

Statistische Ermittlung der Direktivität eines elektrisch großen Prüflings mittels analytischer und numerischer Verfahren

M. Sc. Xiaowei Wang, M. Sc. Matthias Hirte, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick,
Otto-von-Guericke-Universität, Institut für Medizintechnik
Lehrstuhl für EMV, Magdeburg, Deutschland, xiaowei.wang@ovgu.de

1 Einleitung

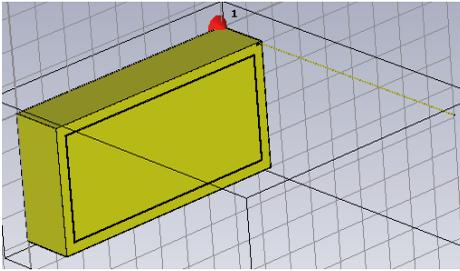
Die direkte Messung der maximalen elektrischen Feldstärke eines elektrisch großen Prüflings (engl. equipment under test, EUT) mit hoher Frequenz ist komplex und zeitaufwendig. Im Frequenzbereich oberhalb von 1 GHz ist die Modenverwirbelungskammer (MVK) eine geeignete alternative Testumgebung, weil das konkrete Abstrahldiagramm irrelevant ist. Mit Hilfe der Direktivität kann die gemessene abgestrahlte Leistung aus der Messung in der MVK in die entsprechende elektrische Feldstärke konvertiert werden [6].

Dieser Beitrag untersucht den Einfluss verschiedener elektrisch großer Kabelkonfigurationen des EUT auf die Schätzung der Direktivität. Ziel dieser Arbeit ist die Vorstellung der Ergebnisse der abgestrahlten Feldstärke und der Direktivität dieses neuen Simulationsmodells, welches ein Kombination aus dem eigentlichen Prüfling und der Anschlussleitung darstellt. Die Interpretation der Ergebnisse führt zu einer verlässlichen Möglichkeit, die gemessene Gesamtstrahlungsleistung in einer MVK in die äquivalente elektrische Feldstärke in einem bestimmten Abstand zu transformieren.

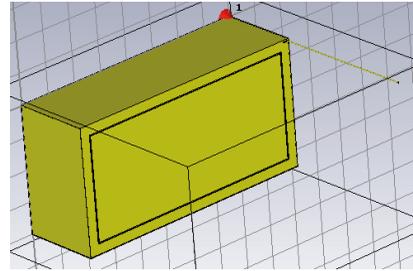
Ein quaderförmiges Metallgehäuse in der Größe eines Computergehäuses mit einem Schlitz und einer Anschlussleitung wird als Prüfling für den Frequenzbereich von 1 GHz bis 6 GHz berücksichtigt (siehe Abbildung 1). Die Anschlussleitung läuft zunächst im Inneren des Gehäuses und wird durch eine kleine Öffnung nach außen geführt. Als Anregung wird eine diskrete Quelle mit einer Leistung von 1 W zwischen der Innenwand des Gehäuses und der Leitung betrachtet. Eine neuartige statistische Untersuchung betrachtet die zufällige Verlegung der Anschlussleitung, die von der Prüflingsoberfläche ausgeht. Die Leitungslänge und die Größe des Gehäuses werden beliebig variiert. Danach werden die abgestrahlte Feldstärke des Kabels und des Prüflings berechnet. Diese Prozedur wird mehrfach wiederholt und statistisch ausgewertet. Für unterschiedliche Konfigurationen wird die maximale Richtwirkung mittels numerischer Simulation (CST MWS Studio) bestimmt. Die Simulationsergebnisse werden mit analytischen Verfahren [3] verglichen. Anschließend werden die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion und die Verteilungsfunktion berechnet, um den Modalwert der Direktivität (das Maximum der Dichtefunktion) besser darzustellen.

2 Beschreibung des Simulationsverfahrens

Das quaderförmige Metallgehäuse mit einem Schlitz und einer Anschlussleitung wurde mit Hilfe des Programmpaketes CST Microwave Studio modelliert und dessen maximale dreidimensionale Direktivität berechnet. Diese ist das Maximum der D_θ -Komponente in der Azimutrichtung und der D_φ -Komponente in der vertikalen Richtung. Die statistischen Eigenschaften der Direktivität wurden durch zufällige Änderung der Länge des Drahtes



(a) Beispiel 1 der statistischen Variation



(b) Beispiel 2 der statistischen Variation

Abbildung 1: Quaderförmiges Metallgehäuse mit einem Schlitz und einer Anschlussleitung als Simulationsmodell für einen Prüfling im Frequenzbereich von 1 GHz bis 6 GHz

Tabelle 1: Statistische Variation der Parameter

Parameter	Statistischer Variationsbereich
Breite des Gehäuses	Zufallszahl zwischen 2 cm bis 28 cm
Länge des Drahtes	Zufallszahl zwischen 30 cm bis 80 cm

und der Breite des Gehäuses erhalten. Die Länge des Gehäuses war mit 40 cm konstant und die Höhe betrug 20 cm. Der Variationsbereich der Breite des Gehäuses war 2 cm bis 28 cm und der Variationsbereich der Länge des Drahtes betrug 30 cm bis 80 cm, wie es in Tabelle 1 dargestellt ist. Der Draht wurde jeweils im Gleichtakt durch eine Quelle zwischen dem Draht und der Innengehäusewand angeregt, wie in Abbildung 2 dargestellt. Die Emission des simulierten Prüflings ist die Summe der Emissionen des Kabels und des Gehäuses.

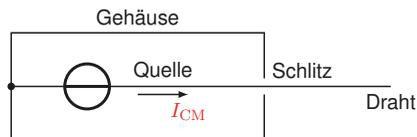


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Gehäuses und der nach außen geführten Leitung

3 Statistische Eigenschaften der maximalen Direktivität

3.1 Prüfling mit Anschlussleitung

Die statistische Verteilung der maximalen Direktivität mit dreidimensionaler Abtastung ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Mittelwert dieser Direktivität wird mit dem Ergebnis von Wilson [6] verglichen. Die maximale dreidimensionale Direktivität mit dreidimensionaler

Abtastung für einen unbeabsichtigten Strahler kann durch

$$\langle D_{\text{co,max}} \rangle = \begin{cases} 1,55, & ka \leq 1 \\ \frac{1}{2} \left[\ln(N_s) + \frac{1}{2N_s} + 0,577 \right], & ka > 1 \end{cases} \quad (1)$$

beschrieben werden. Dabei ist $N_s = 4 \lfloor (ka)^2 + 2ka \rfloor$, wobei $\lfloor ka \rfloor$ die größte ganze Zahl kleiner oder gleich ka (elektrische Größe) ist. Dabei bezeichnet k die Wellenzahl und a den kleinsten Kugelradius, der den Prüfling einschließt. Aus Abbildung 4 ist zu erkennen, dass der Vergleich der Simulationsergebnisse und der Werte nach der Theorie nach Wilson eine gute Übereinstimmung mit geringfügigen Abweichungen zeigt. Das quaderförmige Metallgehäuse mit einem Schlitz und einer Anschlussleitung wirkt eher als absichtlicher Strahler, was zu einer höheren Direktivität in den Simulationsergebnissen führt.

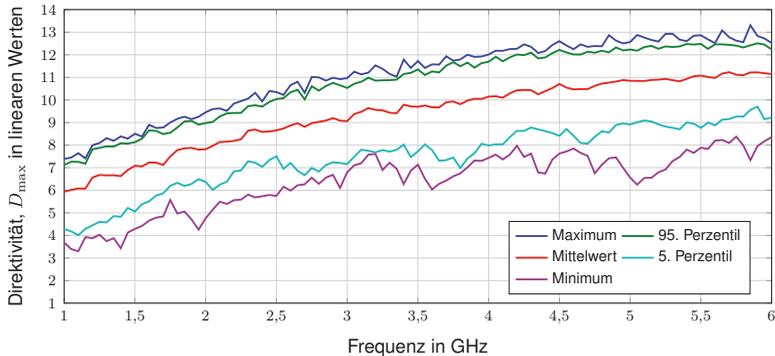


Abbildung 3: Statistische Verteilung der maximalen dreidimensionalen Direktivität für das Modell einschließlich des Gehäuses mit angeschlossener Leitung



Abbildung 4: Mittelwert des maximalen Direktivität D_{max} für das Modell einschließlich des Gehäuses mit angeschlossener Leitung

3.2 Prüfling ohne angeschlossene Leitung

Die gleichen Untersuchungen wurden für das Prüflingsmodell ohne Anschlussleitung wiederholt. Eine lineare Dipolquelle mit einem Radius von 1 mm und einer Länge von 100 mm

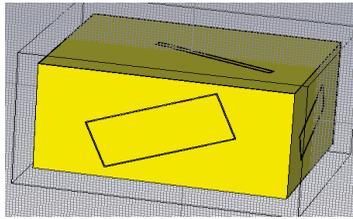


Abbildung 5: Quaderförmiges Metallgehäuse mit mehreren zufällig angeordneten Schlitz-zen als Simulationsmodell für einen Prüfling im Frequenzbereich von 1 GHz bis 6 GHz

befand sich im Inneren des Gehäuses. Die Eingangsleistung betrug 1 W. Die statistischen Eigenschaften der Direktivität wurden durch zufälliges Verändern der Anzahl der Schlitz-ze auf der Gehäuseoberfläche erhalten. Dabei wurden auch die Größe der Schlitz-ze, die Positionen der Schlitz-ze und die Drehwinkel der Schlitz-ze variiert, siehe Abbildung 5. Ein Zufallszahlengenerator wurde in der CST-Software programmiert, so dass jedes Mal das simulierte Modell zufällig durch Berücksichtigung aller dieser Variationsfaktoren verändert wurde. Die maximale Direktivität wurde für jeden Prüfling bestimmt. Die Auswertung basiert auf 110 Prüflingen, welche mit unterschiedlichen Schlitzparametern abgebildet werden. Auf diese Weise kann eine große Anzahl von Stichproben erzeugt und simuliert werden, um die statistischen Eigenschaften der Direktivität zu bestimmen, deren Perzentile in Abbildung 6 dargestellt sind.

3.2.1 Dreidimensionale Abtastung

Bei dreidimensionaler Abtastung für das Gehäuse mit Schlitz-zen ohne angeschlossene Leitung zeigt der Vergleich der Simulationsergebnisse und der Werte nach der Theorie nach Wilson eine bessere Übereinstimmung, wie in Abbildung 7 zu sehen ist. Für die beiden Fälle wurden eine ähnliche Tendenz und nur geringfügige Unterschiede beobachtet. Die angeschlossene Leitung könnte im Normalfall eine wichtige Strahlungsquelle sein. Die kleine Schwingungen sind durch statistische Schwankungen zu begründen.

3.2.2 Eindimensionale Abtastung

Die maximale Direktivität mit eindimensionaler Abtastung (nur die D_θ -Komponente in der Azimutrichtung) wird nach

$$\langle D_{\max} \rangle = \begin{cases} 2,45, & ka \leq 1 \\ \ln(N_c) + \frac{1}{2N_c} + 0,577, & ka > 1 \end{cases} \quad (2)$$

bestimmt, wobei $N_c = 2(2 \lfloor ka \rfloor + 1)$. Die so bestimmte Direktivität ist in Abbildung 8 dargestellt. Im Vergleich mit der dreidimensionalen Abtastung, beträgt die Direktivität durchschnittlich 3 dB weniger. Dieser Effekt kann auch in [5] beobachtet werden. Abbildung 9 zeigt die Differenz der Direktivität mit dreidimensionaler und eindimensionaler Abtastung nur für das Gehäuse. Diese Differenz variiert für die numerische Simulation zwischen 0,03 bis 6,32 und für die Theorie nach Wilson zwischen 1,98 und 3,57, siehe Tabelle 2. Dies erklärt auch, dass die Standardabweichung von 1,13 der numerischen Simulationsergeb-

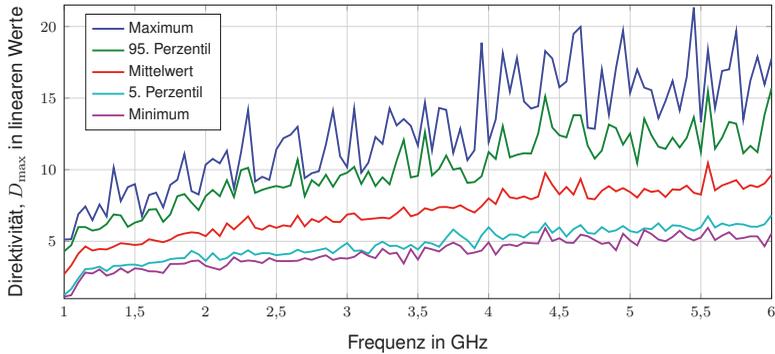


Abbildung 6: Statistische Verteilung der maximalen Direktivität mit dreidimensionaler Abtastung nur für das Gehäuse, ohne angeschlossene Leitung

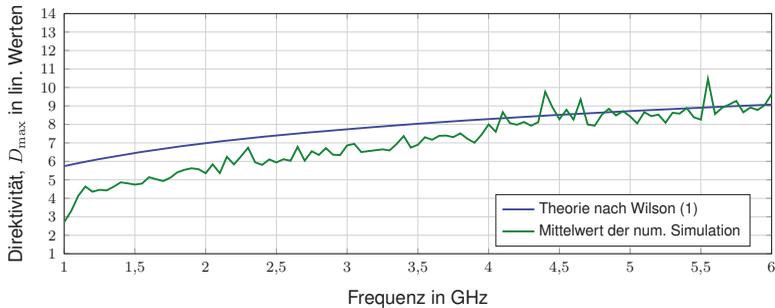


Abbildung 7: Mittelwert der maximalen Direktivität D_{\max} mit dreidimensionaler Abtastung nur für das Gehäuse, ohne angeschlossene Leitung

Tabelle 2: Statistisch Eigenschaften der Differenz der Direktivität

Parameter	Simulation	Wilson Theorie
Mittelwert	2,56 (4,08 dB)	2,97 (4,73 dB)
Standardabweichung	1,13	0,44

nisse größer ist als die Standardabweichung von 0,44 der Theorie nach Wilson. Die relativ große Standardabweichung wird durch die Variation des simulierten Prüflings hervorgerufen. Die mittleren Abweichungen sind jeweils größer als 3 dB. Es ist zu erwarten, dass die mittlere Abweichung geringer wird und näher an 3 dB liegt, wenn mehr Abtastpunkte gewählt werden.

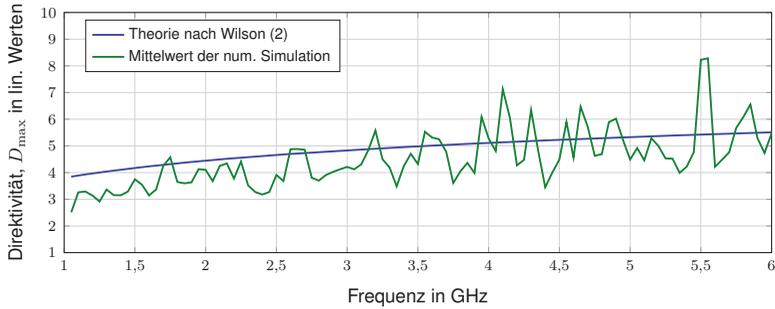


Abbildung 8: Mittelwert der maximalen Direktivität D_{\max} mit eindimensionaler Abtastung nur für das Gehäuse, ohne angeschlossene Leitung

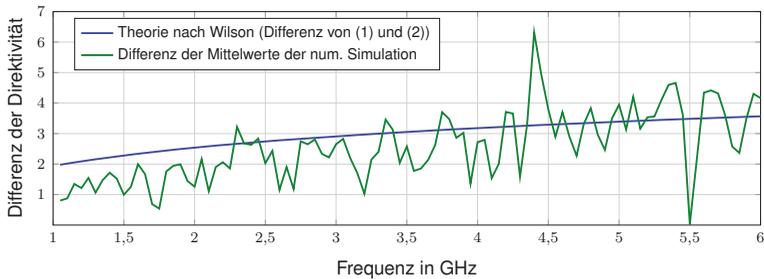


Abbildung 9: Differenz der Direktivität von dreidimensionaler Abtastung und eindimensionaler Abtastung nur für das Gehäuse, ohne angeschlossene Leitung

4 Analytische Beschreibung

Für die Direktivität eines quaderförmigen Metallgehäuses mit Schlitz- und Anschlussleitungen gibt es keine zufriedenstellende analytische Lösung. Ziel dieses Abschnitts ist es, eine analytische Beschreibung für einen speziellen Fall zu finden, bei dem die Abstrahlung über die Leitung dominiert. Die Leitung ist am Ende offen, so dass diese als Stehwellenantenne [4] betrachtet werden kann. Dementsprechend kann die Abstrahlung durch eine Stehwellenantenne modelliert werden, für die die Direktivität nach folgender Formel [2] berechnet werden kann.

$$D_{\max} \approx 2 \cdot \left(9.1 \frac{l_{\text{SWA}}}{\lambda_0} - 1.7 \right) \left(2.1 + \ln \frac{l_{\text{SWA}}}{\lambda_0} \right)^{-1} \quad (3)$$

Eine gute Übereinstimmung mit ausreichender Genauigkeit zwischen den analytischen Ergebnissen und den Simulationsergebnissen ist in Abbildung 10 zu erkennen. Die Drahtresonanzen können in den Simulationsergebnissen beobachtet werden. Aufgrund der Bodenreflexion in der Simulation gibt es einen leichten Resonanzeffekt um 4,95 GHz.

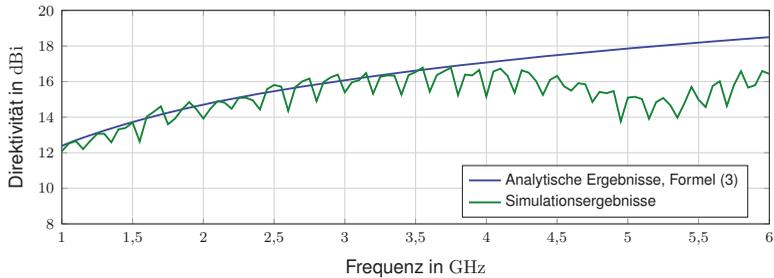


Abbildung 10: Maximale Direktivität mit dreidimensionaler Abtastung für das Gehäuse mit einem daran befestigten Draht mit einer Länge von 1 m über einer Masseebene, verglichen mit der Direktivität einer Stehwellenantenne

5 Verteilungsfunktion der Direktivität

Das theoretische Maximum der Direktivität liegt im Bereich zwischen 1 und unendlich. In diesem halb-unendlichen (oder auf einer Seite begrenztem) Intervall stehen eine unterschiedliche Verteilungsfunktionen, beispielsweise die χ^2 -Verteilung, die Exponentialverteilung, die Gammaverteilung oder die Rayleighverteilung zur Verfügung. Jedoch zeigt die Gammaverteilung die beste Übereinstimmung, weshalb die Direktivität für das quaderförmige Metallgehäuse mit einem Schlitz und einer Anschlussleitung mit statistischer Variation durch eine Gammaverteilung angenähert werden kann. Diese Verteilungsfunktion der Direktivität ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Dichtefunktion (nach Glättung [1]) in Abbildung 12 zeigt, dass die maximale Wahrscheinlichkeit nahezu dem Mittelwert der Direktivität entspricht.

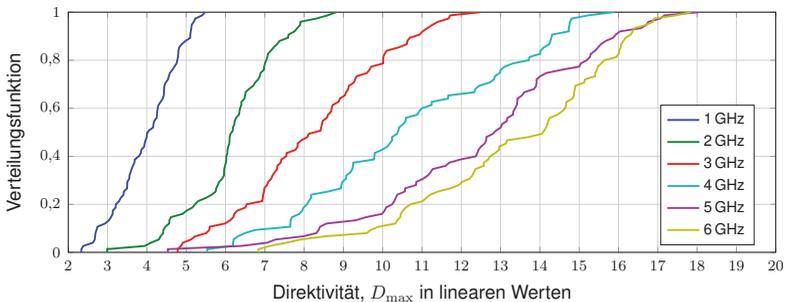


Abbildung 11: Verteilungsfunktion der Direktivität für das quaderförmige Metallgehäuse mit Schlitz und einer Anschlussleitung mit statistischer Variation an 6 Frequenzpunkten

6 Schlussfolgerung und Diskussion

In diesem Beitrag wurde eine statistische Untersuchung der Direktivität mit einem quaderförmigen geschlitzten Metallgehäuse als Prüflingsmodell vorgestellt. Der Vergleich der

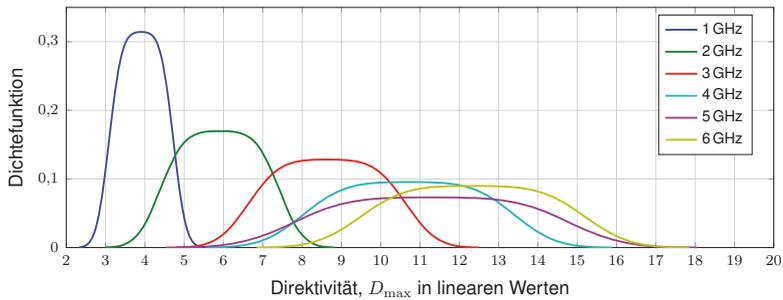


Abbildung 12: Dichtefunktion der Direktivität für das quaderförmige Metallgehäuse mit Schlitzen und einer Anschlussleitung mit statistischer Variation an 6 Frequenzpunkten

Erwartungswerte der Direktivität zwischen der numerischen Simulation und analytischen Verfahren zeigt eine gute Übereinstimmung. Für das Modell des quaderförmigen Metallgehäuses mit einem Schlitz und einer Anschlussleitung kann die dominierende Leitung als Stehwellenantenne aufgefasst werden. Die Verteilungsfunktion der Direktivität folgt einer Gammaverteilung, die für einen unbeabsichtigten Strahler eine geeignete Näherung darstellt.

Literatur

- [1] MATLAB, Version 2012. <http://de.mathworks.com/help/stats/ksdensity.html>
- [2] KARK, Klaus W.: *Antennen und Strahlungsfelder – Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung*. 5. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014. – 508 S. #<http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-03616-4#>. – ISBN 9783658036164
- [3] KRAUTHÄUSER, Hans G.: *Grundlagen und Anwendungen von Modenverwirbelungskammern*. 1. Magdeburg : Nitsch, Jürgen and Styczynski, Zbigniew Antoni, 2007 (Res Electricae Magdeburgenses, Magdeburger Forum zur Elektrotechnik 17). – ISBN 978-3-929757-43-9
- [4] WANG, Jianqing ; FUJIWARA, O. ; SASABE, K.: A simple method for predicting common-mode radiation from a cable attached to a conducting enclosure. In: *Microwave Conference, Asia-Pacific* Bd. 3, 2001, S. 1119–1122
- [5] WILSON, P.: Emission and immunity testing: test object electrical size and its implication. In: *Electromagnetic Compatibility, International Symposium on* Bd. 2, 2004, S. 349–352
- [6] 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