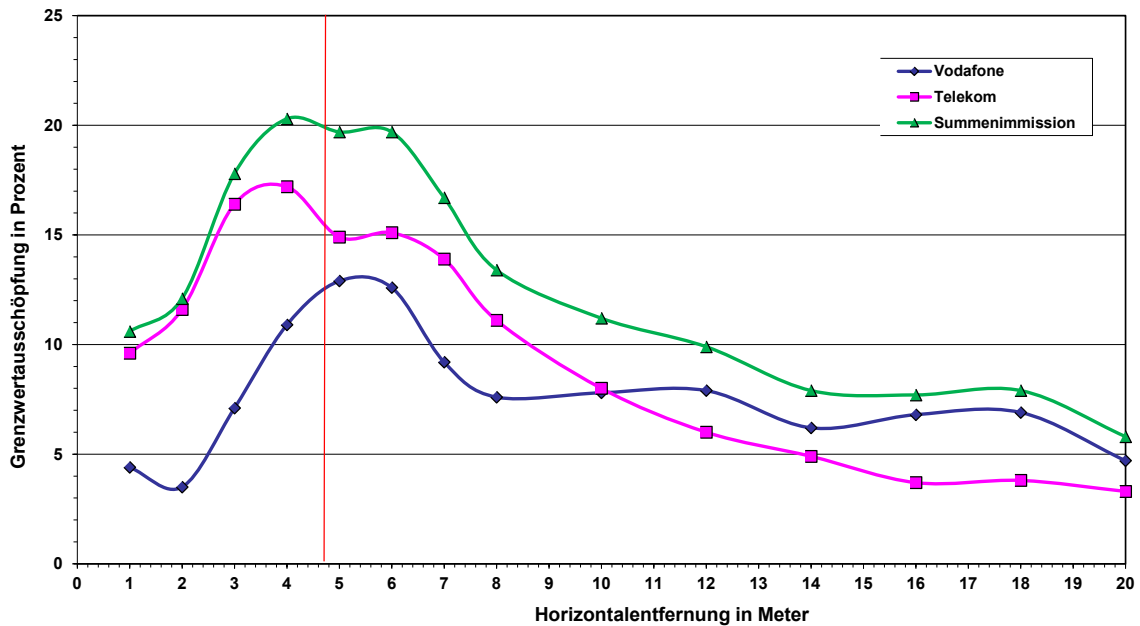


Bild 6.6: Standort 1: Immissionsverteilung entlang Messlinie 1. Die rote Linie in der Grafik gibt die Position der Telefonsäule an. Der zweite Standort (Laternenmast) befindet sich am Nullpunkt des Diagramms.

Man erkennt deutlich eine Kumulation der Immission beider Anlagen insbesondere auf Höhe der Telefonsäule der Telekom, da dort auch die Felder des zweiten Standortes (Vodafone) ihr Maximum besitzen. Es muss aber auch festgehalten werden, dass es durch die Kumulation bei diesem Standort nicht zu übermäßig hohen Feldern im Bereich einer Grenzwertausschöpfung nahe oder über 100 Prozent kommt. Der größte kumulierte Maximalwert beträgt 20,3 Prozent. Ohne den Einfluss des zweiten Standortes (Vodafone) hätte dieser Immissionswert 17,2 Prozent betragen.

### 6.2.3 Dämpfungswirkung von Glasscheiben

Es ist bekannt, dass Fenster von außen einwirkende Hochfrequenzfelder mehr oder weniger stark dämpfen können. Um diese Tatsache genauer zu analysieren, wurden neun Messungen durchgeführt, bei denen jeweils in vergleichbarem Abstand zum Kleinzellenstandort, einmal vor einem Gebäudefenster und ein zweites Mal im Innenraum unmittelbar dahinter die Hochfrequenzimmissionen der Kleinzellenanlage ermittelt wurden. Diese Messungen erfolgten an acht Standorten, die Ergebnisse sind in Tabelle 6.2 dokumentiert.

Punkt Nr. außen / innen	Grenzwertausschöpfung außen	Grenzwertausschöpfung innen	Unterschieds- faktor	Unterschied in dB
01.10 / 01.09	3,5 %	1,5 %	2,33	3,7 dB
03.05 / 03.06	1,3 %	0,7 %	1,86	2,7 dB
04.06 / 04.07	1,6 %	1,3 %	1,23	0,9 dB
05.04 / 05.05	1,1 %	0,2 %	5,50	7,4 dB

Punkt Nr. außen / innen	Grenzwertausschöpfung außen	Grenzwertausschöpfung innen	Unterschieds- faktor	Unterschied in dB
06.09 / 06.10	0,8 %	0,1 %	8,00	9,0 dB
08.10 / 08.09	1,3 %	0,2 %	6,50	8,1 dB
11.03 / 11.01	4,7 %	1,1 %	4,27	6,3 dB
12.01 / 12.03	5,5 %	1,7 %	3,24	5,1 dB
12.06 / 12.04	0,6 %	0,5 %	1,20	0,8 dB

Tabelle 6.2: Vergleich der Immissionswerte vor bzw. hinter einem Gebäudefenster. Prozentuale Grenzwertausschöpfung bezüglich der elektrischen Feldstärke (für eine Abstrahlung mit der aktuell maximal möglichen EIRP der Anlagen) und daraus errechneter Unterschiedsfaktor.

Bei allen neun Vergleichsmessungen waren die Felder hinter der Glasscheibe geringer ausgeprägt als davor. Der Unterschied lag hierbei im Bereich von etwa einem bis neun Dezibel (d.h. Schwächung der Leistung des Funksignals minimal um den Faktor 1,2 und maximal um den Faktor 8). Die Ausprägung der Scheibendämpfung ist von der Qualität der eingebauten Wärmeschutzverglasung, dem Material des Fensterrahmens und der Beschaffenheit der umgebenden Wände aber auch vom Einfallswinkel des Funksignals auf die Scheibe abhängig.

### 6.3 Anlagenkategorien A, B und C und deren Immissionen

Im Rahmen des Projektes soll untersucht werden, ob sich die drei Anlagenkategorien A, B und C bezüglich der von ihnen in der Umgebung erzeugten Immissionen unterscheiden. Wie in Abschnitt 3.1 bereits erläutert, definieren die deutschen Mobilfunknetzbetreiber aktuell die folgenden Anlagenkategorien:

- Kategorie A:** Zugang von Personen ist aufgrund der Montagehöhe ausgeschlossen. Oberhalb der Antenne befinden sich keine öffentlich zugänglichen Orte.  
Zu dieser Kategorie gehören beispielsweise freistehende Telefonsäulen, Litfaßsäulen, Laternen- und sonstige Masten.
- Kategorie B:** Antenne mit Vor-Wand-Montage. Zugang von rechts/links, oben/unten, vorne/hinten ist zu betrachten.  
Zu dieser Kategorie gehören insbesondere Sektor- oder Rundstrahlantennen, die an oder direkt vor einer Gebäudewand montiert sind.
- Kategorie C:** Intrinsisch sicher. Zugang/Zugriff von Personen ist aufgrund der Grenzwerteinhaltung außerhalb des Gehäuses gewährleistet.  
Obwohl sich Personen in unmittelbarer Nähe der Antennen aufhalten können, sind Anlagen dieser Kategorie sicher, weil die abgestrahlte Leistung geeignet begrenzt wurde. Zu dieser Kategorie gehören bei-

spielsweise Anlagen, die an oder in Fernmelde-Multifunktionsgehäusen installiert sind.

Die zwölf im Rahmen dieses Projektes untersuchten Standorte können wie folgt den obigen Kategorien zugeordnet werden:

- **Kategorie A:** Standorte 1 bis 7
- **Kategorie B:** Standorte 10 bis 12
- **Kategorie C:** Standorte 8 und 9

In Bild 6.7 sind die untersuchten Anlagen bezüglich der größten von ihnen generierten Immissionen vergleichend gegenübergestellt.

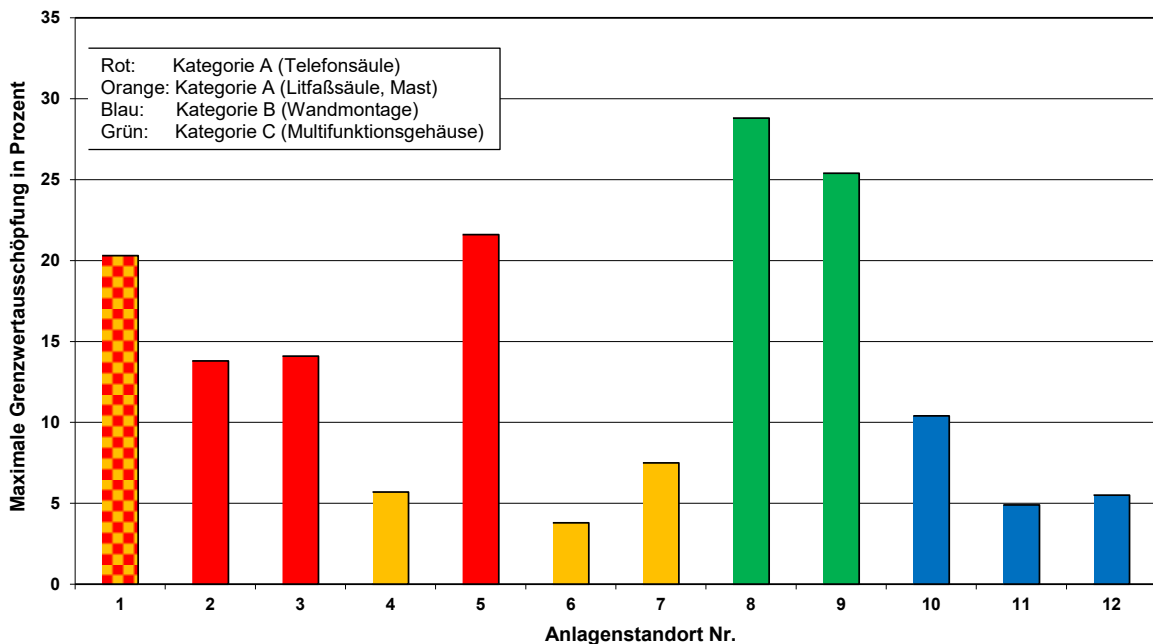


Bild 6.7: Größter jeweils gefundener Immissionswert (prozentuale Grenzwertausschöpfung) in Abhängigkeit von der Standortkategorie. Am Standort Nr. 1 befinden sich zwei Anlagen der Kategorie A (Telefonsäule bzw. Mastmontage). Daher ist die dazugehörige Säule im Bild sowohl in Rot als auch in Orange eingefärbt.

Die geringsten Maximalimmissionen (Grenzwertausschöpfungen maximal etwa 10 Prozent) wurden bei den Standorten mit *hoch montierten Antennen* (Montagehöhe größer als drei Meter) gefunden (Kategorie A: Mast, Litfaßsäule bzw. Kategorie B: Wandmontage). Allerdings muss bei der Wandmontage noch bedacht werden, dass es dort auch relevante Immissionspunkte in Räumen hinter der Antenne geben kann. An derartigen Punkten konnten im Rahmen dieses Projektes nur an einem Standort gemessen werden (Standort Nr. 12), der allerdings mit einer sehr kleinen EIRP von nur 1,7 Watt betrieben wird, so dass für eine umfassende Immissionsbewertung in Räumen neben oder hinter derartigen Antennenstandorten dieses Projekt noch keine ausreichenden Messergebnisse zur Verfügung stellen kann.

Im Umfeld der Telefonsäulen (Kategorie A) ergaben sich etwas größere Maximalimmissionswerte (Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa 10 und 20 Prozent), was hauptsächlich auf die *geringere Montagehöhe der Antennen* (ca. 2,3 Meter) zurückzuführen ist.

Die größten Maximalimmissionswerte (zwischen etwa 25 und 30 Prozent) fanden sich erwartungsgemäß an den Standorten der Kategorie C, da sich dort Personen auch in *unmittelbarer Nähe zur Antenne* aufhalten können und daher dort auch Messpunkte möglich und sinnvoll sind.

## 6.4 Vergleich der Maximalimmission mit der aktuellen Immission

Um die Sicherheit in der Umgebung von Hochfrequenzquellen auch unter ungünstigsten Bedingungen sicherzustellen, ist für den Grenzwertvergleich der größtmögliche 6-Minuten-Mittelwert der Immission heranzuziehen. Da Mobilfunkanlagen theoretisch über sechs Minuten und mehr mit ihrer maximal möglichen Leistung abstrahlen können, ist für die Bewertung nach 26.BImSchV die Immission für den Fall einer Abstrahlung mit maximal möglicher Sendeleistung zu betrachten, auch wenn dieser Betriebszustand in der Realität vermutlich nur selten über Zeiträume von sechs Minuten und mehr anhalten wird. Grundsätzlich unmöglich ist es jedenfalls nicht.

Um näher zu quantifizieren, wie sehr sich bei den in diesem Projekt betrachteten Kleinzellenanlagen der auf maximale Anlagenleistung hochgerechnete Immissionswert von einer typisch aktuell auftretenden Immission unterscheidet, wurde an einigen Punkten in der Umgebung von zwei LTE-Standorten (Standorte Nr. 8 und Nr. 9) zusätzlich die aktuelle Immission ermittelt. Der Vergleich zwischen maximaler- und aktueller Immission ist in Tabelle 6.3 dokumentiert.

Punkt Nr.	Entfernung zur Kleinzellenanlage	Grenzwertausschöpfung (aktuelle Immission)	Grenzwertausschöpfung (Maximalimmission)	Unterschieds-faktor	Unterschieds-faktor [dB]
08.02	0,5 m	4,3 %	28,8 %	6,70	16,5
08.03	1,0 m	3,1 %	16,8 %	5,42	14,7
08.05	9,5 m	0,5 %	2,0 %	4,00	12,0
08.06	19 m	0,3 %	1,5 %	5,00	14,0
08.10	20 m	0,2 %	1,3 %	6,50	16,3
09.L1-0,5m	0,5 m	4,5 %	25,4 %	5,64	15,0
09.L1-1,0m	1,0 m	2,3 %	11,6 %	5,04	14,1
09.01	13 m	0,2 %	1,2 %	6,00	15,6
09.02	24 m	0,1 %	0,8 %	8,00	18,1
09.04	24 m	0,2 %	0,7 %	3,50	10,9
09.07	11 m	0,2 %	1,8 %	9,00	19,1

Tabelle 6.3: Vergleich der aktuellen und der auf maximale Anlagenleistung hochgerechneten Immissionen für einige Punkte in der Umgebung der Kleinzellenanlagenstandorte Nr. 8 und Nr. 9.

Je geringer die vom betrachteten Standort aktuell generierte prozentuale Grenzwertausschöpfung ausfällt, desto mehr beeinflussen die Immissionen von anderen benachbarten LTE-2600-Standorten der Telekom die Messung der aktuellen Immission der Kleinzellenanlage. Dies führt tendenziell zu einer Vergrößerung des Messergebnisses für die aktuelle Immission des Standortes, da die frequenzselektive Erfassung der Leistung im LTE-2600-Band der Telekom nicht zwischen den Feldern der verschiedenen Anlagenstandorte in einem Frequenzband unterscheiden kann. An den Messpunkten nahe an den Kleinzellenantennen ist der verfälschende Einfluss von benachbarten Dachstandorten des gleichen Betreibers hingegen vernachlässigbar gering.

Tabelle 6.3 kann man entnehmen, dass die gemessene aktuelle Immission an allen untersuchten Punkten *sehr deutlich* unter der theoretischen Maximalimmission bleibt. Die gefundenen Unterschiedsfaktoren liegen leistungsbezogen zwischen etwa 12 bis 81 (11 bis 19 dB). Da die Messungen an einem Werktag während der typischen "busy hours" durchgeführt wurden (zwischen 11 und 13 Uhr), ist es sehr wahrscheinlich, dass die Kleinzellenanlagen zum Messzeitpunkt auch eine gewisse Menge an Datenverkehr abgewickelt haben. Da die Messungen am 20. Dezember 2021 vorgenommen wurden, ist es allerdings durchaus denkbar, dass sich zu anderen Jahreszeiten (z.B. im Sommer, wenn die in der Umgebung der beiden Anlagenstandorte befindlichen großen Außenbereiche der Gastronomie gut besetzt sind) auch eine größere Anlagenauslastung ergeben hätte, so dass dann der Unterschied zwischen aktueller und maximaler Immission auch kleiner ausfallen könnte. Die Ergebnisse eines Vergleichs zwischen aktueller und maximal möglicher Immission unterliegen also immer einer kaum vermeidbaren Unsicherheit.

## 6.5 Immissionen durch benachbarte Mobilfunkanlagen

Zusätzlich zu den Immissionen, verursacht durch die Kleinzellenanlagen, wurden an jeweils zwei Punkten pro Standort auch die Immissionen erfasst, die dort durch die Emissionen von in der Nachbarschaft vorhandenen Mobilfunkbasisstationen (vornehmlich Dachstandorte) generiert werden. Einer der beiden Messpunkte befand sich in geringerer Entfernung zur Kleinzellenanlage (Abstand ca. 5,5 bis 14 Meter, im Mittel 9,6 Meter), der zweite jeweils in größerer Entfernung (40 bis 102 Meter, im Mittel 67,6 Meter).

In Tabelle 6.4 sind die Ergebnisse dieser Messungen dokumentiert. Dabei findet sich in Spalte Nr. 3 die Immission (bei Maximalauslastung der verursachenden Anlagen), die durch die Signale der Kleinzellenanlage generiert wird. In Spalte Nr. 4 ist hingegen angegeben, welche Immission herrscht, wenn nur die anderen in der Nähe befindlichen Mobilfunkbasisstationsstandorte betrachtet werden.

Ein Unterschiedsfaktor größer als eins beziehungsweise 0 dB bedeutet hierbei, dass am Messort die Immission durch die Kleinzellenanlage größer ist, als die von den Dachstandorten.

Punkt Nr.	Entfernung zur Kleinzellenanlage	Grenzwertausschöpfung (Kleinzellenanlage)	Grenzwertausschöpfung (Dachstandorte)	Unterschiedsfaktor	Unterschiedsfaktor [dB]
01.01	9 m	<b>7,5 %</b>	3,7 %	2,0	3,1 dB
01.12	96 m	<b>3,5 %</b>	3,0 %	1,2	0,7 dB
02.04	9 m	<b>3,3 %</b>	1,7 %	1,9	2,9 dB
02.10	102 m	0,4 %	<b>2,3 %</b>	0,2	-7,6 dB
03.10	14 m	<b>3,5 %</b>	3,4 %	1,0	0,1 dB
03.01	54 m	0,8 %	<b>2,3 %</b>	0,3	-4,6 dB
04.01	5,5 m	<b>5,7 %</b>	1,6 %	3,6	5,5 dB
04.11	70 m	0,5 %	<b>1,9 %</b>	0,3	-5,8 dB
05.02	6 m	<b>5,9 %</b>	0,6 %	9,8	9,9 dB
05.08	66 m	<b>0,7 %</b>	0,6 %	1,2	0,7 dB
06.02	13 m	<b>1,5 %</b>	0,5 %	3,0	4,8 dB
06.06	49 m	<b>0,8 %</b>	0,5 %	1,6	2,0 dB
07.01	9,5 m	<b>5,7 %</b>	2,9 %	2,0	2,9 dB
07.10	72 m	0,9 %	<b>2,8 %</b>	0,3	-4,9 dB
08.05	9,5 m	<b>2,0 %</b>	1,6 %	1,3	1,0 dB
08.08	55 m	0,4 %	<b>3,1 %</b>	0,1	-8,9 dB
09.01	13 m	1,2 %	1,2 %	1,0	0 dB
09.09	40 m	0,2 %	<b>1,9 %</b>	0,1	-9,8 dB
10.03	7 m	<b>9,4 %</b>	4,5 %	2,1	3,2 dB
10.06	52 m	0,5 %	<b>5,4 %</b>	0,1	-10,3 dB
11.04	14 m	<b>4,9 %</b>	2,9 %	1,7	2,3 dB
11.13	95 m	0,2 %	<b>6,1 %</b>	0,03	-14,8 dB
12.08	5,5 m	<b>2,4 %</b>	1,2 %	2,0	3,0 dB
12.15	60 m	0,2 %	<b>1,4 %</b>	0,1	-8,5 dB

Tabelle 6.4: Ergebnis der zusätzlich durchgeführten Feldstärkemessungen, verursacht durch benachbarte Mobilfunkbasisstationsstandorte im Vergleich zu den Immissionen durch die Kleinzellenanlage (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der elektrischen Feldstärke für Maximalauslastung der Umgebungsstandorte und einer Abstrahlung mit der aktuell maximal möglichen EIRP der Kleinzellenanlagen). Der jeweils größere Immissionswert ist **fett** markiert.

Ein Blick in Tabelle 6.4 zeigt, dass an zehn der 24 Messpunkte die Immissionen, verursacht durch die in der näheren Umgebung befindlichen Mobilfunkanlagen größer oder gleich sind, als die der jeweiligen Kleinzellenanlage. Dieser Fall tritt insbesondere an den "Fern"-Messpunkten (neun von zwölf) auf. An den "Nah"-Messpunkten überwiegt an elf der zwölf Punkte die Immission der Kleinzellenanlage. In Tabelle 6.5 wird der Unterschied zwischen Kleinzellen- und Nachbarstandortimmission mittels der Medianwerte nochmals verdeutlicht.

Lage des Messpunktes bzgl. der Kleinzellenanlage	Immission Kleinzellenanlage (Median)	Immission Nachbarstandorte (Median)
"Nah" (5,5 - 14 m)	4,2 %	1,7 %
"Fern" (40 - 102 m)	0,5 %	2,3 %

Tabelle 6.5: Immissionsvergleich Kleinzellenanlage - Nachbarstandorte in Abhängigkeit von der Lage des Messpunktes bezüglich der Kleinzellenanlage (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der elektrischen Feldstärke für Maximalauslastung der Umgebungsstandorte und einer Abstrahlung mit der aktuell maximal möglichen EIRP der Kleinzellenanlagen).

Offensichtlich sind bereits nach einigen zehn Metern Entfernung zum Kleinzellenstandort dessen Immissionen so stark abgeklungen, dass die Felder, verursacht durch die in der näheren Umgebung befindlichen Nachbarstandorte bereits überwiegen.

## 6.6 Immissionen durch "sonstige" Funksendeanlagen

Zusätzlich zum Mobilfunk wurden an jeweils einem Punkt pro Kleinzellenstandort auch die Immissionen erfasst, die dort durch die Emissionen von "sonstigen" ortsfesten Funksendeanlagen generiert werden. Es wurde hierbei der Frequenzbereich von 27 MHz bis 6 GHz betrachtet. Es zeigt sich, dass an den Punkten die Immissionen, verursacht durch Rundfunksender (UKW, DAB+, DVB-T2) dominierend sind. Der Einfluss der Rundfunksenderstandorte Alexanderplatz, Scholzplatz und Schöneberg ist an vielen Messpunkten vorhanden.

In Tabelle 6.6 sind die Ergebnisse dieser Messungen dokumentiert. Dabei findet sich in Spalte Nr. 3 die Immission (bei Maximalauslastung der verursachenden Anlagen), die durch die Signale der Kleinzellenanlage generiert wird. In Spalte Nr. 4 ist hingegen angegeben, welche Immission herrscht, wenn nur die (Rundfunk-) Sendeanlagen betrachtet werden.

Messpunkt Nr.	Entfernung zur Kleinzellenanlage	Grenzwertausschöpfung Kleinzellenanlage	Grenzwertausschöpfung "sonstige" (Rundfunk-) Signale	Unterschiedsfaktor	Unterschiedsfaktor [dB]
01.12	96	3,5 %	0,9 %	3,9	5,9 dB
02.10	102	0,4 %	0,7 %	0,6	-2,4 dB
03.01	54	0,8 %	0,7 %	1,1	0,6 dB
04.11	70	0,5 %	0,2 %	2,5	4,0 dB
05.02	6	5,9 %	0,2 %	29,5	14,7 dB
06.02	13	1,5 %	0,2 %	7,5	8,8 dB
07.10	72	0,9 %	5,8 %	0,2	-8,1 dB
08.08	55	0,4 %	0,9 %	0,4	-3,5 dB
09.10	21	1,0 %	4,7 %	0,2	-6,7 dB



Messpunkt Nr.	Entfernung zur Kleinzellenanlage	Grenzwertausschöpfung Kleinzellenanlage	Grenzwertausschöpfung "sonstige" (Rundfunk-) Signale	Unterschiedsfaktor	Unterschiedsfaktor [dB]
10.06	52	0,5 %	<b>0,7 %</b>	0,7	-1,5 dB
11.04	14	<b>4,9 %</b>	0,2 %	24,5	13,9 dB
12.15	60 m	0,5 %	0,5 %	1,0	0 dB

Tabelle 6.6: Ergebnis der zusätzlich durchgeführten Feldstärkemessungen, verursacht durch "sonstige" (Rundfunk-) Sendeanlagen (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der elektrischen Feldstärke. Der jeweils größere Immissionswert ist **fett** markiert.

Ein Unterschiedsfaktor größer als eins beziehungsweise 0 dB bedeutet hierbei, dass am Messort die Immission durch die Kleinzellenanlage größer war, als die durch sonstige (Rundfunk-) Sendeanlagen.

An vier der zwölf Messpunkte wurden Immissionen, verursacht von "sonstigen" (Rundfunk-) Sendeanlagen mit mehr als einem Prozent Grenzwertausschöpfung festgestellt. An den beiden Messpunkten mit den größten "sonstigen" Immissionen (Nr. 07.10 und 09.10) herrschte direkte Sichtverbindung zum Fernsehturm am Alexanderplatz.

Ein Blick in Tabelle 6.6 zeigt, dass an sechs der zwölf Messpunkte die Immissionen durch sonstige (Rundfunk-) Sendeanlagen größer oder gleich sind, als die der jeweiligen Kleinzellenanlage. Allerdings muss angemerkt werden, dass die Messpunkte mit im Mittel etwa 51 Meter vergleichsweise weit von der Kleinzellenanlage entfernt sind.

## 7 Untersuchung der Leistungsregelung im LTE-Uplink

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse von Untersuchungen zur Sendeleistungsregelung eines Endgeräts in Abhängigkeit von der Versorgungsqualität durch eine Kleinzellenanlage vorgestellt und zudem ein systematischer Vergleich der Endgerätesendeleistungen bei Verbindung mit einer Kleinzellenanlage sowie mit einem Makrozellenstandort durchgeführt.

Diese Untersuchungen sollen die Frage näher beleuchten, ob im unmittelbaren Umfeld von Kleinzellenstandorten die Sendeleistung des Endgerätes geringer ausfällt, als es ohne die Kleinzellenanlage der Fall wäre. Eine geringere Sendeleistung des Endgerätes würde automatisch auch zu einer Abnahme der durch das Endgerät am Nutzer erzeugten Hochfrequenzexposition führen.

### 7.1 Verwendete Messgeräte

Für die hier dokumentierten Untersuchungen wurden die in Tabelle 5.2 aufgelisteten Messgeräte eingesetzt (Team 2). Die auf dem für die Messungen verwendeten Endgerät Samsung Galaxy S8 installierte Applikation "QualiPoc" dient zur Messung der aktuellen Sendeleistung des Endgeräts auf dem Nutzdatenkanal (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH) sowie der Dokumentation der aktuellen Empfangspegel der umliegenden Basisstationen (Reference Signal Received Power, RSRP).

### 7.2 Messverfahren und Messobjekte

Die Messungen erfolgten im Umfeld der untersuchten Kleinzellenstandorte Nr. 5 und Nr. 8. Am Standort Nr. 5 befinden sich die LTE-Antennen der Kleinzellenanlage in der Spitze einer freistehenden Telefonsäule am Nikolsburger Platz, am Standort Nr. 8 in einer speziellen Umhausung an einem Fernmelde-Multifunktionsgehäuse (MFG) in der Wörther Straße nahe des Kollwitzplatzes (siehe Bild 7.1).



Bild 7.1: Kleinzellenbasisstationen, in deren Umgebung die Uplinkmessungen vorgenommen wurden. Links: Fernmelde-Multifunktionsgehäuse Wörther Straße (Kollwitzplatz). Rechts: Telefonsäule am Nikolsburger Platz.

Ermittelt wurde die Sendeleistung eines LTE-Endgeräts in Abhängigkeit vom Versorgungspegel der jeweiligen Basisstation. Dazu wurde Uplink-Datenverkehr erzeugt, indem mit einem Mobiltelefon Samsung Galaxy S8 eine 1.000 MB große Datei per FTP-Upload auf einen Server hochgeladen wurde. Mithilfe der auf dem Endgerät installierten Anwendung QualiPoc wurden dabei unter anderem folgende Parameter erfasst:

- Die aktuelle Sendeleistung des Endgeräts auf dem Nutzdatenkanal (Physical Uplink Shared Channel, PUSCH).
- Der aktuell vom Endgerät gemessene Empfangspegel der verbundenen Funkzelle (Reference Signal Received Power, RSRP).

Bei den statischen Messungen wurden die Messwerte an singulären Punkten entlang einer Linie - ausgehend vom Anlagenstandort - über einen Zeitraum von jeweils einer Minute aufgezeichnet (siehe dazu die Bilder 7.3 und 7.4). Bei den dynamischen Messungen erfolgte während der Bewegung entlang einer Wegstrecke eine permanente Messwertaufnahme. Aufgrund der Größe der hochzuladenden Datei war gewährleistet, dass das Endgerät während der gesamten Messung Daten zu übertragen hatte. Zudem sorgte die App dafür, dass das Endgerät nur in der jeweils gewünschten Funkzelle eingebucht war und selbst bei Vorhandensein von Basisstationssignalen mit deutlich höheren Empfangspegeln kein Zellwechsel durchgeführt wurde. Dadurch wird die Wiederholbarkeit der Messungen sowie eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Messpunkten sichergestellt.

### **7.3 Zeitlicher Verlauf von Empfangspegel und Sendeleistung**

Die Sendeleistungen des Endgeräts bzw. der vom Endgerät gemessene Empfangspegel der Basisstation wurde bei den statischen Messungen je Messpunkt über die Messdauer von einer Minute gemittelt. Bild 7.2 zeigt die zeitlichen Verläufe der Empfangsleistung der Basisstation (RSRP, blau) sowie der Sendeleistung des Endgeräts (PUSCH Sendeleistung, orange) beispielhaft für Messpunkt 2 am Kollwitzplatz (zirka 28 Meter Entfernung zum Kleinzellenstandort, siehe Bild 7.4). Zeitpunkte, für die keine Messwerte vorlagen (z.B. beim Starten der Aufzeichnung) oder bei denen keine Datenübertragung stattfand, wurden bei der Mittelwertbildung nicht berücksichtigt.

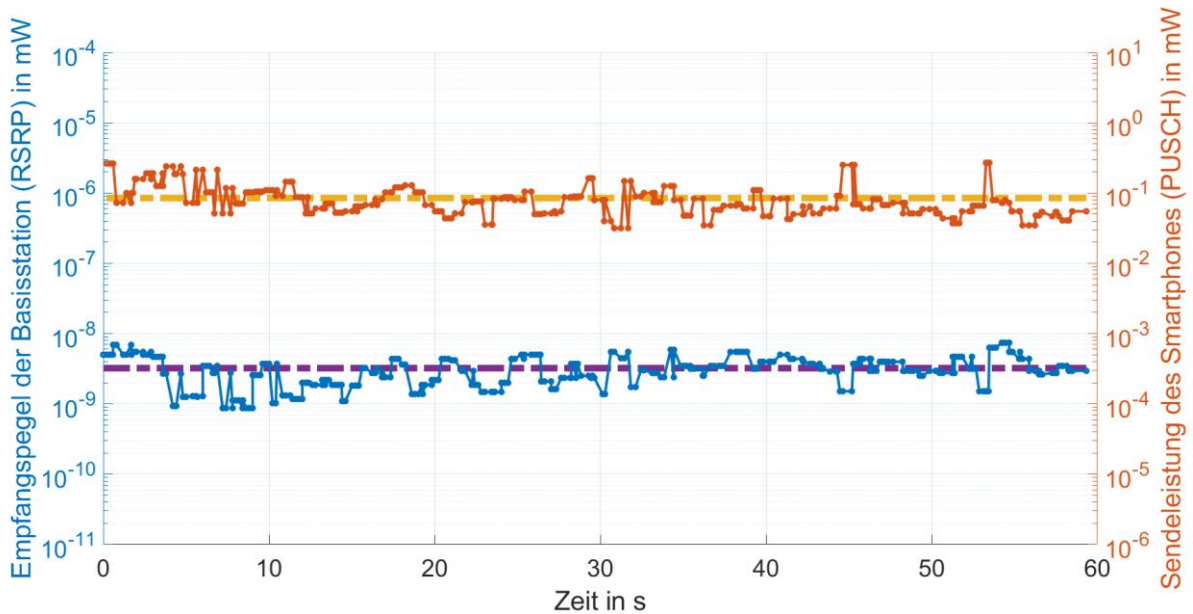


Bild 7.2: Kollwitzplatz: Zeitlicher Verlauf des Empfangspegels der Basisstation (RSRP) und der Sendeleistung des Endgeräts (PUSCH Sendeleistung) während einer ortsfesten Messung am Messpunkt 2. Die jeweiligen zeitlichen Mittelwerte sind in gestrichelten Linien dargestellt.

Aus Bild 7.2 wird erkennbar, dass sich stärkere Schwankungen des Empfangspegels mit einer kurzen Verzögerung unmittelbar auf die Sendeleistung auswirken. Dies ist beispielsweise anhand der blauen Kurve bei ca. 45 bzw. 53 Sekunden ersichtlich, wo kurz nach einem Pegel einbruch im Empfangssignal eine kurzzeitige Erhöhung der Sendeleistung zu beobachten ist.

## 7.4 Messergebnisse

### 7.4.1 Statische Messungen

Die in der Nähe der Telefonsäule am Nikolsburger Platz untersuchten Messpunkte sind in Bild 7.3 grafisch aufbereitet. Die roten Punkte stellen die Messpunkte dar, der blaue Kreis den Standort der Kleinzellenanlage. Die Messpunkte sind in Tabelle 7.1 mit ihrem jeweiligen Abstand, den herrschenden Sichtbedingungen zur Kleinzellenanlage und den Messergebnissen dokumentiert. Die Messpunkte 1 bis 4 liegen auf dem Nikolsburger Platz, die Messpunkte 5 bis 11 an der Nikolsburger Straße. Ab Messpunkt 5 ist die Sichtverbindung zur Telefonsäule nicht mehr vorhanden.

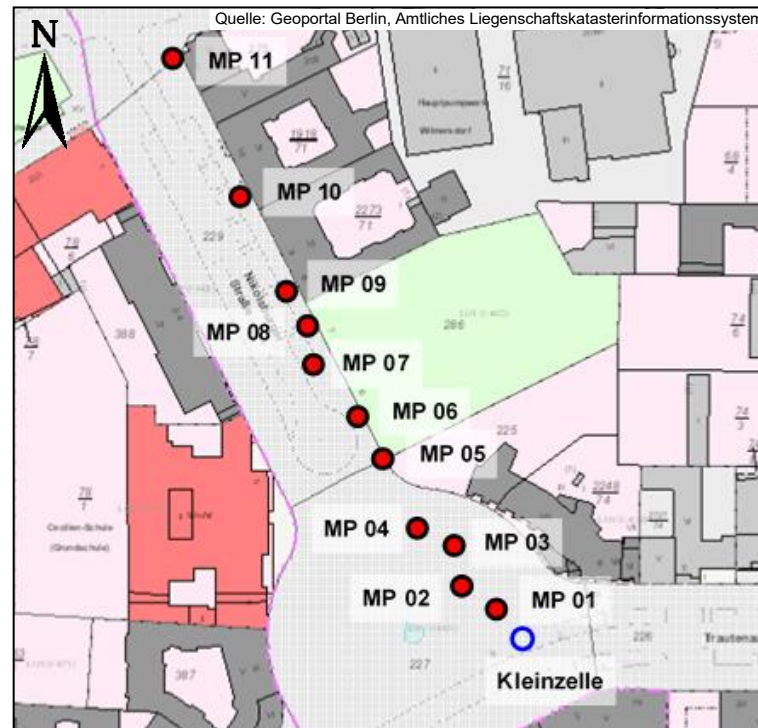


Bild 7.3: Nikolsburger Platz: Untersuchung der Sendeleistungsregelung: Lage der Messpunkte (rote Kreise) und Standort der Kleinzellenanlage (blauer Kreis).

Punkt Nr.	Entfernung zur Kleinzellenanlage	Sichtverbindung	Mittlere PUSCH-Sendeleistung des Endgeräts		Mittlerer RSRP-Empfangspegel der Kleinzellenanlage	
			in mW	in dBm	in mW	in dBm
1	8 m	Ja	0,0029	-25,5	0,0000011	-59,4
2	23 m	Ja	0,02	-16,9	0,000000029	-75,4
3	35 m	Ja	0,04	-14,0	0,000000015	-78,3
4	46 m	Ja	0,14	-8,7	0,00000001	-79,9
5	66 m	Ja	0,98	-0,1	0,0000000018	-87,5
6	81 m	Nein	2,08	3,2	0,00000000067	-91,7
7	101 m	Nein	3,37	5,3	0,00000000028	-95,5
8	109 m	Nein	5,42	7,3	0,00000000013	-98,9
9	123 m	Nein	11,07	10,4	0,000000000055	-102,6
10	156 m	Nein	17,59	12,5	0,000000000027	-105,8
11	197 m	Nein	25,63	14,1	0,00000000001	-109,8

Tabelle 7.1: Nikolsburger Platz: Mittlere Sendeleistung des Endgeräts und mittlerer vom Endgerät gemessener Empfangspegel.

In Tabelle 7.2 sind die Messpunkte im Umfeld des Standortes Kollwitzplatz mit ihrem jeweiligen Abstand, den herrschenden Sichtbedingungen zur Kleinzellenanlage und den Messergebnissen dokumentiert. Bild 7.4 zeigt die Lage der Messpunkte und der Kleinzellenanlage in einem Planausschnitt. Die Messpunkte liegen nahezu auf einer Linie entlang der Wörther Straße. Bei fast allen Messpunkten besteht Sichtverbindung zum Anlagenstandort. Nur am Messpunkt 8 wurde die Sicht zum Kleinzellenstandort durch Vegetation verdeckt.

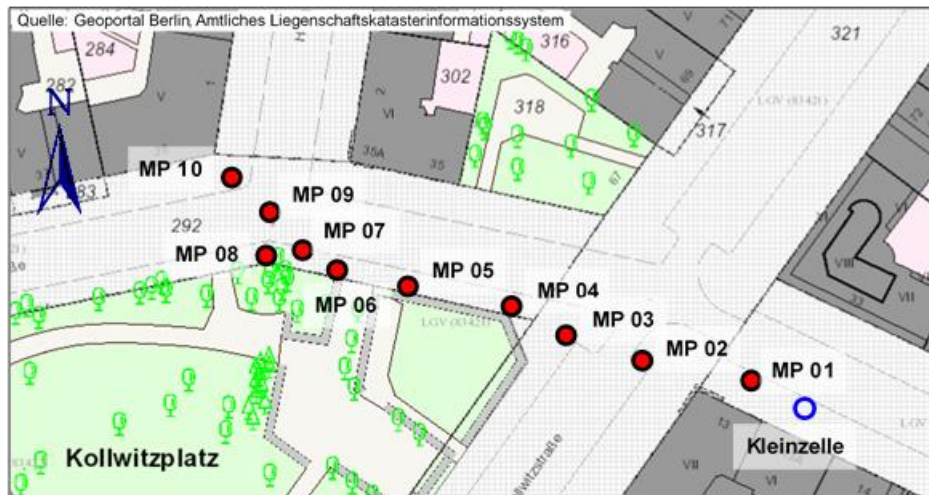


Bild 7.4: Kollwitzplatz: Untersuchung der Sendeleistungsregelung: Lage der Messpunkte (rote Kreise) und Standort der Kleinzellenanlage (blauer Kreis).

Punkt Nr.	Entfernung zur Kleinzellenanlage	Sichtverbindung	Mittlere PUSCH-Sendeleistung des Endgeräts		Mittlerer RSRP-Empfangspegel der Kleinzellenanlage	
			in mW	in dBm	in mW	in dBm
1	10 m	Ja	0,0023	-26,4	0,000000072	-71,4
2	28 m	Ja	0,016	-18,1	0,000000014	-78,4
3	45 m	Ja	0,09	-10,7	0,000000032	-84,9
4	59 m	Ja	1,68	2,2	0,0000000081	-91,0
5	79 m	Ja	0,51	-2,9	0,000000001	-89,9
6	91 m	Ja	3,99	6,0	0,0000000065	-91,9
7	97 m	Ja	104,69	20,2	0,000000016	-87,9
8	101 m	Nein	1,78	2,5	0,0000000039	-94,4
9	102 m	Ja	30,98	14,9	0,0000000067	-91,7
10	111 m	Ja	125,21	21,0	0,0000000039	-94,1

Tabelle 7.2: Kollwitzplatz: Mittlere Sendeleistung des Endgeräts und mittlerer vom Endgerät gemessener Empfangspegel.

Die Messergebnisse von Nikolsburger Platz und Kollwitzplatz sind in Bild 7.5 grafisch aufbereitet. Dort ist die Sendeleistung des Endgeräts (PUSCH) in Abhängigkeit vom Empfangspegel des Basisstationssignals der Basisstation (RSRP) aufgetragen.

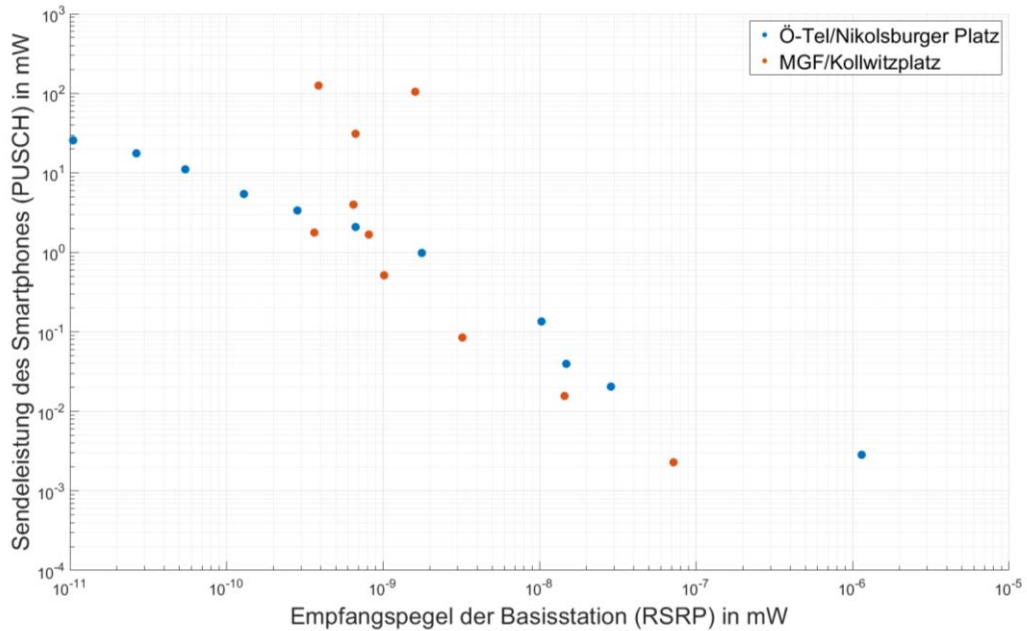


Bild 7.5: Ergebnisse der punktbasierten Messungen zur Abhängigkeit der durchschnittlichen Sendeleistung eines LTE-Smartphones (PUSCH-Sendeleistung) vom durchschnittlichen Empfangspegel des Basisstationssignals (RSRP) der Kleinzellenanlage.

Es ist zu erkennen, dass die Sendeleistung des Endgeräts am Nikolsburger Platz bei steigendem Empfangspegel der Kleinzellenanlage immer weiter heruntergeregelt wird. Dies ist ebenfalls für die Messpunkte 1 bis 6 am Kollwitzplatz ersichtlich. Die Messpunkte 7 bis 10 zeigen dort allerdings keinen klaren Zusammenhang zwischen der PUSCH-Sendeleistung und der RSRP. Ein ähnliches Verhalten der Sendeleistungsregelung konnte am Kollwitzplatz auch bei der dynamischen Messung festgestellt werden (siehe Bild 7.10).

Zur zusätzlichen Abschätzung der Empfangsqualität des Basisstationssignals kann die RSRQ (Reference Signal Received Quality) herangezogen werden. Dieser Wert (zwischen 0 und 1) wird seitens der Basisstation verwendet, um die Notwendigkeit für einen Zell- oder Netzwechsel zu bewerten und wird aus RSRP, der Anzahl der Resource Blocks (Frequenz-Zeit-Ressourcen) und RSSI (Received Signal Strength Indicator) ermittelt. Je größer der RSRQ-Wert, desto besser ist die Empfangsqualität.

In Bild 7.6 ist die PUSCH Sendeleistung in Abhängigkeit von der gemittelten Empfangsqualität der Basisstation RSRQ für alle Messpunkte aufgetragen. Es ist erkennbar, dass - bis auf eine Ausnahme (Messpunkt 10) - die Messergebnisse am Nikolsburger Platz eine gute Empfangsqualität zeigen. Die Ergebnisse des RSRQ am Kollwitzplatz weisen für die Messpunkte 1 bis 3 eine ähnlich gute Empfangsqualität auf, für die restlichen Messpunkte allerdings eine deutlich schlechtere. Die niedrigsten RSRQ-Werte ergeben sich für die Messpunkte 8 bis 10. Diese resultieren vermutlich aus der Lage dieser Messpunkte nahe der Hauptstrahlrichtung einer Antenne der benachbarten Makrobasisstation (Dachstandort), die

auch im gleichen Frequenzband wie die Kleinzellenanlage sendet (siehe Bild 7.12). Diese war vermutlich durch den während der Messungen stark von Personen frequentierten Kollwitzplatz stark ausgelastet, wodurch die Frequenz-Zeit-Ressourcen im genutzten LTE-Band durch mehrere Zellen parallel belegt waren, was zu Interferenzstörungen führen kann. Am Nikolsburger Platz tritt dieser Effekt nicht auf, da sich dort während der Messungen so gut wie niemand außer den messenden Personen befunden hat. Die benachbarte Makrobasissstation sendete hier zwar ebenfalls auf dem gleichen Band wie die Kleinzellenanlage, war aber offensichtlich weniger ausgelastet und durch Gebäude stärker abgeschirmt.

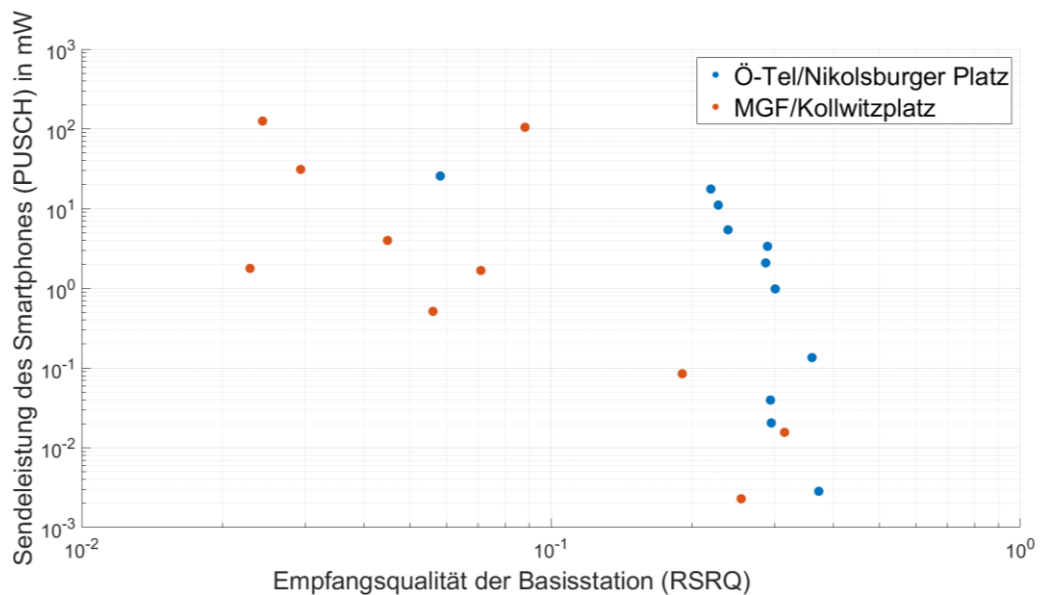


Bild 7.6: Ergebnisse der punktbasierten Messungen zur Abhängigkeit der durchschnittlichen Sendeleistung eines LTE-Smartphones (PUSCH-Sendeleistung) von der durchschnittlichen Empfangsqualität (RSRQ) des Basisstationssignals (RSRP) der Kleinzellenanlage.

Die Messergebnisse verdeutlichen, dass bei beiden untersuchten Standorten mit abnehmendem Abstand zur Kleinzellenanlage bzw. zunehmender Verbindungsqualität die Sendeleistung des Endgerätes um mehrere Zehnerpotenzen verringert wird.

Die statischen Messungen verdeutlichen also, dass im Versorgungsbereich einer Kleinzellenanlage deren Funksignalabdeckung typischerweise so gut ist, dass die Sendeleistung eines in die Anlage eingebuchten Endgerätes und damit auch die vom Endgerät am Nutzer verursachte Hochfrequenzexposition sehr deutlich verringert werden kann.



## 7.4.2 Dynamische Messungen

Neben der messpunktbasierten Bestimmung der durchschnittlichen Sendeleistungen und Empfangspegel wurde zusätzlich an beiden Kleinzellenanlagen eine Messung durchgeführt, bei der das Endgerät - wie in Bild 7.7 und Bild 7.8 dargestellt - entlang einer Strecke bewegt wurde, die jeweils entlang der statischen Messpunkte am Nikolsburger Platz und am Kollwitzplatz verläuft.

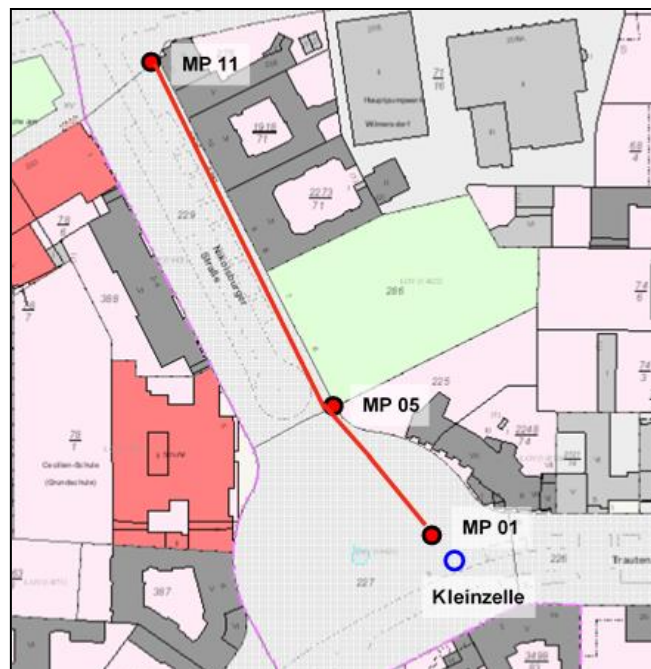


Bild 7.7: Nikolsburger Platz: Abgelaufener Weg zur zeitabhängigen Darstellung der Sendeleistung vom Endgerät in Abhängigkeit von der Empfangsleistung des Kleinzellensignals.



Bild 7.8: Kollwitzplatz: Abgelaufener Weg zur zeitabhängigen Darstellung der Sendeleistung vom Endgerät in Abhängigkeit von der Empfangsleistung des Kleinzellensignals.

Die Messung beginnt stets am weitesten vom Kleinzellenstandort entfernten Punkt (sehr geringe Empfangsleistung) und endet in unmittelbarer Nähe der Kleinzellenanlage (große Empfangsleistung).

In den Bildern 7.9 und 7.10 sind die Messergebnisse mit den entsprechenden Bezugspunkten dargestellt.

Bild 7.9 verdeutlicht, dass am Nikolsburger Platz mit abnehmendem Abstand zum Anlagenstandort die Empfangsleistung stark ansteigt und ebenso die Sendeleistung des Endgeräts deutlich abnimmt. Allerdings ist die Kurve der PUSCH Sendeleistung an einigen Stellen unterbrochen, da das Endgerät dort nicht aktiv gesendet hat. Die Ursache dafür konnte im Nachgang nicht mehr festgestellt werden. Der tendenzielle Abfall der Sendeleistung lässt sich allerdings trotzdem erkennen.

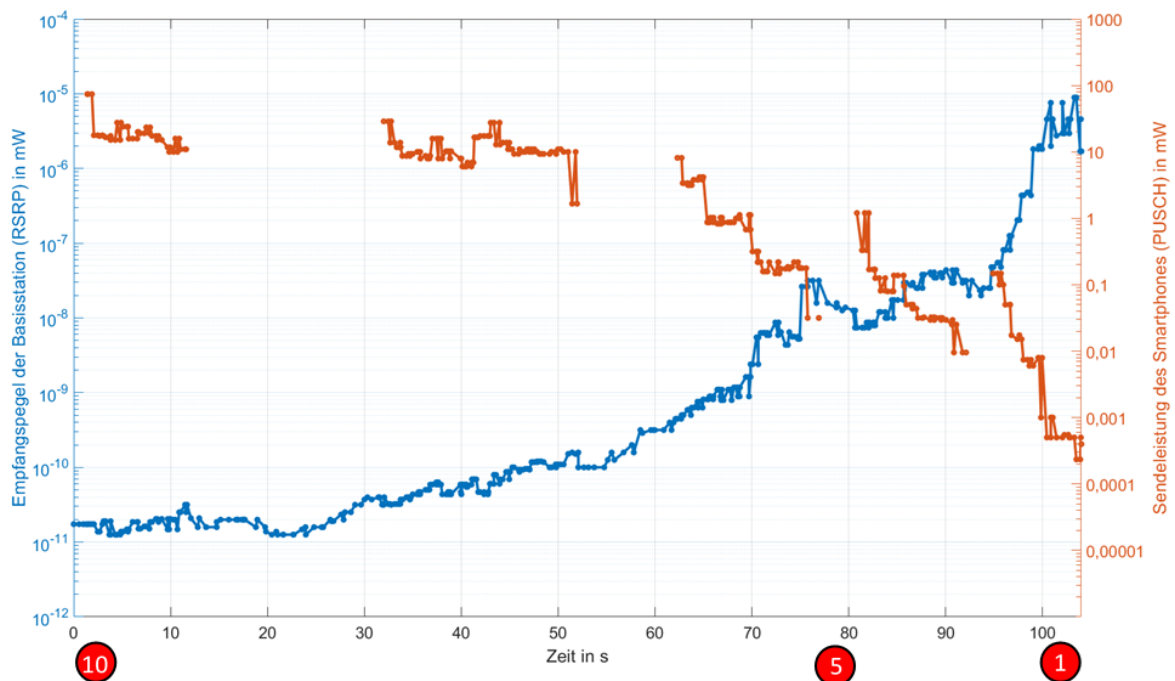


Bild 7.9: Nikolsburger Platz: Zeitliche Verläufe der Sendeleistung des Endgeräts (PUSCH, orange) sowie der vom Endgerät gemessenen Empfangspegel des Basisstationssignals der Kleinzellenanlage (RSRP, blau) entlang des abgelaufenen Weges (siehe Bild 7.7). Die Unterbrechungen der PUSCH Sendeleistung zeigen an, wann das Endgerät nicht aktiv gesendet hat.

Die Ergebnisse der dynamischen Messung am Kollwitzplatz sind in Bild 7.10 dargestellt. Im Bereich zwischen den Messpunkten 9 und 10 liegt die Sendeleistung des Endgeräts nahezu konstant bei der maximalen Ausgangsleistung (200 mW), weil die Empfangsleistung des Signals der Kleinzellenanlage dort sehr niedrig ist. Daraufhin unterliegt die Sendeleistung bis Messpunkt 7 starken Schwankungen, welche bereits in den statischen Messungen (siehe Bild 7.5) aufgetreten sind. Ab Messpunkt 7 nimmt die Sendeleistung bis zum Messpunkt 1 tendenziell um mehrere Zehnerpotenzen ab.

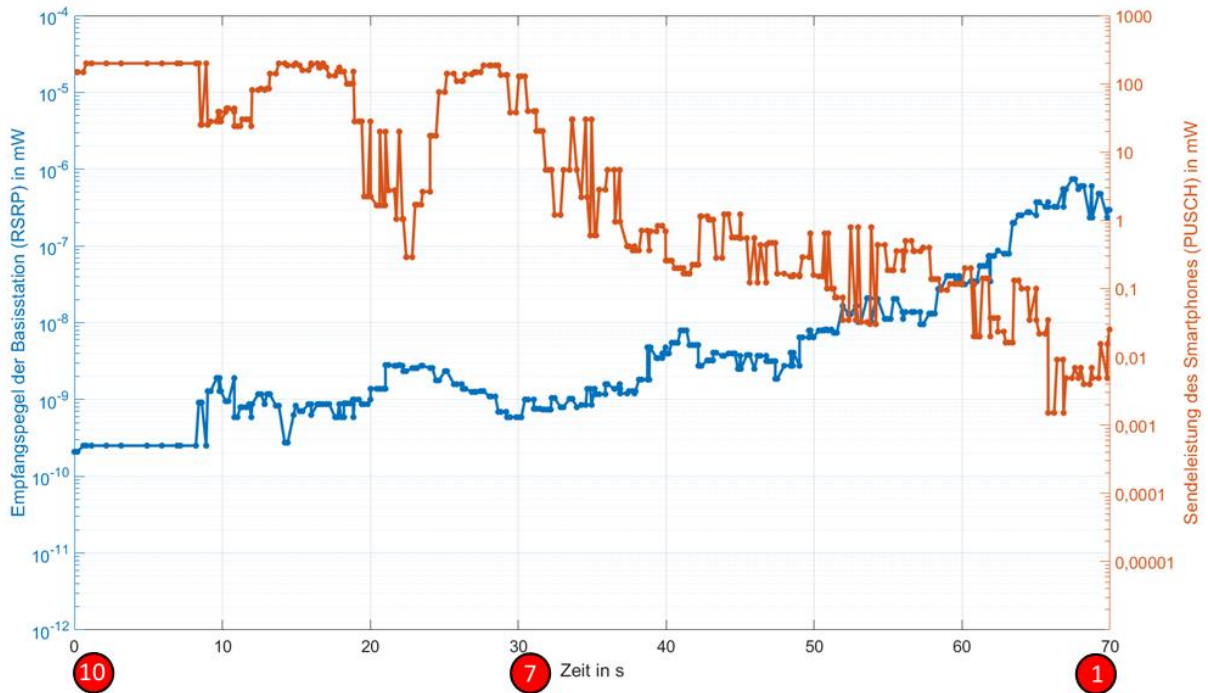


Bild 7.10: Kollwitzplatz: Zeitliche Verläufe der Sendeleistung des Endgeräts (PUSCH, orange) sowie der vom Endgerät gemessenen Empfangspegel des Basisstationssignals der Kleinzellenanlage (RSRP, blau) entlang des abgelaufenen Weges (siehe Bild 7.8).

Abschließend ist in Bild 7.11 die resultierende Abhängigkeit zwischen der Empfangsleistung des Basisstationssignals und der Sendeleistung des Endgeräts für beide untersuchte Standorte in einem gemeinsamen Bild zu sehen.

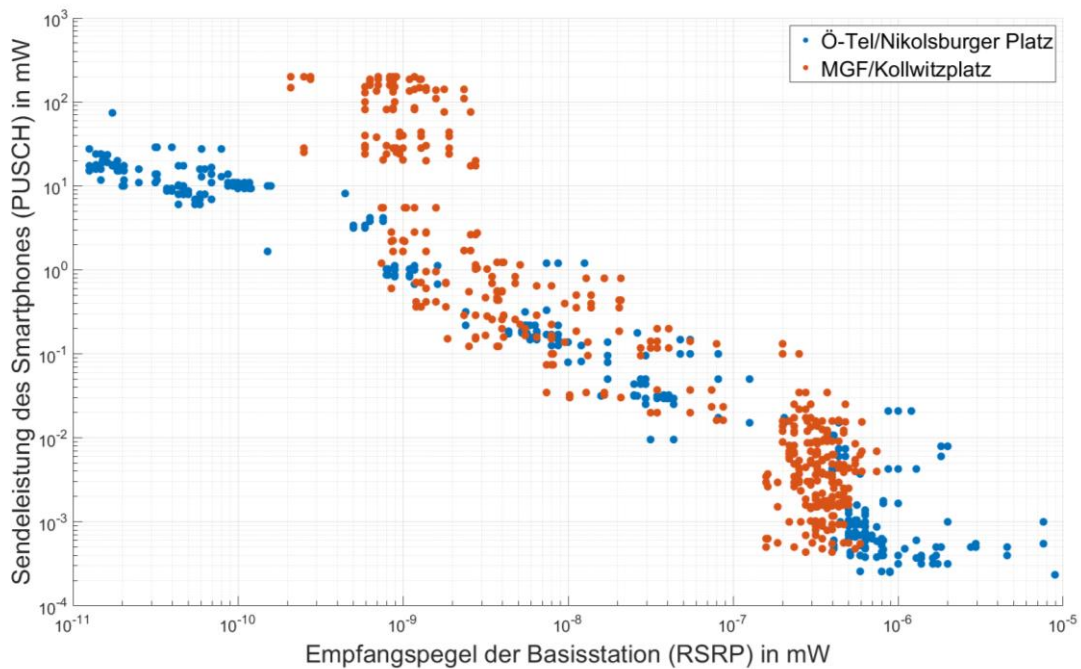


Bild 7.11: Ergebnisse der Messungen zur Abhängigkeit der aktuellen Sendeleistung eines LTE-Endgeräts (PUSCH Sendeleistung) vom aktuellen Empfangspegel des Basisstationssignals (RSRP) der beiden betrachteten Kleinzellenanlagen entlang einer abgelaufenen Wegstrecke.

Im Gegensatz zu den Messergebnissen der statischen Messungen in Abschnitt 7.4.1 wurde hier keine messpunktbasierte Mittelung der Messwerte über eine Minute durchgeführt, sondern alle über den gesamten Messzeitraum erfassten einzelnen Sendeleistungen und Versorgungspegel herangezogen. Die durchschnittliche Dauer einer Einzelmessung betrug hierbei knapp 0,2 Sekunden. Im Vergleich mit den gemittelten Werten in Bild 7.5 zeigt sich dennoch eine sehr gute Übereinstimmung der Werte aus beiden Untersuchungen. Aufgrund der fehlenden Mittelung ist die Varianz der Punkte im Regelbereich, in dem die Kurve einen sinkenden Verlauf aufweist, größer.

## 7.5 Vergleich zwischen Kleinzellen- und Makrostandort

Neben Untersuchungen zur Sendeleistungsregelung wurden zusätzlich Vergleichsmessungen der Sendeleistung des LTE-Endgeräts bei Verbindung mit der Kleinzellenanlage bzw. einer Makrobasisstation an jeweils drei statischen Messpunkten am Nikolsburger Platz und am Kollwitzplatz durchgeführt. In Bild 7.12 sind die Messpunkte dokumentiert, zudem sind der jeweilige Standort der Makrobasisstation mit den horizontalen Sektorausrichtungen sowie der Kleinzellenstandort eingezeichnet. Die Messpunkte V1 bis V3 befinden sich auf der Nikolsburger Straße, wobei nur an V1 eine Sichtverbindung zum Kleinzellenstandort besteht. Eine Sichtverbindung zur Makrobasisstation liegt nur an Messpunkt V3 vor. Am Kollwitzplatz wurden die Messpunkt V4 bis V6 mit Sichtverbindung zum Kleinzellenstandort, jedoch ohne Sichtverbindung (Vegetation) zur Makrobasisstation festgelegt. Am Standort Nikolsburger Platz wurden die Messpunkte derart gewählt, dass diese zwischen Kleinzellen- und Makrobasisstationsstandort liegen und sich mit steigender Messpunktnummer von der Kleinzellenanlage weg in Richtung zur Makrobasisstation hinbewegen. Am Kollwitzplatz nimmt der Abstand zur Kleinzellenanlage ebenfalls mit der Messpunktnummer zu, während der Abstand zur Makrobasisstation in etwa unverändert bleibt.

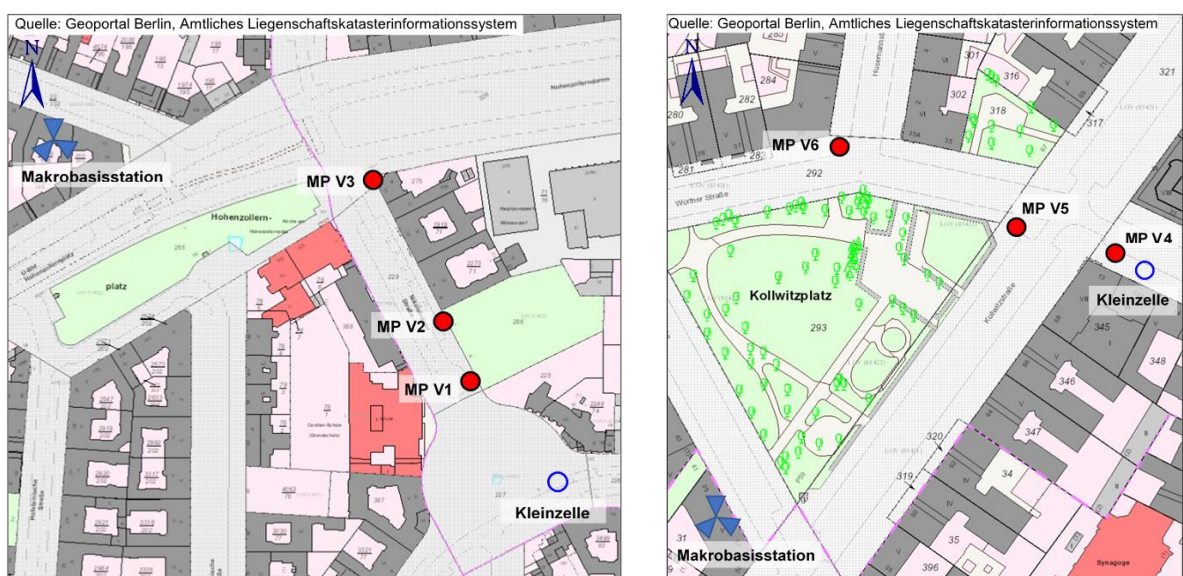


Bild 7.12: Immissionsvergleich zwischen Kleinzellen- und Makrobasisstation: Kartenübersicht der Messumgebung am Nikolsburger Platz und am Kollwitzplatz. Die blauen Dreiecke zeigen die Sektoren der Makrobasisstation, die blauen Kreise die Kleinzellenstandorte. Die roten Kreise markieren die Messpunkte.

Gemessen wurden wieder die Sendeleistungen PUSCH des Endgeräts sowie die Empfangspegel RSRP der Basisstation sowohl für den Fall, dass das Endgerät mit der Kleinzellenanlage verbunden war, als auch für den Zustand, dass es in der bezogen auf den RSRP-Pegel stärksten Makrofunkzelle eingebucht war. Da aufgrund einer starken Abschirmung der Makrobasisstation durch Häuser an der Nikolsburger Straße keine Verbindung mit der Makrobasisstation an Punkten in unmittelbarer Nähe zur Kleinzellenanlage möglich war, wurde der Messpunkt V1 relativ weit vom Standort in eine Entfernung von 81 Meter zu dieser gelegt.

In Tabelle 7.3 sind die Messpunkte mit ihrem jeweiligen Abstand und den herrschenden Sichtbedingungen zum Kleinzellenstandort und zur Makrobasisstation, sowie die Messergebnisse dokumentiert. In Bild 7.13 sind die Messergebnisse grafisch aufbereitet.

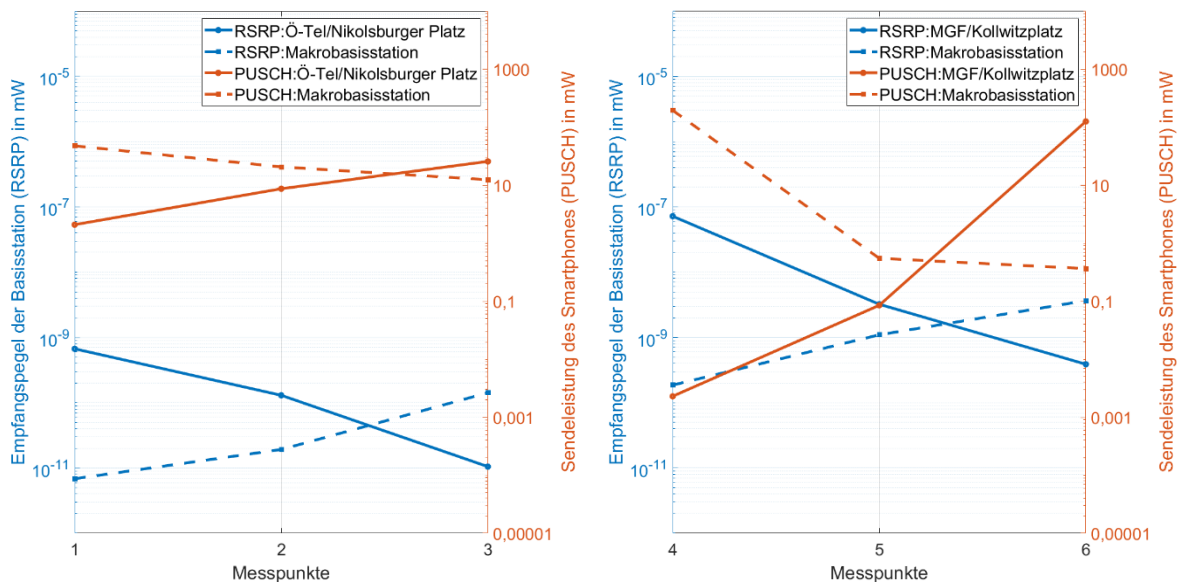


Bild 7.13: Durchschnittlicher RSRP-Empfangspegel und mittlere PUSCH Sendeleistung an jeweils drei stationären Messpunkten bei Verbindung mit der Kleinzellenanlage (durchgezogene Linien) bzw. mit der Makrobasisstation (gestrichelte Linien). Links: Messpunkte V1 bis V3 am Nikolsburger Platz. Rechts: Messpunkte V4 bis V6 am Kollwitzplatz.

Die Messungen zeigen, dass die Sendeleistung des Endgeräts bei Verbindung mit der Kleinzellenanlage mit größer werdender Entfernung zunimmt, während die Sendeleistung bei Verbindung mit der Makrozelle abnimmt. Dies spiegelt sich auch im umgekehrten Verhalten in der RSRP wider.

Es ist aus Tabelle 7.3 bzw. Bild 7.13 ersichtlich, dass die Sendeleistung des Endgeräts an den Punkten V1 und V2 bei Verbindung mit der Kleinzellenanlage unter derjenigen bei Verbindung mit der Makrobasisstation vorliegenden Sendeleistung bleibt. Erst bei Messpunkt V3 mit Sichtverbindung zur Makrobasisstation und in zirka 200 Meter Entfernung zum Kleinzellenstandort kehrt sich die Situation um. Trotzdem sendet das Endgerät bei Verbindung mit der Kleinzellenanlage in dieser Entfernung noch nicht mit der maximalen Sendeleistung (200 mW), sondern bleibt mit ca. 25 mW Sendeleistung immer noch deutlich darunter.

Am Kollwitzplatz steigt die Sendeleistung mit größer werdender Distanz zur Kleinzellenanlage deutlich stärker an, als es am Nikolsburger Platz beobachtet wurde (von 0,0023 mW auf 125,21 mW), obwohl die RSRP an Messpunkt V6 größer ist, als beispielsweise an Messpunkt V3, welcher sich in einer sehr viel größeren Entfernung zum Kleinzellenstandort (197 Meter im Vergleich zu 111 Meter) befindet. Auch hier konnte erst am Messpunkt V6 eine geringere Sendeleistung bei Kommunikation über die Makrozellenstandort im Vergleich zur Verbindung mit der Kleinzellenanlage gefunden werden. Der Unterschied ist hierbei allerdings deutlich größer als am Nikolsburger Platz.

MP	Beschreibung	Entfernung zur Basisstation in m		Sichtverbindung		Mittlere Sendeleistung (PUSCH) des Endgeräts				Mittlere Empfangsleistung (RSRP) am Endgerät			
						Kleinzellenanlage		Makro-Basisstation		Kleinzellenanlage		Makro-Basisstation	
		KZ	MB	KZ	MB	in mW	in dBm	in mW	in dBm	in mW	in dBm	in mW	in dBm
V1	Nikolsburger Straße	81	273	Ja	Nein	2,08	3,2	47,53	16,8	0,00000000067	-91,7	0,000000000068	-111,6
V2	Nikolsburger Straße	110	251	Nein	Nein	8,67	9,4	20,61	13,1	0,00000000013	-98,9	0,000000000019	-107,2
V3	Nikolsburger Straße	197	191	Nein	Ja	25,63	14,1	12,38	10,9	0,000000000011	-109,8	0,000000000014	-98,5
V4	Kollwitzplatz	10	173	Ja	Nein	0,0023	-26,4	194,41	22,9	0,000000072	-71,4	0,000000000017	-97,3
V5	Kollwitzplatz	45	151	Ja	Nein	0,085	-10,7	0,55	-2,6	0,0000000032	-84,9	0,0000000011	-89,6
V6	Kollwitzplatz	111	144	Ja	Nein	125,21	21,0	0,36	-4,4	0,00000000039	-94,1	0,0000000037	-84,4

Tabelle 7.13: Vergleich zwischen Kleinzellenanlage und Makrobasisstation: Mittlere Sendeleistung des Endgeräts und mittlerer vom Endgerät gemessener Empfangspegel der Basisstation (KZ: Kleinzellenstandort; MB: Makrobasisstationsstandort).

## 7.6 Messungen zur Leistungsregelung im LTE-Uplink: Fazit

Aus den Untersuchungen zur Sendeleistungsregelung bei LTE-Endgeräten im Umfeld zweier Kleinzellenstandorte am Nikolsburger Platz und am Kollwitzplatz in Berlin lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten:

- Die Sendeleistung des Endgeräts steigt bei sinkendem Empfangspegel des Kleinzellensignals, der sich mit zunehmendem Abstand zur Basisstation ergibt. Die Sendeleistung kann allerdings unter bestimmten Bedingungen auch bei eigentlich noch ausreichendem Empfangspegel (RSRP) ansteigen, wenn das Endgerät eine schlechte Empfangsqualität (RSRQ) feststellt. Eine derartige Situation kann beispielsweise dann auftreten, wenn eine benachbarte Makrobasisstation im gleichen Frequenzkanal sendet und am betrachteten Ort aufgrund erheblicher Auslastung eine nennenswerte Signalleistung generiert ("Interferenz").
- Bezüglich des zeitlichen Verlaufs der Sendeleistung ist erkennbar, dass diese unmittelbar an Änderungen des Versorgungspegels angepasst wird, sodass ein kurzzeitiger Einbruch des Versorgungspegels der Basisstation mit einer kleinen zeitlichen Verzögerung auch zu einer kurzzeitigen Erhöhung der Sendeleistung des Endgeräts führt.
- Der charakteristische Verlauf der Sendeleistungsregelung ergibt sich sowohl bei statischen Messungen an einzelnen Punkten, wofür die Messwerte jeweils über einen Zeitraum von einer Minute gemittelt wurden, als auch durch kontinuierliche Messungen beim Ablaufen eines sich an den Messpunkten orientierenden Weges.
- Es zeigt sich, dass ein ausreichend hoher Versorgungspegel des Basisstationssignals zu einer Reduzierung der Sendeleistung des Endgeräts um mehrere Zehnerpotenzen führen kann, wodurch gleichzeitig eine deutliche Abnahme der vom Endgerät am Nutzer verursachte Hochfrequenzexposition entsteht.

Die systematischen Vergleichsmessungen der Endgeräte-Sendeleistung bei Verbindung mit einer Kleinzellenanlage bzw. Makrobasisstation an sechs Messpunkten ergaben folgende Ergebnisse:

- An beiden untersuchten Standorten konnte beobachtet werden, dass an Punkten mit abnehmendem Abstand zum Kleinzellenstandort die mittlere Sendeleistung (PUSCH) des Endgeräts bei Kommunikation mit dem Kleinzellenstandort stark abnimmt, während gleichzeitig die Sendeleistung bei Verbindung mit der Makrozellenanlage entsprechend zunimmt. Es konnten hierbei eine Veränderung der Leistung des Endgeräts um bis zu etwa fünf Größenordnungen (d.h. zirka 50 dB) beobachtet werden.
- Am Nikolsburger Platz ergab sich hierbei eine vergleichsweise geringe Änderung der mittleren Sendeleistung des Endgerätes um etwa 11 dB (bei Kommunikation mit der Kleinzellenanlage beziehungsweise etwa 6 dB bei Verbindung mit dem Makrozellenstandort (siehe Tabelle 7.13)).



- Am Kollwitzplatz ergaben die Messungen grundsätzlich die gleiche Tendenz wie am Nikolsburger Platz, jedoch in einer deutlich stärkeren Ausprägung. Hier ändert sich die mittlere Sendeleistung des Endgerätes um etwa 47 dB (bei Kommunikation mit der Kleinzellenanlage bzw. etwa 27 dB bei Verbindung mit dem Makrozellenstandort (siehe Tabelle 7.13). Ein Grund für diesen deutlich größeren Sendeleistungsunterschied liegt in der Tatsache, dass der erste Messpunkt am Kollwitzplatz (V4) deutlich näher am Kleinzellenstandort liegt als es am Nikolsburger Platz der Fall ist, was dazu führt, dass hier das Endgerät aufgrund der um etwa 20 dB größeren Empfangsleistung die eigene Sendeleistung mehr reduzieren kann.

## 8 Zusammenfassung

Um ein genaueres Bild über die Größe und die räumliche Verteilung der von Kleinzellenmobilfunksendeanlagen ("Small Cell" Anlagen) verursachten Hochfrequenzimmissionen zu erhalten, wurden im Rahmen des hier dokumentierten Projektes in der Umgebung von verschiedenen aktuell in Betrieb befindlichen Outdoor-Kleinzellenanlagenstandorten umfangreiche Hochfrequenzfeldstärkemessungen vorgenommen. Alle untersuchten Standorte befinden sich im Stadtgebiet von Berlin. Wichtig ist hierbei, dass verschiedene Kategorien von Kleinzellenstandorten (siehe Abschnitt 3.1) in die Untersuchungen einbezogen werden.

Die Messergebnisse sollen insbesondere der Klärung folgender Fragestellungen dienen:

- *Wie groß sind die von der Kleinzellenanlage bei Maximalauslastung verursachten hochfrequenten Immissionen an verschiedenen Punkten in der näheren Umgebung des Antennenstandortes (typisch zehn Messpunkte pro Anlagenstandort)?*
- *Wie stark unterscheiden sich typisch die auf Maximalauslastung der Kleinzellenanlage hochgerechnete und die aktuell zum Zeitpunkt der Messung vorhandene Immission?*
- *Wie verändert sich die Immission mit dem Abstand zum Anlagenstandort?*
- *Wie stark ist die Kumulation der Immission bei zwei Kleinzellenanlagen ausgeprägt, die sich in unmittelbarer Nachbarschaft zu einander befinden?*
- *Wie groß sind im Vergleich die Immissionen, verursacht durch andere in der näheren Umgebung befindliche GSM-, TETRA-, UMTS- und LTE-Mobilfunksendeanlagen (vornehmlich Dachstandorte)?*
- *Welche Immissionswerte werden im Umfeld des Kleinzellenstandortes durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-Rundfunk, DAB+, DVB-T2) generiert?*
- *Mittels Messungen vor und innerhalb von benachbarten Ladengeschäften oder Gastronomiebetrieben soll zusätzlich der dämpfende Einfluss von Fensterscheiben auf die von der Kleinzellenanlage erzeugten Hochfrequenzimmissionen quantifiziert werden.*

Die Bewertung der gemessenen Immissionen basiert ausschließlich auf den Feldstärkegrenzwerten der 26. BImSchV, welche aufgrund der Zusagen der Deutschen Netzbetreiber aktuell auch für die Beurteilung von Kleinzellenanlagen mit weniger als 10 Watt EIRP im Außenbereich Anwendung finden [SB 20].

Ob neu publizierte Empfehlungen, insbesondere die ICNIRP-Guidelines aus dem Jahr 2020 zukünftig weitergehende, verfeinerte Betrachtungsweisen bei der Bewertung von Kleinzellenstandorten ermöglichen, wurde in dieser Untersuchung nicht weiter thematisiert. Hier bleibt zunächst abzuwarten, in wie weit sich die Inhalte der neuen ICNIRP-Guidelines zukünftig beispielsweise auf europäische Richtlinien und Normen auswirken werden.

Aus den in Kapitel 6 dokumentierten Ergebnissen der an insgesamt 202 Punkten durchgeführten Hochfrequenz-Immissionsmessungen können folgende Schlüsse gezogen werden:

- Die Messungen ergaben für die von den zwölf Standorten aktuell maximal abgestrahlte EIRP (1,7 bis 10 Watt) an den untersuchten Punkten Grenzwertausschöpfungen zwischen *0,1 und 28,8 Prozent*. Wobei Immissionswerte größer als 20 Prozent nur an 4 der 202 Punkte gemessen werden konnten, sie also eine große Ausnahme darstellen. Der Median über alle Punkte beträgt 2,0 Prozent (d.h. an 50 Prozent der Punkte wurde eine Grenzwertausschöpfung von maximal zwei Prozent ermittelt).
- An allen untersuchten Punkten werden die Grenzwertvorgaben der 26. BImSchV, auch bei Aufschlag der bei derartigen Messungen typischen Unsicherheit von 3 dB, *deutlich* unterschritten.
- Zur Verdeutlichung: Bei einer feldstärkebezogenen Grenzwertausschöpfung von 28,8 Prozent und einem Unsicherheitsaufschlag von 3 dB (entspricht einem Faktor von 1,41) könnte die Sendeleistung der verursachenden Anlage maximal noch um den Faktor 6 vergrößert werden, bevor die Grenzwerteinhaltung an diesem Punkt nicht mehr mit ausreichender Sicherheit nachgewiesen wäre.
- Zusätzlich an fünf der zwölf Standorte durchgeführte Messungen entlang radialer Linien mit zunehmendem Abstand zum Anlagenstandort zeigen, dass das Modell der idealen Freiraumausbreitung gut geeignet ist, die im Umfeld von Kleinzellenstandorten zu erwartenden Immissionen ausreichend konservativ abzuschätzen. Die Messungen zeigten deutlich das für die hier betrachteten Abstände zur Anlage typische Abnahmeverhalten der hochfrequenten Immission (Verdoppelung des Abstands führt zur Halbierung der Feldstärke).
- Um zahlenmäßig quantifizieren zu können, um welchen Faktor bei den in diesem Projekt betrachteten Kleinzellenanlagen der auf maximale Anlagenleistung hochgerechnete Immissionswert im Vergleich zu einer typischen Momentanimmission ausfällt, wurde an einigen Punkten in der Umgebung von zwei LTE-Kleinzellenstandorten zusätzlich die aktuelle Immission ermittelt. Die dort aktuell gemessenen Immissionen waren deutlich geringer (leistungsbezogen um etwa den Faktor 12 bis 81) als die maximal mögliche Immission. Da die Momentanimmission vom aktuellen Auslastungszustand der Anlage abhängig ist, unterliegen die Ergebnisse eines Vergleichs zwischen aktueller und maximal möglicher Immission allerdings immer einer nennenswerten Unsicherheit.
- Messungen am Standort Nr. 1, an dem zwei Kleinzellenstandorte in unmittelbarer Nachbarschaft zu einander betrieben werden (Abstand: 4,7 Meter), verdeutlichen die Kumulation der Immission beider Anlagen. Es muss hierbei aber festgehalten werden, dass es durch die Kumulation bei diesem Standort nicht zu übermäßig hohen Feldern im Bereich einer Grenzwertausschöpfung nahe oder über 100 Prozent kommt. Der größte gemessene kumulierte Maximalwert beträgt 20,3 Prozent. Ohne den Einfluss des zweiten Standortes hätte dieser Immissionswert 17,2 Prozent betragen.

- Bei allen neun Vergleichsmessungen zur Untersuchung der Dämpfungswirkung von Fensterscheiben waren die Felder hinter der Glasscheibe geringer ausgeprägt als davor. Der Unterschied lag hierbei im Bereich von etwa einem bis neun Dezibel (d.h. Schwächung der Leistung des Funksignals minimal um den Faktor 1,2 und maximal um den Faktor acht). Die Ausprägung der Scheibendämpfung ist von der Qualität der eingebauten Wärmeschutzverglasung, dem Material des Fensterrahmens und der Beschaffenheit der umgebenden Wände aber auch vom Einfallswinkel des Funksignals auf die Scheibe abhängig.
- Die von den Netzbetreibern eingeführte Einteilung von Kleinzellenstandorten in drei unterschiedliche Kategorien (A, B, C) lässt offensichtlich auch Schlussfolgerungen auf die Größenordnung der in der Umgebung maximal zu erwartenden Immissionen zu. Die geringsten Maximalimmissionen (Grenzwertausschöpfungen in der Umgebung maximal etwa 10 Prozent) wurden bei den Standorten mit *hoch montierten Antennen* gefunden (Kategorie A: Mast, Litfaßsäule bzw. Kategorie B). Im Umfeld der Telefonsäulen (Kategorie A) ergaben sich etwas größere Maximalimmissionswerte (Grenzwertausschöpfungen zwischen etwa 10 und 20 Prozent), was hauptsächlich auf die *geringere Montagehöhe der Antennen* zurückzuführen ist. Die größten Maximalimmissionswerte (feldstärkebezogene Grenzwertausschöpfungen etwa zwischen 20 und 30 Prozent und darüber) fanden sich erwartungsgemäß an den Standorten der Kategorie C, da sich dort Personen auch in *unmittelbarer Nähe zur Antenne* aufhalten können und dort dann auch Messpunkte möglich und sinnvoll waren.
- Zudem wurden an jeweils zwei Punkten pro Kleinzellenstandort auch die Immissionen erfasst, die dort durch die Emissionen von anderen in der Nachbarschaft vorhandenen Mobilfunkbasisstationen generiert werden. Es zeigte sich dabei, dass an zehn der 24 Messpunkte die Immissionen von den in der näheren Umgebung befindlichen Mobilfunkanlagen (z.B. Dachstandorte) größer oder gleich sind, als die der jeweiligen Kleinzellenanlage. Dieser Fall tritt an neun der zwölf "Fern"-Messpunkte (Entfernung zur Kleinzellenanlage: 40 bis 102 Meter) auf. An den "Nah"-Messpunkten (Entfernung zur Kleinzellenanlage: 5,5 bis 14 Meter) überwiegt an elf der zwölf Punkte noch die Immission der Kleinzellenanlage. Offensichtlich sind bereits nach einigen zehn Metern Entfernung zum Kleinzellenstandort dessen Immissionen so stark abgeklungen, dass die Felder, verursacht durch die in der näheren Umgebung befindlichen Dachstandorte bereits überwiegen.
- Neben dem Mobilfunk wurden an jeweils einem Punkt pro Kleinzellenstandort auch die Immissionen erfasst, die dort durch die Emissionen von "sonstigen" ortsfesten Funksendeanlagen generiert werden. Es wurde hierbei der Frequenzbereich von 27 MHz bis 6 GHz betrachtet. Es zeigt sich, dass an den Punkten die Immissionen, verursacht durch Rundfunksender (UKW, DAB+, DVB-T2) dominierend sind. Der Einfluss der Rundfunksenderstandorte Alexanderplatz, Scholzplatz und Schöneberg ist an vielen Messpunkten vorhanden. Die Messungen ergaben, dass an sechs der zwölf Messpunkte die Immission durch sonstige (Rundfunk-) Sendeanlagen größer oder gleich sind, als die der jeweiligen Kleinzellenanlage. Allerdings muss angemerkt werden, dass die Messpunkte mit im Mittel etwa 51 Meter vergleichsweise weit von der Kleinzellenanlage entfernt sind.

- Ergänzend durchgeführte Messungen der Sendeleistung eines Endgerätes zeigen deutlich, dass der von der Kleinzellenanlage generierte Signalpegel im Regelfall zu einer deutlichen Reduzierung der Sendeleistung des Endgerätes im Umfeld des Kleinzellenstandortes führt, was wiederum zu einer Abnahme der durch das Endgerät am Nutzer erzeugten Hochfrequenzexposition führt.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1999/519/EG] **1999/519/EG**, *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz – 300 GHz)*, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften L199/59, 30.07.1999.
- [26. BImSchV] **26. BImSchV**, *Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV)*, BGBl. Jg. 2013 Teil I Nr. 50, 21.08.2013.
- [50413:2009] **DIN EN 50413 (VDE 0848-1)**, *Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)*, August 2009.
- [50413:2020] **DIN EN 50413 (VDE 0848-1)**, *Grundnorm zu Mess- und Berechnungsverfahren der Exposition von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)*, Oktober 2020.
- [ACMA 20] **Australian Communications and Media Authority (ACMA)**, *Electromagnetic energy (EME) measurements near small cell base stations, Summary of results*, Canberra, Melbourne, Sydney, 2020.
- [ANFR 18] **Agence Nationale des Fréquences (ANFR)**, *Rapport technique sur le déploiements pilotes de petites antennes en France*, 2018.
- [BNetzA 20] **BNetzA MA 09/EMF/01**, *Vorläufige Messanweisung des Prüf- und Messdienstes für EMVU-Messungen im Rahmen des Standortbescheinigungsverfahrens*, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen (BNetzA), Referat 511, Mainz 03/2020.
- [BS 20] **C. Bornkessel und L.-M. Schilling**, *Immissionsuntersuchungen an einer Mobilfunk-Kleinzelle*, Abschlussbericht, erstellt für die Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe Berlin, 2020.
- [BV 21] **F. Baum und N. Vogel**, *Messung der Mobilfunkstrahlung der Kleinzelle Bäckeranlage Zürich*, Messbericht für das Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kantons Zürich, 2021.
- [CHM+ 19] **A. Chobineh, Y. Huang, T. Mazloum, E. Conil, and J. Wiart**, *Statistical model of the human RF exposure in small cell environment*, Annals of Telecommunications (2019) 74:103-112, 2019.
- [EU 2021] **M Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks (SCHEER)**, Request for a scientific Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF), [https://ec.europa.eu/health/system/files/2021-07/scheer\\_q\\_023\\_0.pdf](https://ec.europa.eu/health/system/files/2021-07/scheer_q_023_0.pdf), zuletzt besucht am 02.02.2022
- [HO 19] **J. Higashiyama and T. Onishi**, *“EMF exposure evaluation for manhole type base stations”*, URSI AP-RASC 2019, New Delhi, India, March 2019.

- [ICNIRP 1998] **ICNIRP Guidelines 1998**, *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)*, Health Physics, vol. 74 no. 4, S. 494-522, 1998.
- [ICNIRP 2020] **ICNIRP Guidelines 2020**, *Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)*, Health Physics, vol. 118 no. 5, pp. 483-524, 2020.
- [IEC 62232] **IEC 62232 ED3.0**, *Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure*, Committee Draft for Vote (CDV), International Electrotechnical Commission (IEC), TC 106, 07/2021.
- [IEC 62669] **IEC/TR 62669 Ed. 2.0**, *Case studies supporting IEC 62232 - Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure*, Draft Technical Report (DTR), International Electrotechnical Commission (IEC), 12/2018.
- [KBH+ 17] **T. Kopacz, C. Bornkessel, M. Hein, and D. Heberling**, *Investigation of LTE user equipment transmit power control and comparison of uplink exposure between small and macro cell environment*, BioEM2017, Hangzhou, China, 2017.
- [LAI 14] **Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI)**, *Hinweise zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV)*, Stand 22.10.2014.
- [MAJ+ 19] **T. Mazloum, S. Aerts, W. Joseph, and J. Wiart**, *RF-EMF exposure induced by mobile phone operating in LTE small cells in two different urban cities*, Annals of Telecommunications (2019) 74:35-42, 2019.
- [MFE+ 17] **T. Mazloum, B. Fetouri, N. Elia, E. Conil, C. Grangeat, and J. Wiart**, *Assessment of RF human exposure to LTE small- and macro-cells: UL case*, 2017 European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), 2017.
- [SCF 20] **Small cells and health**, Small Cell Forum, Document 001.10.02, Mai 2020.
- [SE 20] Fortschreibung der Selbstverpflichtung gegenüber der Bundesregierung aus dem Jahr 2001 mit dem Schwerpunkt "Kleinzellen" der Deutschen Telekom Technik GmbH, Telefónica Germany GmbH & Co. OHG, Vodafone GmbH und Drillisch Netz AG, 2020.
- [WUS 19] **M. Wuschek**, *Measuring RF Electromagnetic Fields at Mobile Communications Base Stations and Broadcast Transmitter Sites*, Narda Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen 2019.
- [WVR 19] **M. J. van Wyk, J. C. Visser, and C. W. le Roux**, *Measurement of EMF exposure around small cell base station sites*, Radiation Protection Dosimetry (219), vol. 184 no. 2, pp. 2115-215, 2019.

## 10 Detaildokumentation der Messorte und -ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Immissionsmessungen an den zwölf untersuchten Kleinzellen-Anlagenstandorten genauer beschrieben. Es finden sich hier sowohl jeweils eine Dokumentation Messpunkte als auch die ermittelten Immissionswerte (beim Mobilfunk: hochgerechnet auf maximale Anlagenauslastung) in tabellarischer und zum Teil grafischer Form. Die detaillierten Excel-Auswertetabellen der durchgeführten Messungen und eine Fotodokumentation werden dem Auftraggeber elektronisch als Dateien zur Verfügung gestellt.

### 10.1 Standort 1: Straße des 17. Juni 100

Am Standort 1 befindet sich eine Telefonsäule der Telekom, in deren Spitze in einer Höhe von etwa 2,3 Meter Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. In unmittelbarer Nähe zur Telefonsäule (Entfernung etwa 4,7 Meter) sind an einem Laternenmast in einer Höhe von mehr als drei Meter zwei Sektorantennen angebracht, welche die Umgebung mit GSM-900-Signalen versorgen. Betreiber dieser zweiten Mobilfunk-Kleinzellenanlage ist Vodafone. Es handelt sich bei beiden Installationen jeweils um Anlagen der Kategorie A.

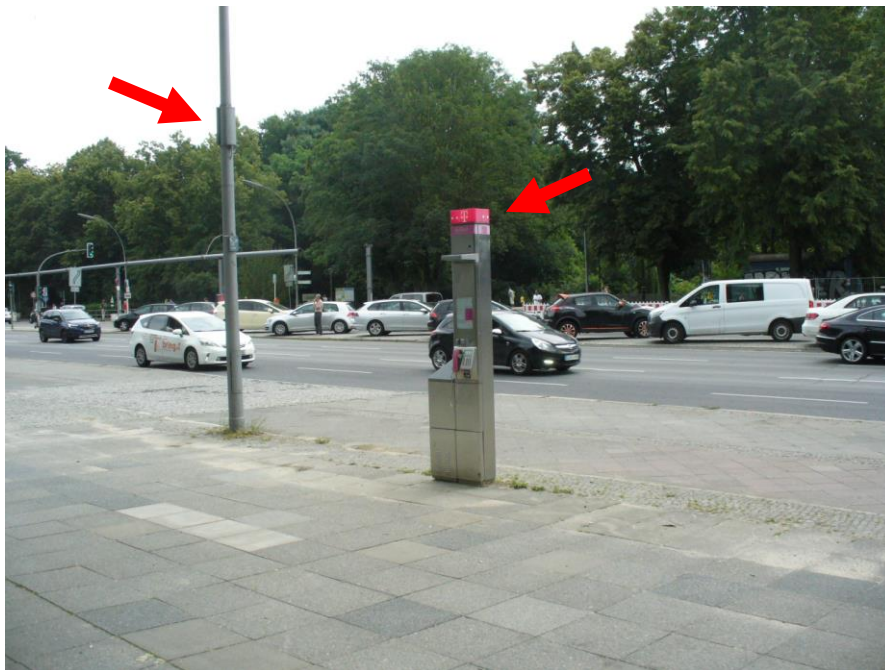


Bild 10.1.1: Standort 1: Antennen der Kleinzellenanlagen (links: Vodafone; rechts: Telekom).

Es handelt sich hier um den einzigen Standort der Messkampagne, an dem zwei Kleinzellenanlagen in unmittelbarer Nähe zu einander betrieben werden. Zudem befinden sich auf der gegenüberliegenden Straßenseite in etwa 40 Meter Entfernung - ebenfalls montiert an einem Laternenmast - weitere Antennen für die GSM-900-Versorgung (Betreiber: Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zwölf Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 8 und 96 Meter) mit und ohne direkte Sicht zur Anlage sowie zwei Linienmessungen durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.1.2 dokumentiert.





Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage*	Sichtverbindung zur Anlage
01.10	Burger King (außen), direkt vor MP 09	ca. 51 m	nein
01.11	Burger King (vor Drive-In-Ausgabe)	ca. 29 m	ja
01.12	Ampelkreuzung Straße des 17. Juni - Klopstockstraße	ca. 96 m	ja

Tabelle 10.1.1: Standort 1: Beschreibung der Messpunkte (\*: Telefonsäule).

Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen entlang zweier Messlinien durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren:

Messlinie L1: Parallel zur Straße in Richtung Westen, beginnend an der Vodafone-Anlage (Laternenmast). Die Länge der Linie beträgt 20 Meter.

Messlinie L2: Senkrecht von der Straße in Richtung Norden, beginnend an der Telekom-Anlage (Telefonsäule). Die Länge der Linie beträgt sechs Meter.

Der Verlauf der Messlinien ist in Bild 10.1.2 eingezeichnet.

Tabelle 10.1.2 dokumentiert die durch die beiden Kleinzellenanlagen an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
01.01	7,5 %
01.02	7,1 %
01.03	4,3 %
01.04	4,2 %
01.05	1,2 %
01.06	2,7 %
01.07	1,6 %
01.08	2,9 %
01.09	1,5 %
01.10	3,5 %
01.11	3,0 %
01.12	2,2 %

Tabelle 10.1.2: Standort 1: Durch die Kleinzellenanlagen in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlagen generieren an den untersuchten Punkten in der näheren Umgebung Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **1,0 und 7,5 Prozent**.

In Tabelle 10.1.3 sind die Ergebnisse der Messungen entlang der beiden Messlinien dokumentiert.

Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)	Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
L1-1m	10,6 %	L2-1m	17,6 %
L1-2m	12,1 %	L2-2m	11,5 %
L1-3m	17,8 %	L2-3m	10,1 %
L1-4m	20,3 %	L2-4m	8,7 %
L1-5m	19,7 %	L2-5m	7,5 %
L1-6m	19,7 %	L2-6m	6,9 %
L1-7m	16,7 %	-	-
L1-8m	13,4 %	-	-
L1-10m	11,2 %	-	-
L1-12m	9,9 %	-	-
L1-14m	7,9 %	-	-
L1-16m	7,7 %	-	-
L1-18m	7,9 %	-	-
L1-20m	5,8 %	-	-

Tabelle 10.1.3: Standort 1: Immissionsverlauf entlang der beiden Messlinien L1 und L2. Die in der ersten Spalte angegebenen Horizontalentfernungen beziehen sich bei L1 den Standort von Vodafone (Laternenmast), bei L2 auf die Telefonsäule der Telekom.

Die größten Immissionen (maximale Grenzwertausschöpfung: **20,3 Prozent**) ergaben sich im Bereich der Messlinie L1 zwischen den beiden Anlagenstandorten, jedoch näher an der Telefonsäule, da dort die Antennen niedriger montiert sind.

In den Bildern 10.1.3 und 10.1.4 sind die Ergebnisse der Linienmessungen visualisiert.

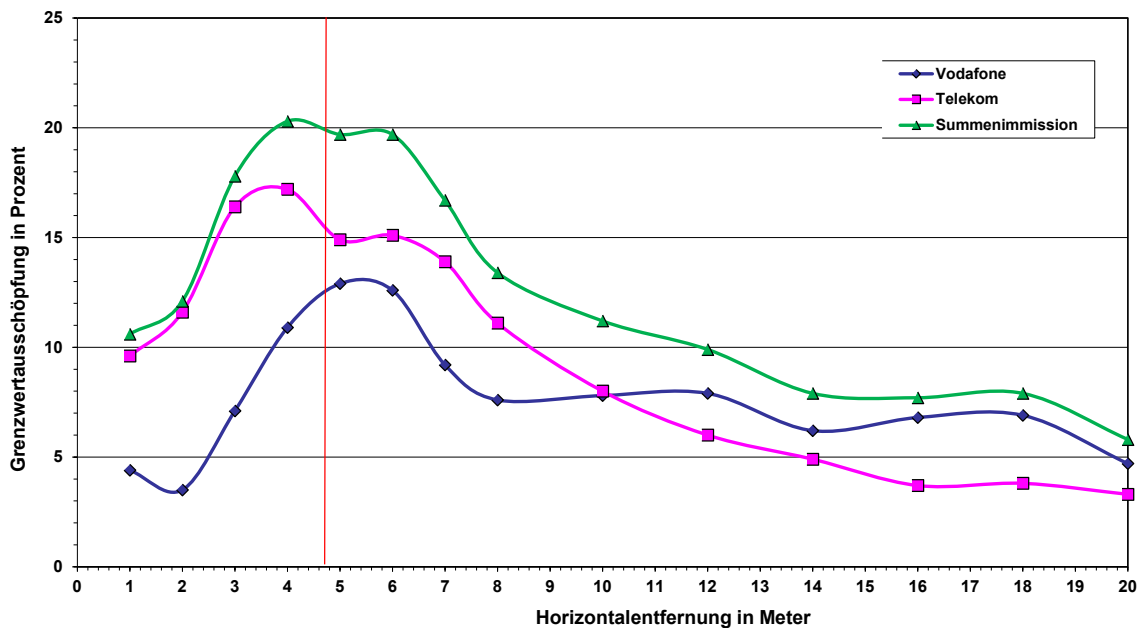


Bild 10.1.3: Standort 1: Immissionsverteilung entlang der Messlinie L1. Die rote Linie in obiger Grafik gibt die Position der Telefonsäule an. Der zweite Standort (Laternenmast) befindet sich am Nullpunkt des Diagramms.

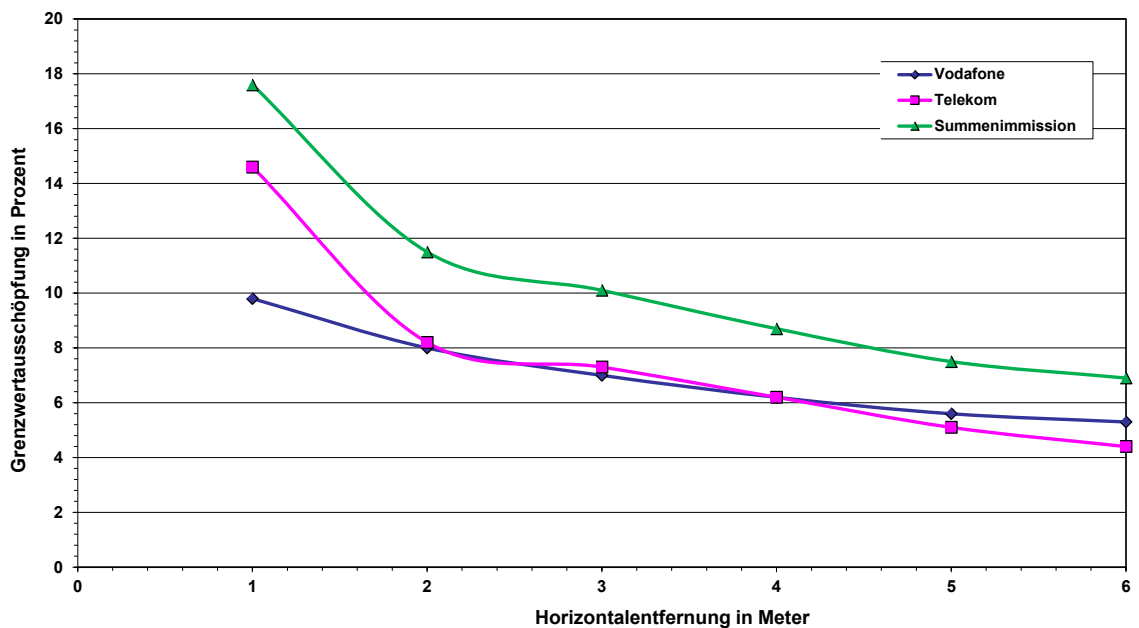


Bild 10.1.4: Standort 1: Immissionsverteilung entlang der Messlinie L2. Die Telefonsäule befindet sich am Nullpunkt des Diagramms.

In Tabelle 10.1.4 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)</b>	<b>Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)</b>
01.01	3,7 %	-
01.12	3,0 %	0,9 %

Tabelle 10.1.4: Standort 1: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.2 Standort 2: Potsdamer Straße 59

Am Standort 2 befindet sich eine Telefonsäule der Telekom, in deren Spitze in einer Höhe von etwa 2,3 Meter Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie A.



Bild 10.2.1: Standort 2: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 0,5 und 102 Meter) mit direkter Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.2.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 02.04 und 02.10** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 02.10** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

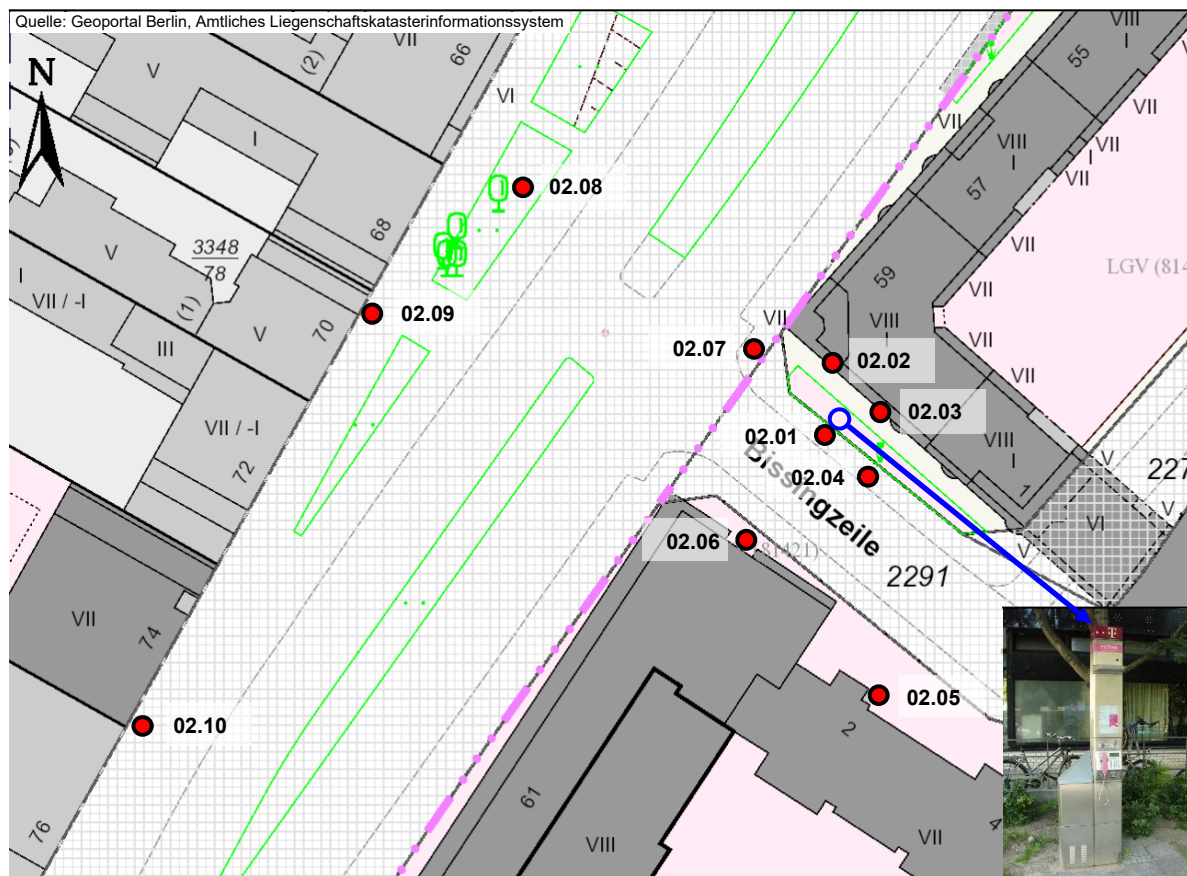


Bild 10.2.2: Standort 2: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
02.01	Gehweg (direkt vor Telefonsäule)	ca. 0,5 m	ja
02.02	Potsdamer Straße 59 (Hauseingang, auf der Treppe)	ca. 5 m	ja
02.03	Potsdamer Straße 59 (vor Eingang Spielothek)	ca. 6 m	ja
02.04	Bissingzeile (neben Parkscheinautomat)	ca. 9 m	ja
02.05	Bissingzeile 2 (vor Hauseingang)	ca. 36 m	ja
02.06	Potsdamer Straße 61 (vor Nebeneingang Bissingzeile)	ca. 16 m	ja
02.07	Potsdamer Straße / Einmündung Bissingzeile (Gehweg)	ca. 11 m	ja
02.08	Potsdamer Straße 66 / 68 (neben U-Bahn-Lüftungsschacht)	ca. 49 m	ja
02.09	Potsdamer Straße 70 (Hofeinfahrt)	ca. 48 m	ja
02.10	Potsdamer Straße 74 (vor Eingang Hotel)	ca. 102 m	ja

Tabelle 10.2.1: Standort 2: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.2.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
02.01	13,8 %
02.02	5,7 %
02.03	5,2 %
02.04	3,3 %
02.05	1,2 %
02.06	2,2 %
02.07	3,4 %
02.08	0,7 %
02.09	0,9 %
02.10	0,4 %

Tabelle 10.2.2: Standort 2: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,4 und 13,8 Prozent**. Die größte Immission ergab sich am Messpunkt mit der geringsten Entfernung zur Anlage (Punkt 02.01).

In Tabelle 10.2.3 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

Punkt Nr.	Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)	Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)
02.04	1,7 %	-
02.10	2,3 %	0,7 %

Tabelle 10.2.3: Standort 2: Gemessenen Hintergrundimmissionen.



### 10.3 Standort 3: Potsdamer Straße 88

Am Standort 3 befindet sich eine Telefonsäule der Telekom, in deren Spitze in einer Höhe von etwa 2,3 Meter Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie A.



Bild 10.3.1: Standort 3: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalfentfernungen (zwischen 0,5 und 54 Meter) mit direkter Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.3.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 03.01 und 03.10** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Aufgrund des geringen Abstandes von **Messpunkt 03.01** zu **Messpunkt 02.10** erfolgte dort keine separate Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender). Es wird stattdessen für Punkt 03.01 das Ergebnis von Punkt 02.10 übernommen.

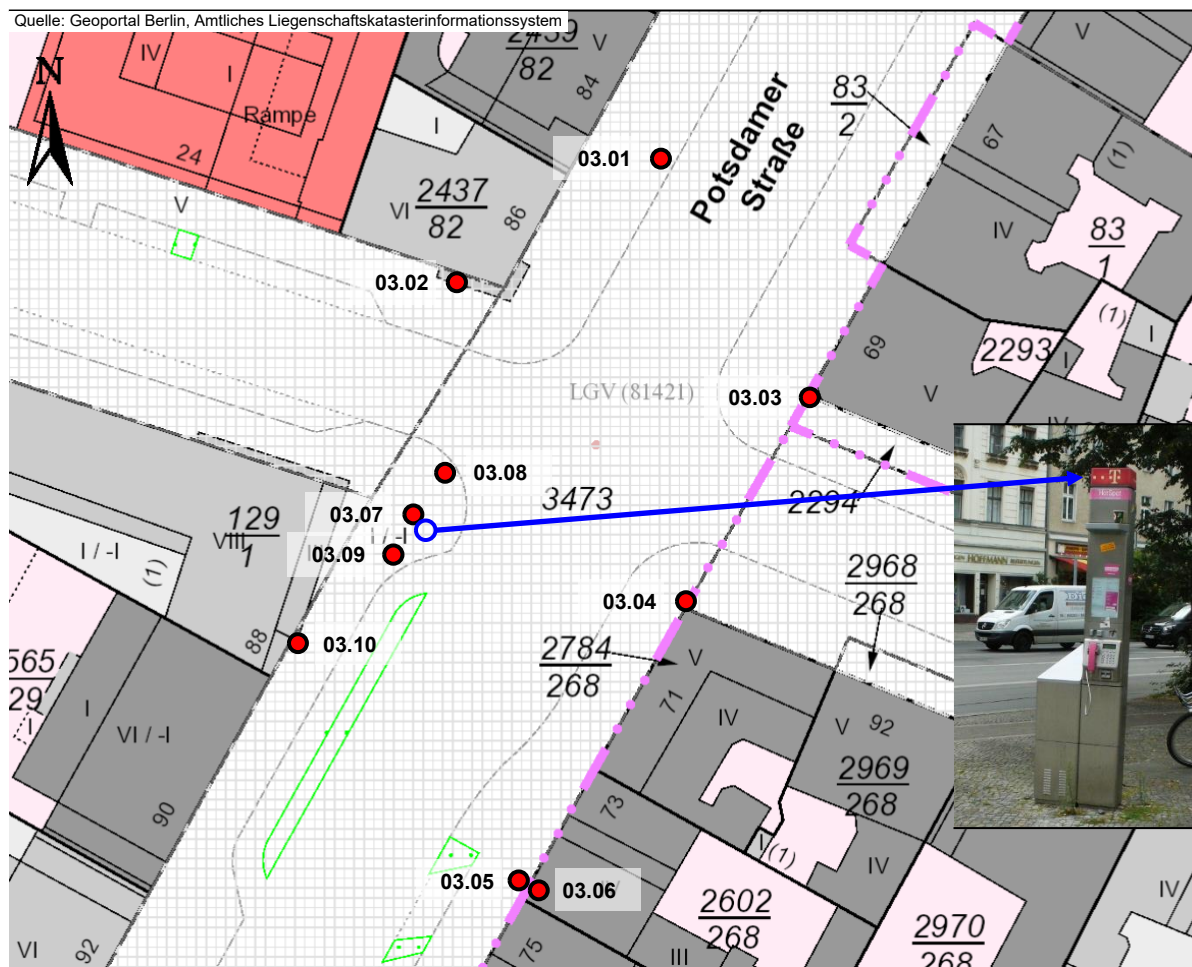


Bild 10.3.2: Standort 3: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
03.01	Bushaltestelle vor Potsdamer Straße 84	ca. 54 m	ja
03.02	Potsdamer Straße 84 (vor Eingang)	ca. 31 m	ja
03.03	Potsdamer Straße 69 (vor Eingang Gaststätte)	ca. 47 m	ja
03.04	Potsdamer Straße 71 (vor Eingang Bäckerei)	ca. 32 m	ja
03.05	Potsdamer Straße 73 (vor Eingang Bestattungsinstitut)	ca. 39 m	ja
03.06	Potsdamer Straße 73 (Bestattungsinstitut innen am Fenster)	ca. 40 m	ja
03.07	Gehweg (direkt vor Telefonsäule)	ca. 0,5 m	ja
03.08	Gehweg nördlich Telefonsäule	ca. 9 m	ja
03.09	Gehweg südlich Telefonsäule	ca. 6 m	ja
03.10	Potsdamer Straße 88 (vor Eingang)	ca. 14 m	ja

Tabelle 10.3.1: Standort 3: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.3.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
03.01	0,8
03.02	1,6
03.03	1,2
03.04	2,2
03.05	1,3
03.06	0,7
03.07	14,1
03.08	4,1
03.09	5,6
03.10	3,5

Tabelle 10.3.2: Standort 3: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,7 und 14,1 Prozent**. Die größte Immission ergab sich am Messpunkt mit der geringsten Entfernung zur Anlage (Punkt 03.07).

In Tabelle 10.3.3 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

Punkt Nr.	Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)	Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)
03.01	2,3 %	0,7 %
03.10	3,4 %	-

Tabelle 10.3.3: Standort 3: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.4 Standort 4: Eislebener Straße 10

Am Standort 4 befindet sich eine Litfaßsäule, in deren Dach in einer Höhe von mehr als drei Meter Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. Betreiber der Anlage ist die Telekom. Es handelt sich hier um eine Anlage der Kategorie A.



Bild 10.4.1: Standort 4: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an elf Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalfentfernungen (zwischen 5 und 70 Meter) mit und ohne direkte Sicht zur Anlage sowie zwei Linienmessungen durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.4.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 04.01** und **04.11** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 04.11** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).



Bild 10.4.2: Standort 4: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
04.01	Nahe Einfahrt Straße, zwischen Metallsäulen	ca. 5,5 m	ja
04.02	Erste Parkbucht im Hof hinter Eislebener Str. 12	ca. 26 m	nein
04.03	Vor Eingangstür Massagecenter Eislebener Str. 13	ca. 32 m	ja
04.04	Gegenüberliegende Straßenseite, vor Eingang Eislebener Str. 9	ca. 24 m	ja
04.05	Links neben Parkscheinautomat, vor Eislebener Str. 10	ca. 12 m	ja
04.06	Gastro Außenbereich vor erster Scheibe Eislebener Str. 10, unterhalb Gebäudevorsprung	ca. 21 m	ja
04.07	Gastro Innenbereich, direkt hinter der Scheibe aus MP04.06	ca. 22 m	ja
04.08	Eingangstür ContiPark, Rankestraße 13	ca. 63 m	ja
04.09	Parkbucht gegenüber Rankestraße 23, nahe der Straße, Litfaßsäule knapp an Gebäudeecke vorbei sichtbar	ca. 60 m	ja (knapp)
04.10	Tür neben Tor Einfahrt Parkhaus, Eislebener Str. 11	ca. 20 m	ja
04.11	Vor Restaurant Dormero / Rotary Club, Eislebener Str. 14, mittig vor der Treppe Hauptportal	ca. 70 m	ja

Tabelle 10.4.1: Standort 4: Beschreibung der Messpunkte.

Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen entlang zweier Messlinien durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren:

Messlinie L1: Parallel zur Straße in Richtung Nordwesten, beginnend an der Litfaßsäule. Die Länge der Linie beträgt elf Meter.

Messlinie L2: Von der Litfaßsäule in Richtung andere Straßenseite (wegen parkender Autos im Winkel von ca. 120° zu Linie L1). Die Länge der Linie beträgt elf Meter.

Der Verlauf der Messlinien ist in Bild 10.4.2 eingezeichnet.

Tabelle 10.4.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
04.01	5,7 %
04.02	0,7 %
04.03	1,4 %
04.04	1,3 %
04.05	2,3 %
04.06	1,6 %
04.07	1,3 %
04.08	0,7 %
04.09	0,4 %
04.10	2,0 %
04.11	0,5 %

Tabelle 10.4.2: Standort 4: Durch die Kleinzellenanlagen in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten in der näheren Umgebung Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,4 und 5,7 Prozent**. Die größte Immission ergab sich am Messpunkt mit der geringsten Entfernung zur Anlage (Punkt 05.07).

In Tabelle 10.4.3 sind die Ergebnisse der Messungen entlang der beiden Messlinien dokumentiert.

Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)	Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
L1-1m	5,3 %	L2-1m	3,8 %
L1-3m	4,4 %	L2-3m	5,4 %
L1-5m	5,1 %	L2-5m	3,1 %
L1-7m	3,8 %	L2-7m	3,4 %
L1-9m	3,2 %	L2-9m	3,0 %
L1-11m	3,2 %	L2-11m	2,7 %

Tabelle 10.4.3: Standort 4: Immissionsverlauf entlang der beiden Messlinien L1 und L2.

Die größten Immissionen (maximale Grenzwertausschöpfung: **5,3 Prozent**) ergaben sich im Bereich der Messlinie L1 sehr nahe am Anlagenstandort.

Im Bild 10.4.3 sind die Ergebnisse der Linienmessungen visualisiert.

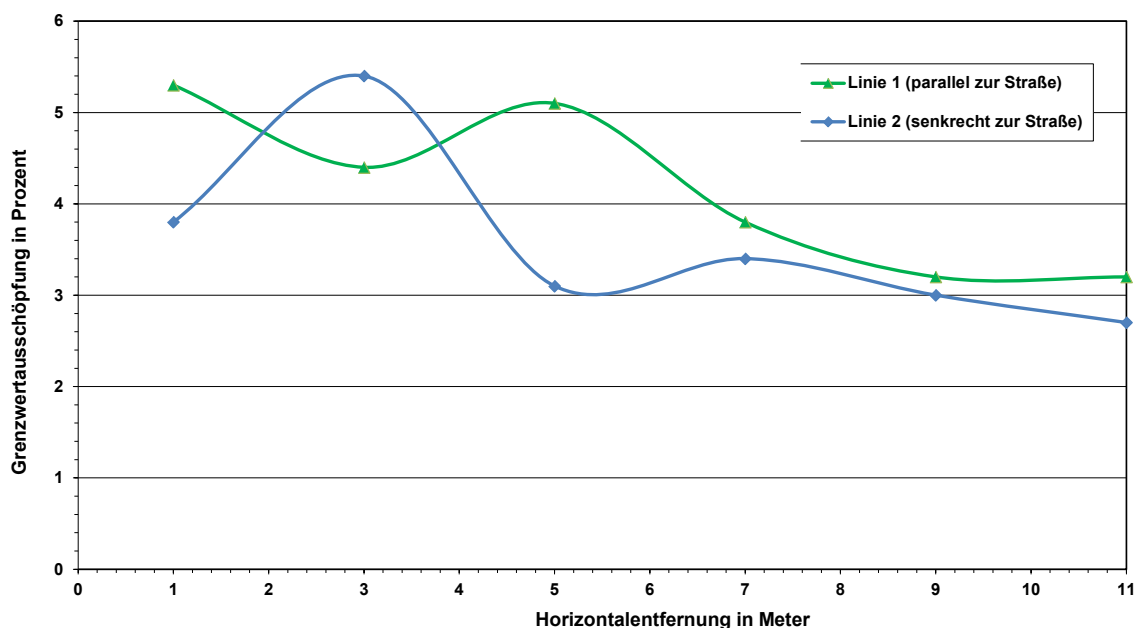


Bild 10.4.3: Standort 4: Immissionsverteilung entlang der Messlinien L1 und L2. Die Außenhülle der Litfaßsäule befindet sich am Nullpunkt des Diagramms.

In Tabelle 10.4.4 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)</b>	<b>Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)</b>
04.01	1,6 %	-
04.11	1,9 %	0,2 %

Tabelle 10.4.4: Standort 4: Gemessenen Hintergrundimmissionen.



## 10.5 Standort 5: Trautenaustraße 6

Am Standort 5 befindet sich eine Telefonsäule der Telekom, in deren Spitze in einer Höhe von etwa 2,3 Meter Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie A.



Bild 10.5.1: Standort 5: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 1 und 77 Meter) mit direkter Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.5.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 05.02** und **05.08** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 05.02** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

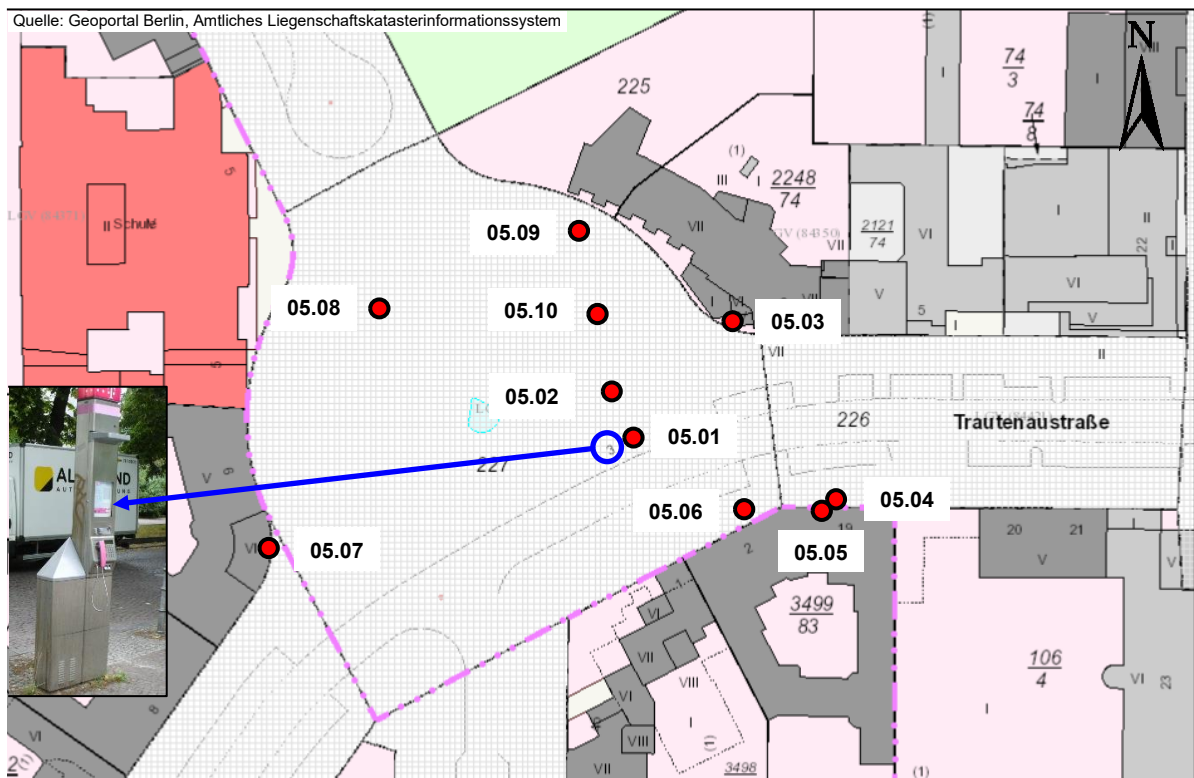


Bild 10.5.2: Standort 5: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
05.01	Nikolsburger Platz (direkt vor der Telefonsäule)	ca. 1 m	ja
05.02	Nikolsburger Platz (Kanaldeckel)	ca. 6 m	ja
05.03	Trautenaustraße 6 (vor Hauseingang)	ca. 21 m	ja
05.04	Trautenaustraße 19 (vor Eingang Hotel)	ca. 30 m	ja
05.05	Trautenaustraße 19 (im Teeladen hinter der Fensterscheibe)	ca. 31 m	ja
05.06	Nikolsburger Platz 2 (vor Restaurant)	ca. 19 m	ja
05.07	Nikolsburger Platz 6 (vor Restaurant)	ca. 67 m	ja
05.08	Nikolsburger Platz 5 (Bäume, 13 m vor Eingang Cäcilienstraße)	ca. 66 m	ja
05.09	Nikolsburger Platz (Laterne)	ca. 38 m	ja
05.10	Nikolsburger Platz (nördlich Telefonsäule)	ca. 18 m	ja

Tabelle 10.5.1: Standort 5: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.5.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
05.01	21,6 %
05.02	5,9 %
05.03	1,7 %
05.04	1,1 %
05.05	0,2 %
05.06	5,2 %
05.07	0,5 %
05.08	0,7 %
05.09	1,6 %
05.10	2,3 %

Tabelle 10.5.2: Standort 5: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,2 und 21,6 Prozent**. Die größte Immission ergab sich am Messpunkt mit der geringsten Entfernung zur Anlage (Punkt 05.01).

In Tabelle 10.5.3 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

Punkt Nr.	Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)	Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)
05.02	0,6 %	0,2 %
05.08	0,6 %	-

Tabelle 10.5.3: Standort 5: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.6 Standort 6: Babelsberger Straße 45

Am Standort 6 befindet sich eine Litfaßsäule, in deren Dach in einer Höhe von mehr als drei Meter Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. Betreiber der Anlage ist die Telekom. Es handelt sich hier um eine Anlage der Kategorie A.



Bild 10.6.1: Standort 6: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 2,5 und 53 Meter) mit direkter Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.6.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 06.02** und **06.06** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 06.02** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).



Bild 10.6.2: Standort 6: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
06.01	Babelsberger Straße 45 (Schachtabdeckung auf Gehweg)	ca. 2,5 m	ja
06.02	Babelsberger Straße 45 (Gehweg gegenüberliegende Seite)	ca. 13 m	ja
06.03	Babelsberger Straße 45 (vor Hauseingang)	ca. 7,5 m	ja
06.04	Babelsberger Straße 46 (vor Hauseingang)	ca. 24 m	ja
06.05	Babelsberger Straße 47 (vor Hauseingang)	ca. 45 m	ja
06.06	Babelsberger Straße 6 (links neben Hofeinfahrt)	ca. 49 m	ja
06.07	Babelsberger Straße 45 (vor Ladeneingang)	ca. 17 m	ja
06.08	Badensche Straße 46 (vor Ladeneingang Glaserei)	ca. 49 m	ja
06.09	Badensche Straße 46 (außen vor Schaufenster Glaserei)	ca. 52 m	ja
06.10	Badensche Straße 46 (Schaufenster Glaserei innen)	ca. 53 m	ja

Tabelle 10.6.1: Standort 6: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.6.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
06.01	3,8 %
06.02	1,5 %
06.03	3,8 %
06.04	1,4 %
06.05	0,5 %
06.06	0,8 %
06.07	2,2 %
06.08	0,8 %
06.09	0,8 %
06.10	0,1 %

Tabelle 10.6.2: Standort 6: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,1 und 3,8 Prozent**. Die größte Immission ergab sich an den beiden Messpunkten mit der geringsten Entfernung zur Anlage (Punkte 06.01 und 06.03).

In Tabelle 10.6.3 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

Punkt Nr.	Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)	Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)
06.02	0,5 %	0,2 %
06.06	0,5 %	-

Tabelle 10.6.3: Standort 6: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.7 Standort 7: Alexanderstraße

Am Standort 7 befindet sich ein Holzmast, an dem in einer Höhe von mehr als drei Meter zwei Antennen für eine GSM-900-Versorgung der Umgebung installiert sind. Betreiber der Anlage ist Vodafone. Es handelt sich hier um eine Anlage der Kategorie A.



Bild 10.7.1: Standort 7: Antennen der Kleinzellenanlage (Vodafone).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 7,5 und 72 Meter) mit und ohne direkte Sicht zur Anlage sowie zwei Linienmessungen durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.7.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 07.01 und 07.10** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 07.10** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

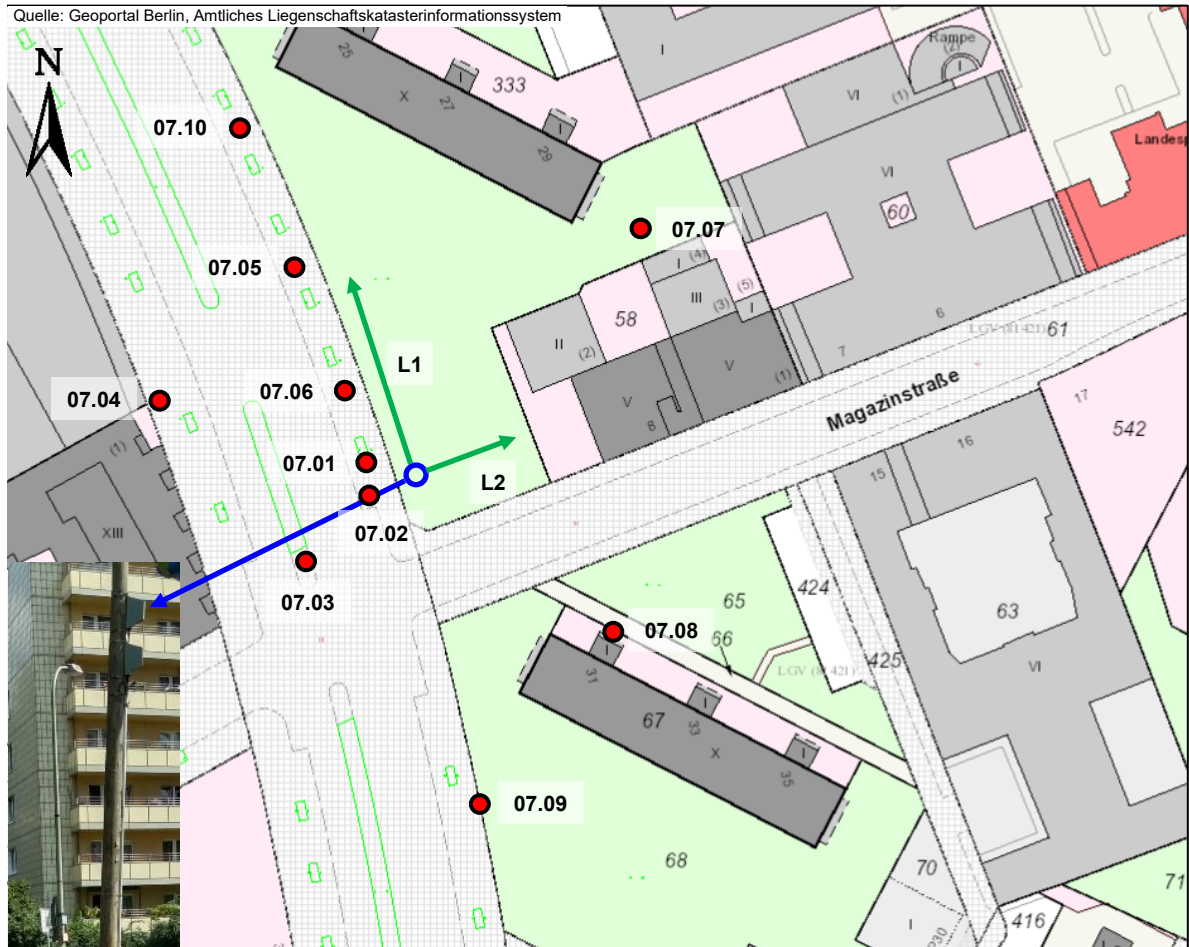


Bild 10.7.2: Standort 7: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
07.01	Alexanderstraße: Zwischen Multifunktionsgehäuse und Baum	ca. 9,5 m	ja
07.02	Alexanderstraße: Vor Mülleimer am Radweg	ca. 7,5 m	ja
07.03	Alexanderstraße: Mittelinsel Fußgängerampel	ca. 21 m	ja
07.04	Alexanderstraße: Vor rotem Pfeiler (Tiefgarageneinfahrt)	ca. 46 m	ja
07.05	Alexanderstraße: Vor Parkscheinautomat	ca. 39 m	nein
07.06	Alexanderstraße: Busersatzhaltestelle, Höhe Fußgängerweg	ca. 20 m	ja
07.07	Am Fuß der breiten Treppe, 2 m Abstand zur Graffiti-Wand	ca. 59 m	nein
07.08	Alexanderstraße 31 (vor Hauseingang)	ca. 43 m	ja
07.09	Alexanderstraße: Vor Bushäuschen, Höhe Werbetafel	ca. 52 m	nein
07.10	Alexanderstraße: Vor Sitzbank	ca. 72 m	nein

Tabelle 10.7.1: Standort 7: Beschreibung der Messpunkte.



Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen entlang zweier Messlinien durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren:

Messlinie L1: Parallel zur Alexanderstraße in Richtung Nordwesten, beginnend am Mast. Die Länge der Linie beträgt 14 Meter.

Messlinie L2: Vom Mast in Richtung Nordosten parallel zur Magazinstraße (im Winkel von ca. 90° zu Linie L1). Die Länge der Linie beträgt zehn Meter.

Der Verlauf der Messlinien ist in Bild 10.7.2 eingezeichnet.

Tabelle 10.7.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
07.01	5,7 %
07.02	5,1 %
07.03	1,3 %
07.04	0,9 %
07.05	1,6 %
07.06	3,2 %
07.07	0,2 %
07.08	1,0 %
07.09	1,0 %
07.10	0,9 %

Tabelle 10.7.2: Standort 7: Durch die Kleinzellenanlagen in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten in der näheren Umgebung Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,2 und 5,7 Prozent**. Die größte Immission ergab sich am Messpunkt 07.01 in zirka 9,5 Meter Entfernung zur Anlage.

In Tabelle 10.7.3 sind die Ergebnisse der Messungen entlang der beiden Messlinien dokumentiert.

Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)	Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
L1-1m	6,3 %	-	-
L1-2m	6,3 %	L2-2m	2,7 %
L1-3m	7,0 %	L2-3m	3,7 %
L1-4m	7,5 %	L2-4m	2,5 %
L1-6m	7,3 %	L2-6m	2,3 %
L1-8m	5,9 %	L2-8m	2,4 %
L1-10m	4,8 %	L2-10m	2,1 %
L1-12m	3,1 %	-	-
L1-14m	4,7 %	-	-

Tabelle 10.7.3: Standort 7: Immissionsverlauf entlang der beiden Messlinien L1 und L2.

Die größten Immissionen (maximale Grenzwertausschöpfung: **7,5 Prozent**) ergaben sich im Bereich der Messlinie L1 in vier Meter Entfernung zum Anlagenstandort.

Im Bild 10.7.3 sind die Ergebnisse der Linienmessungen visualisiert.

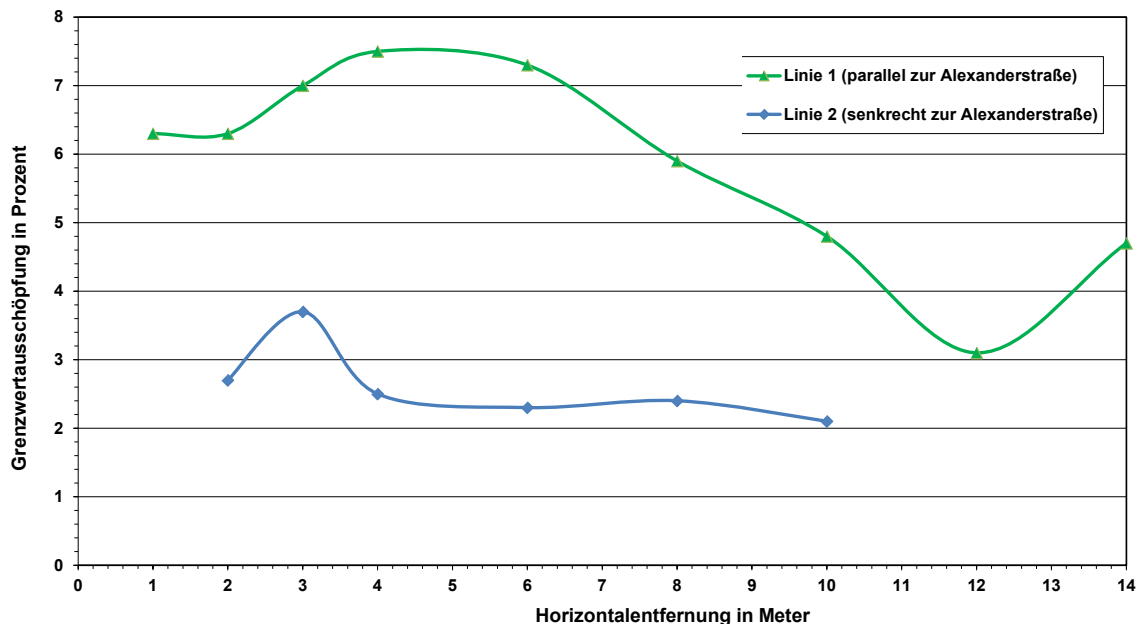


Bild 10.7.3: Standort 7: Immissionsverteilung entlang der Messlinien L1 und L2. Der Mast mit den Antennen befindet sich am Nullpunkt des Diagramms.

Deutlich ist die Richtwirkung des hier verbauten Antennentyps zu erkennen: Die Hochfrequenzenergie wird vornehmlich in horizontaler Richtung parallel zur Alexanderstraße und deutlich weniger senkrecht dazu abgestrahlt.

In Tabelle 10.7.4 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)</b>	<b>Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)</b>
07.01	2,9 %	-
07.10	2,8 %	5,8 %

Tabelle 10.7.4: Standort 7: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.8 Standort 8: Wörther Straße 13

Am Standort 8 befindet sich ein Fernmelde-Multifunktionsgehäuse der Telekom an dessen Seite in einer Höhe von etwa 1,6 Meter hinter einer Kunststoffabdeckung Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie C.



Bild 10.8.1: Standort 8: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an elf Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 0 und 55 Meter) mit direkter Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.8.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 08.05** und **08.08** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 08.08** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

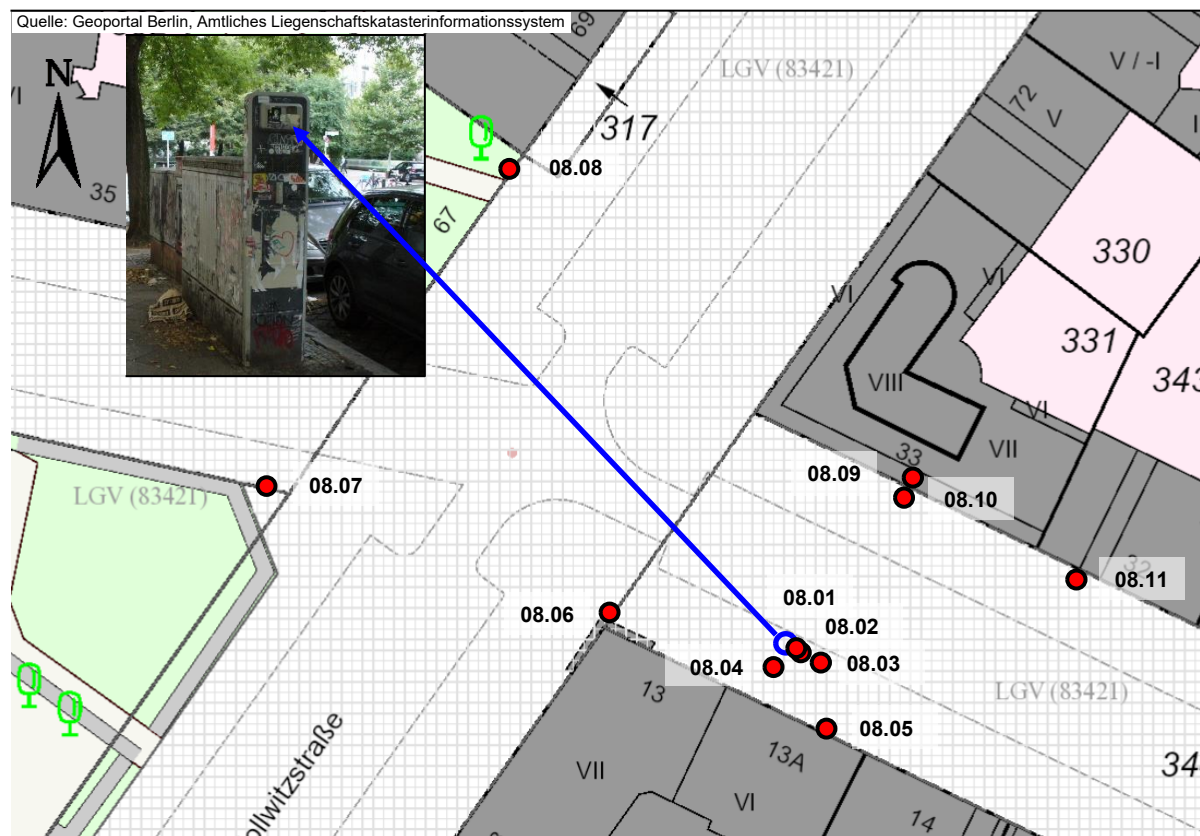


Bild 10.8.2: Standort 8: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
08.01	Direkt an der östlichen Antennenumhausung	0 m	ja
08.02	50 cm Abstand zur östlichen Antennenumhausung	ca. 0,5 m	ja
08.03	1 m Abstand zur östlichen Antennenumhausung (parallel zur Straße)	ca. 1 m	ja
08.04	1 m Abstand zur Antennenumhausung (Richtung Gebäude)	ca. 1 m	ja
08.05	Wörther Straße 13a (vor Hauseingang)	ca. 9,5 m	ja
08.06	Gehsteig an der Ecke Wörther Straße / Kollwitzstraße	ca. 19 m	ja
08.07	Kollwitzplatz (Nordosteck, nahe Metallzaun)	ca. 35 m	ja
08.08	Kollwitzstraße 69 (Sitzbänke südlich des Gebäudes)	ca. 55 m	ja
08.09	Wörther Straße 33 (Innenraum Restaurant vor Fensterscheibe)	ca. 21 m	ja
08.10	Wörther Straße 33 (Gehweg vor Fensterscheibe; siehe MP 08.09)	ca. 20 m	ja
08.11	Wörther Straße 32 (Gehweg zwischen Ladeneingang und Rolltor)	ca. 25 m	ja

Tabelle 10.8.1: Standort 8: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.8.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Zu beachten ist hierbei, dass der Messpunkt 08.01 deutlich weniger als 50 cm von metallischen Objekten entfernt ist (Sensor des Messgerätes hat direkten Kontakt mit der Antennenumhausung) und damit der in [LAI 14] für derartige Messungen geforderte Mindestabstand des Feldsensors von 50 cm zu metallischen Objekten nicht eingehalten ist. Der Messwert für diesen Punkt ist in Tabelle 10.8.2 zwar dokumentiert, er wird jedoch nicht für weitere Betrachtungen herangezogen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
08.01	(75,7 %); siehe Anmerkung in der Tabellenunterschrift!
08.02	28,8 %
08.03	16,8 %
08.04	11,3 %
08.05	2,0 %
08.06	1,5 %
08.07	0,2 %
08.08	0,4 %
08.09	0,2 %
08.10	1,3 %
08.11	0,8 %

Tabelle 10.8.2: Standort 8: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen (Anmerkung: Die für Messpunkt 08.01 dokumentierte Immission ist nicht ausreichend verlässlich und wird daher auch nicht in die weiteren Auswertungen einbezogen, denn der Messpunkt ist deutlich weniger als 50 cm von metallischen Objekten entfernt, weshalb eine unzulässige Beeinflussung der Messantenne nicht ausgeschlossen werden kann.).

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,2 und 28,8 Prozent**. Der größte gültige Messwert ergab sich in einer Entfernung von 0,5 Meter zur Antennenumhausung des Anlagenstandort (Punkt 08.02).

In Tabelle 10.8.3 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)</b>	<b>Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)</b>
08.05	1,6 %	-
08.08	3,1 %	0,9 %

Tabelle 10.8.3: Standort 8: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.9 Standort 9: Kollwitzstraße 6

Am Standort 9 befindet sich ein Fernmelde-Multifunktionsgehäuse der Telekom an dessen Seite in einer Höhe von etwa 1,6 Meter hinter einer Kunststoffabdeckung Antennen für eine LTE-Versorgung der Umgebung installiert sind. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie C.



Bild 10.9.1: Standort 9: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 0 und 55 Meter), mit und ohne direkte Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.9.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 09.01** und **09.09** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 09.10** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).



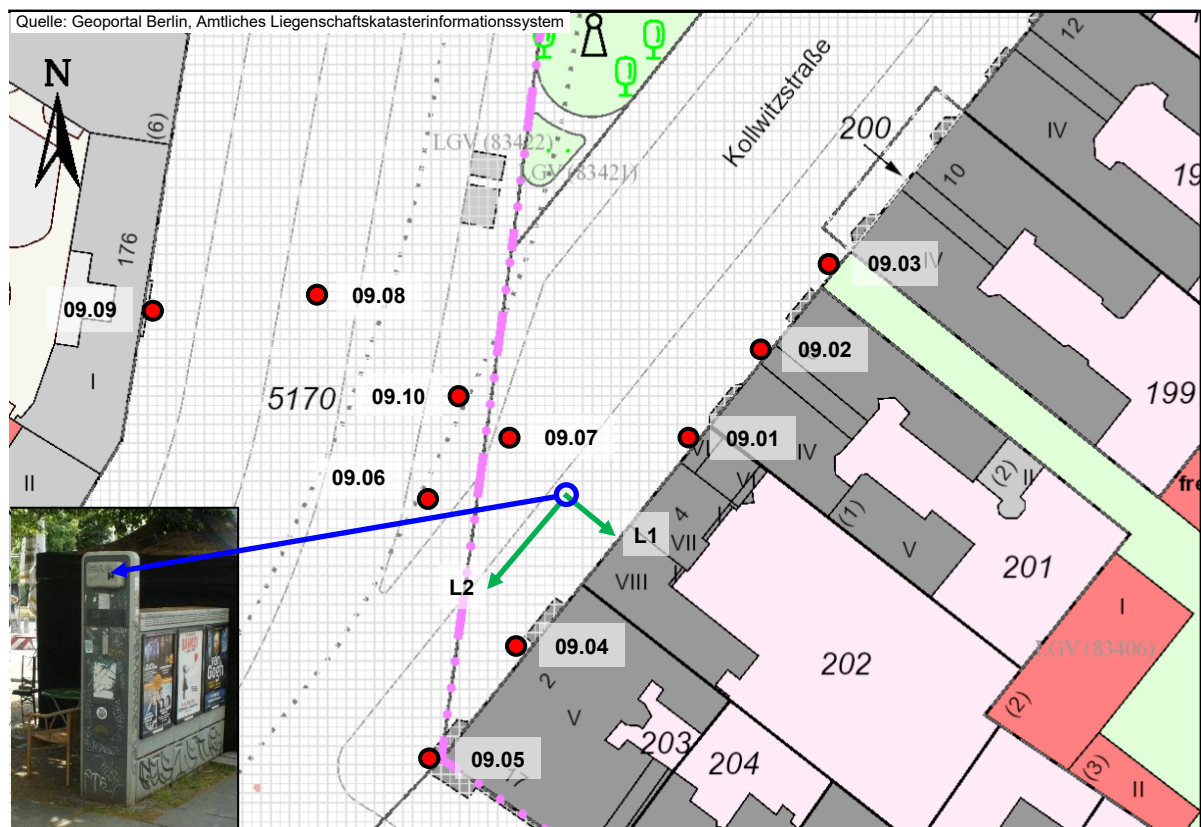


Bild 10.9.2: Standort 9: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
09.01	Kollwitzstraße 4 (links neben Rolltoreingang zum Innenhof)	Ca. 13 m	ja
09.02	Kollwitzstraße 6 (vor Hauseingang)	ca. 24 m	ja
09.03	Kollwitzstraße 8 (vor Eingang zum Innenhof)	ca. 38 m	ja
09.04	Kollwitzstraße 2 (vor Hauseingang)	ca. 24 m	ja
09.05	Ecke Kollwitzstraße / Saarbrücker Straße (Gaststätteneingang)	ca. 37 m	ja
09.06	Einmündung Kollwitzstraße in Schönhauser Allee	ca. 26 m	ja
09.07	Ende der Kollwitzstraße, nordwestlich Standort	ca. 11 m	ja
09.08	Grünstreifeninsel Schönhauser Allee	ca. 42 m	ja
09.09	Schönhauser Allee Westseite (vor Treppe zum "Pfefferberg")	ca. 40 m	nein
09.10	Sennefelder Platz (südlich U-Bahneingang)	ca. 21 m	ja

Tabelle 10.9.1: Standort 9: Beschreibung der Messpunkte.

Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen entlang zweier Messlinien durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren:

Messlinie L1: Vom Standort in Richtung zum Gebäude senkrecht zur Kollwitzstraße. Die Länge der Linie beträgt sieben Meter.

Messlinie L2: Parallel zur Kollwitzstraße in Richtung Südwesten, beginnend am Standort. Die Länge der Linie beträgt zehn Meter.

Der Verlauf der Messlinien ist in ebenfalls Bild 10.9.2 eingezeichnet.

Tabelle 10.9.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
09.01	1,2 %
09.02	0,8 %
09.03	0,7 %
09.04	0,7 %
09.05	0,5 %
09.06	0,5 %
09.07	1,8 %
09.08	0,3 %
09.09	0,2 %
09.10	1,0 %

Tabelle 10.9.2: Standort 9: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,2 und 1,8 Prozent**. Die größte Immission ergab sich am Messpunkt mit der geringsten Entfernung zur Anlage (Punkt 09.07).

In Tabelle 10.9.3 sind die Ergebnisse der Messungen entlang der beiden Messlinien dokumentiert.

Zu beachten ist hierbei, dass der Messpunkt L1-0m deutlich weniger als 50 cm von metallischen Objekten entfernt ist (Sensor des Messgerätes hat direkten Kontakt mit der Antennenumhausung) und damit der in [LAI 14] für derartige Messungen geforderte Mindestabstand des Feldsensors von 50 cm zu metallischen Objekten nicht eingehalten ist. Der Messwert für diesen Punkt ist in Tabelle 10.9.3 zwar dokumentiert, er wird jedoch nicht für weitere Betrachtungen herangezogen.

Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwert-ausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)	Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwert-ausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
L1-0m	(61,6 %); siehe Anmerkung in der Tabellen-unterschrift!	-	-
L1-0,5m	25,4 %	L2-0,5m	15,3 %
L1-1m	11,6 %	L2-1m	7,2 %
L1-2m	5,5 %	L2-2m	5,2 %
L1-4m	2,9 %	L2-4m	2,3 %
L1-6m	2,7 %	L2-6m	2,0 %
L1-7m	2,8 %	L2-8m	1,7 %
-	-	L2-10m	1,4 %

Tabelle 10.9.3: Standort 9: Immissionsverlauf entlang der beiden Messlinien L1 und L2. (Anmerkung: Die für Messpunkt L1-0m dokumentierte Immission ist nicht ausreichend verlässlich und wird daher auch nicht in die weiteren Auswertungen einbezogen, denn der Messpunkt ist deutlich weniger als 50 cm von metallischen Objekten entfernt, weshalb eine unzulässige Beeinflussung der Messantenne nicht ausgeschlossen werden kann.).

Im Bild 10.9.3 sind die Ergebnisse der Linienmessungen visualisiert.

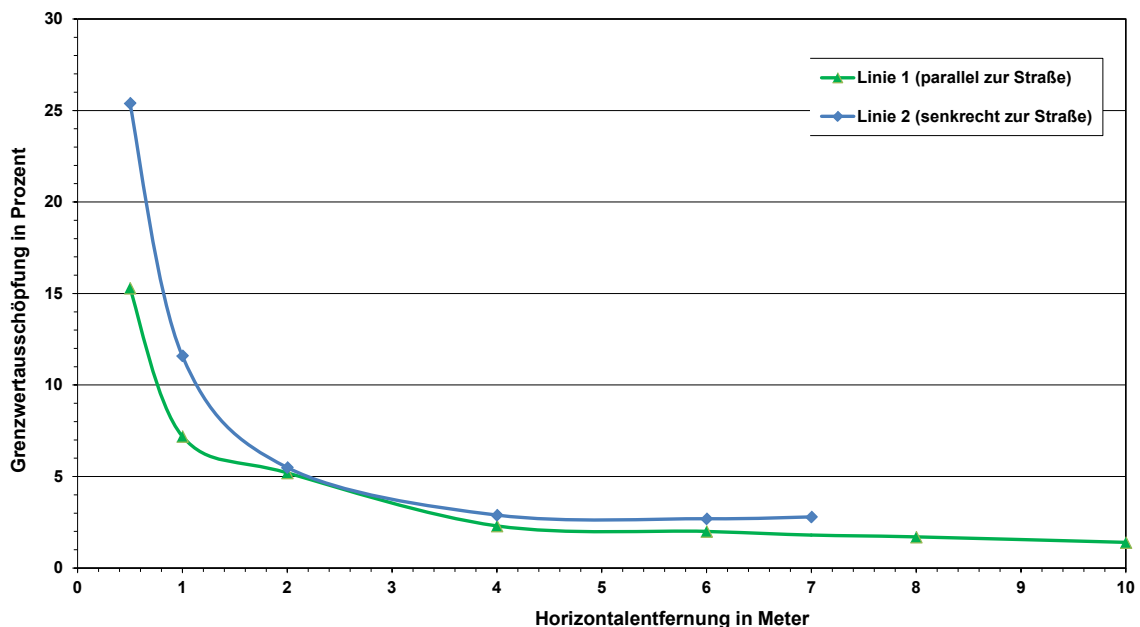


Bild 10.9.3: Standort 9: Immissionsverteilung entlang der Messlinien L1 und L2. Das Antennengehäuse stellt den Nullpunkt des Diagramms dar.

In Tabelle 10.9.4 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)</b>	<b>Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)</b>
09.01	1,2 %	-
09.09	1,9 %	-
09.10	-	4,7 %

Tabelle 10.9.4: Standort 9: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.10 Standort 10: Wittenbergplatz 2

Am Standort 10 befindet sich in einer Höhe von mehr als 3 Meter eine an der Gebäudewand montierte Sektorantenne, über die GSM-900-Signale zur Versorgung der Umgebung abgestrahlt werden. Betreiber der Anlage ist Vodafone. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie B.



Bild 10.10.1: Standort 10: Antenne der Kleinzellenanlage (Vodafone).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an zehn Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalfentfernungen (zwischen 1 und 52 Meter) mit direkter Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.10.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 10.03** und **10.06** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 10.06** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).



Bild 10.10.2: Standort 10: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
10.01	Wittenbergplatz 2 (direkt vor Hauswand unter der Antenne)	ca. 1 m	ja
10.02	Wittenbergplatz 2 (in direkter Linie vor der Antenne)	ca. 3,5 m	ja
10.03	Wittenbergplatz 2 (in direkter Linie vor der Antenne)	ca. 7 m	ja
10.04	Wittenbergplatz 2 (in direkter Linie vor der Antenne)	ca. 14 m	ja
10.05	Wittenbergplatz 2 (in direkter Linie vor der Antenne)	ca. 28 m	ja
10.06	Wittenbergplatz 2 (in direkter Linie vor der Antenne; Sitzpoller)	ca. 52 m	ja
10.07	Wittenbergplatz 3 (16 m vor Hoteleingang)	ca. 23 m	ja
10.08	Wittenbergplatz 3 (9 m vor Hoteleingang)	ca. 18 m	ja
10.09	Hausgrenze Wittenbergplatz 1 und 2 (Höhe MP 10.04)	ca. 15 m	ja
10.10	Hausmitte Wittenbergplatz 1 (Höhe MP 10.04)	ca. 22 m	ja

Tabelle 10.10.1: Standort 10: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.10.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
10.01	6,3 %
10.02	10,4 %
10.03	6,3 %
10.04	3,6 %
10.05	2,7 %
10.06	1,4 %
10.07	1,3 %
10.08	0,7 %
10.09	2,9 %
10.10	1,0 %

Tabelle 10.10.2: Standort 10: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,7 und 10,4 Prozent**. Die größte Immission ergab sich direkt vor der Antenne im Abstand von etwa 3,5 Meter (Punkt 10.02).

In Tabelle 10.10.3 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

Punkt Nr.	Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)	Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)
10.03	4,5 %	-
10.06	5,4 %	0,7 %

Tabelle 10.10.3: Standort 10: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.11 Standort 11: Grolmannstraße 48

Am Standort 11 befindet sich in einer Höhe von mehr als 3 Meter eine an der Gebäudewand montierte Sektorantenne, über die LTE-Signale zur Versorgung der Umgebung abgestrahlt werden. Betreiber der Anlage ist die Telekom. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie B.



Bild 10.11.1: Standort 11: Antenne der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an 13 Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 2 und 95 Meter) mit und ohne direkte Sicht zur Anlage durchgeführt. Zwei Messpunkte (Nr. 11.01 und 11.02) befinden sich innerhalb des Gebäudes, an dessen Fassade die Antenne montiert ist (Biomarkt): Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.11.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 11.04** und **11.13** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 11.04** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).





Bild 10.11.2: Standort 11: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
11.01	Grolmannstraße 48 (im Biomarkt hinter der Scheibe unmittelbar unter der Antenne)	ca. 2,5 m	nein
11.02	Grolmannstraße 48 (im Biomarkt vor dem Kassenbereich)	ca. 13 m	nein
11.03	Grolmannstraße 48 (Gehweg direkt unterhalb der Antenne vor der Scheibe)	ca. 2 m	ja
11.04	Grolmannstraße 48 (Laterne vor Eingang Biomarkt)	ca. 14 m	ja
11.05	Savignyplatz 1 (Litfaßsäule vor Restaurant)	ca. 25 m	ja
11.06	Savignyplatz 1 (Laterne vor Eingang Restaurant)	ca. 36 m	ja
11.07	Eingang Grünanlage, neben Steinsäule	ca. 60 m	ja
11.08	Eingangstür freistehendes WC	ca. 50 m	nein
11.09	S-Bahnbogen 589 (Restaurant Petrocelli, ca. 3 m vor Eingangstür, inmitten des Gastro Außenbereiches)	ca. 35 m	nein
11.10	Grolmannstraße (Unterführung, vor Eingang "Savigny Passage")	ca. 26 m	ja

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
11.11	Grolmannstraße 27 (vor Eingangstür)	ca. 39 m	ja
11.12	Grolmannstraße 48 (in der Grundstückeinfahrt rechts neben dem Biomarkt vor der blauen Aufzugstür, ca. 2 m vom Gebäude entfernt)	ca. 15 m	nein
11.13	Savignyplatz (an Bushaltestelle vor orangenem, freistehendem Mülleimer)	ca. 95 m	nein

Tabelle 10.11.1: Standort 11: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.11.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
11.01	1,1 %
11.02	0,3 %
11.03	4,7 %
11.04	4,9 %
11.05	2,1 %
11.06	0,8 %
11.07	0,9 %
11.08	1,4 %
11.09	1,2 %
11.10	0,5 %
11.11	0,5 %
11.12	0,4 %
11.13	0,2 %

Tabelle 10.11.2: Standort 11: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,2 und 4,9 Prozent**. Die größte Immission ergab sich im Bereich der horizontalen Hauptstrahlrichtung der Antenne im Abstand von etwa 14 Meter (Punkt 11.04).

In Tabelle 10.11.3 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)</b>	<b>Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)</b>
11.04	2,9 %	0,2 %
11.13	6,1 %	-

Tabelle 10.11.3: Standort 11: Gemessenen Hintergrundimmissionen.

## 10.12 Standort 12: Kurfürstendamm 213 - 216

Am Standort 12 befinden sich in einer Höhe von mehr als 3 Meter nahe der Gebäudewand zwei Rundstrahlantennen, über die LTE-Signale zur Versorgung der Umgebung abgestrahlt werden. Betreiber der Anlage ist die Telekom. Es handelt sich um eine Anlage der Kategorie B.



Bild 10.12.1: Standort 12: Antennen der Kleinzellenanlage (Telekom).

In der näheren Umgebung des Standortes wurden Messungen an 15 Punkten bei verschiedenen Orientierungen und Horizontalentfernungen (zwischen 2 und 84 Meter) mit und ohne direkte Sicht zur Anlage durchgeführt. Die nähere Umgebung des Standortes und die Lage der Messpunkte sind in Bild 10.12.2 dokumentiert.

An den **Messpunkten 12.08** und **12.15** wurden - zusätzlich zu den Immissionen der Kleinzellenanlage - auch die Immissionen ermittelt, die dort durch andere in der näheren Umgebung vorhandene Mobilfunkbasisstationsstandorte verursacht werden.

Am **Punkt 12.15** erfolgte außerdem eine Messung der Immissionen, verursacht durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

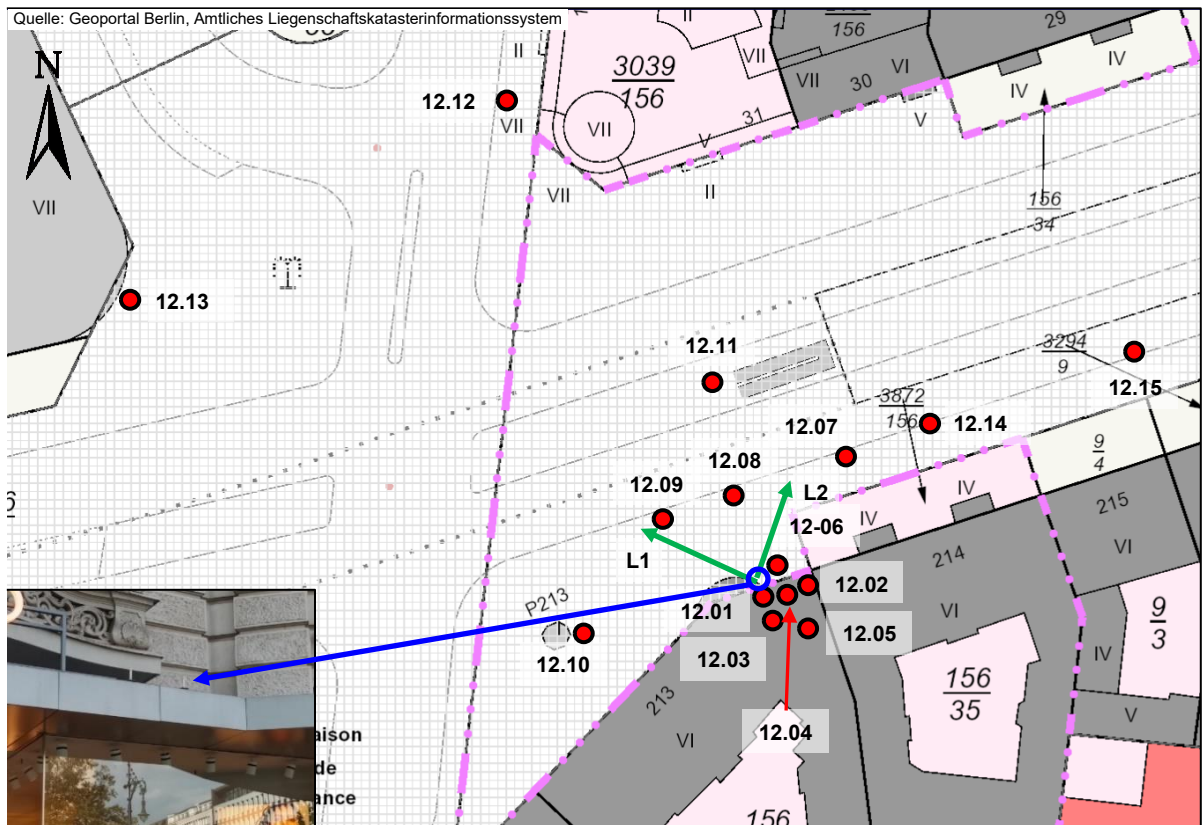


Bild 10.12.2: Standort 12: Umgebungsplan mit Anlagenstandort und Lage der Messpunkte.

Zusätzlich wurden an diesem Standort systematische Messungen entlang zweier Messlinien durchgeführt, um die Veränderung der Feldstärkewerte mit dem Abstand für den Nahbereich des Anlagenstandortes exemplarisch zu dokumentieren:

Messlinie L1: Von Standort in Richtung Nordwest (schwarzer Stromverteiler neben Bushäuschen).

Messlinie L2: Von Standort in Richtung Nordost (Fußgängerampel).

Der Verlauf der Messlinien ist in ebenfalls Bild 10.9.2 eingezeichnet.

Punkt Nr.	Beschreibung	Entfernung zur Anlage	Sichtverbindung zur Anlage
12.01	1. OG, Außenbereich Balkon Ladengeschäft "Lacoste" oberhalb des Ladenlokals "LiuJo", nächstmöglicher Standpunkt zu den Antennen	ca. 2 m	ja
12.02	1. OG, auf selbigem Balkon, entferntester Standpunkt zu den Antennen	ca. 3 m	teilweise
12.03	1. OG, im Ladenlokal "Lacoste", direkt hinter der geschlossenen Balkontür, unmittelbar hinter Messpunkt MP12.01	ca. 3 m	nein
12.04	EG, im Ladenlokal "LiuJo", direkt hinter geschlossener Glaseingangstür, unterhalb der ersten drei Messpunkte	ca. 3 m	nein

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Entfernung zur Anlage</b>	<b>Sichtverbindung zur Anlage</b>
12.05	EG, mittig im Ladenlokal "LiuJo", ca. 4 m von der Eingangstür entfernt	ca. 7 m	nein
12.06	Außenbereich vor Eingangstür "LiuJo", unterhalb des Balkons	ca. 3 m	nein
12.07	Im Buswartehäuschen vor Sitzbank	ca. 17 m	ja
12.08	Links neben Werbewürfel, frontal auf Antennenstandort blickend	ca. 5,5 m	ja
12.09	Gullideckel zwischen Fußgängerampel und Mülleimer	ca. 16 m	ja
12.10	Freistehend, ca. 2 m vor Rondell-Kiosk	ca. 22 m	nein
12.11	Vor Fahrradständer an U-Bahn Eingang Uhlandstraße Mittelinsel Kurfürstendamm	ca. 25 m	ja
12.12	Einmündung Uhlandstraße, vor Parkscheinautomat neben Spielbank	ca. 71 m	ja
12.13	Diagonal gegenüber Kreuzung, mittig vor "Douglas" Haupteingang	ca. 84 m	ja
12.14	Vor Fahrkartenautomat BVG Haltestelle, nahe Restaurant "Maredo"	ca. 27 m	ja
12.15	Kurfürstendamm 215 / 216 (vor BEX Sightseeing Haltestelle, Preisanschlagsäule)	ca. 60 m	ja

Tabelle 10.12.1: Standort 12: Beschreibung der Messpunkte.

Tabelle 10.12.2 dokumentiert die durch die Kleinzellenanlage an den Punkten in der Umgebung verursachten Immissionen.

<b>Punkt Nr.</b>	<b>Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)</b>
12.01	5,5 %
12.02	2,6 %
12.03	1,7 %
12.04	0,5 %
12.05	0,2 %
12.06	0,6 %
12.07	1,1 %
12.08	2,4 %
12.09	1,5 %

Punkt Nr.	Festgestellte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
12.10	0,3 %
12.11	0,9 %
12.12	0,3 %
12.13	0,5 %
12.14	0,6 %
12.15	0,2 %

Tabelle 10.12.2: Standort 12: Durch die Kleinzellenanlage in der Umgebung verursachte Immissionen.

Die Kleinzellenanlage generiert an den untersuchten Punkten Immissionen mit Grenzwertausschöpfungen zwischen **0,2 und 5,5 Prozent**. Die größte Immission ergab sich im Bereich der horizontalen Hauptstrahlrichtung der Antenne im Abstand von etwa zwei Meter (Punkt 12.01).

In Tabelle 10.12.3 sind die Ergebnisse der Messungen entlang der beiden Messlinien dokumentiert.

Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)	Punkt Nr.	Ermittelte Immissionswerte (Grenzwertausschöpfung in Prozent bezüglich der Grenzwerte für das elektrische Feld nach 26. BImSchV bei Maximalauslastung)
L1-3m	1,4 %	L2-3m	1,9 %
L1-4m	1,4 %	L2-4m	1,5 %
L1-5m	1,6 %	L2-5m	1,6 %
L1-6m	1,4 %	L2-6m	1,4 %
L1-7m	1,9 %	L2-7m	1,5 %
L1-8m	1,5 %	L2-8m	1,6 %
L1-9m	1,6 %	L2-9m	1,6 %
L1-10m	1,6 %	L2-10m	1,5 %

Tabelle 10.12.3: Standort 12: Immissionsverlauf entlang der beiden Messlinien L1 und L2.

Die größten Immissionen (maximale Grenzwertausschöpfung: **1,9 Prozent**) ergaben sich im Bereich der Messlinie L1 in sieben Meter und bei Messlinie L2 in drei Meter Entfernung zum Anlagenstandort.

Im Bild 10.12.3 sind die Ergebnisse der Linienmessungen visualisiert.

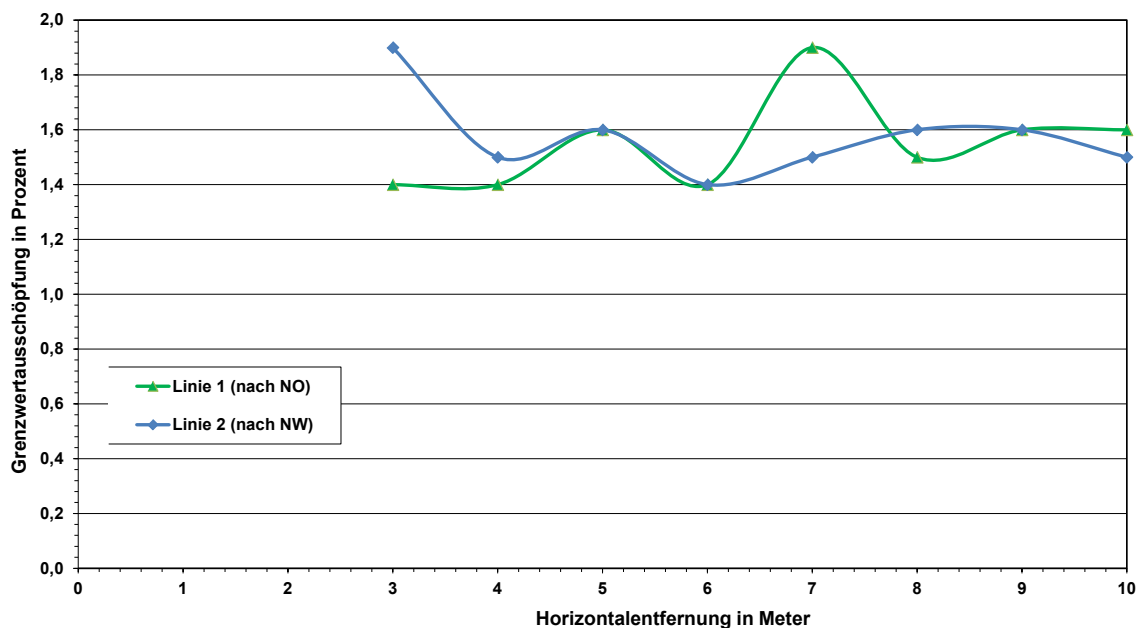


Bild 10.12.3: Standort 12: Immissionsverteilung entlang der Messlinien L1 und L2. Der Antennenstandort befindet sich am Nullpunkt des Diagramms.

In Tabelle 10.12.4 sind die Ergebnisse der zusätzlich durchgeführten Hintergrundimmissionsmessungen dokumentiert (Immissionen, verursacht durch andere Mobilfunksender bzw. "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen, z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender).

Punkt Nr.	Hintergrundimmission durch Mobilfunk (ohne die Immission verursacht durch die Kleinzellenanlage)	Hintergrundimmission durch "sonstige" ortsfeste Funksendeanlagen (z.B. UKW-, DAB- und DVB-T-Sender)
12.08	1,2 %	-
12.15	1,4 %	0,5 %

Tabelle 10.12.4: Standort 12: Gemessenen Hintergrundimmissionen.