

Breitbandige HF-Verstärker in der EMV-Störfestigkeitsprüfung



Je mehr elektronische Geräte in Betrieb gehen, desto relevanter werden EMV-Störfestigkeitsprüfungen. Dieser Beitrag fasst einige Grundlagen zusammen und nennt die wichtigsten Parameter für die Auswahl von breitbandigen HF-Verstärkern.

Elektronische Geräte spielen in fast allen Bereichen des täglichen Lebens eine immer wichtigere Rolle. In einem typischen Haushalt in den USA fanden sich im Jahr 2018 etwa zehn Geräte, fünf Jahre später waren es schon 17 (Quelle: Consumer Electronics Dashboard, Parks Associates, 2024). Weil diese Zahlen allein die funkfähige Elektronik (Mobilfunk, WLAN, Bluetooth) berücksichtigt, ist die Anzahl von elektronischen Geräten pro Haushalt noch größer. Neben der Elektrifizierung des Privatlebens gibt es parallele Entwicklungen in der Industrie, der Luftfahrt, der Medizin und im Bildungssystem.

EMV-Prüfungen sind wichtig für Industrie und Gesellschaft

Alle elektronischen Geräte haben das Potenzial, andere elektronische Geräte zu stören oder von ihnen gestört zu werden. Man unterscheidet dabei zwischen gestrahlter (über die Luft) oder leitungsgebundener (über Kabel) Emission. Die Folgen von elektromagnetischen Störungen reichen von kaum wahrnehmbarem Summen oder sichtbarem Flimmern bis hin zu Geräteausfällen und dauerhaften Schäden.

Mehr elektronische Geräte, oft in enger Nachbarschaft zueinander, erfordern Maßnahmen, um Störungen zwischen Geräten zu erkennen und zu messen. Ziel ist entweder ein vollständiges Beheben oder zumindest ein Begrenzen von elektromagnetischen Störungen.

Unter elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) versteht man die Fähigkeit elektronischer Geräte, in einer bestimmten elektromagnetischen Umgebung ordnungsgemäß zu funktionieren, ohne diese zu stören oder selbst gestört zu werden. Gerade in der heutigen Zeit, mit ihren zahlreichen komplexen und vernetzten Elektronikprodukten, muss eine störungsfreie Koexistenz sichergestellt sein.

Regulierungspflicht und Standards

Die wachsende Bedeutung der elektromagnetischen Verträglichkeit hat zu zahlreichen EMV-Normen und Vorschriften geführt. Sie lassen sich in staatliche, militärische und industrielle EMV-Normen gliedern. Definiert werden sie durch die Komitees der jeweils zuständigen Normungsorganisationen, beispielsweise CISPR, IEEE, ISO oder MIL. In vielen Teilen der Welt dürfen elektronische Produkte nicht vermarktet oder verkauft werden, ohne dass zuvor die Einhaltung der einschlägigen EMV-Normen nachgewiesen wurde. Viele Unternehmen haben daher die EMV-Prüfung in ihren Produktentwicklungszyklus integriert.

Emissionsprüfung und Störfestigkeitsprüfung

EMV-Prüfungen können in zwei allgemeine Kategorien unterteilt werden: Emissionsprüfungen und Störfestigkeitsprüfungen (s. Bild 1).

Bei der Emissionsprüfung (Störaussendung) werden elektromagnetische Signale gemessen, die von dem zu prüfenden Gerät (Equipment Under Test, EUT) ausgesendet werden. So lässt sich feststellen, ob diese Emissionen die zulässigen Grenzwerte überschreiten und möglicherweise Probleme für andere Geräte in der Nähe verursachen. Der Zweck der Störfestigkeitsprüfung (Immunität) besteht dagegen darin, zu überprüfen, ob ein Gerät auch dann noch ordnungsgemäß funktioniert, wenn es (oft erheblichen) Mengen an Hochfrequenzenergie ausgesetzt ist.

Autor:
Michael Hempel
Produktmanager Breitbandverstärker
Rohde & Schwarz
www.rohde-schwarz.com

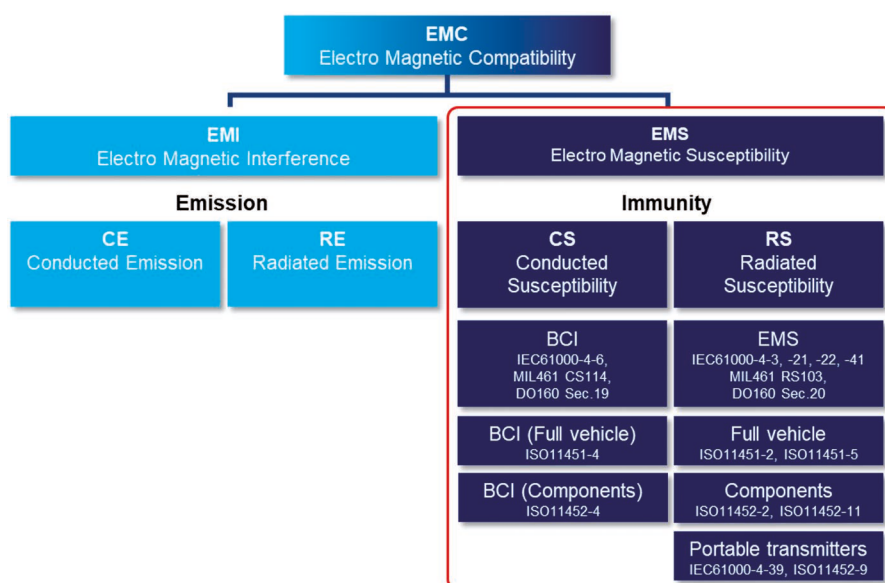


Bild 1: Gliederung der EMV-Prüfungen und Standards. Breitbandverstärkersysteme kommen hauptsächlich in den Störfestigkeitsprüfungen (Electromagnetic Susceptibility, EMS) zum Einsatz

Es gibt zahlreiche bekannte Beispiele für elektronische Geräte, die bei hohen HF-Energiepegeln nicht richtig funktionieren oder ausfallen – in einigen Fällen haben Fehlfunktionen sogar zu Verletzungen und Tod geführt.

Breitbandverstärker werden im Wesentlichen zur Erzeugung des energiereichen Störfeldes bei Störfestigkeitsprüfungen gebraucht. Bild 2 zeigt ein entsprechendes System zur Störfestigkeitsprüfung. Im 19-Zoll-Rack befinden sich unter anderem breitbandige HF-Verstärker für vier Frequenzbereiche von 9 kHz bis 18 GHz, darunter zweimal der R&S BBA300 (siehe Kasten) und zweimal der R&S BBA150.

Überblick: Störfestigkeitsprüfung

Bei einer Störfestigkeitsprüfung wird ein elektronisches Produkt (Gerät, Fahrzeug) über einen weiten Frequenzbereich definierten Pegeln von Hochfrequenzenergie ausgesetzt und überprüft, ob das Produkt weiterhin ordnungsgemäß funktioniert.

Diese Hochfrequenzenergie kann als Störsignal direkt über die angeschlossenen Kabel in den Prüfling geleitet (leitungsgebundene Störfestigkeitsprüfung) oder „über die Luft“ als elektromagnetisches Feld auf den Prüfling gestrahlt werden (gestrahlte Störfestigkeitsprüfung).

Bei der leitungsgebundenen Störfestigkeitsprüfung wird über eine das Kabel umschließende Stromzange ein Störstrom eingespeist, um die Robustheit der elektronischen Eingangs- und Ausgangsschaltungen des Prüflings zu testen.

Bei der gestrahlten Störfestigkeitsprüfung wird durch die Antenne in einem festgelegten Abstand von beispielsweise 3 m ab der Antennenspitze für die jeweilige Testfrequenz ein definiertes elektromagnetisches Feld erzeugt, das einen homogenen Feldbereich von 1,5 x 1,5 m abdeckt. Der Prüfling befindet sich in diesem Feldbereich. Durch schrittweises Erhöhen der Testfrequenz (sweepen) innerhalb der von den Normen vorgegebenen Frequenzbereiche wird nun die Immunität des Prüflings gegen den Frequenzstörer geprüft.



Bild 2: Beispiel für ein System zur Störfestigkeitsprüfung mit R&S BBA Breitbandverstärkern

Je nach Produkt und Norm können bei bestimmten Frequenzbereichen, die zwischen 9 kHz und 18 GHz liegen, elektrische Feldstärken von 3 bis 200 V/m gefordert sein. Im Automotivbereich sind es sogar bis zu 600 V/m (s. Bild 3).

Messaufbau für Störfestigkeitsprüfungen

Bild 4 illustriert einen typischen Systemaufbau für Störfestigkeitsprüfungen. Diese finden in aller Regel in einer geschirmten EMV-Testkammer statt. Als Signalquelle dient ein Signalgenerator. Ein breitbandiges HF-Verstärkersystem verstärkt das Signal, das über eine Breitband-HF-Antenne auf das EUT gestrahlt wird. Bei leitungsgebundenen Tests übernimmt eine Stromzange die Aufgabe der Antenne. Ein Messrichtkopppler und ein Leistungsmesser stellen sicher, dass eine definierte HF-Leistung erzeugt wird. Ob die Feldstärke, die von der EMV-Norm gefordert ist, auch tatsächlich am EUT anliegt, validieren eine Messsonde und ein Messempfänger. Eine Steuerungssoftware übernimmt die Ansteuerung aller beteiligten Geräte und führt das jeweilige Prüfverfahren durch.

Die benötigte HF-Leistung hängt vom EUT und zahlreichen weiteren Faktoren ab und liegt oft bei hunderten oder tausenden Watt. Diese hohen Leistungen können Signalgeneratoren nicht erzeugen. Deshalb sind ihnen breitbandige HF-Verstärkersysteme nachgeschaltet.



Bild 3: EMV-Kammer für gestrahlte Störfestigkeitsprüfungen an ganzen Fahrzeugen

Anforderungen an breitbandige HF-Verstärker

EMV-Testlabore decken oft viele EMV-Normen ab und testen in sehr unterschiedlichen Frequenz- und Leistungsbereichen. Die Alternative zu einem komplexen HF-Verstärkersystem aus unzähligen, schmalbandigen HF-Verstärkern ist ein sehr breitbandiger HF-Verstärker mit skalierbarer Ausgangsleistung. Idealerweise ist er modular aufgebaut, um flexible Kundensysteme zu realisieren.

Neben Skalierbarkeit, Modularität und Flexibilität gibt es eine Reihe an weiteren Anforderungen an einen Breitbandverstärker. Eine davon ist die Robustheit gegenüber Fehlanpassung am HF-Ausgang.

Fehlanpassung und SWR

Die Komponenten auf der Strecke zum Prüfling (Stecker, Kabel, Antenne) haben keine 50-Ohm-Impedanz an ihren Schnittstellen, sind also nicht optimal angepasst. Die Folge sind Reflexionen der erzeugten HF-Leistung, die zum Verstärker zurücklaufen. Auch der Prüfling selbst reflektiert. Dadurch geht dem System Energie verloren, die der HF-Verstärker durch höhere HF-Leistung ausgleichen muss, um die geforderte Nennleistung zu erreichen. Gleichzeitig muss er robust genug sein, um der reflektierten Energie zu widerstehen.

Ein System mit SWR 6 reflektiert zum Beispiel die Hälfte der Energie, bei einem SWR von 2 wird 11% der Leistung reflektiert. Liefert ein HF-Verstärker auch bei Systemen

mit hohen SWR-Werten seine Nennleistung, ist das ein Qualitätsmerkmal und weist auf genügend installierte Transistorreserve hin.

Linearität und Kompressionspunkt

Die Linearität des HF-Verstärkers, seine Ausgangsleistung am 1-dB-Kompressionspunkt und die harmonische Performance sind drei weitere wichtige Leistungsparameter.

Hintergrund: Jeder HF-Verstärker hat eine Kennlinie, die dem Verstärkungsfaktor entspricht und idealerweise linear ist. Das bedeutet: zu einem bestimmten Eingangspegel erzeugt der Verstärker einen größeren Ausgangspegel. Da HF-Verstärker keine unendliche Leistung erzeugen können, sättigen sie oberhalb eines bestimmten Eingangspegels.

Das Ausgangssignal wird komprimiert. Der Punkt, an dem das Ausgangssignal um 1 dB gegenüber dem idealen, linearen Pegel komprimiert wird, heißt 1-dB-Kompressionspunkt P_{1dB} bezeichnet. Bis zu diesem Punkt ist der Verstärker noch annähernd linear, oberhalb davon nehmen die Pegel der harmonischen Störungen gegenüber der Grundwelle stark zu. Daher sollte die harmonische Performance stets am Kompressionspunkt angegeben werden.

Harmonische Performance

In der EMV wird von den HF-Verstärkern erwartet, dass sie die Testsignale so wenig wie möglich verzerren, um die Leistungsparameter der Messobjekte präzise zu validieren. Ein Maß dafür ist die harmonische Performance. Die Harmonischen sind Oberwellen und damit Spektralanteile der Grundwelle. Insbesondere die zweite und dritte Harmonische können aufgrund ihres höheren Pegels zu Störungen beitragen. Dabei wird die Differenz des Pegels der Harmonischen zur Grundwelle als Kennzahl beschrieben. In der EMV hat sich der Standardwert von -20 dBc und besser am 1-dB-Kompressionspunkt als Anforderung an Verstärker etabliert, um einen Maximalwert von -6 dBc am Prüfling gemäß EN 61000-4-3 zu garantieren.

Rauschen

Das Rauschmaß ist ein wesentlicher Parameter für eine störungsarme Verstärkung. In der EMV hängt die Bedeutung des Rauschmaßes des Verstärkers vom jeweiligen Messobjekt ab. Messobjekte mit Funkschnittstellen benötigen eine gute Rauschleistung des Verstärkers, da sonst die Funkverbindung zum Messobjekt gestört oder unterbrochen werden kann.

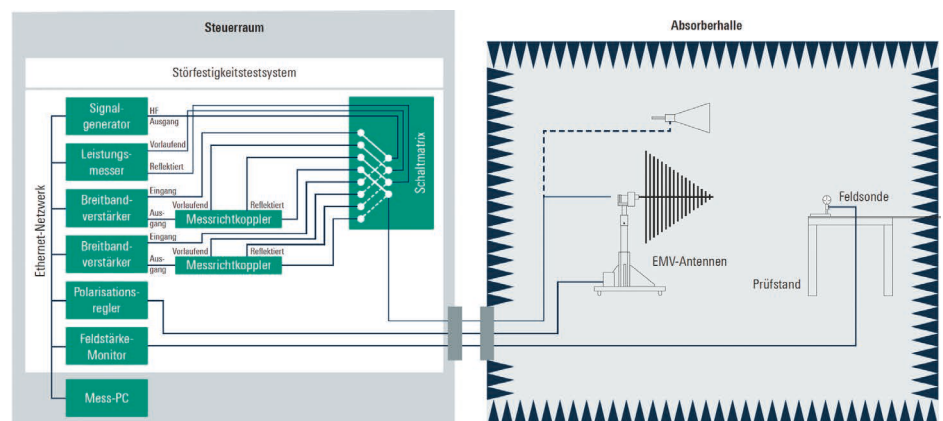


Bild 4: Typischer Systemaufbau für eine Störfestigkeitsprüfung. Ein Großteil der Messtechnik befindet sich in einem Steuerraum. Die eigentliche Messung erfolgt in einer geschirmten EMV-Kammer.

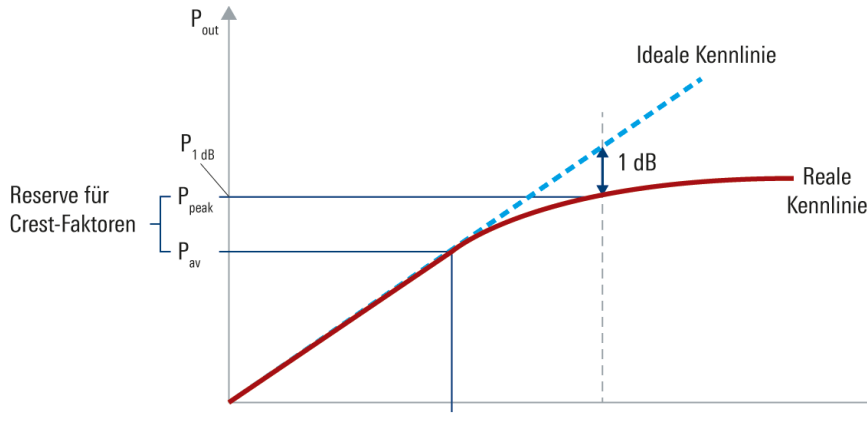


Bild 5: Bei der Dimensionierung der nötigen P1dB-Leistung des Verstärkers ist auf ausreichend Reserven (Headroom) zu achten. Die Spitzenleistung des modulierten Signals sollte die P1dB-Leistung nicht überschreiten.

Das Rauschmaß ist die Differenz zwischen dem Rauschen des realen Verstärkers und dem Rauschen eines idealen Verstärkers mit gleicher Gesamtverstärkung und Bandbreite. Daher ist es möglich, die Rauschleistung mit einer normierten Bandbreite unabhängig von der Verstärkerbandbreite zu definieren. Die Rauschleistungsdichte [dBm/Hz] gibt die Leistung des Rauschens in einer Bandbreite von 1 Hz um die Trägerfrequenz an.

Konstante oder variable Hüllkurve?

Um nun einen HF-Verstärker mit der richtigen Ausgangsleistung zu wählen, müssen weitere Kriterien wie Hüllkurve, Zeitverhalten und Bandbreite des Testsignals betrachtet werden. Testsignale werden in zwei Gruppen geteilt: Signale mit konstanter Hüllkurve und Signale mit variabler Hüllkurve. Konstante Hüllkurven treten beispielsweise bei CW-Signalen oder FM-, PM- und PSK-modulierten Signalen auf. Signale mit variabler Hüllkurve sind beispielsweise AM-Signale, komplexe Mehrträgersignale (wie OFDM mit Phase- und Amplitudenmodulation höherer Ordnung) oder bandbegrenztes weißes Rauschen.

Die Hüllkurve der Testsignale bestimmt, ob der Verstärker Reserven für Signalspitzen benötigt und spiegelt sich im Crest-Faktor (Verhältnis von Spitzenwert eines Signals zu dessen effektivem Mittelwert) wider. Dabei benötigen Signale mit konstanter Hüllkurve keine zusätzlichen Leistungsreserven. Ihr Crest-Faktor beträgt 0 dB.

Crest-Faktor und Hüllkurve

Für Testsignale mit variabler Hüllkurve können sich Crest-Faktoren von bis zu 15 dB ergeben. So hat z.B. eine AM mit 80% Modulationsgrad einen Crest-Faktor von 5,1 dB, eine AM mit drei Tönen einen Crest-Faktor von 14,6 dB, ein gepulstes

CW-Signal einen Crest-Faktor von 3 dB. Diese Crest-Faktoren erfordern zusätzliche Leistungsreserven, die bei der Berechnung der erforderlichen P1dB-Leistung des Verstärkers berücksichtigt werden müssen. Für eine verzerrungsfreie Verstärkung darf die Spitzenleistung des Signals nicht größer als die P1dB-Leistung des Verstärkers sein (s. Bild 5).

Testsignal-Bandbreite berücksichtigen

Die benötigte Bandbreite des Testsignals hat Auswirkungen auf die Dimensionierung der benötigten P1dB-Leistung. Ein HF-Verstärker kann nur eine bestimmte Menge an Energie erzeugen und diese Energie konzentriert sich entweder auf einen einzelnen Ton bzw. eine einzelne Frequenz oder sie verteilt sich bei breitbandigen Signalen über eine bestimmte Bandbreite. Die mittlere Ausgangsleistung des Verstärkers pro Hz ist damit zehnmal der Logarithmus der Bandbreite des Signals kleiner als die mittlere Leistung eines Einzeltoneignisses. Das bedeutet zum Beispiel, dass die mittlere Leistung eines 100 MHz breiten Rauschsignals 80 dB niedriger ist als die eines reinen Sinussignals mit der gleichen aggregierten Leistung.

Zusammenfassung: Anforderungen an HF-Verstärker

Aus der Vielzahl an EMV-Normen ergeben sich die folgenden Punkte als wichtigste Anforderungen an HF-Verstärker für die Störfestigkeitsprüfung:

• Frequenzbereich und Leistung

Die Verstärker sollten ausreichend Leistung über einen sehr breiten Frequenzbereich liefern, um die geforderten Feldstärken an jedem Frequenzpunkt zu erzeugen, die je nach Norm und Anwendung bis zu 600 V/m reichen können.

• Linearität und geringe Verzerrung

Für die meisten EMV-Tests ist eine hohe Linearität über den gesamten Frequenzbereich wichtig. So lassen sich Signalverzerrungen minimieren und die Prüfergebnisse werden nicht verfälscht. Der typische Grenzwert für harmonische Verzerrungen ist -20 dBc bei der 1-dB-Kompressionsleistung.

• hohe Fehlanpassungstoleranz

Da die Last nicht immer optimal angepasst ist, müssen Verstärker sehr robust gegen Reflexionen sein und auch bei hohen SWR-Werten (bis 6) stabil arbeiten.

• Modulationsarten

Die Verstärker sollten Signale mit verschiedenen Modulationsarten, wie CW, AM, PM, oder komplexe Signale, wie OFDM mit variablen Hüllkurven, verstärken können. Signale mit variabler Hüllkurve erfordern zusätzliche Leistungsreserven (Headroom), um Spitzenleistungen abzudecken. ◀

Der R&S BBA300 Breitbandverstärker für Störfestigkeits tests



Mit dem R&S BBA300 hat Rohde & Schwarz sein umfassendes Portfolio an Breitbandverstärkern um eine Familie erweitert, die alles für heutige EMV-Störfestigkeits tests mitbringt: Diese Produkte verfügen über eine hohe Linearität bis 300 W Ausgangsleistung bei herausragender HF-Performance in einem großen Frequenzbereich von 380 MHz bis 6 GHz und 6 bis 18 GHz. Zudem bieten sie durchgängige und sehr breite Frequenzbänder bis in den hohen Mikrowellenbereich und innovative Schutzkonzepte für hohe Verfügbarkeit. Darüber hinaus zeichnen sie sich aus durch eine hervorragende Rauschleistungsdichte, niedrige Rauschzahl und ausgezeichnete Oberwelleneigenschaften. Die Geräte lassen sich flexibel in kompakte 19-Zoll-Systeme integrieren.