

Gestrahlte Störfestigkeit gegen Breitband-Signale – Pegel und Anforderungen an Verstärker

Holger Hirsch, Universität Duisburg-Essen,
Martin Kurka, Universität Duisburg-Essen,
Jan Weber, Universität Duisburg-Essen,
Andreas Gierstorfer, BMW Group,
Patrik Duvnjak, BMW Group,
Werner Ratzel, emv Service GmbH,
Christian Stipp, emv Service GmbH,
Robert Bonn, emv Service GmbH

1 Einleitung

Die Störfestigkeit gegen elektromagnetische Felder wird heute üblicherweise mit amplituden- oder pulsmodulierten Signalen durchgeführt, wobei die Art der Modulation (z.B. 80% AM mit 1 kHz Modulationsfrequenz) zu schmalbandigen Signalen führt. Bislang wird dies als hinreichend für den Nachweis ausreichender Störfestigkeit gegenüber den Nutzsignalen von Funksystemen angesehen, die in allen maßgeblichen elektromagnetischen Umgebungen anzutreffen sind (siehe [1], Annex A). Mit dem zunehmenden Einsatz von digitalen Funkdiensten mit großen Datenraten (LTE, 5G, neuere WiFi-Systeme) wird dies aber in Frage gestellt. Da grundsätzlich von einem nichtlinearen Systemverhalten der Störsecke auszugehen ist, kann bei systemtheoretischer Betrachtung nicht vom Verhalten bei Störfestigkeitsprüfungen mit Schmalbandsignalen auf das Verhalten bei Störfestigkeitsprüfungen mit Breitbandsignalen geschlossen werden. Die Prüfmethode, die einst für Schmalbandsignale entworfen wurden, müssen daher für Breitbandsignale ertüchtigt werden, was derzeit sowohl bei ISO 1145x, als auch im Normungsprojekt IEC 61000-4-41 [2] geschieht.

2 Definition der Prüfstörgröße

Es wäre denkbar, sich für die Schaffung eines generellen Prüfverfahrens zum Test der Störfestigkeit gegen breitbandige Störgrößen an realen Signalformen zu orientieren. Die technischen Spezifikationen [3] und [4] sehen allerdings ein hohes Maß an Flexibilität für die spektrale Aufteilung der für New Radio (NR, 5G) zugewiesenen Frequenzbänder sowie für die Parameter der Modulation vor. Es sind Signalbandbreiten zwischen 5 MHz und 100 MHz spezifiziert ([3],[4]).

Die Sendeleistung von mobilem Equipment und Basisstation nimmt mit Einführung neuer Technologien für Funknetze eher ab (siehe Übersicht in [5]). Aufgrund der spektralen Effizienz und der Möglichkeit der Anpassung an Kanaleigenschaften ist den neueren Funkdiensten die Nutzung von OFDM gemeinsam, welches ein nahezu rechteckförmiges Spektrum erzeugt. Im Zuge der Entwicklung eines Testsignals für die Störfestigkeitsprüfung wäre zwar die Nutzung der Testsignale aus den NR-Test-Spezifikationen (z.B. 0) denkbar, jedoch ist die Übertragbarkeit von NR auf andere Funkdienste sowie die Auswahl eines repräsentativen Parametersatzes diskutabel. Aus diesem Grund hat sich die für die Entwicklung der IEC 61000-4-41 zuständige Arbeitsgruppe für ein bandbegrenztetes Rauschen als Testsignal entschieden. Das Signal kann entweder durch einen physikalischen Rauschgenerator mit daran angeschlossenen analogen Tiefpassfilter oder einen Arbiträr-Generator im Basisband generiert werden. Das Signal wird als geeignet angesehen, wenn das bei einer Auflösebandbreite (RBW) von 1 MHz am Ausgang des Verstärkers gemessene Signal innerhalb der in Abbildung 1 dargestellten spektralen Maske liegt. Es werden insgesamt vier Prüfsignal-Bandbreiten (SBW) definiert (5 MHz, 20 MHz, 40 MHz und 100 MHz), wobei unterhalb einer Mittenfrequenz von 1 800 MHz die Bandbreite 20 MHz und oberhalb 1 800 MHz die Bandbreite 100 MHz vorgesehen ist.

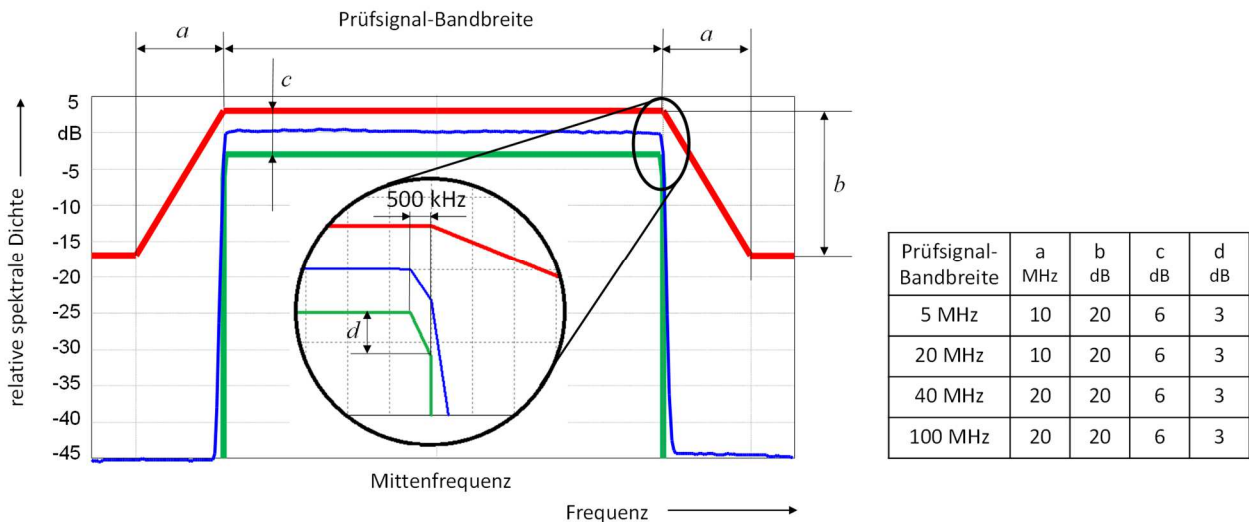


Abbildung 1: Im IEC 61000-4-41 Entwurf [2] definierte spektrale Maske für das bandbegrenzte Rauschsignal am Ausgang des Verstärkers ($RBW=1$ MHz)

Neben der Modulation mit dem Rauschsignal kommt eine Pulsamplitudenmodulation (100 Hz, 50 % Puls-/Periodenverhältnis) zur Anwendung, um die Zeitbereichszugriffe auf den Kanal nachzubilden.

Eine weitere, für die Auslegung des Prüfsystems wesentliche Kenngröße ist das Verhältnis der Spitzenleistung zur mittleren Leistung (Peak-to-Average Power Ratio, PAPR) bzw. der bei Spannungsmessungen bestimmbare „Crest-Faktor“ als Verhältnis der Spitzenspannung zum Effektivwert der Spannung. Ausgedrückt im logarithmischen Maßstab sind beide Größen austauschbar. Die Größen beziehen sich auf die Hüllkurve des modulierten Signals. Dieser Crest-Faktor soll nach Entwurf der IEC 61000-4-41 mindestens 10 dB betragen. Verglichen mit einem 80%-amplitudenmodulierten Signal (Peak 5,1 dB über dem Träger-Pegel) sind die Anforderung an die Dynamik der Messkette im Prüfsystem bei einem Breitbandsignal also höher. Die Festlegung eines Mindest-Crest-Faktors stellt sicher, dass ein Prüfling bei einer Störfestigkeitsprüfung einerseits der vorgesehenen mittlere Leistung, andererseits auch einer Mindestspitzenleistung ausgesetzt wird.

Nach einiger Diskussion hat die für die IEC 61000-4-41 zuständige Arbeitsgruppe entschieden, dass als Prüfpegel eine spektrale Feldstärkedichte herangezogen werden soll. Da für neue Funkdienste (wie oben beschrieben) ähnliche oder kleinere Sendeleistungen definiert sind, werden die Prüfpegel aus den für Schmalband-Störgrößen definierten Pegeln ermittelt. Mit der Annahme, dass die spektralen Anteile eines Rauschsignals unkorreliert sind, verteilt sich bei einem rechteckförmigen Breitbandsignal die Leistung gleichmäßig auf die Prüfsignal-Bandbreite. Eine zu einem Schmalband-Prüfpegel von E_0 äquivalente spektrale Feldstärkedichte ist also:

$$E_{FSD} = E_{0,dB} - 10 \times \lg\left(\frac{SBW}{1\text{Hz}}\right)$$

Bei einem vergleichbaren Prüfpegel von $1 \text{ V/m} = 120 \text{ dB}(\mu\text{V/m})$ ergibt sich demnach für ein 20 MHz breites Signal eine spektrale Feldstärkedichte von $47 \text{ dB}\left(\frac{\mu\text{V}}{\text{m} \cdot \sqrt{\text{Hz}}}\right)$.

In der Praxis ergibt sich nicht die Notwendigkeit zur Messung der spektralen Feldstärkedichte, da das Prüfsystem erst mit einem CW-Signal einregeln und anschließend die Modulation zuschalten kann. Soll die Verstärkerleistung direkt gemessen werden, so kann dies über einen Spektrumanalysator mit einer Messfunktion zur Ermittlung der Kanalleistung oder (bei hinreichend flachem Frequenzgang des Verstärkers) mit einem mittelwertanzeigenden Leistungsmesskopf

erfolgen. Im Gegensatz zu IEC wird der Prüfpegel nach ISO auf den Spitzenwert bei einem modulierten Signal bezogen. Eine Beibehaltung dieser Philosophie würde bei größeren Prüfsignal-Bandbreiten sehr schnelle Tastköpfe erfordern. Ist aber der Crest-Faktor des Signals bekannt, so kann leicht von einem gemessenen Leistungsmittelwert auf den Leistungsspitzenwert umgerechnet werden.

3 Eignung von Prüfsystemen, die bisher für Tests nach IEC 61000-4-3 verwendet werden

Seit dem Start der Arbeit an IEC 61000-4-41 ist es das Bestreben der Arbeitsgruppe, möglichst wenig zusätzlichen technischen und prozeduralen Aufwand für Störfestigkeitsprüfungen mit Breitbandsignalen gegenüber Störfestigkeitsprüfungen mit Schmalbandsignalen zu schaffen. IEC 61000-4-3 sieht vor, dass für alle Punkte in einem Punktfeld (Uniform Field Area, UFA) das Verhältnis von im Punkt erzeugter Feldstärke zu der in die Antenne injizierte Leistung ermittelt wird. In einem festgelegten Schema wird pro Frequenz ein Referenzpunkt gewählt, an dem sich die Einstellung der erforderlichen Leistung zum Erreichen der gewünschten Prüfstörgröße orientiert. Das Schema führt dazu, dass in allen anderen Punkten mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eine Feldstärke zwischen 0 dB und 6 dB bezogen auf die Prüffeldstärke erreicht wird. In IEC 61000-4-3 erfolgt die Betrachtung mit rein sinusförmigen (cw) Signalen.

Wird nun bei identischem Aufbau eine Prüfung mit einem Breitbandsignal durchgeführt und der bei der Mittenfrequenz nach IEC 61000-4-3 gewählte Punkt als Referenz verwendet, fragt sich, wie hoch in der Prüfsignal-Bandbreite die Variation der Feldstärke in den UFA-Feldpunkten ist. Es war zu befürchten, dass durch den Frequenzgang des Verstärkers, der Antenne und der Absorberhalle größere Feldstärkevariationen auftreten. Von den Mitgliedern der Arbeitsgruppe, die Zugang zu UFA-Daten aus verschiedenen Absorberhallen haben, wurden diese als komplette Datensätze zur Verfügung gestellt. Somit konnten die Daten von weltweit 20 Hallen mit insgesamt 80 Datensätzen (zwei Polarisationen, bis zu 3 Frequenzbereiche pro Datensatz) ausgewertet werden. Dazu wird in einem ersten Schritt die Feldstärke in sämtlichen UFA-Punkte für die in den Bereich der Prüfsignal-Bandbreite (hier 100 MHz) fallenden Frequenzen auf Basis eines bei der Mittenfrequenz gewählten Referenzpunktes berechnet (siehe Abbildung 2).

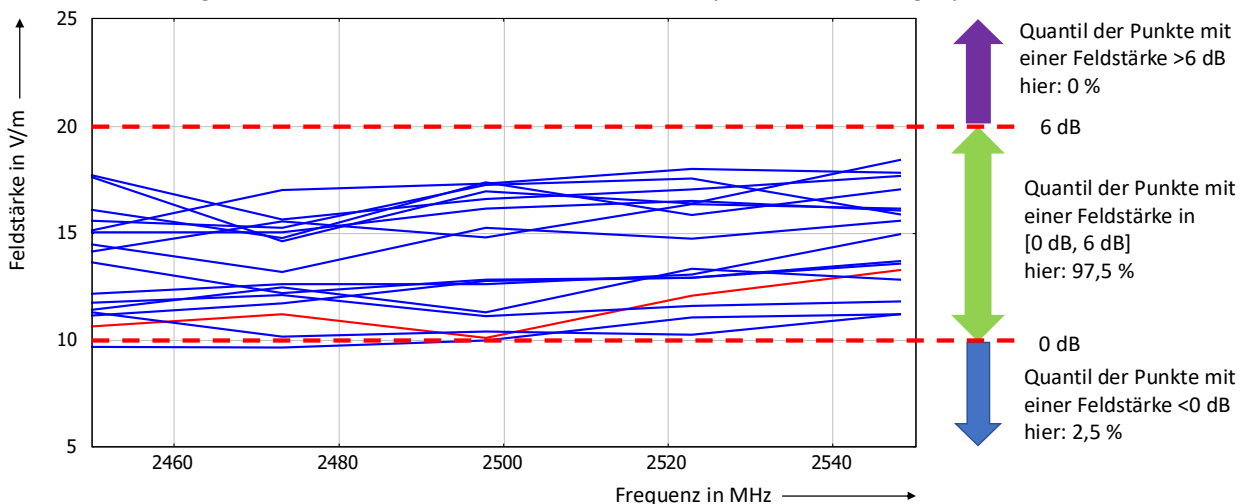


Abbildung 2: Exemplarische Darstellung der aus einem UFA-Datensatz bestimmten Feldstärken in den einzelnen UFA-Punkten für eine Prüfsignal-Bandbreite von 100 MHz bei einer Mittenfrequenz von 2,5 GHz. Die Feldstärke des nach IEC 61000-4-3 bei der Mittenfrequenz gewählten Referenzpunktes ist in rot dargestellt. Die Zielfeldstärke beträgt 10 V/m.

Im zweiten Schritt werden die Daten für alle im UFA-Datensatz vorhandene Frequenzen jeweils innerhalb einer Prüfsignal-Bandbreite statistisch ausgewertet. Dabei werden die Quantile, für die

die Feldstärke innerhalb des 0 dB-6 dB-Intervalls liegen, die Quantile, für die die Feldstärke kleiner als die Zielfeldstärke ist, und die Quantile bestimmt, für die eine Feldstärke von mehr als 6 dB über der Zielfeldstärke ermittelt wird. Diese Quantile sind in Abbildung 3 über der Frequenz exemplarisch für eine Halle bei einer Polarisation im Frequenzbereich 1 GHz bis 6 GHz dargestellt.

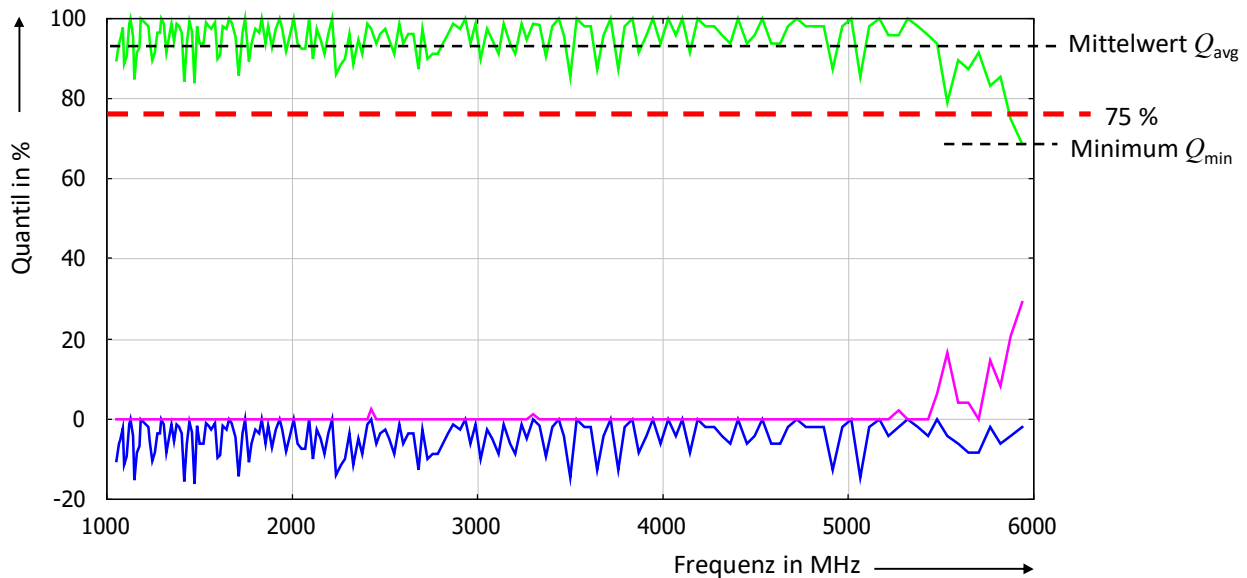


Abbildung 3: Exemplarische Darstellung der für eine Halle aus den UFA-Daten für eine Prüfsignal-Bandbreite von 100 MHz ermittelten Quantile (grün: Quantile für eine Feldstärke innerhalb [0 dB, 6 dB], magenta: Quantile für eine Feldstärke von mehr als 6 dB über der Zielfeldstärke, blau: Quantile für eine Feldstärke von weniger als der Zielfeldstärke (der Übersichtlichkeit halber als negativer Zahlenwert dargestellt))

Um daraus kurze Kennzahlen für einen UFA-Datensatz zu erzeugen, wird für den kompletten Frequenzbereich das durchschnittliche [0 dB, 6 dB]-Quantil (Q_{avg}), bzw. das minimale Quantil ermittelt (Q_{min}). Diese Kennzahlen werden für alle UFA-Datensätze im Diagramm in Abbildung 4 aufgetragen.

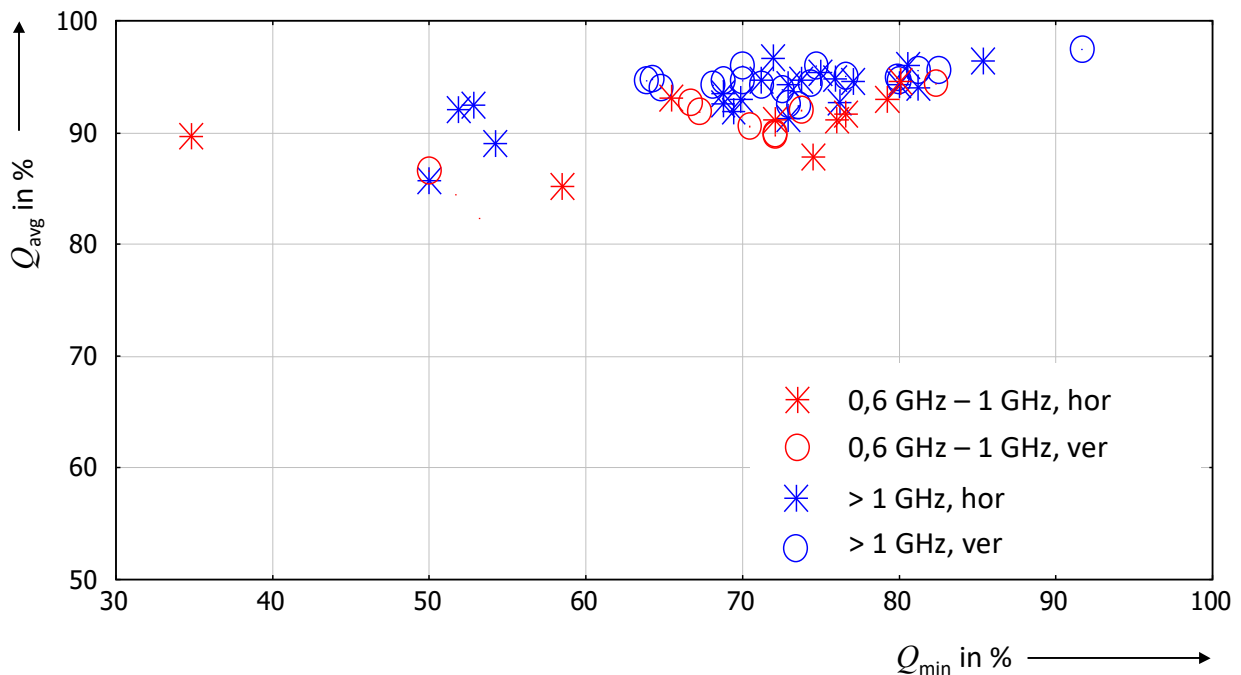


Abbildung 4: Aggregierte Darstellung der [0 dB, 6 dB]-Quantile für weltweit 20 Absorberhallen mit insgesamt 80 UFA-Datensätzen

Es ist erkennbar, dass das mittlere Quantil bei über 80 % liegt. Das heißt: für 80 % der UFA-Punkte und Frequenzen innerhalb einer Prüfsignal-Bandbreite von 100 MHz liegt die Feldstärke im [0 dB, 6 dB] Intervall. Nur bei wenigen Hallen sinkt bei bestimmten Frequenzen das minimale [0 dB, 6 dB]-Quantil unter 60 % ab. Diese Ergebnisse haben der Arbeitsgruppe die Zuversicht gegeben, die Prüfpegel-Einstellung für die kommende IEC 61000-4-41-Norm auf Basis der in den Laboren bereits vorhandenen UFA-Daten festzulegen.

4 Anforderungen an Leistungsverstärker

Da die Erfahrung gezeigt hat, dass die im letzten Entwurf zur IEC 61000-4-41 ([2]) festgelegte Messung des Crest-Faktors wegen der erforderlichen Auflösebandbreite eine nicht unerhebliche Hürde in der Anwendung der Norm darstellt, ist nun ein Verfahren zur schnellen Überprüfung einer akzeptablen Verstärkersättigung ähnlich zur IEC 61000-4-3 erarbeitet worden, das in den kommenden CDV zur IEC 61000-4-41 einfließen wird. Damit sind nun drei Kriterien zur Sicherstellung der Prüfsignalqualität definiert worden, die aber in einem Prozessschritt vereint werden können:

Die Ausgangsleistung wird zunächst auf den bei der UFA-Auswertung vorgegebenen Leistungswert eingeregelt (unmoduliert).

- 1) Die Generatorleistung wird um 10 dB gesteigert und dabei die Verstärkerausgangsleistung überwacht. Steigt diese um mindestens 8 dB, wird angenommen, dass das System für die Prüfung geeignet ist.
- 2) Nach Senken des Generatorpegels auf den Soll-Leistungswert wird die Modulation zugeschaltet und das Spektrum mit einem Spektrum-Analysator mit einer Auflösebandbreite von 1 MHz gemessen. Das gemessene Spektrum wird auf Einhaltung der spektralen Maske (siehe Abbildung 1) geprüft.
- 3) Sollte die 8 dB-Sättigungsprüfung nicht erfolgreich sein oder eine 10 dB Anhebung mit einem CW-Signal nicht möglich sein, so besteht nach einem Anhang die Möglichkeit, auf die Messung des Crest-Faktors zurück zu greifen und zu prüfen, ob dieser mindestens 10 dB beträgt.

Inwieweit diese Anforderungen konsistent sind, soll im Folgenden durch messtechnische Untersuchungen geklärt werden.

4.1 Für die Untersuchungen verwendete Breitband-Testsignale

Für die Charakterisierung von Übertragungskanälen wird oft ein normalverteiltes weißes Rauschen (AWGN) zum Übertragungssignal addiert. Es bietet sich daher an, ein solches normalverteiltes Rauschsignal (WGN) auch für die Breitbandsignal-Erzeugung heranzuziehen. Dieses Rauschen hat theoretisch einen unendlich hohen Crest Faktor. Praktisch liegt die Differenz zwischen Spitzenleistung und mittlerer Leistung bei einem bandbegrenzten normalverteilten Rauschen mit hinreichend hoher Wahrscheinlichkeit (>99.9999 %) eher bei ca. 11 dB. Um nichtlineare Effekte des Verstärkers detaillierter untersuchen zu können, werden neben WGN weitere Signale synthetisiert, die einen Crest Faktor von rund 15 dB (Signal „PN11“) und 20 dB (Signal „PN113“) aufweisen. Diese Signale basieren auf einem Polynom als Verteilungsfunktion, wobei der Exponent zur Einstellung des Crest Faktors herangezogen werden kann. Abbildung 5 zeigt die Wahrscheinlichkeitsfunktionen (*CDF*) der verwendeten Rauschsignale.

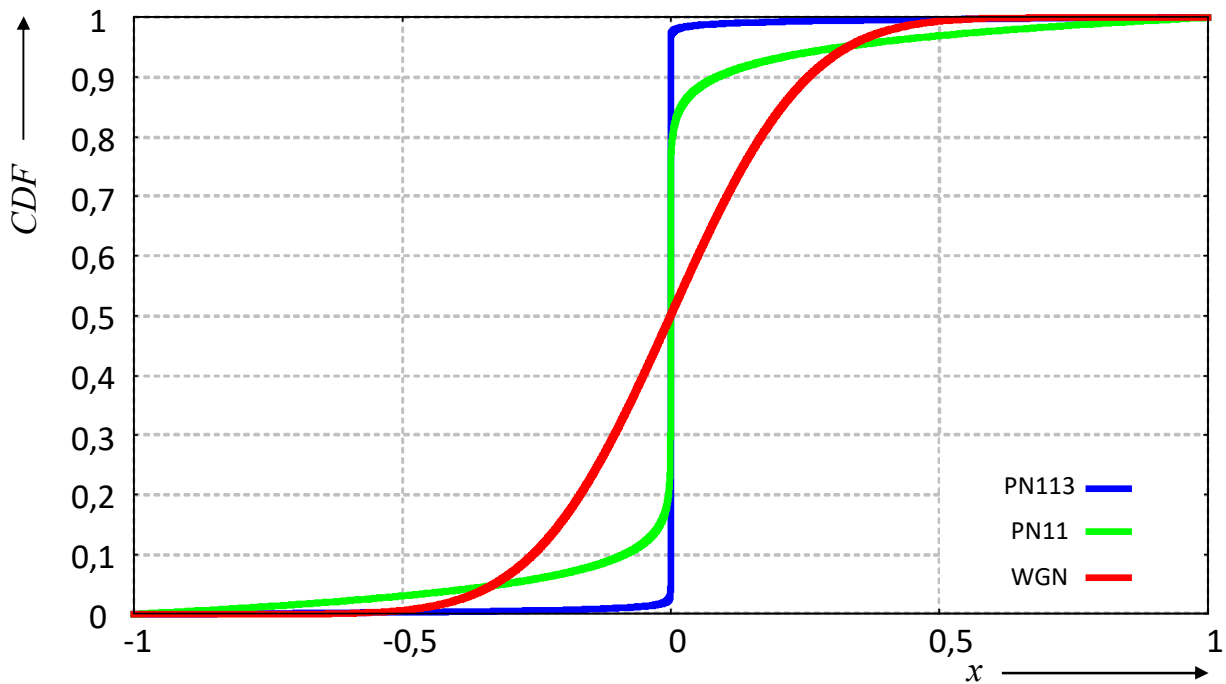


Abbildung 5: Verteilungsfunktionen (CDF) für die verwendeten Rauschsignale (rot: WGN, Crest-Faktor: 11 dB, grün: PN11, Crest-Faktor: 15 dB, blau: PN113, Crest-Faktor: 20 dB)

Die als Sampling-Daten vorliegenden Signale werden über ein digitales Tiefpassfilter auf die gewünschte Basisband-Bandbreite gebracht und in den Arbiträr-speicher des verwendeten Vektorsignalgenerators geladen. Die Samplingfrequenz beträgt 150 MS/s. Die hier untersuchten Signale haben eine Prüfsignal-Bandbreite von 20 MHz bei einer Mittenfrequenz von 700 MHz. Zur Ermittlung der Verstärkersättigung wird zudem eine Messreihe im reinen CW-Betrieb durchgeführt.

4.2 Einfluss eines nichtlinearen Verstärkerverhaltens auf das Prüfsignal

Die oben definierten Signale werden nacheinander auf den Eingang eines 100 W-Verstärkers appliziert. Der Signalpegel am Generatorausgang wird in 1 dB-Schritten von -35 dBm bis -5 dBm gesteigert und dabei das Ausgangsspektrum des Verstärkers mit einer *RBW* von 1 MHz gemessen. Mit der „Complementary Cumulative Distribution Function“ (*CCDF*)-Messfunktion eines Spektrum-Analysators wird zudem die Hüllkurve des Signals am Ausgang des Verstärkers analysiert. Dies erlaubt eine direkte Messung des Crest-Faktors. Bei dieser Messung muss darauf geachtet werden, dass die Bandbreite des Analysators mindestens so groß ist, wie die Prüfsignal-Bandbreite.

Abbildung 6 zeigt exemplarisch das Spektrum am Ausgang des untersuchten Verstärkers (100 W) in Abhängigkeit des Generatorpegels $P_{\text{gen,avg}}$. Im Nutzband ist ab einem Generatorpegel von etwa -15 dBm eine Sättigung sichtbar. Interessanter ist jedoch die auf Intermodulation zurückführbare Anhebung der Seitenbänder mit steigendem Generatorpegel.

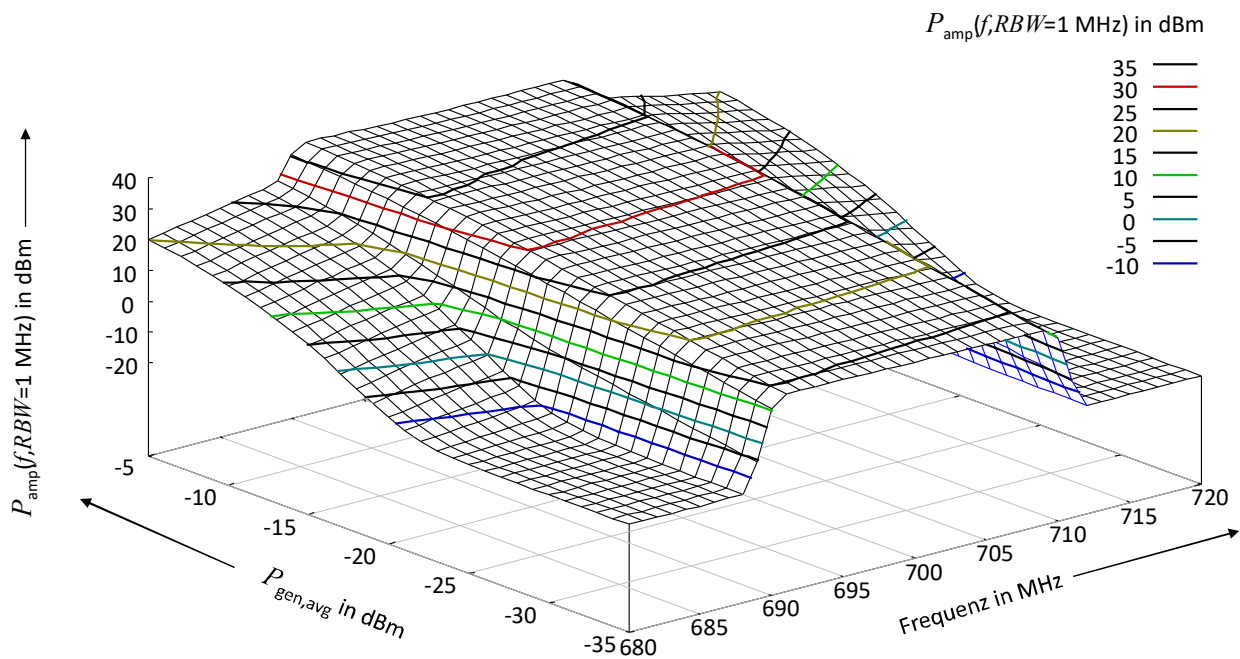


Abbildung 6: Spektrum am Ausgang des 100 W-Verstärkers exemplarisch für das PN11-Signal in Abhängigkeit des Generatorpegels $P_{\text{gen,avg}}$.

Die CCDF für dieses Signal ist exemplarisch in Abbildung 7 für verschiedene Generatorpegel dargestellt.

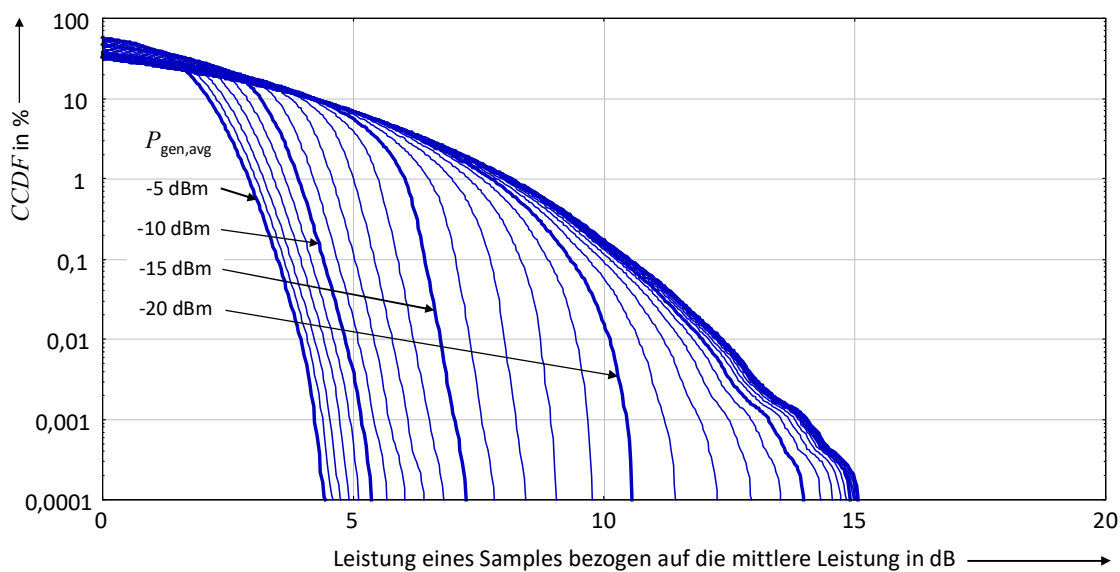


Abbildung 7: CCDF für verschiedene Generatorpegel für das PN11-Signal

Aus diesen Diagrammen kann nun der Einfluss des Verstärkers auf die Seitenbänder sowie den Crest Faktor ermittelt werden (siehe Abbildung 8).

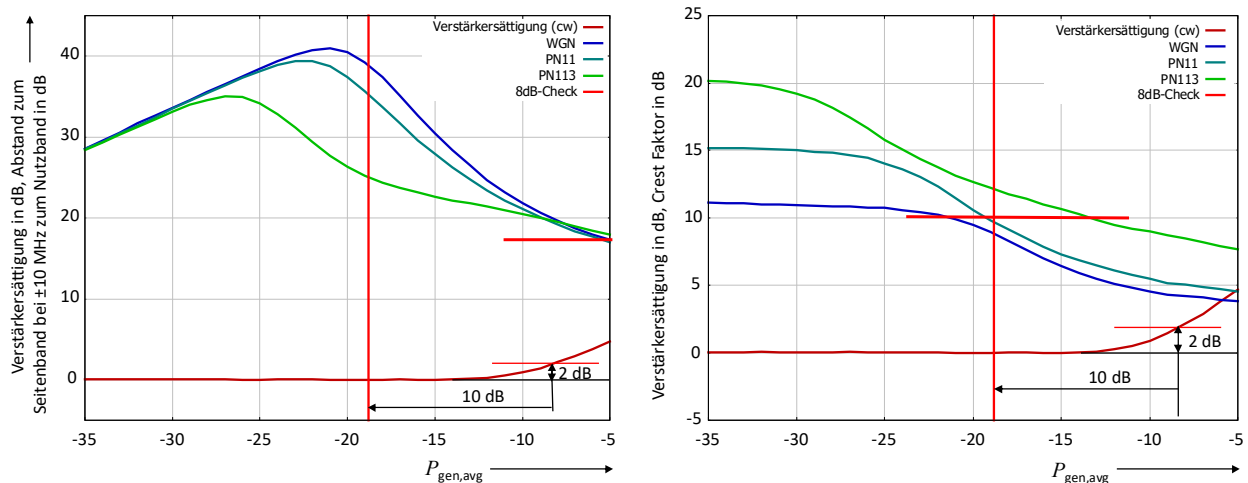


Abbildung 8: Abstand der Seitenbänder zum Nutzband sowie Crest Faktor in Abhängigkeit der mittleren Generatorleistung. In die Diagramme ist jeweils die Abweichung der Verstärker-Ausgangsleistung zu einem linearen Verlauf in dB als „Verstärkersättigung“ eingetragen.

Gemäß 8 dB-Verstärkersättigungsscheck ergibt sich eine Limitierung der Generatorleistung auf etwa -18 dBm (bei der untersuchten Mittenfrequenz von 700 MHz). Aufgrund der mit 17 dB Anstieg bzw. Abfall über 10 MHz (siehe Parameter a, b und c in Abbildung 1) großzügig bemessenen Steigung, stellt das Kriterium der spektralen Maske keine Herausforderung im Hinblick auf Verstärkersättigungseffekte dar. In ISO wird aktuell vorgeschlagen, die Steigung zu erhöhen (20 dB Anstieg/Abfall auf 20% der Prüfsignalbandbreite). Die Einhaltung eines Crest Faktors von 10 dB variiert stark mit der Art des Rauschens. Wird ein Signal synthetisiert, das einen hohen Crest Faktor hat, so tritt die Unterschreitung der Schwelle von 10 dB erst bei einer vergleichsweise hohen Generatorleistungen auf. Wird aber bei einer solchen Auslegung eines Prüfsystems eine hohe Leistung bei der Prüfung bei bestimmten Frequenzen nicht abverlangt, kann dies einen signifikant schärferen Test gegenüber einem normalverteilten Rauschen bedeuten.

5 Fazit

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das für IEC 61000-4-3 bis auf den Signalgenerator verwendete Testequipment (einschließlich Absorberhalle) auch für die Prüfung der Störfestigkeit gegen Breitbandsignale genutzt werden kann. Aufgrund des gegenüber AM höheren Crest Faktors ist bei gleichen Prüfpegeln eine höhere Verstärkerspitzenleistung notwendig. Die Untersuchungen zur Verstärkersättigung haben gezeigt, dass die entstehende Norm ggf. im Hinblick auf die Festlegung eines adäquaten Crest-Faktors für das Prüfsignal nachgeschärft werden müsste.

Literatur

- [1] IEC 61000-4-3:2020, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-3: Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test
 - [2] Entwurf zur IEC 61000-4-41, 77B/870/CD von 2023-08-18, Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-41: Testing and measurement techniques - Broadband radiated immunity tests
 - [3] ETSI TS 138 104:2023-10, V17.11.0, 5G, NR, Base Station (BS) radio transmission and reception
 - [4] ETSI TS 138 101-1:2023-10, V17.11.0, 5G, NR, User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone
 - [5] IEC TR 61000-2-5:2017, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 2-5: Environment – Description and classification of electromagnetic environments
- ETSI TS 138 141-1:2022-04, V17.5.0, 5G, NR, Base station (BS) conformance testing – Part 1: Conducted conformance testing