

Statistische Untersuchung von CISPR 12 Messplätzen anhand numerischer Feldsimulationen

M.Sc. Christoph Schwing, Universität Duisburg-Essen, IW/ETS
Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch, Universität Duisburg-Essen, IW/ETS

1. Einleitung

Für die Störaussendungsmessung von Kraftfahrzeugen ist in der internationalen Norm CISPR 12 festgelegt, dass diese Messungen auf einem im Freien gelegenen Messplatz (*en: outdoor test site, OTS*) durchzuführen sind. Alternativ dazu können Absorberräume (*en: absorber lined shielded enclosure, ALSE*) genutzt werden, wenn die Ergebnisse denen entsprechen, die auf einer OTS gewonnen werden. Dazu sind derzeit im zuständigen Gremium CISPR/D Validierungsverfahren in Beratung. Die Eignung eines möglichen Validierungsverfahrens ist in [1] dargestellt worden. Um für das Validierungsverfahren passende Grenzwerte zu definieren, müssen die Unterschiede der Messplätze herausgearbeitet und verstanden sein. Dazu bietet sich die Korrelation von Messverfahren nach CISPR 16-4-5 TR [2] an. In [3] und [4] ist anhand von realen Messungen sowie numerischer Feldsimulationen gezeigt worden, dass Unterschiede zwischen den Messplätzen aufgrund unterschiedlicher Bodenparameter existieren. Im Folgenden wird die Korrelation von ALSE und OTS, im Hinblick auf die Abweichung des jeweiligen Messplatzes zu einer definierten Referenzgröße untersucht. Diese physikalische Referenzgröße ist ein Maß für das Störpotential eines Prüflings hinsichtlich des Funkschutzes.

2. CISPR 12 Validierungsbestrebungen

Messplätze für Störaussendungsmessungen von Fahrzeugen nach CISPR 12 können ein im Freien gelegener Messplatz, aber auch eine Absorberhalle sein. Der im Freien gelegene Messplatz darf nach CISPR 12 keine metallischen, elektromagnetisch reflektierenden Gegenstände innerhalb eines Radius von $d = 30$ m aufweisen, weitere elektrische Bodenparameter sind nicht definiert. Die Absorberhalle wird oft mit metallischem Boden realisiert, es existieren aber auch Absorberhallen mit künstlichem Bodenbelag, welcher den elektrischen Eigenschaften von Asphalt nachempfunden ist. Für Absorberhallen, die laut CISPR 12 ein alternativer Messplatz sind, muss nachgewiesen werden, dass die Ergebnisse, denen auf im Freien gelegenen Messplätzen entsprechen. Derzeit wird in CISPR/D über Verfahren diskutiert, wie die Vergleichbarkeit der zulässigen Messplätze nachgewiesen werden kann. Die Verfahren lehnen sich an die Messung der „*normalized site attenuation*“ (NSA) Methode nach CISPR 16 an, folgen aber der Messmethodik mit fester Antennenhöhe, welche in CISPR 12 definiert ist. Dazu wird eine kleine bikonische Sendeantenne verwendet und die Messplatzdämpfung für horizontale und vertikale Polarisation aufgenommen. Ein Verfahren, welches nur für nicht-metallische Messplätze geeignet ist, nutzt nur die Antennenposition direkt gegenüber der Empfangsantenne, Bild 1, und ist dabei in 1,0 m Höhe aufzustellen.

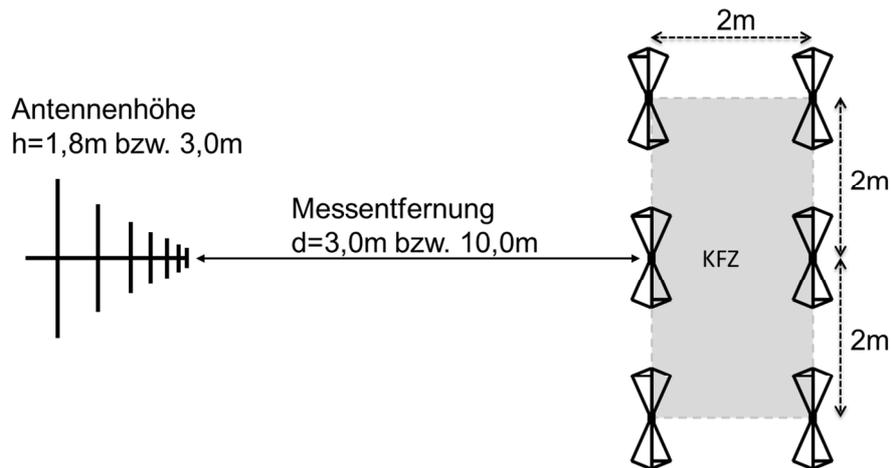


Bild 1: Aufbau zur Validierung von Messplätzen

Ein Verfahren, welches auch für metallische Böden geeignet sein könnte verwendet sechs Positionen der Sendeantenne, die den Umriss eines KFZ annähern, wie in Bild 1 zu sehen ist. Dazu wird die Sendeantenne an jeder Position in $1,0\text{m}$ und $1,5\text{m}$ Höhe aufgestellt. Die so gewonnen 24 Messplatzdämpfungen werden danach zu einer minimalen Messplatzdämpfung verrechnet. Die minimale Messplatzdämpfung soll ein Maß für die auf einem Messplatz maximal zu empfangende Feldstärke sein.

3. CISPR 16-4-5 – Verwendung alternativer Messverfahren

Werden für Störaussendungsmessungen alternative Messverfahren (ATM) eingesetzt, so ist es wünschenswert, dass diese dasselbe Maß an Funkschutz herstellen, das auch etablierte Messverfahren bieten. Der technische Bericht CISPR 16-4-5 TR stellt dafür ein geeignetes Verfahren zu Verfügung. Dieses basiert auf der Analyse einer großen Anzahl unterschiedlicher Prüflinge, welche mit dem etablierten Messverfahren (ETM) sowie dem alternativen Messverfahren untersucht werden. Des Weiteren wird eine Referenzgröße (X_i) für die Störaussendung jedes Prüflings ermittelt. Diese muss das Störpotential eines Prüflings hinsichtlich der Funkschutzanforderungen abbilden können. Für jeden einzelnen Prüfling kann nun eine Differenz zwischen der Referenzgröße und dem Messergebnis ($M_{ATM,i}$, $M_{ETM,i}$) beider Messverfahren ermittelt werden.

$$D_{ATM,i}(f) = X_i(f) - M_{ATM,i}(f) \quad D_{ETM,i}(f) = X_i(f) - M_{ETM,i}(f) \quad (1)$$

Über die Gesamtheit aller untersuchten Prüflinge lässt sich der Mittelwert der Abweichungen zwischen der Referenzgröße und beiden Messverfahren ermitteln.

$$\bar{D}_{ATM,i}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{ATM,i}(f) \quad \bar{D}_{ETM,i}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_{ETM,i}(f) \quad (2)$$

Über die beiden oben angegebenen Formeln kann die inhärente Unsicherheit, ($U_{ATM,inherent}$, $U_{ETM,inherent}$) eines Messverfahrens bezogen auf die Referenzgröße anhand der Standardabweichung (s) abgeschätzt werden.

$$u_{ETM|ATM, \text{inherent}} = s(D_{ETM|ATM}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (D_{ETM|ATM} - \bar{D}_{ETM|ATM})^2}{N-1}} \quad (3)$$

Somit hat man ein Maß für die inhärente Unsicherheit mit der die Messverfahren das Störpotential von Prüflingen bewerten.

Eine Aussage über die systematische Abweichung von Messergebnissen zwischen alternativem und etabliertem Messverfahren kann über den Mittelwert des Korrelationsfaktors (\bar{k}) ausgedrückt werden.

$$\bar{k}(f) = \bar{D}_{ATM}(f) - \bar{D}_{ETM,i}(f) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N M_{ETM,i}(f) - M_{ATM,i}(f) \quad (4)$$

Aus den abgeleiteten Größen lässt sich der Grenzwert des etablierten Messverfahrens (L_{ETM}) auf einen Grenzwert für das alternative Messverfahren (L_{ATM}) umrechnen.

$$L_{ATM} = L_{ETM} - \bar{k} \quad (5)$$

Die hier betrachtete inhärente Unsicherheit u_{inherent} muss zur intrinsischen Unsicherheit der Messverfahren nach CISPR 16-4-1 und der Unsicherheit des Messinstrumentariums hinzugezogen werden, um die erweiterte Unsicherheit jedes Messverfahrens zu erhalten. Ist die erweiterte Unsicherheit des alternativen Messverfahrens kleiner als die des etablierten Messverfahrens, so wird L_{ATM} verwendet. Ist sie größer, so wird L_{ATM} um den Betrag Differenz der erweiterten Unsicherheiten reduziert.

Da es für eine Untersuchung nach CISPR 16-4-5 vieler unterschiedlicher Prüflinge Bedarf, bietet sich eine statistische Analyse von Feldberechnungsergebnissen an.

4. Statistisches Modell

Hierbei soll auch anhand der Methodik zur Verwendung von alternativen Messverfahren nach CISPR 16-4-5 die Charakteristik des Bodens von verschiedenen Messplätzen für die Fahrzeugmessung untersucht werden. Das verwendete Modell wird an das Validierungsverfahren mit den sechs unterschiedlichen Antennenpositionen angelehnt. Dazu werden in einem Feldberechnungsprogramm zwölf Antennen in 1,0 m und 1,5 m Höhe, an den sechs Positionen entlang des gedachten KFZ-Umfangs erzeugt. Es wird ein Modell mit horizontal polarisierten Antennen, und ein Modell mit vertikal polarisierten Antennen benötigt. Unter der Annahme linearen Verhaltens dieses Aufbaus können die Ergebnisse der Feldberechnung aus horizontaler und vertikaler Polarisation komponentenweise überlagert werden.

Für die Untersuchung nach der CISPR 16-4-5-Methode werden Prüflinge mit zufälliger Charakteristik benötigt. Dies wird hier durch zufällige Auswahl der Anregung jeder einzelnen Antenne im Antennenarray erreicht. Dazu wird der Betrag der Anregung aus einer Normalverteilung, die Phase der Anregung aus einer Rechteckverteilung von 0 bis $2 \cdot \pi$ durch Pseudo-Zufallszahlen erzeugt.

Für das horizontale und vertikale Modell eines zufällig erzeugten Prüflings werden die Daten für die Feldstärke an den interessierenden Punkten durch das Feldberechnungsprogramm berechnet. Die Simulation einer Empfangsantenne ließe eine mathematische Überlagerung der Ergebnisse nur bedingt zu und wird hier nicht weiter verfolgt. Zur Auswertung der Abstrahlung werden für jedes Modell die Messpunkte nach CISPR 12 in

3 m und 10 m Messentfernung in 1,8 m und 3,0 m Höhe beidseitig des Antennenarrays berechnet. Um eine Aussage über das Störpotential eines Prüflings zu erhalten werden Messpunkte auf einer Halbkugel in 11 m Entfernung zum Mittelpunkt am Boden des Antennenarrays berechnet. Für das Verhalten der Prüflinge im Freiraum (FAR) werden die Messpunkte wie zuvor, aber über eine Vollkugel berechnet.

Die Analyse der Bodenparameter wird auf folgende Parameterkombinationen beschränkt:

Tabelle 1: Parametersätze der elektrischen Bodeneigenschaften von Messplätzen

Name	Elektrische Bodenparameter	
	<i>Leitfähigkeit in $1/(\Omega \cdot m)$</i>	<i>Relative Permittivität</i>
Freiraum (FAR)	-	-
OTS _{reference}	0.0001	3
CityMaxAtt	0.0004	3
CityAvgAtt	0.001	5
DrySandyCoastal	0.001	10
RichAgricLand	0.01	15
Freifeld (SAR)	Ideal leitfähig	-

Das Freifeld (SAR) steht hier stellvertretend für die Bodenparameter einer Absorberhalle mit metallischem Boden, auch wenn dabei ideale Absorber unterstellt werden. Die Parametersätze von Freifeldern mit nicht ideal leitender Charakteristik stehen hier für Beispiele von möglichen Referenzmessplätzen.

5. Ergebnisse der Korrelation

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse basieren auf einer Anzahl von $N = 1000$ zufällig erzeugten Prüflingen, welche unter Verwendung eines numerischen Feldberechnungsprogramms untersucht wurden. Die 1000 unterschiedlichen Prüflinge sind für jeden Parametersatz aus Tabelle 1 berechnet worden. Es wird der Mittelwert des Korrelationsfaktors (\bar{k}), von jeweils einem Parametersatz eines Referenzmessplatzes gegen den alternativen Messplatz (SAR) für die Messung nach CISPR 12 dargestellt. Die Darstellung der Standardabweichung (s) jedes Messplatzes geschieht gegen die physikalische Referenz, welche hier als maximale effektive Feldstärke auf einer Vollkugel mit gegebenem Radius um den Prüfling herum, im Freiraum gewählt wurde. Somit sind in Bild 2 und Bild 4 sechs Kurven für die Korrelation von verschiedenen Bodenparametern der etablierten Methode gegen die alternative Methode dargestellt. In Bild 3 und Bild 5 sind sieben Kurven der Standardabweichung jeder Messmethode gegen die physikalische Referenz aufgetragen.

Für Bild 1 und Bild 2 beträgt die Messentfernung der CISPR 12 Methode $d = 3$ m zur Seite des Prüflings.

In Bild 1 ist gut zu erkennen, dass die fünf Parametersätze der etablierten Methode annähernd parallel zu einander sind und innerhalb eines Streubandes von circa 1 dB verlaufen. Dabei ist die größte Abweichung mit fast -3 dB bei knapp unterhalb 50 MHz zu finden. Die Korrelation von FAR gegen SAR weicht davon ab und ist rein informativ als Messverfahren ohne Bodenreflexion gewählt worden.

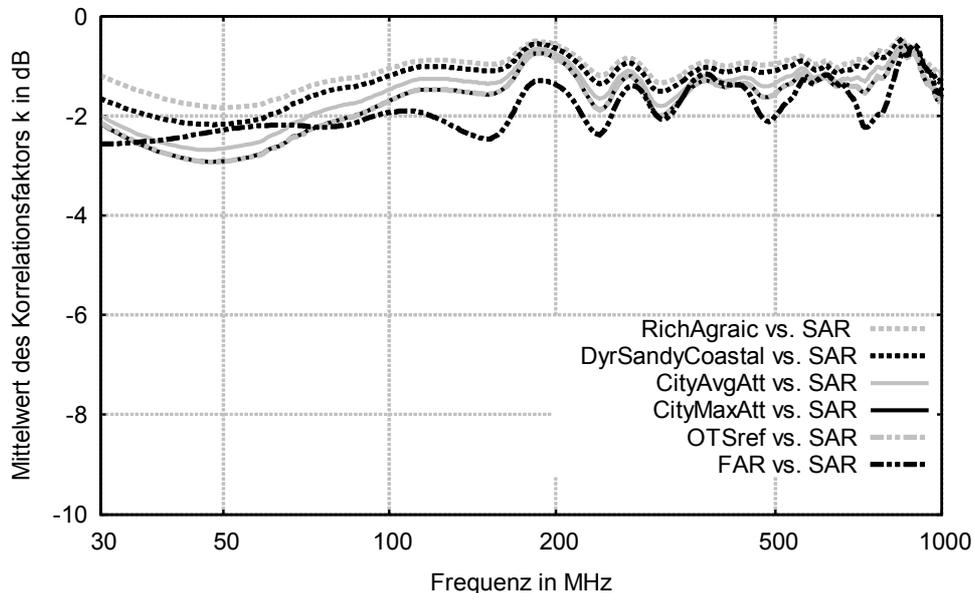


Bild 2: Mittelwert des Korrelationsfaktors, Messentfernung $d = 3$ m

Die Kurven für die Paarungen CityMaxAtt und OTS_{reference} gegen SAR sind nur schwer zu unterscheiden, da diese fast komplett gleich verlaufen.

Bild 3 zeigt die Verläufe der Standardabweichung der Messmethoden zur Referenzgröße. Auffällig ist, dass die Standardabweichung für Frequenzen unter 70 MHz für die etablierten Messplätze etwa 0,2 bis 0,5 dB niedriger ist als für den alternativen Messplatz (SAR). Weiterhin lässt sich erkennen, dass für Frequenzen oberhalb von 200 MHz die Unterschiede zwischen den Kurven sehr gering werden.

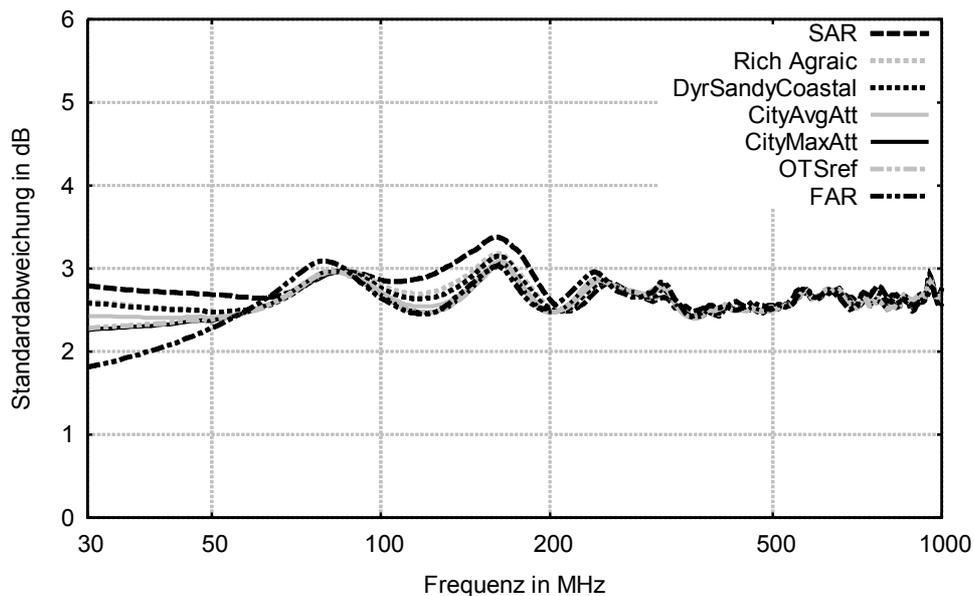


Bild 3: Standardabweichung zur Referenzgröße, Messentfernung $d = 3$ m

In Bild 4 und Bild 5 sind der Mittelwert des Korrelationsfaktors und die Standardabweichung der Messmethoden für eine Messdistanz von $d = 10$ m nach CISPR 12 dargestellt.

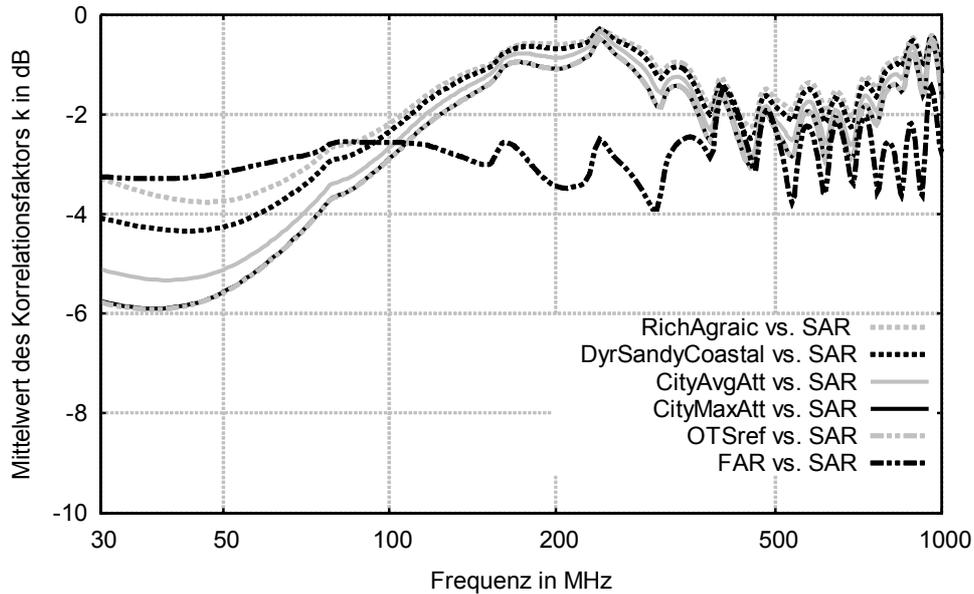


Bild 4: Mittelwert des Korrelationsfaktors, Messentfernung $d = 10$ m

Die Kurven für die OTS-Parameter verlaufen ab etwa 100 MHz parallel zueinander, weisen aber unterhalb von 100 MHz stärkere Abweichungen zueinander auf als für die $d = 3$ m Messdistanz. Auch hier verläuft die FAR gegen SAR Korrelation anders als die restlichen Kurven.

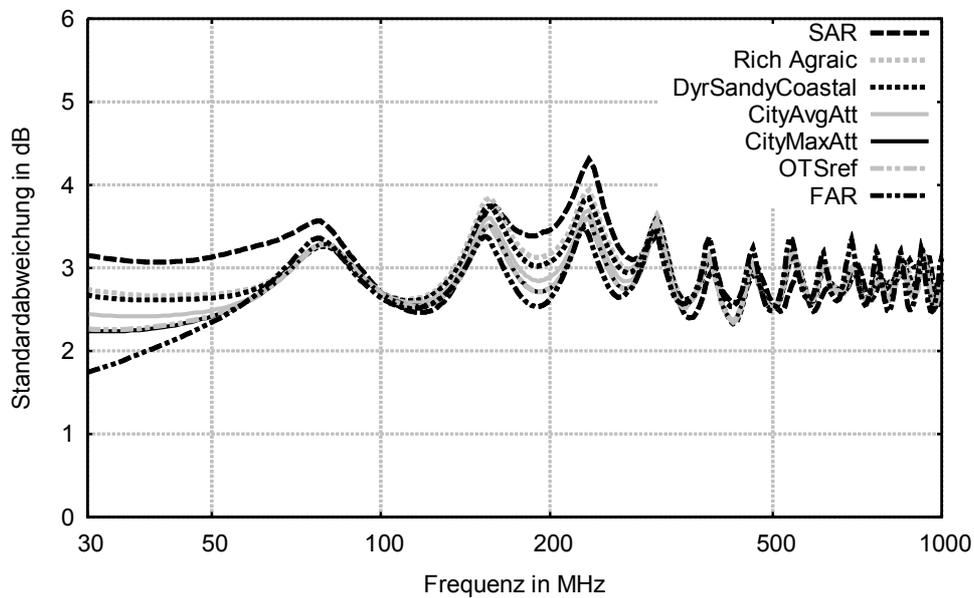


Bild 5: Standardabweichung zur Referenzgröße, Messentfernung $d = 10$ m

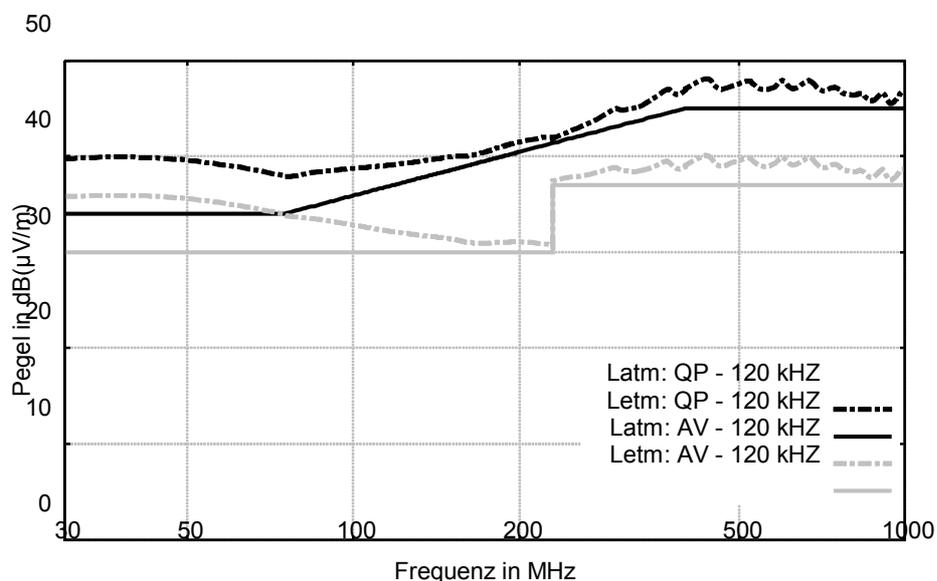
Bild 5 zeigt den Verlauf der Standardabweichungen für die Messdistanz $d = 10$ m. Es ist zu erkennen, dass die Standardabweichung von SAR gegen die Referenzgröße hier etwas mehr von den Kurven der Standardabweichung der etablierten Messverfahren abweicht als bei der Messdistanz $d = 3$ m. Der größte Unterschied zwischen alternativem und etabliertem Messverfahren ist aber auch hier für Frequenzen unterhalb von

70 MHz mit 0,5 bis 1 dB Abweichung zu finden. Zwischen 150 MHz und 250 MHz weichen die Standardabweichungen nochmals stärker voneinander ab. Ansonsten verlaufen die Kurven parallel zueinander in einem schmalen Streuband.

Speziell in den Kurven für die Messentfernung $d = 10$ m ist eine periodisch auftretende Resonanz über den Frequenzbereich sowohl für die Mittelwerte des Korrelationsfaktors, also auch für die Standardabweichungen zu erkennen. Da dieser Effekt auch für die Standardabweichung der FAR-Kurve zu erkennen ist, kann dies kein Effekt sein, der durch den Boden hervorgerufen wird. Wertet man den Frequenzabstand zweier aufeinanderfolgender Resonanzen aus, so erhält man $\Delta f = 76$ MHz. Rechnet man dies in die korrespondierende Wellenlänge um, so erhält man $\lambda/2 \approx 2$ m. Dies entspricht dem Abstand der einzelnen Antennenpositionen zueinander. Ein weiteres Indiz dafür, dass dieser Effekt durch die gegenseitige Verkopplung der Antennen in Antennenarray hervorgerufen wird ist, dass in [3] Korrelationsfaktoren bestimmt wurden, für die jede Antennenposition einzeln berechnet und hinterher überlagert wurden. Die Mittelwerte der Korrelationsfaktoren aus [3] zeigen nicht das für Resonanzen typische periodische Verhalten.

6. Umrechnung des Grenzwertes

Anhand der durch die CISPR 16-4-5 Methode gewonnenen Daten, lässt sich beispielhaft der Grenzwert der gestrahlten Störaussendungsmessung des Referenzmessplatzes (L_{etm}) auf einen Grenzwert für den alternativen Messplatz (L_{atm}) umrechnen. Hier wird dies für die Messentfernung $d = 10$ m durchgeführt, da diese die größeren Unterschiede zwischen der Messplätzen aufwies. Als Parameter für die elektrische Bodenbeschaffenheit des Referenzmessplatzes werden die Parameter des $\text{OTS}_{\text{reference}}$ verwendet, SAR ist der alternative Messplatz.



Die Korrektur des Grenzwertes für den alternativen Messplatz ist hier nur mit dem Mittelwert des Korrelationsfaktors für $\text{OTS}_{\text{reference}}$ gegen SAR durchgeführt worden. Die Standardabweichungen sind hier unberücksichtigt geblieben.

7. Fazit

Es sind mit der CISPR 16-4-5 Methode die Unterschiede von CISPR 12 Referenzmessplätzen und alternativen Messplatz herausgearbeitet worden. Dabei sind durch die Art der Prüflingsmodellauswahl anhand einer Validierungsmethode Resonanzen entstanden, welche auf die gemeinsame Simulation vieler Antennen in einem Modell zurückzuführen sind. Die Ergebnisse zeigen dieselbe Tendenz für die Korrelationsfaktoren wie vorausgehende Untersuchungen. Neu ist die Bestimmung der Standardabweichungen der Messverfahren gegen die Referenzgröße. Die Resonanzphänomene bedingen weitere Untersuchungen.

Würde die Methodik der CISPR 16-4-5 auf die Grenzwerte der CISPR 12 angewandt werden, wäre eher eine Erleichterung der Anforderungen zu erwarten.

8. Literatur

- [1] C. Schwing, H. Hirsch et al., „Validierung von Messplätzen für Störaussendungsmessungen von Fahrzeugen nach CISPR 12“, Elektromagnetische Verträglichkeit emv 2012, VDE VERLAG GMBH Berlin, 2012, pp. 273-280
- [2] IEC Technical Report CISPR 16-4-5, „Conditions for the use of alternative test methods“
- [3] C. Schwing, H. Hirsch, „Investigation of CISPR 12 test sites“, Conference Proceedings EMC Europe 2012, Rome, doi: 10.1109/EMCEurope.2012.6396660
- [4] C. Schwing, H. Hirsch, „Validation of CISPR 12 test sites“, Conference Proceedings EMC Europe 2013, Brugge, ISSN 2325-0356, pp. 316-320