

Möglichkeiten und Grenzen der Messverfahren zur Bewertung von Solarwechselrichtern nach der neuen EN 55011

Simon Scheck, EPCOS AG, EMV-Labor, Regensburg, Deutschland
Christian Paulwitz, EPCOS AG, EMV-Labor, Regensburg, Deutschland
Dr. Stefan Weber, EPCOS AG, München, Deutschland

1 Ausgangssituation

Um die bis zur Edition 5 bestehende Lücke in der Normung zu schließen, werden in der neuen Ausgabe der EN 55011 (CISPR 11 Ed. 6.0) [1], der Produktfamiliennorm für industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte, erstmals Messverfahren und Grenzwerte für die leitungsgebundene Störaussendung zwischen 150 kHz und 30 MHz an den Gleichspannungsschnittstellen von Geräten festgelegt, die an das Niederspannungsnetz angeschlossen und für den Einbau in Photovoltaik-Energieerzeugungssystemen (GCPC – Grid connected Power Conditioners) vorgesehen sind.

Hierzu wurde eigens eine Netznachbildung (DC-NNB) definiert. Deren Aufgabe ist es, die vom Prüfling erzeugten hochfrequenten Störungen auszukoppeln, um diese dann auf einem entsprechenden Messgerät darstellen zu können. Des Weiteren soll dem Prüfling für den oben genannten Frequenzbereich eine definierte Impedanz an der zu untersuchenden Schnittstelle (hier: DC-Spannungsversorgung) geboten werden. Die Impedanz der Netznachbildung soll der einer realen Installation mit Photovoltaikgeneratoren (PV-Generator – Photovoltaikpaneele auf dem Dach) möglichst nahe kommen. Die dritte Aufgabe einer Netznachbildung ist es, eine ausreichende Entkopplung zwischen dem Prüflingsanschluss und dem speisenden Netz sicher zu stellen.

Neben dem Standardmessverfahren mit Netznachbildungen in den Leistungszweigen des Prüflings werden speziell für Geräte größer 20 kVA zur Einhaltung der Grenzwerte der Klasse A, Gruppe 1 alternative Messverfahren angeboten. Die derzeit im Markt verfügbaren Gleichspannungs-Netznachbildungen sind auf eine Stromtragfähigkeit von 100 A begrenzt. Für die Alternativverfahren für Geräte größer 20 kVA sind in der oben genannten Norm [1] die Verwendung der Netznachbildungen als Spannungstastkopf bei der gleichzeitigen Messung mit einer HF-Stromzange zugelassen.

Ziel dieses Beitrages ist es aufzuzeigen, inwiefern sich diese Messverfahren umsetzen lassen und wie es um die Vergleichbarkeit der alternativen Messverfahren bestellt ist, um eine zuverlässige Konformitätsaussage für Geräte aller Leistungsklassen sicherzustellen.

2 Grenzwerte und deren Herleitung

In den technischen Anforderungen wird die Gleichstrom-Netznachbildung mit folgenden Parametern beschrieben (vgl. [1] Annex I) und hier auszugsweise angegeben:

- Messbereich 150 kHz bis 30 MHz
- Gleichtakt-Abschlussimpedanz am Prüflingsanschluss (150 ± 30) Ω
- Gegentakt-Abschlussimpedanz am Prüflingsanschluss (150 ± 30) Ω
- Gleich- und Gegentakt-Entkopplung jeweils > 20 dB

Als Grundlage für die Festlegung der Grenzwerte dienen die der Wechselspannungsseite, welche bereits in den älteren Ausgaben der EN 55011 angegeben sind. Hierzu ist eine Umrechnung basierend auf den Impedanzverhältnissen der verwendeten Messmittel notwendig. Während an dem Wechselspannungsanschluss eine 50- Ω -/ 50- μ H-Stromversorgungsnetzachbildung nach CISPR (V-Netzachbildung) zur Anwendung kommt, wird der Gleichspannungsanschluss mit der oben beschriebenen DC-Netzachbildung mit einer Impedanz von 150 Ω bewertet.

Abhängig vom verwendeten Netzanschluss auf der Wechselspannungsseite ergibt sich dort bei asymmetrischer Betrachtung eine Impedanz von 25 Ω (zwei-Leiter) bzw. 12,5 Ω (vier-Leiter).

Basierend auf diesem Zusammenhang werden als Kompromiss die Grenzwerte für die Störspannung für Geräte der Klasse A, Gruppe 1 für den Gleichspannungsanschluss die auf einem Messplatz mit einer 150- Ω -DC-Netzachbildung nach Tabelle 2 [1] angegeben.

3 Messmittel und Messaufbau und deren Grenzen

Die eingangs beschriebenen Aufgaben einer DC-Netzachbildung sind in ihren Elementen wiederzufinden. Die Auskopplung des Messsignals erfolgt mit entsprechender Beschaltung an den Anschlüssen T1, T2 und T3. Die Entkopplung wird über die Induktivitäten sowie die versorgungseitig (PV generator simulator, d. h. DC-Quelle) ergänzten Kondensatoren sichergestellt, wobei die beiden Kondensatoren gegen Erde (je 47 nF) gleichzeitig die asymmetrische Kapazität des Photovoltaik-Generators nachbilden.

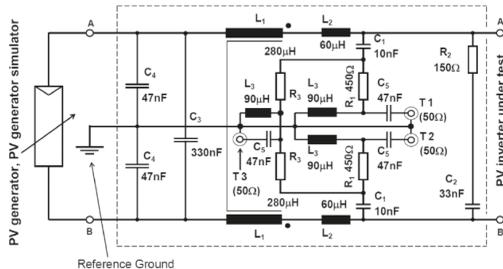


Bild 1: Beispiel eines Schaltbildes einer DC-Netzachbildung, nach [1]

Mit dieser Netzachbildung können sowohl die symmetrischen/asymmetrischen als auch die unsymmetrischen Störungen gemessen werden.

In der Norm wird für das alternative Messverfahren mit der Netzachbildung als Spannungstastkopf allerdings nur die Messung der Gleichtakt-Störspannung bzw. des Gleichtakt-Störstromes beschrieben. Damit ist die erste systematische Ungleichheit in der Bewertung mit der konventionellen Verwendung der Netzachbildung gegeben, da wie im Vergleich in Bild 3 zu erkennen bei dem hier vermessenen Solarwechselrichter die Gegentaktstörungen um mehr als 10 dB über den Gleichtaktstörungen liegen, welche damit unter den Tisch fallen

Neben der Begrenzung des maximalen Stromes ist auch die in der Norm [1] geforderte Entkoppeldämpfung von > 20 dB kritisch zu betrachten. Im Gegensatz zur 50- Ω -/ 50- μ H-Stromversorgungsnetzachbildung nach CISPR, bei der eine Mindestentkoppeldämpf-

fung von 40 dB gefordert ist, kann die geringere Dämpfung einen Einfluss auf die resultierende Messunsicherheit haben. Diese geringe Entkopplung ist dem geringen Entkopplungskondensator geschuldet, da die meisten Wechselrichter nur sehr geringe Erdströme während ihrer Isolationsprüfung zulassen.

Für Geräte, welche aufgrund des maximalen Ein- und Ausgangsstromes mit einer Netznachbildung gemessen werden können, ergibt sich ein Messaufbau bei dem beide Leistungsschnittstellen mittels einer Netznachbildung abgeschlossen und bewertet werden – Methode 1 (vgl. Bild 6 [1]).

Für Prüflinge größerer Leistung können neben dem oben beschriebenen Verfahren auch alternative Messaufbauten verwendet werden (Bild 2).

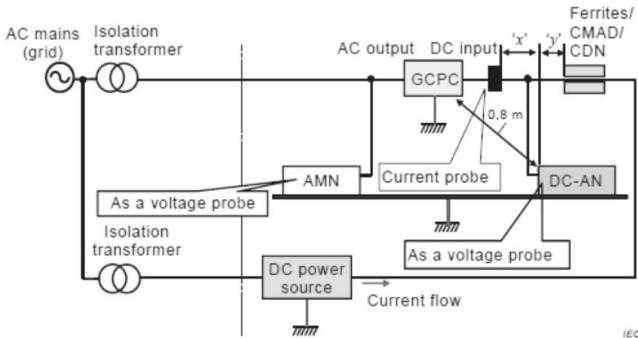


Bild 2: alternativer Messaufbau für Geräte mit einer Nennleistung von mehr als 20 kVA [1]

Hier werden die Netznachbildungen als Spannungstastköpfe verwendet und die Entkopplung der Gleichspannungsseite erfolgt z. B. durch ein Koppel-/Entkoppelnetzwerk (CDN) welches aus der IEC/EN 61000-4-6 [2] bekannt ist und eine asymmetrische Impedanz von 150 Ω aufweist. Im Gegensatz zur DC-Netznachbildung stehen hier im Markt Geräte mit einer maximalen Stromtragfähigkeit von bis zu 200 A zur Verfügung was den Einsatzbereich etwas erweitert. Der begrenzende Faktor ist meist die limitierte Spannungsfestigkeit, was die Anwendbarkeit in dieser Art von Applikation wieder einschränkt. Diese Netzwerke umfassen laut [2] in ihren Parametern den für die Störspannungsmessung relevanten Frequenzbereich, jedoch ist die Spezifikation vor allem bei Frequenzen größer als 24 MHz mit einer deutlich höheren Toleranz versehen als die der Gleichspannungs-Netznachbildung, was wiederum negativen Einfluss auf die zu erwartende Messunsicherheit hat.

Als weitere Möglichkeit lässt die Norm die Entkopplung mittels einer Vorrichtung zur Absorption von Gleichtakt-Störgrößen (CMAD) nach der EN 55016-1-4 [3] zu. Diese Entkoppelzangen sind allerdings nur im Frequenzbereich von 30 MHz bis 200 MHz definiert, so dass die Eignung dieser Art der Entkopplung bei einem normativ geforderten Frequenzband zwischen 150 kHz und 30 MHz fragwürdig ist. Als mechanisches Problem zeigt sich der maximal mögliche Kabeldurchmesser der verfügbaren Entkoppelzangen, die typischerweise einen Gesamtdurchmesser von maximal 30 mm zulassen, was bei Leitungen für diese Anwendungen je nach erforderlicher Stromtragfähigkeit zu weiteren Einschränkungen führt.

Die dritte Alternative stellt die Entkopplung mittels Ferriten mit einer Induktivität von 90-150 μH dar (vgl. 8.2.2.2.3.1 in [1]). Ferrit-Ringkerne sind auch mit größeren Durchmessern erhältlich, allerdings fehlt in der Norm [1] die Beschreibung derer Eigenschaften besonders bezüglich des Frequenzverhaltens. Eine Vergleichbarkeit der Entkopplung mit unterschiedlichen, willkürlich gewählten Ferriten scheint also nicht möglich. Induktivitätswerte werden typischerweise bei einer Messfrequenz von 10 kHz oder 100 kHz bestimmt – dadurch ist noch keine Aussage für den gesamten Frequenzbereich der Messungen gegeben. Zudem wird selbst unter der Annahme der Breitbandigkeit der Induktivität bei der unteren Frequenz der EMV-Messungen von 150 kHz gerade einmal eine Impedanz von gut 100 Ω erreicht, die man im Vergleich zu den 150 Ω der Netznachbildung schwerlich als ausreichend hochohmig ansehen kann, um die Impedanz der DC-Versorgung ausreichend zu entkoppeln.

Für die alternativen Messverfahren sieht die Norm neben der Messung der Gleichtakt-Störspannung auch die Messung des Gleichtakt-Störstromes vor. Wie bei den Elementen zur Entkopplung stößt man auch bei der HF-Stromzange an mechanische Grenzen. Diese sind jedoch weniger kritisch, da hier Messmittel mit einem Innendurchmesser von 100 mm und mehr verfügbar sind.

4 Vergleichbarkeit der Messergebnisse

Um die Vergleichbarkeit der Messverfahren in der Praxis zu untersuchen, wurde nachfolgend ein handelsüblicher Solarwechselrichter mit einer Nennleistung von 50 kVA unter Anwendung der verschiedenen Messmethoden bewertet. Dieser Wechselrichter wurde herstellereitig zur Einhaltung der Klasse B, Gruppe 1 optimiert, was sich im großen Abstand zur den Grenzwerten der Klasse A, Gruppe 1 widerspiegelt. Für den hier vorliegenden Vergleich der Messmethoden sind die Absolutwerte der Störpegel jedoch sekundär. Als Referenz dient die Messmethode 1 (vgl. 8.2.2.2.2 in [1]), bei der sowohl die Wechsel- als auch die Gleichspannungsseite mit einer Netznachbildung im Leistungspfad gemessen werden.

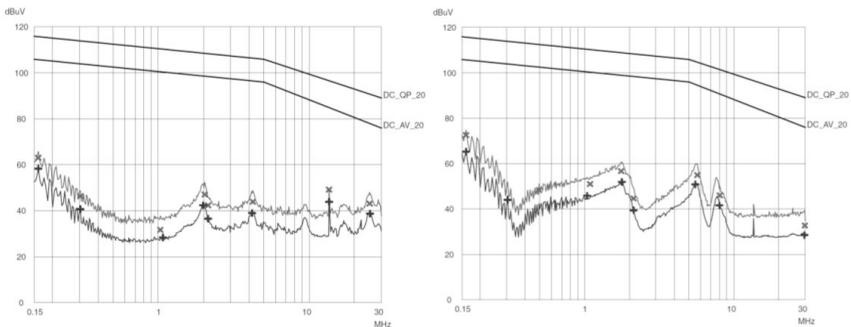


Bild 3: Messung der Gleichtaktstörungen (links) und der Gegentaktstörungen (rechts) an der Gleichspannungsseite mit der DC-Netznachbildung – Methode 1

Im Vergleich hierzu die Messmethode 2 (siehe Bild 4), bei der die Gleichspannungsseite mit einer Netznachbildung als Spannungstastkopf und zusätzlich mit einer HF-Stromzange gemessen wurde. Die Entkopplung fand mittels eines Koppel-/Entkoppelnetzwerks nach EN 61000-4-6 statt.

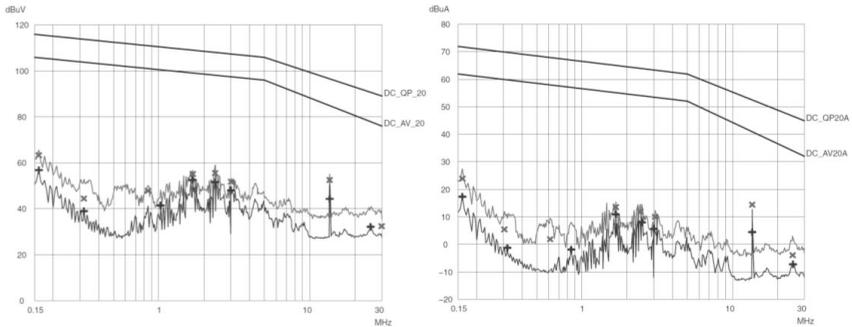


Bild 4: Messung der Gleichtaktstörungen an der Gleichspannungsseite mit der DC-Netznachbildung als Spannungstastkopf (links) und HF-Stromzange (rechts) – Methode 2 (Entkopplung mit CDN)

Aus dem Vergleich der beiden Gleichtakt-Störspannungsmessungen kann man bereits eine Differenz, abhängig vom Frequenzbereich, von bis zu 20 dB erkennen (vgl. Bild 5). Dabei ist noch nicht berücksichtigt, dass die im zweiten Verfahren wegfallende Gegentakt-Messung die höchsten Pegel ergab.

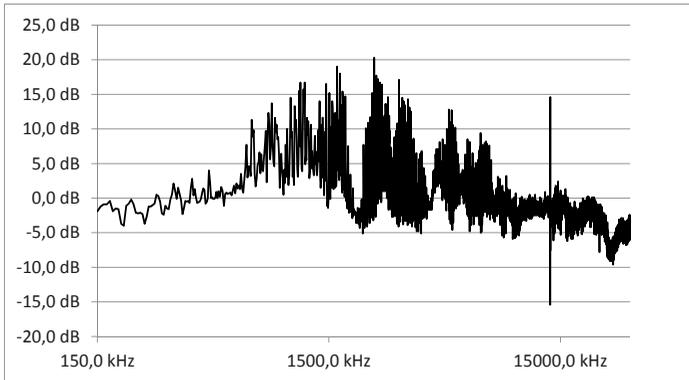


Bild 5: Differenz der Gleichtaktstörungen (common mode) an der Gleichspannungsseite mit Methode 1 bzw. Methode 2 (Entkopplung mit CDN)[Mittelwert]

Im Folgenden wurden die Messungen des Störstromes und der Störspannung bezüglich des Abstandes zu den jeweiligen Grenzwerten gegenübergestellt. In dem unten stehenden Beispiel (vgl. Bild 6) kann man erkennen, dass die Störstrommessung hier den geringeren Abstand zum Grenzwert aufweist und somit den kritischeren Fall darstellt.

Besonders bei der Störstrommessung warten aber noch weitere Unwägbarkeiten. Der Abstand der HF-Stromzange zur DC-Netznachbildung bzw. zur Entkoppeleinrichtung ist in einem Bereich von 0 bis 30 cm relativ weit gesteckt (vgl. Bild 2). Besonders bei der Ausprägung einer stehenden Welle auf der zu messenden Leitung kann die Positionierung einen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis und dessen Unsicherheit haben.

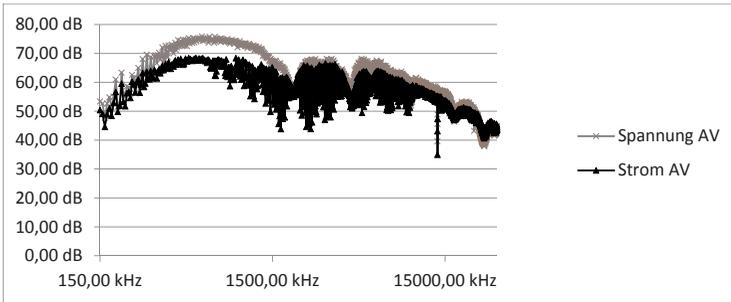


Bild 6: Abstand der Gleichtaktstörungen (common mode) an der Gleichspannungsseite in der Störspannungs- und der Störstrommessung bezogen auf den jeweiligen Grenzwert der Klasse A, Gruppe 1 (Mittelwert)

Auch der Vergleich der anderen möglichen Entkopplungsmethoden weist eine hohe Unsicherheit auf. Die Gegenüberstellung der Störspannungsergebnisse mit der DC-Netznachbildung als Spannungstastkopf und einer Entkopplung mittels CDN, CMAD bzw. Ferriten ergibt eine Differenz von deutlich über 10 dB (vgl. Bild 7 und 8) im Messergebnis.

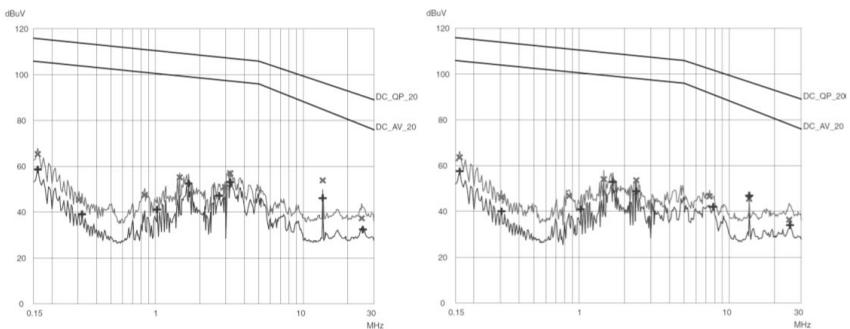


Bild 7: Messung der Gleichtaktstörungen (common mode) an der Gleichspannungsseite eines Solarwechselrichters mit der DC-Netznachbildung als Spannungstastkopf mit der Entkopplung mittels CMAD (links) bzw. mittels Ferriten – 125 μH @10 kHz (rechts).

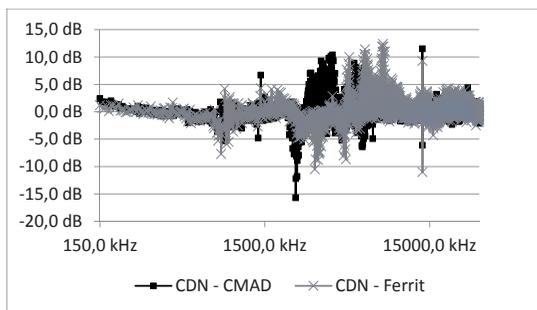


Bild 8: Differenz der Gleichtaktstörungen (common mode) an der Gleichspannungsseite mit Methode 2 mit CDN, CMAD bzw. Ferriten (Mittelwert)

Ebenso problematisch stellt sich die Vergleichbarkeit erwartungsgemäß auf der Wechselspannungsseite dar. Wird hier mit der V-Netznachbildung als Spannungstastkopf gemessen, ist keinerlei Entkopplung zum speisenden Netz vorgesehen. In diesem Fall sind Pegelunterschiede von bis zu 30 dB möglich. Besonders bei diesem Messaufbau ist zu berücksichtigen, dass die Störungen des Versorgungsnetzes mit gemessen werden, was eine Umgebungsmessung unabdingbar macht. Dies ist jedoch keine spezielle Problematik der Messungen an GCPCs sondern ein grundsätzliches bei Messungen mit nicht ausreichender Entkopplung.

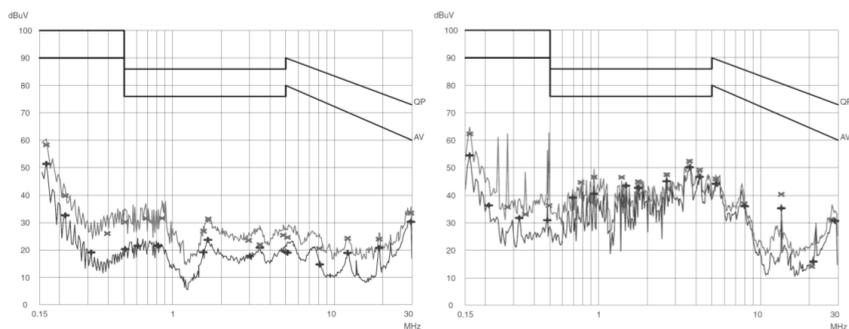


Bild 9: Messung der Wechselspannungsseite eines Solarwechselrichters mit der V-Netznachbildung (links) bzw. der V-Netznachbildung als Spannungstastkopf (rechts).

5 Zusammenfassung

In der neuen Ausgabe der EN 55011 (CISPR 11 Ed. 6.0) [1] stehen Messverfahren und Grenzwerte für die leitungsgebundene Störaussendung an Gleichspannungsschnittstellen von Solarwechselrichtern zur Verfügung. Besonders die Bewertung von Wechsel-

richtern mit höherer Leistung bringt die Messtechnik an ihre Grenzen. Um auch diese Geräte bewerten zu können, wurden neue Messverfahren mit aufgenommen. Diese alternativen Messmethoden bergen ein hohes Maß an Unsicherheiten bzw. lassen sich nur schwerlich miteinander vergleichen. Zudem gibt es für Wechselrichter großer Leistung, für die keine ausreichend dimensionierte Netznachbildung zur Verfügung steht, keine Anweisung zur Bewertung der Klasse B.

Unterschiede von 20 dB und mehr sind bei der Verwendung der verschiedenen Entkopplungsvarianten durchaus möglich, wobei ein Teil der herangezogenen Messmittel in dem anzuwendenden Frequenzbereich nicht ausreichend oder gänzlich undefiniert sind.

Bei Einbeziehung der hier beschriebenen und untersuchten Einflüsse auf die Kalkulation der Messunsicherheit könnte die Brauchbarkeit der alternativen Messaufbauten leicht in Frage gestellt werden.

6 Quellenhinweise

- [1] CISPR 11 Ed. 6 (2015)
International Electrotechnical Commission – IEC
Interference relating to industrial, scientific and medical radio-frequency apparatus, to other (heavy) industrial equipment, to overhead power lines, to high voltage equipment and to electric traction
Umsetzung in die harmonisierte Europäische Norm EN 55011
- [2] IEC 61000-4-6 (2013)
Umgesetzt in der harmonisierten Europäischen Norm
EN 61000-4-6 (2014)
Deutsche Fassung DIN EN 61000-4-6 (VDE 0847-4-6) (2014)
*Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) –
Teil 4-6: Prüf- und Messverfahren – Störfestigkeit gegen leitungsgeführte Störgrößen, induziert durch hochfrequente Felder*
- [3] IEC/CISPR 16-1-4 (2010) +A1 (2012);
Umgesetzt in der harmonisierten Europäischen Norm
EN 55016-1-4 (2010) +A1 (2012)
Deutsche Fassung DIN EN 55016-1-4 (VDE 0876-16-1-4) (2013)
*Anforderungen an Geräte und Einrichtungen sowie Festlegung der Verfahren zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit –
Teil 1-4: Geräte und Einrichtungen zur Messung der hochfrequenten Störaussendung (Funkstörungen) und Störfestigkeit – Zusatz-/Hilfseinrichtungen – Gestrahlte Störaussendung*