

Erste Ergebnisse für die gemessene Direktivität von realen Prüflingen aus dem DEBoRA-Projekt

Dr.-Ing. Mathias Magdowski, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für EMV
Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Lehrstuhl für EMV

1 Einleitung

Die Messung der gestrahlten Störemission von Prüflingen ist ein wichtiger Schritt zur Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit. Für die Messung existieren verschiedene standardisierte Verfahren, die sich grob in feldstärke- und leistungs-basierte Messverfahren einteilen lassen. Die Messung der abgestrahlten Feldstärke erfolgt z. B. in Absorberhallen [5], wobei in einem bestimmten Abstand für jede Frequenz das Maximum der Feldstärke über alle Raumrichtungen und Polarisationen zu ermitteln ist. Für elektrisch große Prüflinge, also Prüflingsabmessungen größer als die Wellenlänge, wird es zunehmend schwieriger, dieses Maximum zu finden, weil sich die Abstrahldiagramme feiner aufgliedern. In diesem Fall bieten sich leistungs-basierte Messumgebungen wie z. B. Modenverwirbelungskammern [4] an, in denen die gesamte abgestrahlte Leistung eines Prüflings unabhängig vom konkreten Abstrahldiagramm relativ einfach und robust gemessen werden kann. Die statistische Unsicherheit der Messung liegt dann nicht mehr im unbekanntem Abstrahlverhalten des Prüflings (relativ große Unsicherheit bei hohen Frequenzen), sondern in der intrinsischen Feldunsicherheit der Messumgebung (unabhängig von der Frequenz).

Übliche Fachgrund- oder Produktnormen spezifizieren jedoch typischerweise nur feldstärkebasierte Grenzwerte [2, 3], so dass leistungs-basierte Messwerte nicht direkt mit einem entsprechenden Grenzwert [6] verglichen werden können. Eine Umrechnung der Mess- bzw. Grenzwerte ist jedoch nur möglich, wenn das konkrete Abstrahldiagramm bzw. die maximale Direktivität eines Prüflings bekannt sind, die sich beide nur aufwendig messen lassen und dazu noch über der Frequenz ändern.

2 Berechnung der maximalen Direktivität

Deshalb existieren verschiedene Verfahren zur Abschätzung der Direktivität, deren Frequenzabhängigkeit und statistischer Verteilung [7] bzw. zur empirischen Ermittlung von Umrechnungsfaktoren zwischen Grenzwerten verschiedener Messverfahren [1]. Ein Problem bei der Ermittlung solcher Umrechnungsfaktoren ist deren zunächst unbekannter Wertebereich und die damit einhergehende schwierige Bewertung der Gültigkeit, gerade bei verrauschten Messwerten.

Die maximale Direktivität eines Prüflings, also die abgestrahlte Leistung in der Hauptstrahlungsrichtung bezogen auf die mittlere Strahlungsleistung hat dagegen einen begrenzten Wertebereich, ist stets größer als Eins und liegt für unbeabsichtigte Strahler typischerweise im Bereich von 1,5 bis 15.

Eine übliche Abschätzungsformel (siehe [11, Gl. (11)] oder [7, Gl. (32) und (35)]) gibt die

maximale Direktivität

$$D_{\max} \approx \begin{cases} 2,452 & ka \leq 1 \\ 0,577 + \ln(4ka + 2) + \frac{1}{8ka+4} & ka > 1 \end{cases} \quad (1)$$

in Abhängigkeit der Wellenzahl $k = 2\pi f/c_0$ mit der Frequenz f und der Lichtgeschwindigkeit c_0 sowie des Radius a an. Dieser entspricht dem Radius der kleinsten Kugel, die den Prüfling komplett umschließt und ist ein grobes Maß für die Prüflingsgröße. Diese Abschätzung gilt für die eindimensionale Abtastung auf einem den Prüfling umfassenden Kreisring für eine Kombination beider Polarisierungen. Weiterhin existieren entsprechende Modelle und Formeln für die dreidimensionale Abtastung der Direktivität bzw. die Betrachtung nur einer Polarisation.

Nachteilig für diese Abschätzung ist, dass die zugrundeliegenden Prüflingsmodelle sehr generisch sind und deshalb berechtigterweise hinterfragt werden kann, ob sich reale Prüflinge tatsächlich ähnlich verhalten.

3 Messung der maximalen Direktivität

Eine weitere praxisnahe Variante ist die Bestimmung der Direktivität aus routinemäßigen Emissionsmessungen in Absorberhallen, die im Rahmen der Marktüberwachung z. B. durch die Bundesnetzagentur durchgeführt werden. Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurde das DEBoRA-Projekt (Directivity Estimation Based on Routine Assessments) ins Leben gerufen und die eingesetzte Software [10] zur Messautomatisierung so modifiziert, dass nicht nur das Maximum der abgestrahlten Feldstärke (bzw. Leistung), sondern auch der Mittelwert über alle Polarisierungen und Ausrichtungen der Prüflingsdrehzscheibe gespeichert wird. Das Verhältnis beider Größen ist ein einfacher Schätzer der Direktivität, wie sie auch für die Umrechnung der Grenzwerte benötigt wird.

3.1 Messaufbau

Der Messaufbau entspricht einer üblichen Messung der gestrahlten Störemission. Da natürlich nur dann eine Direktivität bestimmt werden kann, wenn der Prüfling überhaupt etwas abstrahlt, wurden die in diesem Beitrag beschriebenen Messungen zunächst in einem Messlabor durchgeführt, in dem hauptsächlich Kommunikationsgeräte untersucht werden, die bestimmungsgemäß stets in einem bestimmten Frequenzbereich abstrahlen. Obwohl solche Geräte nicht direkt als unbeabsichtigte Strahler aufgefasst werden können, sollten sie sich doch ähnlich verhalten.

Die Messungen wurden mit folgenden Parametern bzw. unter den folgende Bedingungen durchgeführt.

Winkelschritte: 45°
Polarisation: horizontal und vertikal
Umgebung: Freiraumbedingungen (Vollabsorberkammer)
Höhenscan: nein
Messentfernung: 3 m

3.2 Auswertung

Die Rohdaten der Messung stellen die frequenzabhängigen Empfangsleistungen für die horizontale und vertikale Polarisation für jeden Winkelschritt dar. Diese werden von einem Leistungspegel zunächst in eine Leistung umgerechnet, damit die anschließende Mittelung über alle Polarisationen und Winkelschritte auf einer linearen Skala stattfindet und tatsächlich ein arithmetischer Mittelwert gebildet wird. Eine direkte Mittelung der dB-skalierten Pegel würde stattdessen einer quadratischen Mittelwertbildung entsprechen.

Für die entsprechende Maximalwertbildung ist es demgegenüber egal, ob diese mit linearen Leistungen oder dB-skalierten Pegeln stattfindet. Die Direktivität wird abschließend als Verhältnis der maximalen zur mittleren Leistung für jede Frequenz berechnet. Alternativ kann die Direktivität auch als dB-skaliertes Maß aus der Differenz des maximalen und mittleren Leistungspegel bestimmt werden.

4 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

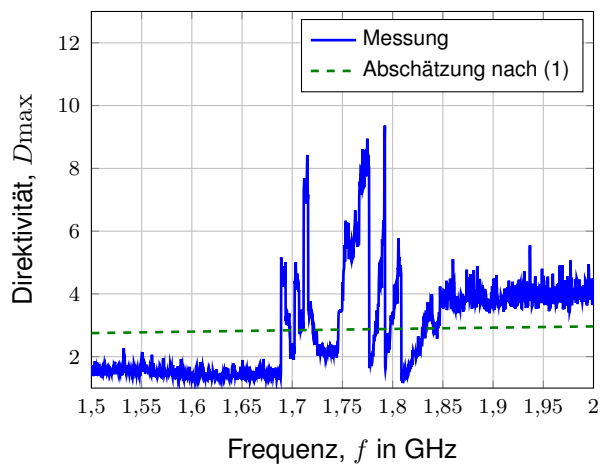
Ein anonymisierter Überblick über die in diesem Beitrag untersuchten Prüflinge ist in Tabelle 1 gegeben. Die dort verzeichnete Prüflingsgröße entspricht dem in Gleichung (1) benutzten Radius a .

Tabelle 1: Übersicht über die untersuchten Datensätze und Prüflinge

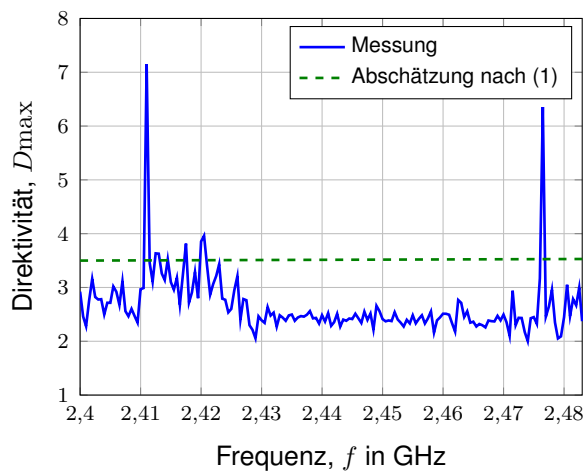
Daten-satz	Prüfling	Frequenzband	Prüflingsgröße
1	Mobiltelefon	GSM 1,8 GHz	5 cm
2	Funkkamera	ISM 2,4 GHz für Wi-Fi	8 cm
3	mobiler Transmitter	ISM 2,4 GHz für Bluetooth	20 cm
4	mobiler Transmitter	ISM 2,4 GHz für Wi-Fi	8,5 cm
5	mobiler Transmitter	ISM 2,4 GHz für Wi-Fi	10 cm
6	mobiler Transmitter	ISM 2,4 GHz für Wi-Fi	15 cm
7	Funkkamera mit Monitor	ISM 2,4 GHz; 4,9 GHz; 7,4 GHz für Wi-Fi	21,5 cm

Die aus der Messung ermittelten Direktivitäten sind für die einzelnen Datensätze bzw. Prüflinge mit einem entsprechenden Vergleich der durch Gleichung (1) abgeschätzten Direktivitäten in Bild 1 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Verläufe zum großen Teil nur aus rauschartigen Werten bestehen, deren Schwankung die Unsicherheit der Messung widerspiegelt. Nur in den kleinen Frequenzbereichen, in denen die Prüflinge abstrahlen, werden sinnvolle Direktivitätswerte bestimmt, die dann jedoch oft deutlich oberhalb der Abschätzung liegen.

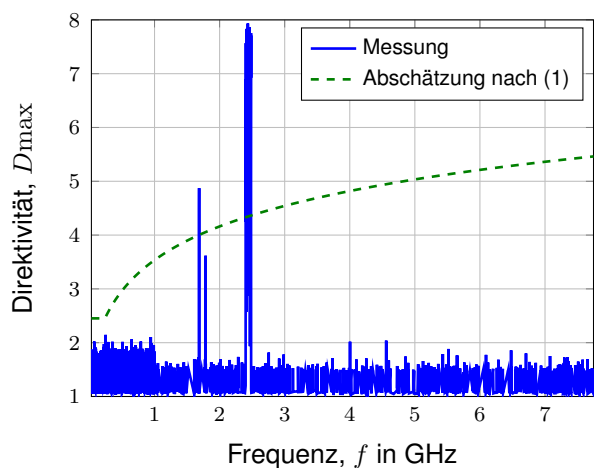
Detaillierte Einblicke liefern die Darstellungen in Bild 2, in denen jeweils nur die Frequenzbereiche herausgegriffen wurden, in denen der Prüfling tatsächlich abstrahlt. Hier fällt erneut auf, dass die gemessene Direktivität über der Frequenz sehr schnellen Schwankungen unterworfen ist, die nicht sehr plausibel erscheinen, da mit einer höheren Frequenzkorrelation [9] gerechnet werden müsste, die nur in Bild 2d knapp oberhalb von 2,4 GHz zu erkennen ist.



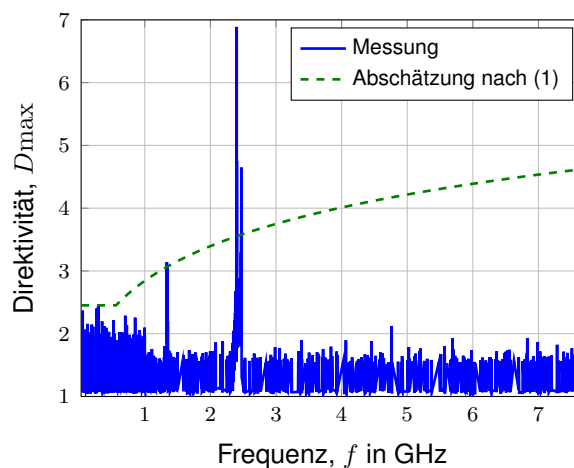
(a) Datensatz 1



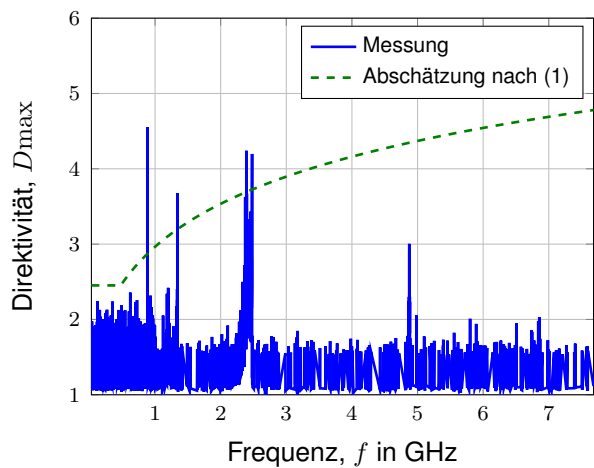
(b) Datensatz 2



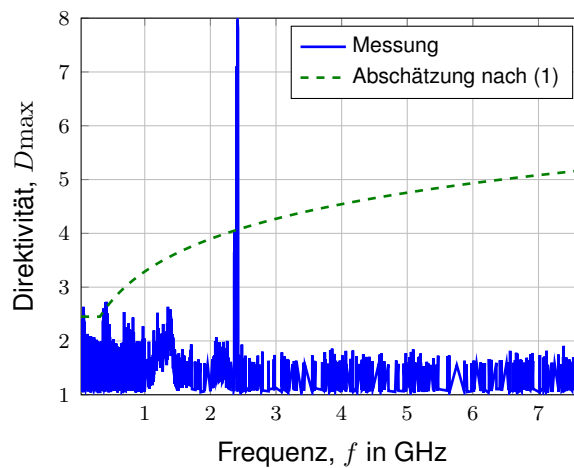
(c) Datensatz 3



(d) Datensatz 4



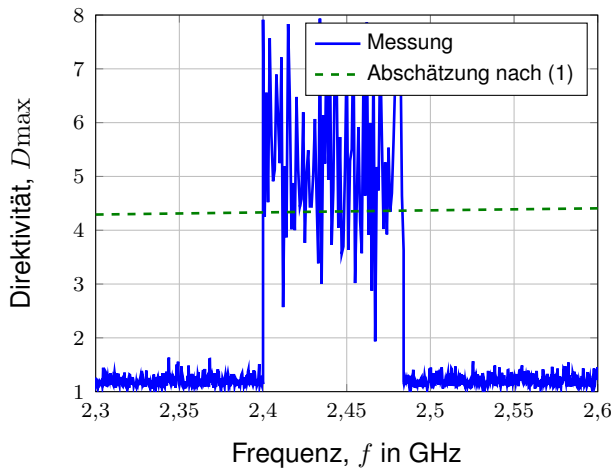
(e) Datensatz 5



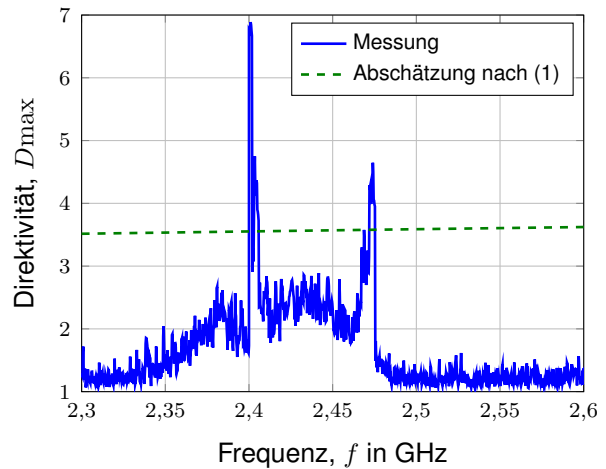
(f) Datensatz 6

Bild 1: Vergleich der experimentell ermittelten Direktivitäten mit einer üblichen Abschätzung über den gesamten gemessenen Frequenzbereich

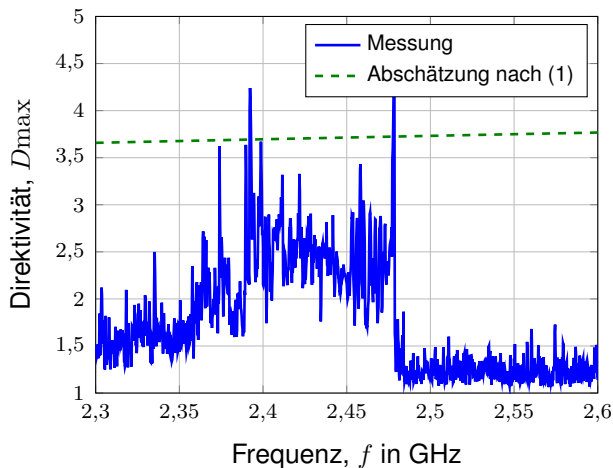
Für einen weiteren Prüfling, dessen Direktivität in Bild 3 dargestellt ist, wurden zur näheren Untersuchung auch die Rohdaten der Messung exportiert und analysiert.



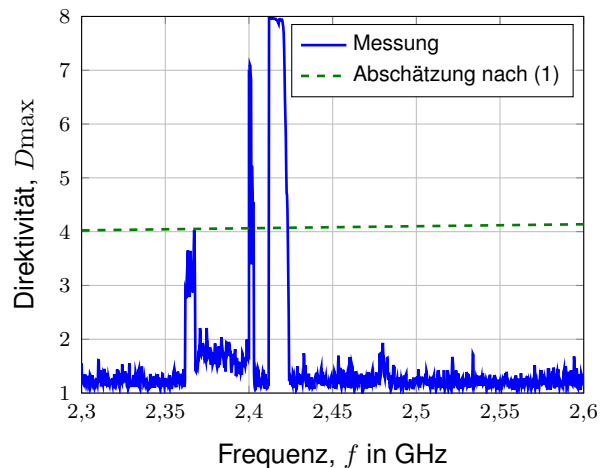
(a) Datensatz 3



(b) Datensatz 4



(c) Datensatz 5

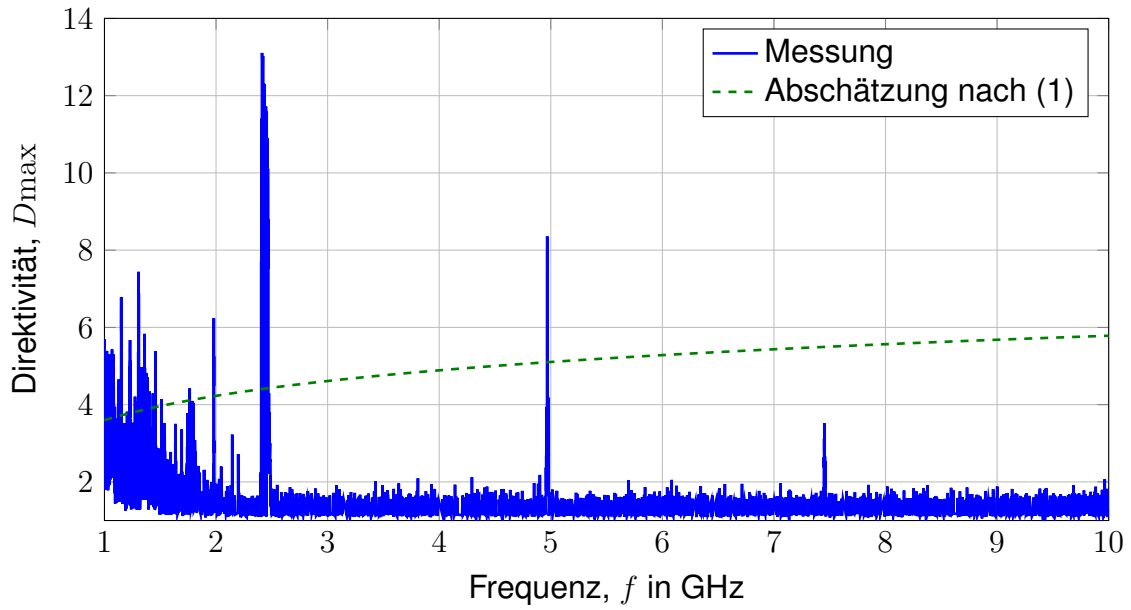


(d) Datensatz 6

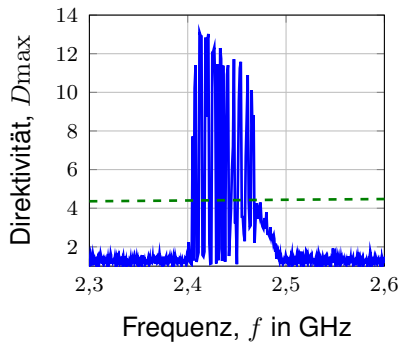
Bild 2: Vergleich der experimentell ermittelten Direktivitäten mit einer üblichen Abschätzung über den Frequenzbereich, in dem der Prüfling abstrahlt

Bild 4 zeigt dazu die in eine bestimmte Richtung abgestrahlte Leistung normiert auf den Mittelwert über alle Richtungen. Dort lässt sich erkennen, dass jeweils nur wenige Raumrichtungen (hier 180° and 225° mit vertikaler Polarisation) bei der Abstrahlung überwiegen, während die Abstrahlung in die anderen Raumrichtungen nahezu gleich ist. Außerdem sind einzelne Träger im Frequenzband erkennbar, zwischen denen keine größere Abstrahlung in eine besondere Raumrichtung festgestellt werden kann bzw. bei denen fraglich ist, ob dort überhaupt eine nennenswerte Leistung abgestrahlt wurde, aus der sich eine Direktivität bestimmen lässt.

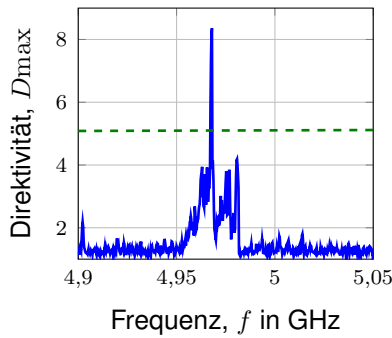
Streng genommen müsste man den Auswertalgorithmus also entsprechend so anpassen, dass für jede Frequenz geprüft wird, ob die mittlere Abstrahlleistung mindestens einen gewissen Faktor (z. B. z_2) oder einen bestimmten Pegelabstand (z. B. 3 dB) über dem Grundrauschen des Messaufbaus liegt, und nur dann eine Direktivität berechnet wird.



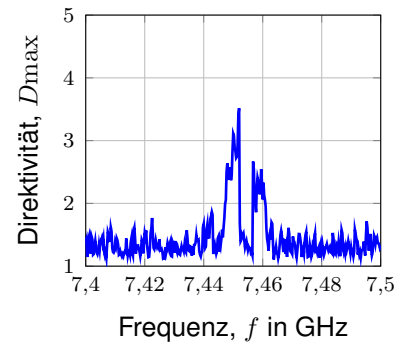
(a) Gesamter gemessener Frequenzbereich



(b) Zoom bei 2,4 GHz

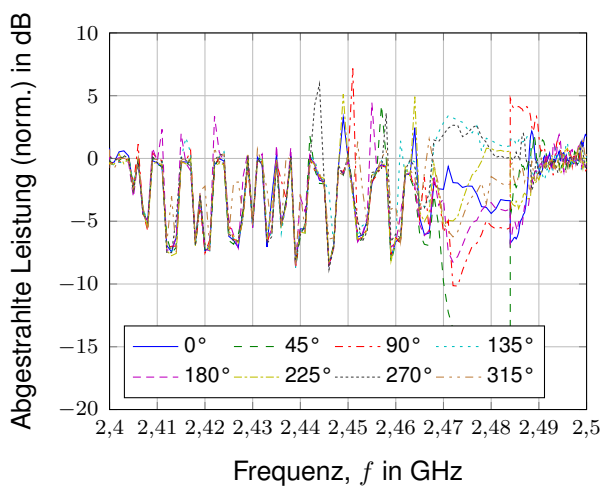


(c) Zoom bei 4,9 GHz

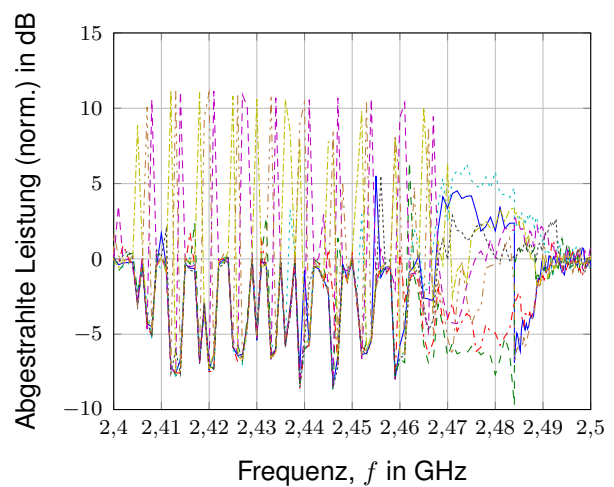


(d) Zoom bei 7,4 GHz

Bild 3: Vergleich der experimentell ermittelten und abgeschätzten Direktivität für den Datensatz 7



(a) horizontale Polarisation



(b) vertikale Polarisation

Bild 4: Abgestrahlte Leistung in eine bestimmte Richtung und einer bestimmten Polarisation, normiert auf den Mittelwert der abgestrahlten Leistung über alle Raumrichtungen und Polarisationen

Eine nicht unerhebliche Schwierigkeit besteht also darin, Prüflinge zu finden, die einerseits typische potentielle EMV-Störquellen darstellen, andererseits aber bei möglichst vielen Frequenzen eine moderate Abstrahlung aufweisen. Diese Herausforderung wurde bereits in [8] diskutiert.

Nichtsdestotrotz lässt sich festhalten, dass die gemessenen und abgeschätzten Direktivitäten hinreichend gut übereinstimmen, um Prüflingsmodelle und Abschätzungsformeln für die Direktivität zum Umrechnung von Grenzwerten zumindest nicht kategorisch auszuschließen.

5 Zusammenfassung

Im Beitrag wurden erstmals Direktivitätsmesswerte von realen Prüflingen vorgestellt, die automatisiert aus Routinemessungen im Rahmen der Marktüberwachung ermittelt wurden. Solche Messwerte können in Zukunft einen wichtigen Beitrag zur Umrechnung von feldstärke- in leistungs-basierte Grenzwerte darstellen und damit eine breitere Anwendung von alternativen Testverfahren wie Modenverwirbelungskammern für gestrahlte Störemissionsmessungen ermöglichen.

Mittelfristig sollen zahlreiche weitere Messungen folgen, aus denen eine Datenbank mit experimentell ermittelten Direktivitätswerten für typische Prüflinge aufgebaut werden soll. Dazu ist eine weitere Automatisierung des Messverfahrens und der Auswertungsprozedur notwendig

Danksagung

Die Autoren möchten den Herren Dr. Sisoletsky, Siebert, Schmidt und Brüsewitz von der Bundesnetzagentur, Messlabor Kolberg für die Aufnahme der Messdaten sowie den Herren Prof. Krauthäuser und Manicke von der Technischen Universität Dresden für den ursprünglichen DEBoRA-Projektbeginn danken.

Literatur

- [1] COMITÉ INTERNATIONAL SPÉCIAL DES PERTURBATIONS RADIOÉLECTRIQUES (Hrsg.): *Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods – Part 4-5: Uncertainties, statistics and limit modelling – Conditions for the use of alternative test methods*. CISPR TR 16-4-5:2006+AMD1:2014 CSV Consolidated version. Genf, Schweiz: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques, Juli 2014. – 117 S.
- [2] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. UND VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V. (Hrsg.): *DIN EN 61000-6-3:2011-09, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-3: Fachgrundnormen – Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe (IEC 61000-6-3:2006 + A1:2010); Deutsche Fassung EN 61000-6-3:2007 + A1:2011*. Berlin, Frankfurt: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband

der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., September 2011. – auch VDE 0839-6-3:2011-09

- [3] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. UND VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V. (Hrsg.): *DIN EN 61000-6-4:2011-09, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 6-4: Fachgrundnormen – Störaussendung für Industriebereiche (IEC 61000-6-4:2006 + A1:2010); Deutsche Fassung EN 61000-6-4:2007 + A1:2011*. Berlin, Frankfurt: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., September 2011. – auch VDE 0839-6-4:2011-09
- [4] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. UND VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V. (Hrsg.): *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 4-21: Prüf- und Messverfahren – Verfahren für die Prüfung in der Modenverwirbelungskammer (IEC 61000-4-21:2011)*. 2. Berlin, Frankfurt: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., Dezember 2011
- [5] DIN DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. UND VDE VERBAND DER ELEKTROTECHNIK ELEKTRONIK INFORMATIONSTECHNIK E.V. (Hrsg.): *DIN EN 55016-2-3:2014-11, Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Teil 2-3: Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Messung der gestrahlten Störaussendung (CISPR 16-2-3:2010 + A1:2010 + A2:2014); Deutsche Fassung EN 55016-2-3:2010 + A1:2010 + AC:2013 + A2:2014*. Berlin, Frankfurt: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., November 2014. – auch VDE 0877-16-2-3:2014-11
- [6] HOLLOWAY, Christopher L. ; WILSON, Perry F. ; KOEPKE, Galen H. ; CANDIDI, Marco: Total Radiated Power Limits for Emission Measurements in a Reverberation Chamber. In: *IEEE Symposium on Electromagnetic Compatibility* Bd. 2. Boston, MA, USA, August 2003, S. 838 – 843
- [7] KRAUTHÄUSER, Hans G.: Statistical Analysis of the Correlation of Emission Limits for Established and Alternative Test Sites. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 53 (2011), November, Nr. 4, S. 863 –875. <http://dx.doi.org/10.1109/TEMC.2010.2102764>. – DOI 10.1109/TEMC.2010.2102764. – ISSN 0018–9375
- [8] MENSSEN, Benjamin ; BRECH, Henrik ; GARBE, Heyno: On determining the directivity of electrically large, unintentional electromagnetic radiators – Assessment of a real electronic equipment. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. Breslau, Polen, September 2016. – ISSN 2325–0364, S. 520–525
- [9] MENSSEN, Benjamin ; GENENDER, Evgeni ; KRETH, Adrian ; GARBE, Heyno: Investigation of the frequency correlation between radiation patterns of unintentional emitters for large frequency bands. In: *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. Rom, Italien, September 2012. – ISSN 2325–0356, S. 1–5
- [10] ROHDE & SCHWARZ GMBH & Co. KG: *R&S@EMC32 Measurement Software*. <https://www.rohde-schwarz.com/de/software/emc32/>. Version: 9.15
- [11] WILSON, Perry F. ; HILL, David A. ; HOLLOWAY, Christopher: On Determining the Maximum Emissions From Electrically Large Sources. In: *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 44 (2002), Februar, Nr. 1, S. 79 – 86