



TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU

---

Datenschutzkonformer  
Abschlussbericht zum Projekt  
2113000385  
Version 1.0

„Immissionsuntersuchungen  
an einer Mobilfunk-Kleinzelle“

erstellt für die

Senatsverwaltung für Wirtschaft,  
Energie und Betriebe Berlin

25.03.2020

## **Projektleitung beim Auftragnehmer**

Dr.-Ing. Christian Bornkessel  
Technische Universität Ilmenau  
Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik  
Postfach 10 05 65  
98684 Ilmenau  
Tel: 03677/69-1592  
Fax: 03677/69-1586  
E-Mail: christian.bornkessel(at)tu-ilmenau.de

## **Autoren**

Dr. Christian Bornkessel, TU Ilmenau  
M. Sc. Lisa-Marie Schilling, TU Ilmenau

## **Auftraggeber**

Land Berlin,  
vertreten durch die Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe  
Referat III B –  
Innovation, Cluster, Industrie, Smart City, Digitalisierung, Kreativwirtschaft  
Martin-Luther-Straße 105  
10825 Berlin

## **Projektnummer**

2113000385

## **Inhaltsverzeichnis**

|   |          |
|---|----------|
| <b>Inhaltsverzeichnis.....</b>                          | <b>3</b> |
| <b>1 Aufgabenstellung.....</b>                          | <b>4</b> |
| <b>2 Beschreibung der Anlage und der Messungen.....</b> | <b>4</b> |
| <b>3 Ergebnisse und Dokumentation .....</b>             | <b>4</b> |
| <b>3.1 Downlink-Messungen.....</b>                      | <b>5</b> |
| <b>3.2 Uplink-Messungen.....</b>                        | <b>6</b> |
| <b>Anhang: Erläuterung zu den Grenzwerten .....</b>     | <b>7</b> |
| <b>Literaturverzeichnis.....</b>                        | <b>9</b> |

## 1 Aufgabenstellung

Das Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik der TU Ilmenau wurde von der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe Berlin beauftragt, Untersuchungen zur Größe und Verteilung der elektromagnetischen Immission an einer Mobilfunk-Kleinzelle in Berlin durchzuführen.

Die Messungen wurden im November 2019 von Herrn Dr. Chr. Bornkessel und Frau L.-M. Schilling an mehreren Messpunkten durchgeführt, die einvernehmlich zwischen der Senatsverwaltung Berlin und dem Auftragnehmer ausgewählt wurden. Alle Messpunkte befanden sich in für die Allgemeinheit zugänglichen Bereichen.

Die Vorgehensweise der Messungen und die dabei erzielten Ergebnisse sind ausführlich in [Bor 19] dokumentiert. Sie werden in vorliegendem Bericht datenschutzkonform zusammengefasst und anschaulich dargestellt.

## 2 Beschreibung der Anlage und der Messungen

Bei der untersuchten Anlage handelt es sich um eine Mobilfunk-Kleinzelle, welche in eine Trägerstruktur integriert und deren Sende- und Empfangsantenne in etwa 4 m Höhe angebracht ist. Die Anlage befindet sich in Berlin-Reinickendorf und arbeitet mit dem Mobilfunksystem LTE bei 2650 MHz. Die Messungen wurden als „Downlink-Messungen“ und „Uplink-Messungen“ durchgeführt:

Bei den *Downlink-Messungen* wurde mit Hilfe eines frequenzselektiven Immissionsmessgerätes (Narda SRM-3006) die elektromagnetische Immission an verschiedenen Messpunkten im unmittelbaren Umfeld der Kleinzelle gemessen und auf den nach 26. BImSchV geforderten Zustand bei maximaler Anlagenauslastung hochgerechnet [26. BImSchV]. Die Ergebnisangabe erfolgt in Prozent der Ausschöpfung der gesetzlichen Grenzwerte für die elektrische Feldstärke (%E). 100 %E bedeutet, dass der Grenzwert für die elektrische Feldstärke zu 100 % ausgeschöpft, also genau erreicht wird.

Bei den *Uplink-Messungen* wurden mit Hilfe eines Mobiltelefons mit Messsoftware (Rohde & Schwarz Qualipoc) an mehreren Messpunkten die Empfangsleistung durch die Mobilfunk-Kleinzelle (RSRP, *Reference Signal Received Power*) und die Sendeleistung des Mobiltelefons (*Tx Power*) gemessen, während eine 100 MB große Datei vom Mobiltelefon zu einem Server über die Mobilfunkverbindung hochgeladen wurde. Die maximale Sendeleistung des verwendeten Mobiltelefons beträgt im LTE-Betrieb 200 mW. Das Mobiltelefon wurde alternativ zur Kleinzelle auch in eine etwa 815 m entfernte Makrozelle mit LTE eingebucht. Mit diesen Messungen kann beurteilt werden, ob und wie die Verbindungsqualität zur nächsten Basisstation die durch das eigene Endgerät verursachte persönliche Exposition beeinflusst.

## 3 Ergebnisse und Dokumentation

In diesem Kapitel werden die gemessenen Werte mit Hilfe von „szenischen Darstellungen“ visualisiert. Damit soll einerseits die Übertragbarkeit der an der konkret gemessenen Kleinzelle festgestellten Immissionen auf ähnliche Szenarien ermöglicht und andererseits eine weitgehende Anonymisierung der untersuchten Anlage und Messpunkte erreicht werden.

### 3.1 Downlink-Messungen

Bild 3.1a zeigt die Messpunkte, die sich an der Trägerstruktur mit integrierter Kleinzelle (K1), etwa 15 m entfernt auf derselben Straßenseite (K2) und auf der gegenüberliegenden Straßenseite in etwa 30 m Entfernung (K3) befanden. Weiterhin wurden Messungen ca. 5 m neben der Trägerstruktur (K4) sowie im Oberdeck eines Linienbusses (K5), der sich direkt neben der Trägerstruktur (Abstand zur Kleinzelle ca. 80 cm) befand, durchgeführt.

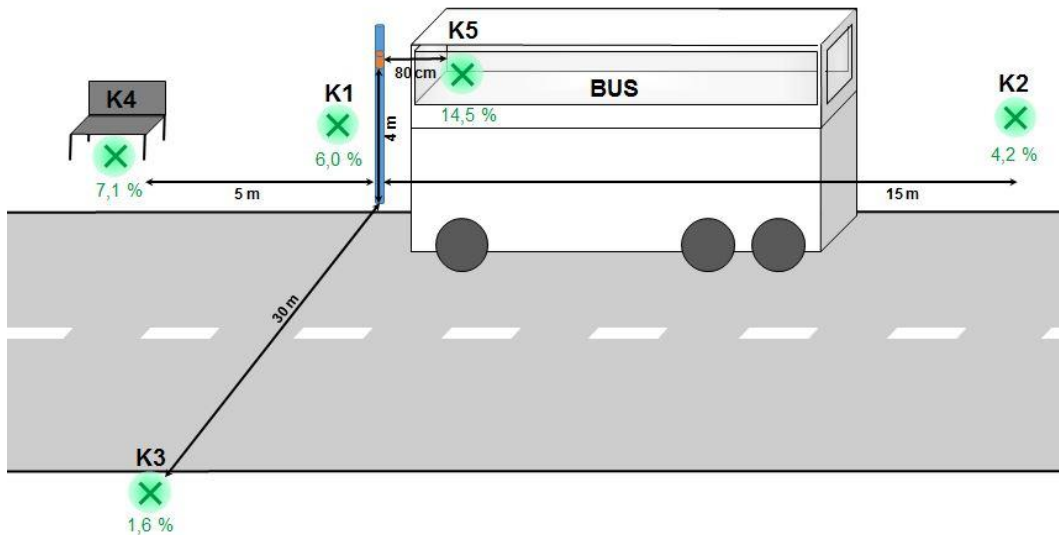


Bild 3.1a: Szenische Darstellung „Mobilfunk-Kleinzelle, Downlink“

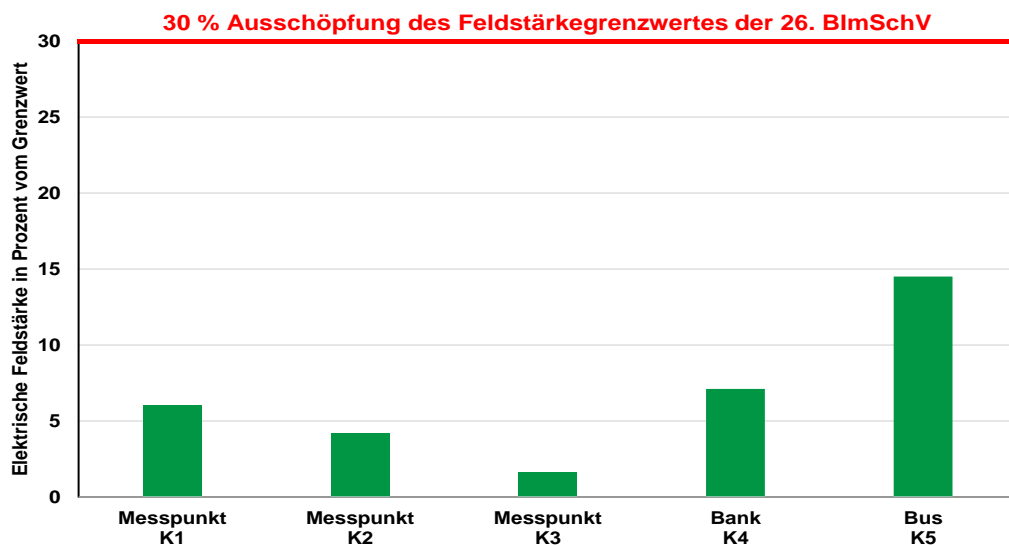


Bild 3.1b: Szenario „Mobilfunk-Kleinzelle, Downlink“; gemessene Immissionen

Die Messergebnisse zeigen gleichmäßig abnehmende Immissionen bei den drei Messpunkten K1 ... K3 mit zunehmendem Abstand. Im etwa 5 m entfernten Messpunkt K4 wurden höhere Immissionen festgestellt als direkt an der Trägerstruktur mit der Kleinzelle; dies ist auf die Abstrahlcharakteristik der Kleinzelle zurückzuführen.

Die höchsten Immissionen ergaben sich im Oberdeck des Linienbusses an einem Sitzplatz, der 80 cm von der Kleinzelle entfernt war. Aber auch dort ist der Ausschöpfungsgrad der Grenzwerte der 26. BImSchV mit 14,5 %E immer noch niedrig.

## 3.2 Uplink-Messungen

Bild 3.2 zeigt zwei ausgewählte Messpunkte der Uplink-Messungen, die sich direkt an der Kleinzelle bzw. in etwa 30 m Abstand zu dieser befanden. Beide Messpunkte haben etwa 815 m Abstand zur Makrozelle.

Die Beurteilung der Empfangsqualität erfolgt nach einem Schulnotensystem, das aus [LTE 20] entnommen wurde.

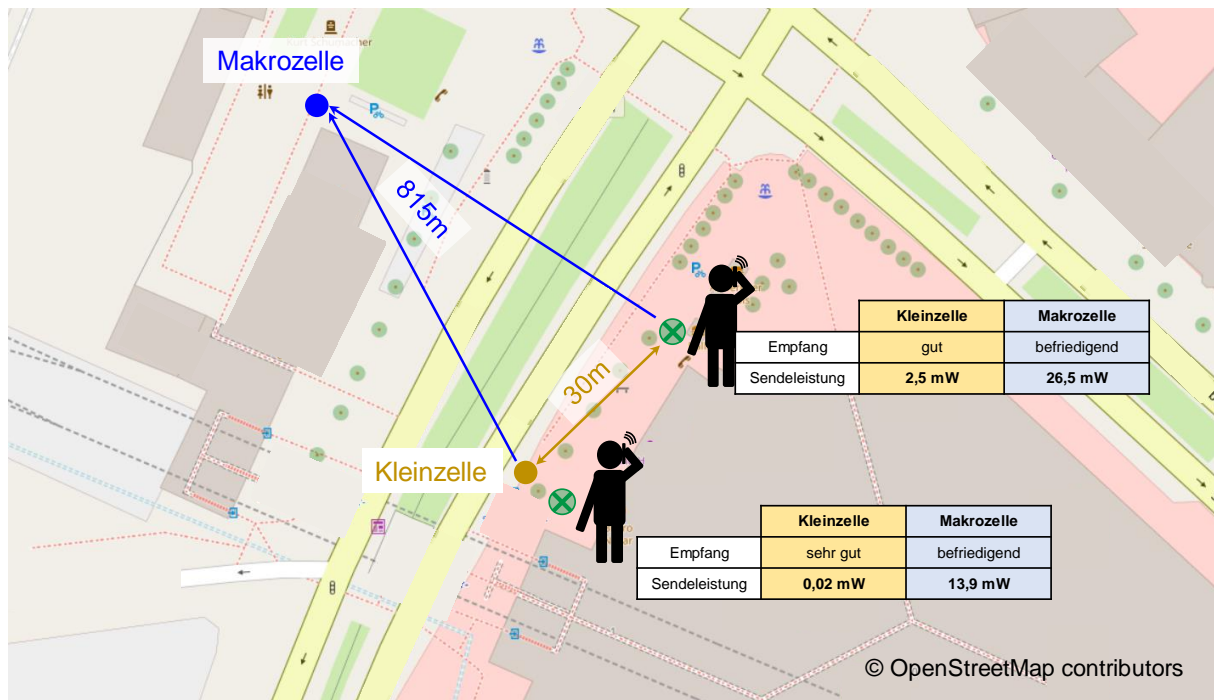


Bild 3.2: Szenario „Mobilfunk-Kleinzelle, Uplink“; gemessene Werte für Empfang und Sendeleistung. Karte von OpenStreetMap, © OpenStreetMap contributors, [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org), Nutzungsbedingungen unter [www.openstreetmap.org/copyright](http://www.openstreetmap.org/copyright)

Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Je schlechter die Funkzelle vom Mobiltelefon empfangen wird, desto höher ist die Sendeleistung des Endgeräts. Ist die Verbindung zwischen Mobiltelefon und Basisstation weniger gut, z.B. durch eine höhere Distanz oder Objekte in der Sichtachse, erhöht das Endgerät beim Upload bzw. Hochladen von Daten seine Sendeleistung.
- So ist am Messpunkt direkt an der Kleinzelle die Sendeleistung des Mobiltelefons bei Einbuchung in die Kleinzelle mit 0,02 mW um etwa den Faktor 700 geringer als bei Einbuchung in die Makrozelle mit 13,9 mW. Am 30 m entfernten Messpunkt sinkt zwar der Empfang der Kleinzelle von „sehr gut“ auf „gut“, trotzdem ist hier die Sendeleistung des Mobiltelefons immer noch etwa zehnmals kleiner als bei Einbuchung in die Makrozelle, die weiterhin die Makrozelle nur „befriedigend“ empfängt.
- Da das eigene Mobiltelefon aufgrund der Nähe zum Körper die Hauptquelle der persönlichen Gesamtexposition darstellt, können Kleinzellen ein Mittel zur Minimierung der persönlichen Gesamtexposition sein.

## Anhang: Erläuterung zu den Grenzwerten

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 in diesem Bereich. Diese Verordnung wurde im Jahr 2013 novelliert [26. BImSchV]. Sie gilt für die Errichtung und den Betrieb von Hochfrequenzanlagen, Niederfrequenzanlagen und Gleichstromanlagen.

Im Hochfrequenzbereich (HF-Bereich) gilt die 26. BImSchV für ortsfeste Sendeanlagen mit einer Sendeleistung von 10 W 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 W EIRP, wenn diese an einem Standort errichtet werden, an dem unter Berücksichtigung der neuen Anlage die Grenze von 10 W EIRP überschritten wird.

Zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen sind 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. Bei gepulsten elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich oberhalb von 10 MHz, wie z.B. von Radaranlagen, darf zusätzlich der Spitzenwert für die elektrische und magnetische Feldstärke das 32fache der Werte nach Tabelle A1 nicht überschreiten.

Tabelle A1: Grenzwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke im Hochfrequenzbereich nach 26. BImSchV. Für  $f$  ist der Zahlenwert in MHz einzusetzen.

| Frequenz $f$ in MHz | Effektivwert, 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              | $87 / \sqrt{f}$   | $0,73 / f$                                     |
| 10 - 400            | 28  | 0,073  |
| 400 - 2000          | $1,375 \cdot \sqrt{f}$  | $0,0037 \cdot \sqrt{f}$                        |
| 2000 - 300000       | 61  | 0,16   |

Elektrische und magnetische Feldstärken sind im Fernfeld einer Strahlungsquelle über den Wellenwiderstand des Freiraumes,  $Z_0 \approx 377 \Omega$ , ineinander überföhrbar und beinhalten dieselbe Information. Deswegen ist es hier ausreichend, lediglich die GröÙe des elektrischen Feldes zu messen.

Das Produkt von elektrischer und magnetischer Feldstärke im Fernfeld einer Strahlungsquelle ergibt die elektrische Leistungsflussdichte  $S$ . Da auch diese dieselbe Information wie die Feldstärken beinhaltet, wird sie oft alternativ zur elektrischen Feldstärke bei der Grenzwertüberprüfung herangezogen.

Wirken gleichzeitig Felder unterschiedlicher Frequenzen zusammen, dann sind die grenzwertbezogenen Ausschöpfungsgrade (GW\_ASG) geeignet zu summieren. In Anlehnung an [26. BImSchV] werden diese für die Frequenzbereiche ab 100 kHz wie folgt gebildet:

$$GW\_ASG_{thermisch} = \sqrt{\sum_{i=100kHz}^{300GHz} \left(\frac{E_i}{E_{L,i}}\right)^2} \quad (A.1)$$

$E_i$  gemessene elektrische Feldstärke bei der Frequenz  $i$ ;  
 $E_{L,i}$  Referenzwert für die elektrische Feldstärke nach Tabelle A.1.

Der mit dem Faktor 100 multiplizierte grenzwertbezogene Ausschöpfungsgrad nach Gleichung A.1 ergibt die prozentuale Ausschöpfung des zulässigen *Feldstärke*-Grenzwertes. Dieser darf den Wert 100 nicht überschreiten, da der Wert 100 hier das Erreichen des Grenzwertes bedeutet. Entfällt in Gleichung A.1 die Quadratwurzel auf der rechten Seite, ergibt sich bei Multiplikation mit dem Faktor 100 die prozentuale Ausschöpfung des zulässigen *Leistungsflussdichte*-Grenzwertes.

Zur Frage, ob es neben thermischen Wirkungen, auf denen die Grenzwertsetzung im Mobilfunkfrequenzbereich beruht, noch andere Wirkungen bei niedrigeren Strahlungsintensitäten auf den menschlichen Organismus gibt, geben nationale und internationale Expertenkomitees regelmäßig Stellungnahmen ab. So hat das EU-Beratungsgremium SCENIHR (Wissenschaftlicher Ausschuss „Neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken“) im März 2015 bestätigt, dass auf Basis der aktuellen wissenschaftlichen Forschungsergebnisse keine gesundheitsschädigende Wirkung von hochfrequenten elektromagnetischen Feldern unterhalb der Grenzwerte ausgeht. Die Weltgesundheitsorganisation WHO betont in ihrem „Fact Sheet 193“ vom Oktober 2014, dass die grundlegende Wechselwirkung von Hochfrequenzfeldern mit dem menschlichen Körper auf der Wärmewirkung beruhe. Zu Einflüssen dieser Felder auf das EEG, kognitive Funktionen, Schlaf, Puls und Blutdruck lägen keine konsistenten Ergebnisse zu nachteiligen Effekten auf die Gesundheit vor, sofern die Grenzwerte eingehalten werden. Darüber hinaus habe die bisherige Forschung keine Hinweise auf eine kausale Beziehung zwischen Hochfrequenzfeldern und der (selbst berichteten) Elektrosensibilität erbracht. Hinsichtlich eines Hirntumorrisikos beim mobilen Telefonieren deuteten weder die Ergebnisse von Tierversuchen, noch die Resultate der INTERPHONE-Studie auf ein erhöhtes Risiko hin, von einer kleinen Untergruppe der Vieltelefonierer mit erhöhter Gliomhäufigkeit abgesehen. Aufgrund der unklaren Ergebnisse bei Vieltelefonierern hatte die Internationale Krebsforschungsorganisation IARC hochfrequente elektromagnetische Felder als möglicherweise krebserregend (Klasse 2B) eingestuft; dies bezieht sich jedoch primär auf die Handynutzung [Med 19].

Nach Aussage des Bundesamtes für Strahlenschutz und der Deutschen Strahlenschutzkommission konnten die Ergebnisse des Deutschen Mobilfunk-Forschungsprogramms (DMF) sowie weiterer aktueller nationaler und internationaler Studien gesundheitsrelevante Wirkungen unterhalb der Grenzwerte nicht bestätigen. Nicht-thermische biologische Wirkungen bei niedrigen Intensitäten hochfrequenter Felder wurden nicht nachgewiesen. Die Frage der Langzeitwirkungen über einen Zeithorizont von mehr als fünfzehn Jahren hinaus bleibt weiterhin offen. Sie ist Gegenstand weiterer Untersuchungen [BfS 19].



## Literaturverzeichnis

- [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.
- [BfS 19] **Bundesamt für Strahlenschutz**, *Wirkungen hochfrequenter Felder*, [http://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/wirkung/wirkung\\_node.html](http://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/wirkung/wirkung_node.html);  
zuletzt besucht am 13.03.2020.
- [Bor 19] **Chr. Bornkessel und L.-M. Schilling**, *EMF-Messung & Auswertung (Mobilfunk)*, Abschlussbericht zum Projekt 2113000285 im Auftrag der Senatsverwaltung für Wirtschaft, Energie und Betriebe Berlin, Ilmenau (2019).
- [LTE 20] **LTE-Anbieter.Info**, RSRP (Referenz Signal Received Power), Was sagt der Wert aus und wofür ist er wichtig?  
<https://www.lte-anbieter.info/technik/rsrp.php>;  
zuletzt besucht am 24.03.2020
- [Med 19] **Informationszentrum Mobilfunk**, *Medizinisch relevante Aspekte des Mobilfunks – Eine Information für Ärzte*, Lichtblick Kommunikation (Hrsg.), September 2019.