

# Messtechnische Verifikation der Eigenschaft „Unintentional Radiator“ für ein reales Objekt

B. Sc. Henrik Brech, [henrik.brech@stud.uni-hannover.de](mailto:henrik.brech@stud.uni-hannover.de)  
Dipl.-Ing. Benjamin Menßen, [menssen@geml.uni-hannover.de](mailto:menssen@geml.uni-hannover.de)  
Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, [garbe@geml.uni-hannover.de](mailto:garbe@geml.uni-hannover.de)

Leibniz Universität Hannover, Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik, Appelstr. 9a, 30167 Hannover, Deutschland

## 1 Einleitung

Die Messung der elektromagnetischen Störaussendung elektronischer Geräte ist ein wesentlicher Aspekt im Bereich der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV).

In [1] wird die Problematik bei der Betrachtung von elektrisch großen Objekten beschrieben. Es wird darauf verwiesen, dass aktuelle Messverfahren den Charakter unbeabsichtigter Strahler [2] insbesondere für Frequenzen oberhalb 1 GHz nicht korrekt erfassen, da „Unbeabsichtigte Strahler“ die Eigenschaft besitzen, dass die Richtung der maximalen Störaussendung nicht a priori bestimmbar ist. Dies lässt sich durch transiente und stochastische elektronische Prozesse innerhalb der komplexen Leitungsstrukturen des Objekts erklären. Stochastische Ansätze sollen diese Problematik greifbar machen und die vorhandenen Messverfahren dahingehend erweitern. Ein Ansatz zur Beschreibung der maximalen Direktivität von unbeabsichtigten Strahlern wird in [3] vorgestellt. Bezugsgröße für den Verlauf der maximalen Direktivität ist die elektrische Größe  $k_a$  des Objekts. Diese Ansätze wurden u. a. in [4] schon in Simulationen an generischen Objekten verifiziert.

Eine Verifikation anhand von Messungen an realen Objekten steht jedoch noch aus. Dazu wurde in dieser Arbeit die Hauptplatine eines Desktop-PCs ausgewählt. Die Untersuchung von transienten und stochastischen Prozessen ist dabei nicht trivial. Die Wahl des Messgerätes sowie des zu wählenden Modus zur Detektion der Emission werfen Probleme auf, wie z. B. die Nichtdetektion von transienten Signalanteilen. Diese Problematik soll in dieser Arbeit näher beleuchtet werden, so dass eine Empfehlung bezüglich des notwendigen Messverfahrens ausgesprochen werden kann.

Schließlich soll anhand der Ergebnisse eine Diskussion über die Größe des EUTs geführt werden, ähnlich wie es in [5] angeregt wurde.

## 2 Eigenschaft „Unintentional Radiator“

Der Begriff „Unintentional Radiator“ beschreibt in der EMV ein Objekt, das elektromagnetische Strahlung emittiert, obwohl es nicht für diesen Zweck gebaut wurde [2]. Diese Definition ist jedoch sehr allgemein. Ein Kriterium, das technisch nachweisbar ist, wird von Menssen et al. in [4] vorgestellt. Als Größe wird dabei die maximale Direktivität des unbeabsichtigt strahlenden Objekts betrachtet. Die Direktivität wird in [6] definiert als:

$$D(\phi_0, \theta_0) = \frac{P(\phi_0, \theta_0)}{\frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\phi, \theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta d\phi} \quad (1)$$

Dabei ist die maximale Direktivität für eine Polarisation, hier durch den kopolarisierten Anteil dargestellt, definiert als:

$$\langle D_{\max, \text{co}} \rangle = \max \left\{ \frac{P_{\text{co}}(\phi_0, \theta_0)}{\langle P(\phi, \theta) \rangle} \right\} \quad , \quad (2)$$

wobei  $P_{\text{co}}(\phi_0, \theta_0)$  die gemessene Leistung in eine Raumrichtung ist und  $\langle P(\phi, \theta) \rangle$  der Mittelwert der gesamten gemessenen Leistung ist. Für einen unbeabsichtigten Strahler wurde u. a. von Wilson et al. [3] ein stochastischer Ansatz entwickelt, der den Verlauf der maximalen Direktivität durch

$$\langle D_{\max, \text{co}} \rangle \approx \begin{cases} 1.55 & , \text{für } ka \leq 1 \\ \frac{1}{2} \cdot \left( 0.577 + \ln(N_s) + \frac{1}{2N_s} \right) & , \text{für } ka > 1 \end{cases} \quad (3)$$

beschreibt. Dabei beschreibt  $N_s$  die Anzahl der unabhängigen Samples im gesamten Raum, beschrieben durch:

$$N_s = 4 \cdot (ka)^2 + 8 \cdot ka \quad . \quad (4)$$

Der Ausdruck  $ka$  in Gl. (4) beschreibt die elektrische Größe, die das Produkt aus der Wellenzahl  $k$  und dem Radius  $a$  einer das Objekt minimal umschließenden Kugel ist. Der in Gl. (3) vorgestellte Verlauf der maximalen Direktivität gilt für den dreidimensionalen Fall. Da das Messen einer dreidimensionalen Richtcharakteristik unverhältnismäßig zeitaufwendig ist, wird in [3] ebenfalls eine Näherung für den Schnitt in der Ebene vorgestellt:

$$\frac{\langle P_{\text{rec}, \text{max}} \rangle}{\langle P_{\text{rec}} \rangle} \approx \begin{cases} 2.45 & , \text{für } ka \leq 1 \\ 0.577 + \ln(4 \cdot ka + 2) + \frac{1}{8 \cdot ka + 4} & , \text{für } ka > 1 \end{cases} \quad (5)$$

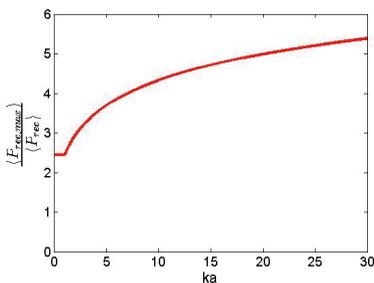


Abbildung 1: Theoretischer Verlauf der Direktivität in einer Schnittebene  $\frac{\langle P_{\text{rec}, \text{max}} \rangle}{\langle P_{\text{rec}} \rangle}$

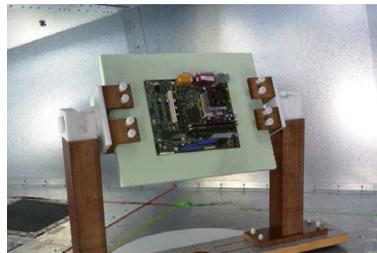


Abbildung 2: Hauptplatine eingespannt in der Halterung

Gl. (5) dient im weiteren Verlauf als technische Definition der Eigenschaft „Unintentional Radiator“. Die Gleichung bildet somit die Grundlage zur messtechnischen Verifikation.

### 3 Messungen

In den folgenden Abschnitten wird die Messdurchführung zur Verifikation der Eigenschaft „Unintentional Radiator“ präsentiert. Dazu wird zunächst der Messaufbau vorgestellt. Anschließend werden unterschiedliche Messergebnisse vorgestellt, bei denen verschieden Messgeräte verwendet werden, um eine zweckmäßige Wahl des Messgeräts zu erreichen, mit dem die geforderte Eigenschaft verifiziert werden kann.

#### 3.1 Messaufbau

Die technische Definition eines unbeabsichtigten Strahlers nach Gl. (5) soll jetzt mit Hilfe eines geeigneten Messaufbaus für ein reales elektronisches Objekts verifiziert werden. Ein schematischer Messaufbau ist in Abb. 3 gezeigt. Dazu wird eine GTEM-Zelle als Messumgebung verwendet, in der ein automatisierter Drehteller eingebaut ist. Die Ansteuerung des Drehtellers und Auswertung der Messdaten erfolgt über eine dafür entwickelte GUI in MATLAB. Wichtige Parameter für die Messdurchführung sind u. a. die Schrittweite zwischen den Messpunkten und die Wartezeit, die während einer Messung in einem Punkt verweilt werden soll. Darüber hinaus können verschiedenste Parameter an das Messgerät übergeben werden, um z.B. den Frequenzbereich oder die Amplitudeinstellungen zu verändern.

Als EUT wird die Hauptplatine eines Computers genutzt, die aus dem Gehäuse ausgebaut wurde (siehe Abb. 2). Das Entfernen des Metallgehäuses des Computers dient zum einen dazu, messbare Feldwerte zu erreichen und zum anderen dazu, Richtdiagramme durch metallische Gegenstände, die nicht Teil des Strahlers sind, nicht zu verfälschen. Die Hauptplatine bietet sich als EUT an, da sie ein im Alltag häufig anzufindendes elektronisches Objekt ist und sich in ersten Tests herausgestellt hat, dass sie

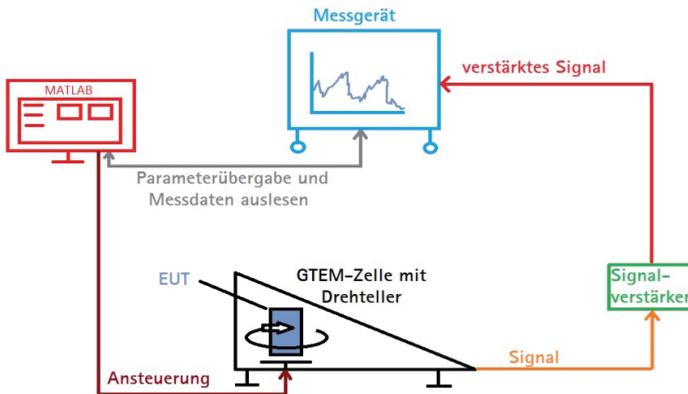


Abbildung 3: Schematischer Messaufbau

deutlich messbare Feldwerte aussendet. Sie wird von sämtlicher Peripherie, wie z. B. der Festplatte, befreit. Auf die Weise wird versucht ein möglichst einfaches EUT zu untersuchen. Die Abmessungen der Platine sind 0,244m x 0,203m x 0,06m, was einem Radius  $a$  von ca. 0,16 m entspricht. Die Hauptplatine wird, wie in Abb. 2 gezeigt, in eine Halterung eingespannt, die es erlaubt die Platine variabel auszurichten. Lediglich das Netzteil des Desktop-PCs wird zum Betrieb der Platine benötigt. Es wird so in der GTEM-Zelle positioniert, dass es sich nicht zwischen dem Port der GTEM-Zelle und dem EUT befindet. Betrieben wird die Platine, indem das Netzteil angeschaltet wird und keine weiteren Befehle folgen. Dadurch gerät sie in einen konstanten Zustand, in dem ein kurzzeitig angeschlossener Monitor die Meldung „Operating system not found“ anzeigt. Die Platine befindet sich somit in einem definierten Betriebsmodus und emittiert messbare Strahlung über einen breiten Frequenzbereich. Inwiefern Reflexion und Absorption am Netzteil Einfluss auf den Radius  $a$  hat, bleibt auszuwerten.

Da die ausgesendeten Feldstärken sehr gering sind, wird zusätzlich ein Signalverstärker mit einer Verstärkung von 20 dB in die Messkette eingefügt. Mit diesem Messaufbau können somit die folgenden Messungen durchgeführt werden, um die Eigenschaft „Unintentional Radiator“ für das gewählte EUT zu untersuchen. Dabei kann das EUT mit Hilfe der Einspannvorrichtung verschieden orientiert werden, um in unterschiedlichen Schnittebenen zu messen. Zusätzlich können unterschiedliche Messgeräte verwendet werden, um die verschiedenen Signaleigenschaften zu erfassen.

## 3.2 Messen mit Spektrumanalysator

### 3.2.1 Maximalmalwerterfassung

Zur Detektion der maximal emittierten Strahlung, wird in [7] die Messung mit einem Spektrumanalysator im Maximalwerterfassungs-Modus empfohlen. Die ersten Ergebnisse der Messungen führen zu dem Verlauf in Abb. 4. Es kann jedoch noch keine Aussage über den Radius  $a$  getroffen werden, da der Verlauf nicht mit dem Verlauf nach Gl. (5) übereinstimmt. Im niedrigeren Frequenzbereich sind die Werte teilweise sehr hoch, wohingegen im höheren Frequenzbereich die Werte sehr nahe bei Eins liegen, was isotropes Strahlungsverhalten bedeuten würde.

Die niedrigen Werte bei höheren Frequenzen deuten darauf hin, dass die Computerplatine bei diesen Frequenzen kaum noch messbare Felder emittiert und somit lediglich das Eigenrauschen des Messgerätes gemessen wird. Aus diesem Grund wird zusätzlich noch eine Referenzmessung durchgeführt, um das Rauschen zu messen. Die Messwerte werden mit der Referenzmessung verglichen und verworfen, falls ein Messwert das Rauschen nicht mit mindestens 3 dB überschreitet. Als zusätzliches Kriterium werden Frequenzen verworfen, bei denen mehr als 10 % der Messwerte in einer Schnittebene die Referenzmessung verletzen. Dies ist notwendig, um das Abtasttheorem nach Gl. (4) zu erfüllen und eine stochastische Auswertung zu ermöglichen. In Abb. 5 ist die zuvor dargestellte Messung nach Anwendung des Ausschlusskriteriums dargestellt. Bei höheren Frequenzen sind dadurch viele Werte nicht mehr dargestellt. Im niedrigeren Frequenzbereich sind jedoch nach wie vor die Ausreißer erkennbar, was mit der Funktionsweise des Spektrumanalysators zusammenhängen muss. Die kurzzeitig, stochastisch auftretenden Signalanteile können nicht hinreichend gut von dem Messgerät erfasst werden. Der dargestellte Verlauf von  $\frac{\langle P_{rec,max} \rangle}{P_{rec}}$  entspricht somit nicht Gl. (5). Es wird

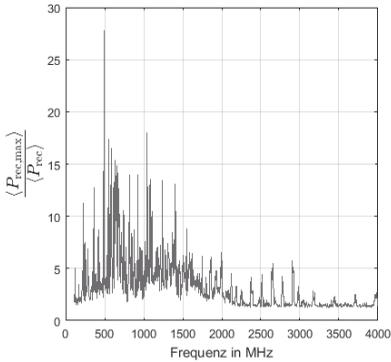


Abbildung 4: Messung mit Spektrumanalysator mit Maximalwertfassung

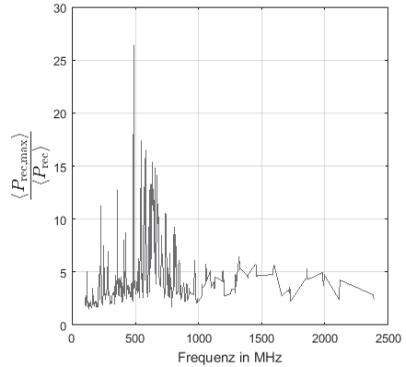


Abbildung 5: Maximalwerterfassung nach Ausschlusskriterium

im Folgenden versucht, die Messungen mit dem Spektrumanalysator mit Mittelwertbildung durchzuführen.

### 3.2.2 Mittelwertbildung

Bei der Messung mit Spektrumanalysator mit Maximalwerterfassung ergeben sich teilweise sehr hohe Werte für  $\langle \frac{P_{rec,max}}{P_{rec}} \rangle$ . Durch die Nutzung der Mittelwerterfassung wird versucht, diese Spitzenwerte zu glätten. Zusätzlich wird dadurch der Rauschpegel gesenkt, so dass weitere Frequenzen sichtbar werden könnten. Abb. 6 zeigt eine solche Messung. Die Spitzenwerte dieser Messung liegen weit unter den Spitzenwerten der Messungen mit Maximalwerterfassung. Bei Frequenzen geringer elektromagnetischer Emission ergeben sich jedoch weiterhin Werte, die das Rauschen nicht überschreiten und somit der theoretische Verlauf aus Gl. (5) weiterhin nicht angenähert werden kann. Die Nutzung des im vorigen Abschnitt vorgestellten Ausschlusskriteriums ist deshalb in den weiteren Untersuchungen weiter zu verfolgen.

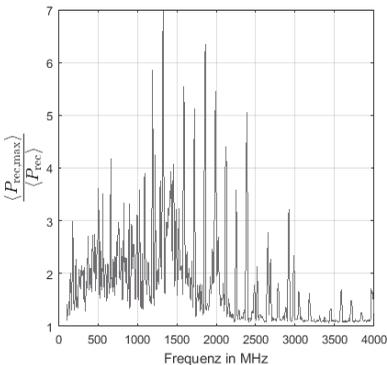


Abbildung 6: Mittelwertbildung ohne Ausschlusskriterium

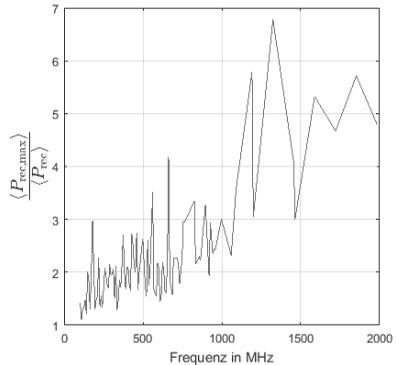


Abbildung 7: Mittelwerterfassung mit Ausschlusskriterium

Das Ergebnis des in Abb. 6 dargestellten Messergebnisses nach Anwendung des Ausschlusskriteriums ist in Abb. 7 zu beobachten. Es wird hier nur der Frequenzbereich bis 2 GHz betrachtet, da sämtliche Frequenzen darüber das Ausschlusskriterium erfüllen. Die dargestellten Messwerte lassen sich jedoch nach wie vor nicht mit dem Verlauf aus Gl. (5) vereinbaren.

Die Untersuchung mit dem Spektrumanalysator scheint an dieser Stelle nicht mehr weiter zu führen. Zur Detektion möglichst aller von der Platine emittierten Signalanteile wird ein Messgerät benötigt, das auch kurzzeitig auftretende Signale erkennt. Aus diesem Grund wird zur folgenden Messung ein Echtzeit-Spektrumanalysator verwendet.

### 3.3 Messen mit Echtzeit-Spektrumanalysator mit Maximalwerterfassung

Nachdem die Messergebnisse aus den Messungen mit einem Spektrumanalysator die Eigenschaft „Unintentional Radiator“ für das untersuchte Objekt nicht verifizieren konnten, wird im Folgenden ein Echtzeit-Spektrumanalysator (engl.: real-time spectrum analyzer, kurz: RTSA) verwendet. Dieser zeichnet sich dadurch aus, dass die Messungen im Zeitbereich durchgeführt werden und der Frequenzbereich mittels einer Kurzzeit-Fourier-Transformation abgebildet wird. Somit sollten kurzzeitige Signalanteile besser erfasst werden.

Die Messungen mit dem RTSA werden ebenfalls mit Maximalwerterfassung und einem zusätzlich zugeschalteten Positive-Peak-Detektor durchgeführt. Auf diese Weise wird erneut versucht das emittierte Maximum über den Messzeitraum zu detektieren. Erste Messungen, wie in Abb. 8 gezeigt, weisen bereits Charakteristika von Gl. (5) auf. Für diese Messung wurde pro Messposition 30 Sekunden lang gemessen. Es ist zu erkennen, dass im Bereich messbarer Störemission die Werte für  $\frac{\langle P_{\text{rec,max}} \rangle}{P_{\text{rec}}}$  mit steigender Frequenz tendenziell ebenfalls ansteigen. Es lassen sich jedoch sehr hohe Ausreißer erkennen, die das Ergebnis nicht zufriedenstellend darstellen. Aufgrund der erkennbaren Ähnlichkeit mit dem theoretischen Verlauf wird eine Optimierung an die Gl. (5) mit der

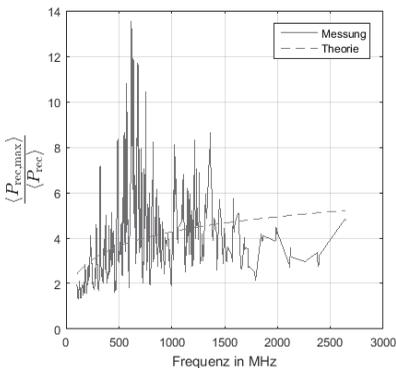


Abbildung 8: Messung mit RTSA und kurzer Messzeit

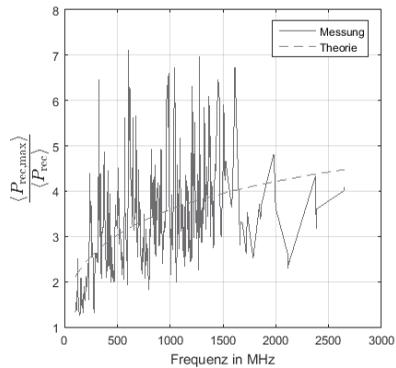
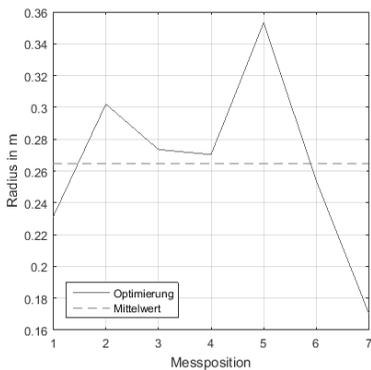


Abbildung 9: Messung mit RTSA und langer Messzeit

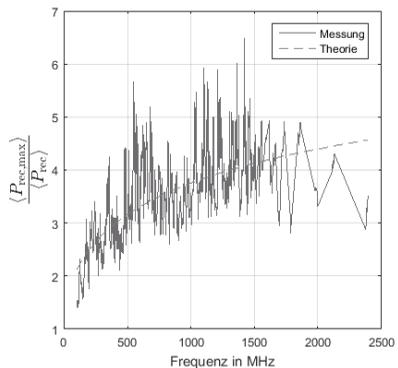
Methode der kleinsten Quadrate implementiert, die den Verlauf der Theoriekurve an die Messwerte anpasst. Diese Optimierung ermittelt den Radius  $a$ , der eine Skalierung der elektrischen Größe  $ka$  zulässt. Für die durchgeführte Messung berechnet die Optimierung einen Radius von  $a = 45$  cm. Dieser Radius erscheint bei geometrischer Betrachtung der Platine tendenziell zu hoch. Dies liegt vor allem daran, dass die Ausreißer in der grafischen Darstellung einen zu hohen Wert verursachen. Die Vermutung liegt nahe, dass sich diese hohen Werte durch die Funktionsweise des Messgeräts begründen lassen. Durch die Echtzeitbandbreite von 140 MHz muss die Verweildauer in einem Messpunkt ausreichend groß gewählt werden, um die einzelnen Frequenzblöcke mehrfach zu durchlaufen.

In der Darstellung in Abb. 9 wird eine Messzeit von 60 Sekunden pro Messposition genutzt. Erster klar erkennbarer Effekt ist, dass die Spitzenwerte deutlich geringer sind als bei der kürzeren Messzeit. Die mittels Optimierung ermittelte Theoriekurve gibt einen Radius  $a$  von ca. 27 cm aus. Dieser Radius liegt ungefähr zwischen dem Radius der Hauptplatine (ca. 16 cm) und dem Radius des Gesamtsystems aus Platine und Netzteil (ca. 29 – 35 cm je nach Orientierung).

Schließlich wird die Messung mit Hilfe der Halterung aus Abb. 2 für mehrere Schnittebenen durchgeführt. Insgesamt wird die Platine in 7 Schnittebenen vermessen. Das Gesamtsystem verändert sich in seiner Anordnung für jede Messung, da das Netzteil in seiner Position fixiert bleibt und lediglich die Position der Hauptplatine verändert wird. In Abb. 10 sind die optimierten Radien aller Messpositionen aufgezeigt. Es lässt sich erkennen, dass die Radien für die verschiedenen Positionen variieren. Die Radien liegen aber alle im Bereich zwischen 16 cm und 35 cm, den Abmessung der Hauptplatine alleine und dem Gesamtsystem. Im Mittel ergibt sich ein Radius  $a$  von ca. 25 cm. Anschließend wird aus allen Messungen ein gemittelter Verlauf generiert und ebenfalls eine Optimierung durchgeführt. Abb. 11 stellt diesen Verlauf dar. Auch hier stellt sich ein optimierter Radius von  $a = 26$  cm ein.



**Abbildung 10: Optimierte Radien aus den 7 Messpositionen**



**Abbildung 11: Mittelung aus mehreren Schnittebenen**

## 4 Zusammenfassung

Das Messen der elektromagnetischen Störaussendung von realen elektronischen Objekten ist aufgrund ihrer unbeabsichtigten, stochastischen Strahlungscharakteristik nicht trivial. Insbesondere für Frequenzen oberhalb 1 GHz ist die Richtung der maximalen Störaussendung nicht vorhersagbar. Um stochastische Ansätze auf vorhandene Messverfahren zu applizieren, muss geprüft werden, ob die Eigenschaft „Unintentional Radiator“ für reale Objekte vorausgesetzt werden kann.

Dieser Fragestellung wurde in dieser Arbeit nachgegangen und es hat sich gezeigt, dass es zunächst wichtig ist, die zweckmäßige Wahl des Messgerätes zu treffen. Messungen mit einem Spektrumanalysator konnten die transienten, stochastisch auftretenden Signalanteile nicht korrekt erfassen, so dass weder mit einer Maximalwertfassung, noch mit einer Mittelwertfassung, die gesuchte Eigenschaft nachgewiesen werden konnte. Schließlich führten die Untersuchungen auf die Wahl eines Echtzeit-Spektrumanalysators (RTSA) mit Maximalwertdetektor zur geeigneteren Messwertfassung. Dadurch konnte anhand einer Hauptplatine eines Desktop-PCs die Eigenschaft „Unintentional Radiator“ verifiziert werden.

Darüber hinaus konnte mit den gewonnenen Messdaten eine Diskussion über die elektrische Größe  $ka$  des Objekts geführt werden. Es konnte gezeigt werden, dass der Radius  $a$  des Systems in etwa dem Radius des Gesamtsystems entspricht, also des Verbunds aus Hauptplatine und Netzteil inklusive Zuleitungen. Somit ist es möglich, basierend auf der Geometrie des Systems, stochastische Methoden nach [1] anzuwenden, um die elektromagnetische Störaussendung des EUTs zu bestimmen.

## Literaturangaben

- [1] Messen, B.; Hamann, D.; Garbe, H., "Extension of the Emission Measurements for Alternative Test Methods above 1 GHz for Unintentional Electromagnetic Radiators", in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, Dresden, Germany, pp. 444-449, 16-22 Aug. 2015
- [2] Federal Communications Commission (FCC), "Title 47 - Telecommunication: Chapter I - FEDERAL COMMUNICATIONS COMMISSION: Subchapter A - GENERAL: Part 15 - RADIO FREQUENCY DEVICES," 47 CFR 15, October 2010
- [3] Wilson, P. F.; Hill, D. A.; Holloway, C. L., "On determining the maximum emissions from electrically large sources," in *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol.44, no.1, pp.79-86, Feb 2002
- [4] Messen, B.; Burghardt, F.; Garbe, H., "Simulation objects to be used as unintentional radiators," in *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMC'14/Tokyo)*, pp.37-40, 12-16 May 2014
- [5] Garbe, H., "How Large is a Large EUT? Influence of the DM-CM Conversion to Radiation", 2009 Kyoto International Symposium on EMC, pp. 677–680, July 2009
- [6] Balanis, C. A., "Antenna Theory - Analysis and Design", *John Wiley & Sons Inc.*, 2005.
- [7] "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 ed. 3.0, 2010