

Flächendeckende Expositionsbewertung mittels hochgenauer und breitbandiger Feldkarten

Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Volksw. Matthias Hampe,
Ostfalia Hochschule für angewandte Wissenschaften, Fakultät Elektrotechnik
Labor für Elektromagnetische Verträglichkeit, Wolfenbüttel, m.hampe@ostfalia.de

Abstract

Die Arbeit behandelt neuartige Feldkarten, die sich als hochgenaue, flächendeckende Momentaufnahme für hochfrequente elektromagnetische Felder interpretieren lassen. Die Feldkarten wurden mit einem mobilen Messaufbau erstellt. Zentraler Bestandteil ist hier ein moderner Messempfänger mit Zeitbereichsoption. Aktuell werden Frequenzen im Bereich 300 MHz bis 3 GHz vermessen, um die derzeit wichtigsten hochfrequenten Sendequellen zu erfassen, insbesondere die Mobilfunksignale. Zur abschließenden Bewertung der Expositionssituation wird der Gesamtsumimationsquotient gemäß der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes gebildet und dargestellt [1]. Eine Auswertung der Messungen in über 200 Städten zeigt eine gute Korrelation des Gesamtsumimationsquotienten mit der Bevölkerungsdichte.

1 Einleitung

Elektromagnetische Felder (EMF) werden in immer vielfältigerer Weise unter immer vollständigerer Ausnutzung des zur Verfügung stehenden Frequenzspektrums durch technische Geräte und Anlagen erzeugt. Im Hochfrequenzbereich wird das Spektrum immer lückenloser für die drahtlose Nachrichtenübertragung genutzt. Dies hat auch Auswirkungen auf den Pegel der elektrischen und magnetischen Felder im Alltag. Die ständig neu hinzukommenden technischen Applikationen und ihre rasche Verbreitung erfordern es, die veränderte Expositionssituation des Menschen zu erfassen und die Gesamtheit der auf ihn einwirkenden elektromagnetischen Felder zu bewerten. Daher ist zukünftig eine flächendeckende Erfassung und Bewertung der Immissionen in den jeweiligen Frequenzbändern von herausragender Bedeutung [2, 3, 4].

In dieser Arbeit präsentieren wir neuartige Feldkarten für zahlreiche deutsche Städte, die in den vergangenen Jahren mittels eines mobilen Messaufbaus erstellt wurden. Zentraler Bestandteil ist dabei ein moderner Messempfänger, der seit einigen Jahren verstärkt für normgerechte Messungen genutzt wird [5, 6]. Der wesentliche Vorteil des Messgerätes ist die vergleichsweise kurze Messzeit, was eine flächendeckende und zugleich breitbandige Signalerfassung ermöglicht. Der Messaufbau wird detailliert im nächsten Abschnitt beschrieben. Anschließend werden die erzielten Messergebnisse vorgestellt und diskutiert.

2 Messaufbau

Das eingesetzte mobile Messsystem zur breitbandigen Messung elektromagnetischer Felder zeigt Abbildung 1. Der Zeitbereichsmessempfänger als zentrales Element ist über ein verlustarmes Hochfrequenzkabel mit einer bikonischen Antenne verbunden. Im Rahmen dieser Arbeit kamen zwei unterschiedliche Messempfänger zum Einsatz, der TDEMI X6 von Gauss Instruments und der ESR7 von Rohde & Schwarz. Da beide Geräte vergleichbare Ergebnisse mit nahezu identischer Genauigkeit liefern, wird im Folgenden nicht weiter zwischen den jeweiligen Messungen mit den Messempfängern unterschieden. Die breitbandige bikonische Messantenne SBA 9113 von Schwarzbeck ist in einem Dachgepäckträger angeordnet, um einerseits einen Witterungsschutz und andererseits die erforderliche Messhöhe von ungefähr 1,5 m über dem Erdboden zu gewährleisten [7]. Alle Messungen werden mittels eines Steuerrechners gestartet und beendet, alle Ergebnisse werden zudem auf diesem Rechner gespeichert. Schließlich wird ein Empfänger für globale Navigationssatellitensysteme (GNSS) genutzt, um die genaue Position während der Fahrt zu jedem Zeitpunkt bestimmen zu können.

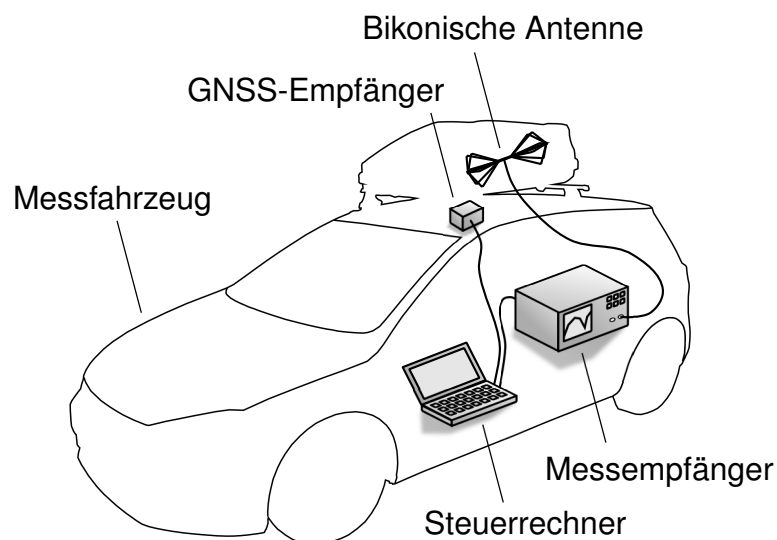


Abbildung 1: Messfahrzeug mit Zeitbereichsmessempfänger, bikonischer Antenne, Steuerrechner sowie GNSS-Empfänger.

Sämtliche Messungen erfolgen im Bereich 300 MHz bis 3 GHz¹. Die Messbandbreite beträgt 120 kHz, der Experte würde daher von schmalbandigen Messungen sprechen. In dieser Arbeit wird dennoch der Begriff Breitbandmessung verwendet, da ein relativ großer Frequenzbereich abgedeckt wird. Die Verweilzeit wurde für alle Messungen zu 10 ms gewählt. Hieraus ergibt sich für einen vollständigen Frequenzdurchlauf eine Messzeit im Bereich von 1,3 s und 2,2 s. Insgesamt werden dann je nach verwendetem Messempfänger bis zu 97.335 Frequenzpunkte erfasst.

¹Messungen aus dem Jahr 2015 decken den Bereich 500 MHz bis 3 GHz ab.

In zahlreichen Testmessungen wurde die breitbandige bikonische Antenne SBA 9113 horizontal und vertikal im Dachgepäckträger ausgerichtet. Höhere Feldstärken wurden dabei grundsätzlich mit der vertikalen Polarisation gemessen, da zahlreiche Sender ebenfalls diese Polarisationsebene verwenden, insbesondere Basisstationen für den Mobilfunk². Dem Fachmann ist natürlich klar, dass sich die Feldstärke grundsätzlich nur dann exakt bestimmen lässt, wenn möglichst gleichzeitig Messungen in Richtung der drei Koordinatenachsen x , y und z erfolgen. Der erforderliche Aufwand steht dabei allerdings in keinem Verhältnis zum erwarteten Mehrwert³. Demnach wurde für die umfangreichen Messvorhaben ausschließlich die vertikale Polarisation gewählt.

Abbildung 2 zeigt den Betrag E der elektrischen Feldstärke, die im September 2017 an einem Messort in Wolfenbüttel aufgezeichnet wurde. Sämtliche Daten wurden um den Einfluss sowohl des Messkabels als auch der Antenne korrigiert. Hierzu wurde die Einfügedämpfung des Messkabels mittels eines vektoriiellen Netzwerkanalysators als Funktion der Frequenz bestimmt. Außerdem wurde der Antennenfaktor der vertikal orientierten Antenne im Dachgepäckträger bestimmt. Nach Korrektur der Daten ist die maximale Feldstärke $E = 126,8 \text{ dB } (\mu\text{V}/\text{m})$ bei der Frequenz $f = 933,7 \text{ GHz}$. Hierbei handelt es sich um einen GSM-Downlink-Kanal der Firma Telefonica. Der gemessene Wert liegt noch deutlich unterhalb des Grenzwertes gemäß der 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV) [1]. Schließlich soll angemerkt werden, dass sich Felder mit der Zeit ändern können. Die dargestellten Messwerte lassen sich daher als hochgenaue Momentaufnahme interpretieren.

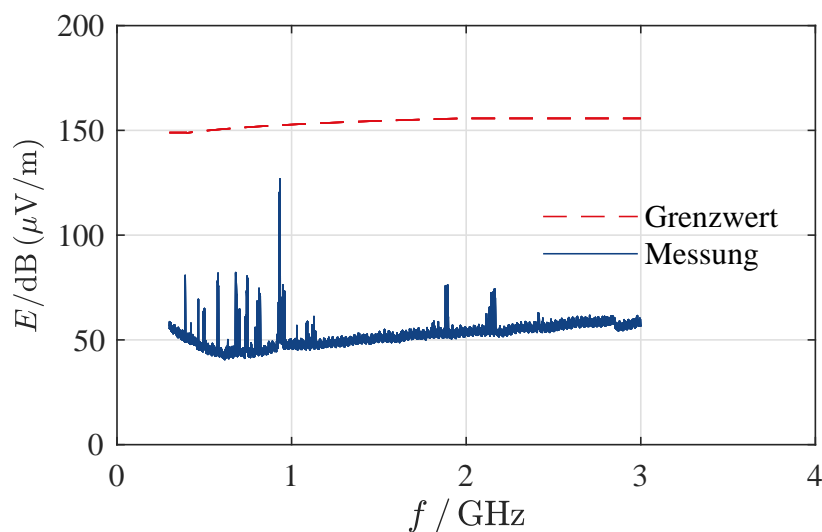


Abbildung 2: Betrag der elektrischen Feldstärke E für einen Messort in Wolfenbüttel mit der Grenzwertkurve entsprechend der 26. BImSchV [1]. Feldstärken sind grundsätzlich zeitvariant, die Messwerte lassen sich als hochgenaue Momentaufnahme interpretieren.

²Einige Basisstationen nutzen bekanntlich zudem eine Polarisation von $\pm 45^\circ$.

³Im Grunde müssten dann drei Messempfänger gleichzeitig Messdaten aufzeichnen.

3 Expositionsbewertung

Wie zuvor bereits angedeutet wurden in den vergangenen Jahren flächendeckende Messungen in über 200 Städten und Gemeinden mit dem mobilen Messsystem nach Abbildung 1 durchgeführt. Die elektrischen Feldstärken werden dabei kontinuierlich während der Fahrt gemessen und gespeichert. Außerdem wird die genaue Position zum Messzeitpunkt mittels des GNSS-Empfängers bestimmt. Streng genommen gibt es natürlich nicht den einen Messort, da sich das Messfahrzeug durchgehend bewegt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher der Ort zu Beginn eines jeden Messdurchlaufs als Messort definiert.

Um eine möglichst einfache und schnelle Bewertung der Expositionssituation durch die nicht-ionisierenden Felder zu erlauben, werden die recht umfangreichen Messdaten eines jeden Messortes zudem zu einer einzigen Kennzahl aggregiert. Diese Kennzahl wird als Gesamtsumimationsquotient (Total Exposure Ratio, TER) bezeichnet [3, 4, 7]. Für die vorliegenden Messungen vereinfacht sich die Berechnungsgleichung zu

$$TER = \sum_{f=300\text{ MHz}}^{3\text{ GHz}} \left(\frac{E(f)}{E_{\max}(f)} \right)^2. \quad (1)$$

Für jeden Messort werden die dort ermittelten elektrischen Feldstärken $E(f)$ bei jeder Frequenz f durch den jeweiligen Feldstärkegrenzwert $E_{\max}(f)$ geteilt. Den weiterhin recht umfangreichen Datensatz mit bis zu 97.335 Punkten vereinfacht man dann zur gewünschten Kennzahl TER , indem die Teilergebnisse für alle Frequenzpunkte erst quadriert und anschließend aufsummiert werden. Abbildung 3 zeigt beispielhaft die farblich kodierte Darstellung des TER für Wolfenbüttel. Feldkarten weiterer Städte und Gemeinden sind frei im Internet abrufbar unter www.Feldkarte.de.

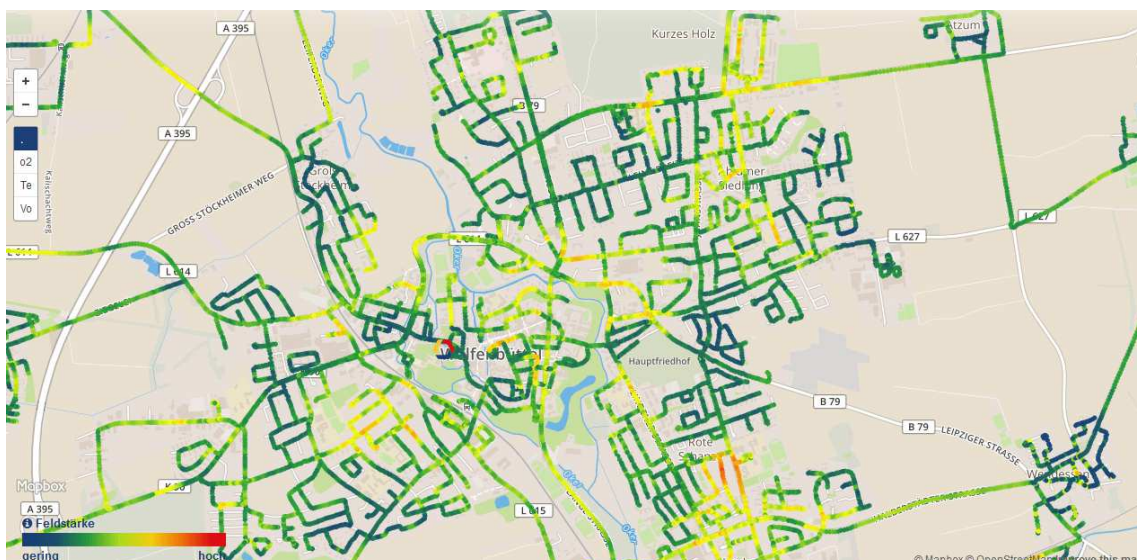


Abbildung 3: Feldkarte der Stadt Wolfenbüttel als Visualisierung des farblich kodierten Gesamtsumimationsquotienten TER für jeden Messort.

Die farbliche Kodierung des Gesamtsumimationsquotienten TER orientiert sich am Farbverlauf des Regenbogens. Die verwendete Skala reicht von Blau (relativ gering) bis Rot (relativ hoch). Es wird eine logarithmische Einteilung gewählt, bei welcher der geringste Gesamtsumimationsquotient mit der Farbe Blau kodiert ist,

$$TER_{\min} = 0,00001 . \quad (2)$$

Der maximal zulässige Wert [3, 7]

$$TER_{\max} = 1,0 \quad (3)$$

wird durch die Farbe Rot repräsentiert und auf zwei Arten erreicht oder überschritten:

1. Der Feldstärkegrenzwert wird bei mindestens einer Frequenz verletzt.
2. Der Feldstärkegrenzwert wird bei mehreren Frequenzen nahezu erreicht.

In Wolfenbüttel ist der höchste Gesamtsumimationsquotient $TER = 0,1136$, der durch einen Mobilfunksender im Südosten der Stadt hervorgerufen wird. Dieser Wert ist zwar vergleichsweise hoch, liegt aber dennoch deutlich unterhalb des maximal zulässigen Wertes TER_{\max} .

Um eine gute Vergleichbarkeit zwischen den unterschiedlichen Orten zu ermöglichen, wurde außerdem ein gemittelter Gesamtsumimationsquotient \overline{TER} berechnet, indem die Gesamtsumimationsquotienten aller Messpunkte einer Ortschaft aufsummiert und anschließend durch die Gesamtanzahl der Messpunkte geteilt wurden. Der höchste Mittelwert ergibt sich gemäß Tabelle 1 dabei in der Stadt Düsseldorf, der geringste im Dorf Mörschied. Mögliche Gründe für die beobachteten Unterschiede werden aktuell untersucht. Wichtig jedenfalls scheint die Bevölkerungsdichte D zu sein.

Tabelle 1: Rangfolge der gemittelten Gesamtsumimationsquotienten \overline{TER} .

Rang	Ort	\overline{TER}
1	Düsseldorf	0,0106
2	München	0,0089
3	Frankfurt	0,0079
4	Hamburg	0,0066
5	Neuss	0,0064
⋮	⋮	⋮
248	Dahner-Felsenland	0,0002
249	Gnarrenburg	0,0002
250	Fintel	0,0002
251	Gielde	0,0001
252	Mörschied	0,0001

Um dies zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 4 für alle $N = 252$ vermessenen Orte die mittleren Gesamtsumimationsquotienten \overline{TER} als Funktion der Bevölkerungsdichte D . Die entsprechende Regressionsgerade ist ebenfalls eingezeichnet. Zwischen beiden Größen ist dabei eine gute Korrelation zu erkennen, der Korrelationskoeffizient nach Pearson beträgt $\rho = 0,7457$. Die Daten zeigen allerdings auch für Städte mit ähnlicher Bevölkerungsdichte deutliche Unterschiede. Zum Beispiel liegt der \overline{TER} in Düsseldorf grob um den Faktor 5 über dem Wert in Hannover. Die wahrscheinlichste Erklärung hierfür ist die jeweils sehr unterschiedliche Datenbasis - in Hannover wurden nahezu alle Straßen vermessen und in Düsseldorf lediglich die Hauptstraßen.

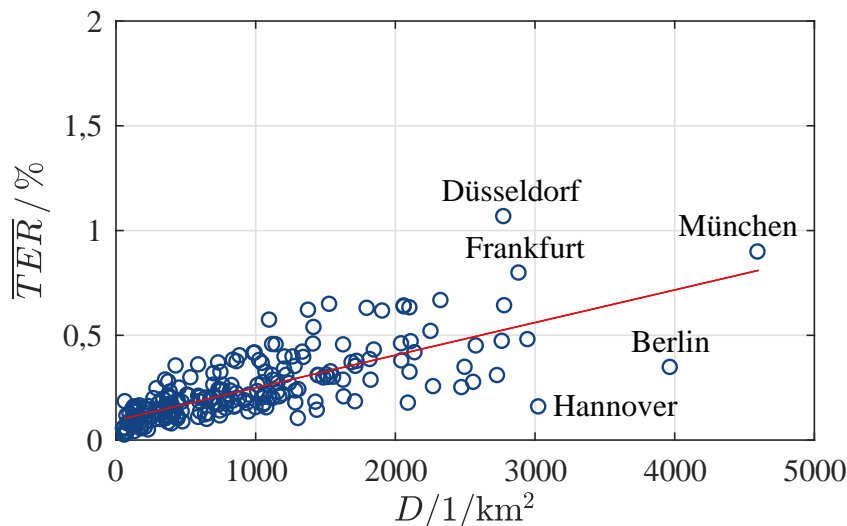


Abbildung 4: Mittlere Gesamtsumimationsquotienten \overline{TER} in Prozent als Funktion der Bevölkerungsdichte D für die $N = 252$ vermessenen Orte zusammen mit der Regressionsgeraden.

Zum Abschluss sollen Vorteile sowie auch Nachteile des in dieser Arbeit vorgestellten Messverfahrens diskutiert werden. Für eine fest definierte Gesamtmesszeit besteht zuerst einmal ein Spannungsverhältnis zwischen der Messdauer an einem einzelnen Messpunkt sowie der Gesamtanzahl an Messpunkten selbst. Dies ist in vereinfachter Form in Abbildung 5 veranschaulicht mit den folgenden beiden Ansätzen:

1. Einzelmessungen erfolgen an vielen unterschiedlichen Messpunkten.
2. Mehrfachmessungen erfolgen an einem einzelnen Messpunkt.

Der erste Ansatz wurde in dieser Arbeit unter Verwendung schneller Messempfänger mit Zeitbereichsoption realisiert. Auf diese Weise lässt sich die Expositionssituation in ausgedehnten Gebieten als hochgenaue Momentaufnahme erfassen und bewerten. Die erhaltenen Messergebnisse weisen jedoch den Nachteil auf, dass eine womöglich vorhandene Zeitvarianz nicht erkannt wird. Eine zeitliche Feldstärkeänderung lässt sich gut mit dem zweiten oben genannten Ansatz auflösen, den die Bundesnetzagentur mit ihrem automatischen Messsystem verfolgt [9]. Hier ist allerdings nachteilig, dass eine zuverlässige Expositionsbewertung lediglich für den gewählten Messpunkt besteht.

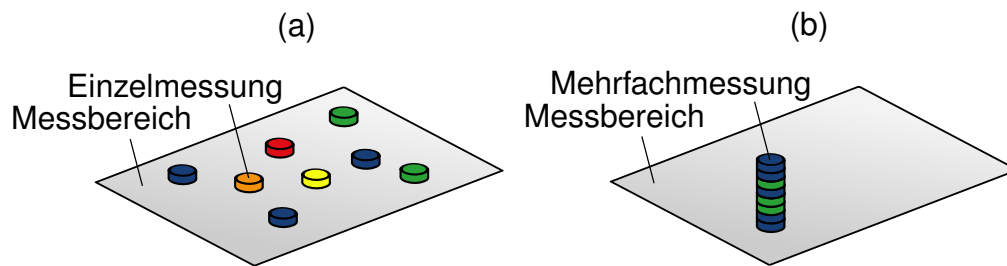


Abbildung 5: Vorgehensweisen zur Expositionsbewertung: (a) Einzelmessungen an vielen Messpunkten, (b) Mehrfachmessungen an einem Messpunkt.

Der Einsatz moderner Messempfänger zur Expositionsbewertung ist zudem nicht in den relevanten Normen und Richtlinien berücksichtigt, siehe beispielsweise [3, 4, 7]. Zwar wurden diese Dokumente in den vergangenen Jahren regelmäßig aktualisiert, allerdings ist deren technische Basis teils mehr als 20 Jahre alt. Aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten, umfangreichen Messungen geht insbesondere hervor, dass die folgenden zwei Aspekte zukünftig Berücksichtigung finden sollten:

1. Feldstärkegrenzwerte sind zusammen mit der Messbandbreite B zu definieren.
2. Summationsformeln sind zusammen mit der Frequenzschrittweite df anzugeben.

Abbildung 6 veranschaulicht den Einfluss der genannten Größen. Die Bandbreite B hat gemäß Abbildung 6 (a) wesentlichen Einfluss auf die gemessene Feldstärke E , höhere Bandbreiten führen zu höheren Messwerten. Demzufolge ließen sich Messergebnisse grundsätzlich in eine gewünschte Richtung manipulieren, die gleichzeitige Definition von Grenzwert und Messbandbreite scheint somit geboten. Letztlich wird die gewählte Frequenzschrittweite df entsprechend Abbildung 6 (b) das Ergebnis bei Bildung des Gesamtsumimationsquotienten wesentlich bestimmen. Im Prinzip erfolgt eine einfache Summation aller Frequenzanteile, um das Spektrum aussagekräftig zu repräsentieren. Um keine Spektralanteile zu vernachlässigen beziehungsweise mehrfach zu erfassen, scheint insbesondere die Festlegung $df = B$ angemessen. Bislang fehlt eine solche Angabe in den entsprechenden Normen und Richtlinien vollständig.

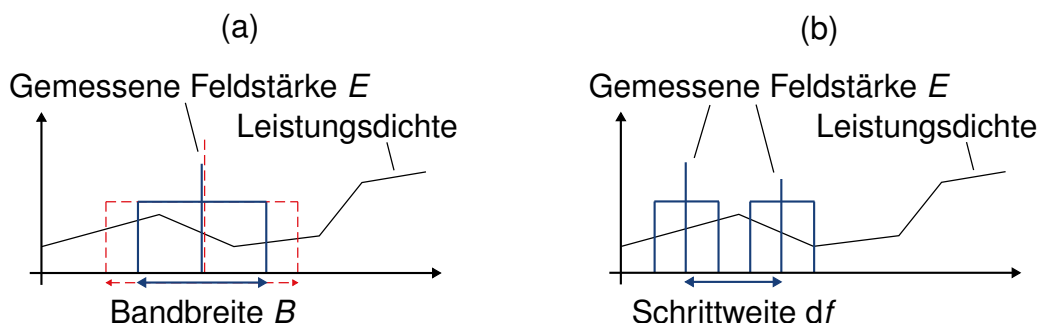


Abbildung 6: Wesentlichen Einfluss auf die Messergebnisse haben (a) Bandbreite B sowie (b) Schrittweite df .

4 Zusammenfassung

Es wurden neuartige Feldkarten vorgestellt, die sich als hochgenaue, flächendeckende Momentaufnahme für hochfrequente elektromagnetische Felder interpretieren lassen. Das Messvorgehen wurde ausführlich erläutert, es kam ein mobiler Messaufbau mit einem Zeitbereichsmessempfänger zum Einsatz. Als ein Beispiel wurde die Feldkarte für die Stadt Wolfenbüttel dargestellt, die Ergebnisse für weitere Städte und Gemeinden sind frei im Internet unter www.Feldkarte.de abrufbar.

Abschließend wurde der Gesamtsummationsquotient für alle 252 bislang vermessenen Orte gebildet und dargestellt. Dabei zeigte sich eine gute Korrelation der Messwerte mit der Bevölkerungsdichte, der Korrelationskoeffizient beträgt $\rho = 0,7457$. Für einige Städte waren allerdings Unterschiede zu beobachten, deren mögliche Ursachen kurz diskutiert wurden. Für eine zuverlässige Expositionsbewertung scheint es angebracht, relevante Parameter wie insbesondere die Messbandbreite klar vorzuschreiben.

Literaturangaben

- [1] Bundesgesetzblatt Jahrgang 2013 Teil I Nr. 50, "Sechszwanzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)," August 2013.
- [2] Strahlenschutzkommission, "Elektromagnetische Felder neuer Technologien - 2013 Status Report," Juli 2013.
- [3] ICNIRP, "Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, Ausgabe 74, Nr. 4, S. 494-522, 1998.
- [4] VDE 0848-211:2008-09, *Assessment of Electronic and Electrical Equipment Related to Human Exposure Restrictions for Electromagnetic Fields (0 Hz - 300 GHz) (IEC 62311:2007, modified); Deutsche Version EN 62311:2008*, September 2008
- [5] CISPR16-1-1, *Specification for Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus and Methods Part 1-1: Radio Disturbance and Immunity Measuring Apparatus—Measuring Apparatus*, Schweiz: Int. Electrotech. Commiss., 2003.
- [6] S. Braun, T. Donauer, und P. Russer, "A Real-Time Time-Domain EMI Measurement System for Full-Compliance Measurements According to CISPR 16-1-1," *IE-EE Trans. Electromagn. Compat.*, Ausgabe 50, Nr. 2, S. 259–267, Mai 2008.
- [7] Reg TP MV 09/EMF/3, Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, *Messvorschrift für bundesweite EMVU-Messreihen der vorhandenen Umgebungsfeldstärken*, Februar 2003.
- [8] C. Bornkessel, M. Schubert, M. Wuschek, und P. Schmidt, "Measurement and Calculation of General Public Electromagnetic Exposure Around GSM and UMTS Cellular Base Stations," in *Proc. INICA 2007*, München, S. 225-229, März. 2007.
- [9] Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen, <http://emf2.bundesnetzagentur.de/karte/default.aspx>, abgerufen am 01.12.2017.