

# Anspruchsvolle Messungen mit niedrigstem Eigenrauschen gemäß den aktuellen EMV-Normen

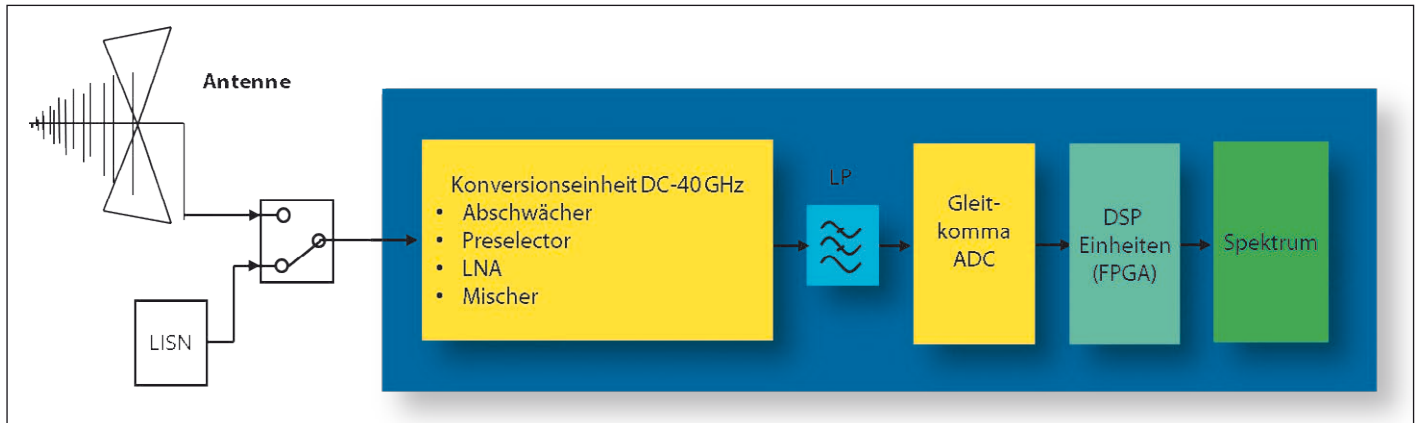


Bild 1 EMV-Zeitbereichsmesssystem TDEMI eXtreme

In den letzten Jahren wurden durch technologische Fortschritte die verfügbaren Echtzeitbandbreiten erheblich vergrößert. So wurde 2007 erstmalig ein TDEMI-1G-Messsystem vorgestellt, welches über 162,5 MHz Echtzeitbandbreite verfügte. Im Rahmen der Weiterentwicklung und Vorstellung der Produktserie TDEMI X wurde die Echtzeitbandbreite zunächst auf 325 MHz und schließlich sogar auf 645 MHz vergrößert. Damit ist es nun möglich, sowohl Störleistung als auch Störspannung in Echtzeit über den gesamten Bandbereich zu messen. Für Emissionsmessungen bis 1 GHz kann der Bereich in zwei Echtzeitbänder zerlegt werden und die formale Messung erfolgt innerhalb dieser beiden Bänder an allen Punkten gleichzeitig.

Eine Frage, welche sich allerdings immer wieder stellt, ist, ob ein solches Messgerät die gleiche Empfindlichkeit liefern kann, wie ein langsamer Superheterodynempfänger. Wenn ein Superheterodynempfänger die Messung viel langsamer durchführt, so könnte man annehmen, dass das Rauschen geringer wäre. Warum diese Annahme jedoch nicht korrekt ist, und warum heutige Messgeräte mit 645 MHz Echtzeitbandbreite sogar ein deutlich besseres Eigenrauschen

liefern können, wird im Rahmen des Artikels erklärt.

Die Firma GAUSS INSTRUMENTS hat im Dezember letzten Jahres eine neue Option vorgestellt, welche das Rauschen insbesondere im kritischen Bereich von 30 MHz – 1 GHz auf ca.  $-15 \text{ dB}\mu\text{V}$  absenkt. Typische Superheterodynempfänger erreichen im Vergleich im besten Fall hier gerade  $-10 \text{ dB}\mu\text{V}$ . Dies zeigt, dass es Messgeräte gibt, welche eine sehr hohe Echtzeitbandbreite haben aber auch gleichzeitig - bezüglich des Rauschbodens - gegenüber einem langsamen Superheterodynempfänger überlegen sind.

## 1 Funktionsweise TDEMI eXtreme

Das Eingangssignal wird im Basisband mit einer hochlinearen Analog-Digital-Wandler-Einheit zur Messung im Frequenzbereich DC - 1 GHz abgetastet und digitalisiert. Zusätzlich kommt eine Vorselektion mit hochlinearen Vorverstärkern zum Einsatz. Für Messungen im Bereich oberhalb des Basisbands von 1 GHz wird dann eine breitbandige Frequenzumsetzung mit integrierter Vorselektion eingesetzt. Die spektrale Darstellung kann einerseits digital superheterodyn oder mittels Kurzzeit-FFT erfolgen. Ein vereinfachtes Blockschaltbild der Funktions-

weise eines TDEMI eXtreme (kurz TDEMI X) Messempfängers ist in Bild 1 dargestellt. Für Messungen der gestrahlten Emission verwendet man typischerweise breitbandige logarithmisch-periodische Antennen zum Empfang der Störausstrahlung des Messobjekts. Alternativ können Messungen mittels Absorptionszangen, Nahfeldsonden oder Netznachbildungen durchgeführt werden. Zur Untersuchung der Einkopplung an Antennen in einem Kraftfahrzeug kann das TDEMI X auch direkt angeschlossen werden. Durch das mehrstufige Analog-Digital-Wandler-System erfolgt die Digitalisierung des Messsignals in Gleitkommazahl-Arithmetik mit entsprechend hoher Dynamik. Hierzu werden nach neuestem Stand der Technik mehrere Analog-Digital-Wandler in Kombination eingesetzt.

Dieses Verfahren ermöglicht es, einen äquivalenten Dynamikbereich von ca. 22 Bit zu realisieren, womit es einerseits möglich ist, eine hohe Sensitivität von z. B. ca.  $-25 \text{ dB}\mu\text{V}$  (Rauschboden in CISPR Band B) zu erreichen und andererseits gleichzeitig Pulse von mehreren Volt vollständig zu erfassen. Durch sehr leistungsfähige FPGAs mit einer Rechenleistung, welche jeweils ca. 200 handelsüblichen PCs entspricht, erfolgt die Auswertung

Stephan Braun  
Bernd Frech  
GAUSS INSTRUMENTS,  
München  
www.gauss-instruments.com

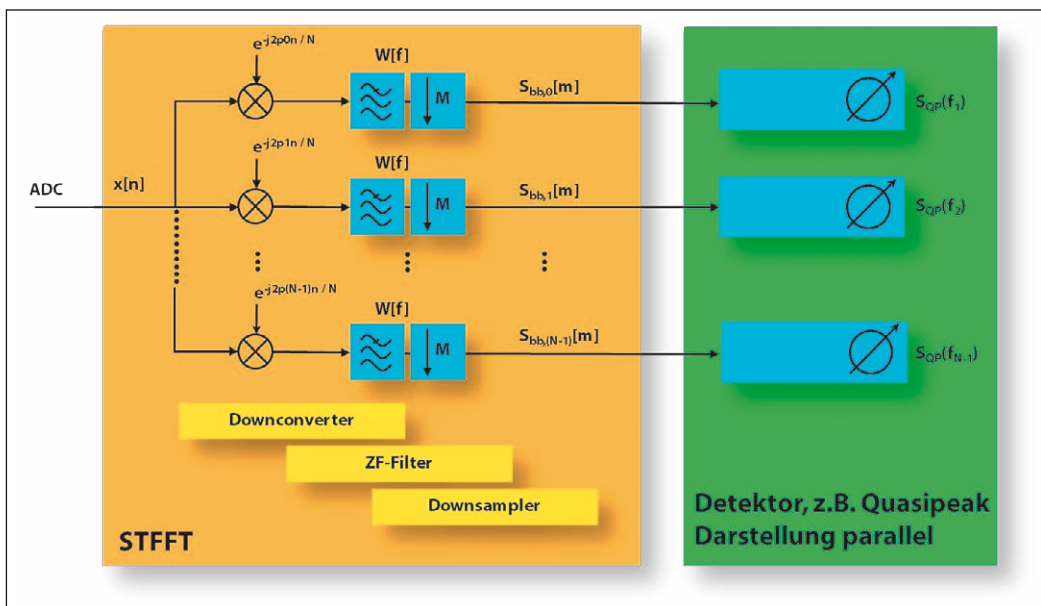


Bild 2: Mehrkanalmessempfänger - Umsetzer, Filterbank, Dezimator und Detektor

in einer Bandbreite von bis zu 645 MHz vollständig lückenlos in Echtzeit. Mit dem vorliegenden System können so bis zu 64000 Frequenzpunkte gleichzeitig gemessen werden. Zudem wurde die Dynamik nochmals um ca. 25 dB gegenüber vorhergehenden Plattformen erhöht und der nutzbare Frequenzbereich für Applikationen bis hinauf zu 40 GHz erschlossen.

1.1 Mehrkanalempfänger

Die CISPR 16-1-1 fordert bei der finalen Maximierung Beobachtungszeiten von z. T. mehr als 15 s. In der Vergangenheit wurde die Maximierung sequentiell an mehreren Frequenzpunkten durchgeführt. Zuvor mussten die kritischen Frequenzen jedoch z. B. durch eine Vormessung (sog. Prescan) zuerst identifiziert werden.

Durch die Kombination von Kurzzeit-FFT und digitalem Superheterodynmodus kann nun gleichzeitig, über ein ganzes Band von 645 MHz, an allen Frequenzpunkten die Messung mit Quasi-Peak und CISPR-Average durchgeführt werden. Technisch wird dies durch eine hochgradige Parallelisierung erreicht. Die Kurzzeit-FFT ist hierbei ein mathematischer Baustein, der es ermöglicht, doppelte Berechnungen auf effiziente Weise

einzusparen und Symmetrieeigenschaften auszunutzen. Die Detektoren müssen an allen Frequenzpunkten vollständig parallel realisiert werden. Ein vereinfachtes Blockschaltbild einer Kombination von Kurzzeit-FFT und Mehrkanalempfänger zeigt Bild 2. Das TDEMI X enthält mehrere solcher Funktionsblöcke in Kombination mit Superheterarchitektur.

Die CISPR 16-1-1 beschreibt alle Anforderungen welche ein Messempfänger erfüllen muss. Wesentliche Kriterien sind hierbei die Dynamikanforderungen für Pulse und deren korrekte Darstellung. Generell gilt für alle Messempfänger nach CISPR 16-1-1, dass diese während der Beobachtungszeit das Signal lückenlos messen und auswerten müssen. Bei analogen Empfängern geschieht dies an der eingestellten Frequenz. Bei teildigitalisierten oder volldigitalen Messempfängern, wie z. B. dem TDEMI X, erfolgt die in der CISPR 16-1-1 geforderte lückenlose Auswertung mittels sehr leistungsfähiger FPGAs. Bei den hier eingesetzten FPGAs handelt es sich nicht nur um einen „FFT-Chip“, sondern um eine vollwertige Implementierung von vielen parallelen Messempfängern nach CISPR 16-1-1 [2]. Das TDEMI X beinhaltet bis zu 64 000 pa-

rallele Messempfänger, welche durch eine patentierte Technologie zur Verfügung stehen und geschützt sind.

1.2 POI – Propability of Intercept

Bei FFT-basierenden Geräten spricht man oft auch von der sogenannten Probability of Intercept (kurz POI), welche die Fähigkeit eines Messgerätes spezifiziert, Signale mit einer minimalen Dauer noch korrekt zu erfassen und darzustellen. Echtzeit-Spektrumanalysatoren haben üblicherweise ein POI von >15 µs. Im Standard CISPR 16-1-1 Ed. 3.1 wird diese Anforderung derart definiert, dass ein moderner Messempfänger, ein sog. „FFT-based Measuring Instrument“, das Eingangssignal kontinuierlich messen und auswerten muss. Ferner muss das Messgerät eine korrekte Anzeige für die Pulse gemäß CISPR 16-1-1 liefern. Ein derartiger normkonformer Empfänger, der FFT-basierend arbeitet, muss also einen POI von 300 ps zur Verfügung stellen.

Ein TDEMI X hält die Anforderung eines POI von 300 ps gemäß der CISPR 16-1-1 ein und erreicht somit die 50000 fache Performance eines handelsüblichen Echtzeitspektrumanaly-

sators, welcher üblicherweise ein POI von > 15 µs bereitstellt.

2. Empfindlichkeit eines Messempfängers

2.1 Das Thermische Rauschen

Das thermische Rauschen eines Messempfängers wird primär durch die Rauschzahl der Eingangsstufe bestimmt. Bei der Realisierung eines EMV-Messempfängers muss man dabei einen Kompromiss zwischen Aussteuerbarkeit und Rauschboden finden. Früher waren die Eingangsverstärker bzgl. ihrer Aussteuerbarkeit sehr begrenzt. Daher musste der Eingangsbereich mit einer sehr schmalbandigen Vorselektion realisiert werden. Dies schützte den Eingangverstärker vor Breitbandsignalen.

Heute ist es möglich, einen deutlich höheren Aussteuerungsbereich zu realisieren, wobei die Rauschzahl der Verstärker sehr gut ist. Neue Chiptechnologien ermöglichen es, differentielle Verstärker mit bis zu 8 GHz Bandbreite zu realisieren. Selbst eine Gegenkopplung, wie man sie aus dem Audiobereich kennt, ist mittlerweile möglich. Dies führt zu einer sehr guten Linearität.

Das Hauptproblem, welches bei Superheterodynempfängern bestehen bleibt, ist der Mischer. Ein Mischer ist naturgemäß ein nichtlineares Bauteil und erzeugt Mischprodukte. Diese Mischprodukte sind relativ hoch. Bei einer Aussteuerung von -10 dB unterhalb der Aussteuerungsgrenze des Mixers wird man viele Mischprodukte erhalten, welche lediglich um 30 dB unterdrückt sind. Daher ist beim Einsatz von Mixern eine Vorselektion unabdingbar.

Aufwendige Vorselektionen mit durchstimmbaren Filtern haben gerade im Bereich bis 1 GHz den Nachteil, dass sie relativ hohe Verluste aufweisen, und damit die Rauschzahl hoch ist. Dies führt zu einem relativ hohen

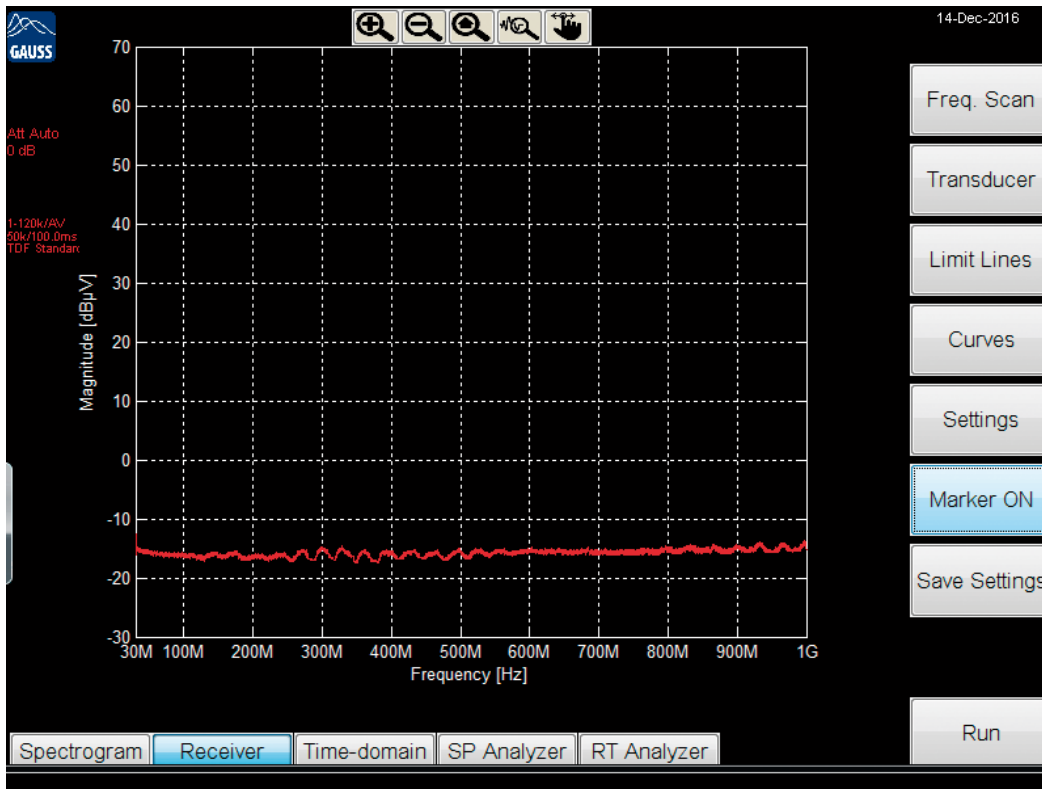


Bild 3 Eigenrauschen des TDEMI X mit entsprechend ausgestatteter Option ULNA-UG1G

Rauschboden. Man erkaufte sich also mit einem höheren Rauschboden eine Unterdrückung der unerwünschten Mischprodukte. Gewisse Mischprodukte, wie z.B. das 2x2-Mischprodukt können nicht unterdrückt werden. Wird ein klassischer Empfänger bei dieser Frequenz angesteuert, so hebt sich der Rauschboden über den gesamten Frequenzbereich an.

Die Firma GAUSS INSTRUMENTS setzt daher, wie auch alle modernen Mobilfunkbetreiber, auf direkte Abtastung mit sehr leistungsfähigen Analog/Digital-Wandlern und einer Vorselektion, welche aus einer Anordnung von Filterbänken besteht.

## 2.2 Direkte Abtastung vs. Mischer

Bei einer direkten Abtastung mittels eines Analog-/Digital-Wandlers hängt die Aussteuerbarkeit mit der Leistungsfähigkeit des A/D-Wandlers zusammen. Gerade in den letzten Jahren wurde die Performance der A/D-Wandler immer weiter verbessert. Es ist heute mög-

lich bei Vollaussteuerungen eine Unterdrückung von 60-90 dB zu erreichen. Ein derartiger Wert ist bei Mischern technisch nicht möglich.

Aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit der A/D-Wandler in Kombination mit sehr guten Vorverstärkern ist es möglich, eine Vorselektion aus diskreten Filtern zu realisieren, welche aufgrund geringerer Dämpfung zu einem besseren Rauschboden führt. Da das Ausgangssignal des Vorverstärkers breitbandig abgetastet wird, kann man auch den Vorverstärker hinsichtlich seiner Übersteuerung direkt im Zeitbereich überwachen und dadurch die Eingangsstufe gegenüber etwaiger Übersteuerung schützen. Ein derartiges Verfahren ist auch in CISPR 16-1-1 bzgl. der Verwendung von Vorverstärkern beschrieben.

## 2.3 Einfluss der Echtzeitbandbreite auf den Rauschboden

Da das TDEMI X eine interne Numerik von über 30 Bit besitzt, ergibt sich somit keine Einschränkung bzgl. der Numerik

auf den Rauschboden. Wir führen nun folgendes Gedankenexperiment durch. Zunächst stellen wir uns einen klassischen Messempfänger mit 120 kHz Bandbreite vor. Dieser empfängt gemäß der Formel

$$P = kT\Delta f \quad (\text{Gl. 1})$$

die Rauschleistung  $P$ , welche bei der Temperatur  $T$  in Kelvin und über den Bandbereich  $\Delta f$  (hier im Beispiel 120 kHz) empfangen wird.  $k$  ist die sogenannte Boltzmann-Konstante.

Ein Messempfänger mit 645 MHz Echtzeitbandbreite würde demnach eine Rauschleistung empfangen, die deutlich höher zu sein scheint, da  $\Delta f$  einer Bandbreite von 645 MHz entspricht. Diese Überlegung ist grundsätzlich korrekt, allerdings muss darüber hinaus der Umstand berücksichtigt werden, dass diese Bandbreite ja wiederum mit Segmenten von 120 kHz parallel gemessen wird und sich somit nach dem Energieerhaltungssatz die Leistung über alle parallel gemessenen Segmente gleichmäßig aufteilt. Dies bedeutet, dass sich das

Grundrauschen um die Anzahl der 120-kHz-Segmente entsprechend reduziert und sich damit auch in diesem Fall wiederum ein Rauschen gemäß Gl. 1 einstellt. Die Höhe des Rauschbodens ist damit natürlich unabhängig von der Echtzeitbandbreite, vorausgesetzt die Numerik und die A/D Wandler haben eine ausreichend gute Performance.

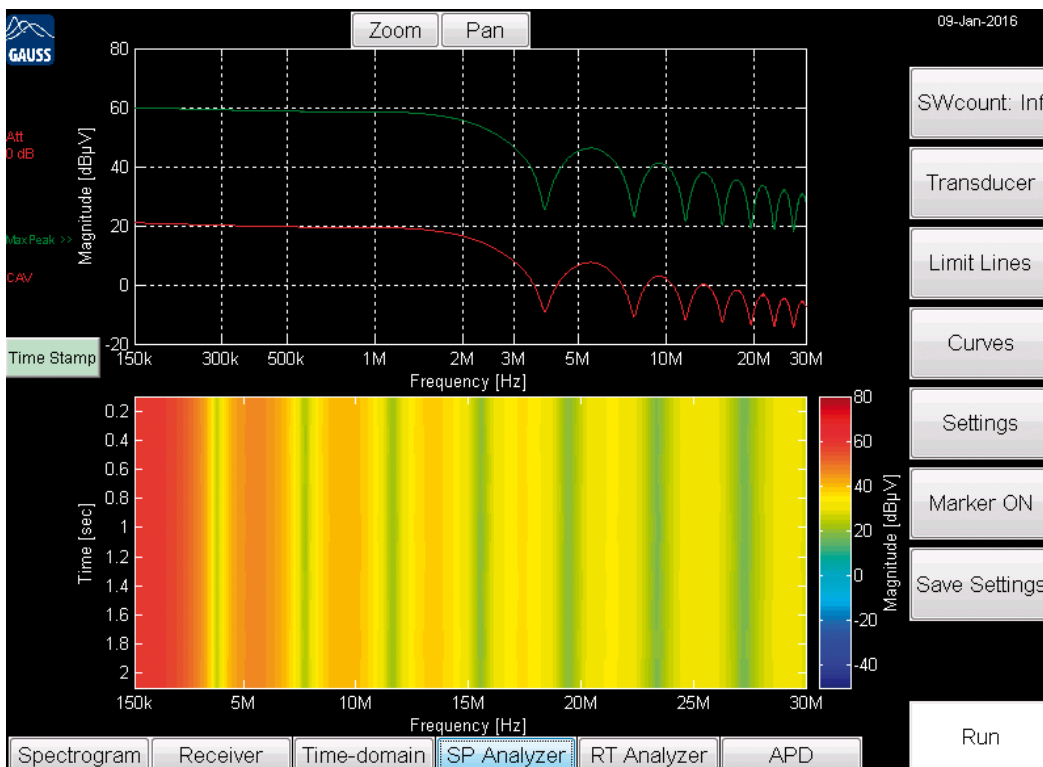
Aus der Beobachtung von Echtzeitspektrumanalysatoren kennt man allerdings noch ein anderes Verhalten. Je größer die Echtzeitbandbreite desto höher der Rauschboden. Dies hängt ganz einfach damit zusammen, dass die Messbandbreite bei solchen Geräten bei Erhöhung der Echtzeitbandbreite ebenfalls erhöht wird. Dies ergibt sich aus dem Nachteil, dass man nur sehr wenige Punkte, typischerweise z. B. 1000, zur Verfügung hat. Beim TDEMI X sind es jedoch 64000.

## 3. Einsatz in der Praxis

### 3.1 Niedrigster Rauschboden im Bereich 30 MHz – 1 GHz

Durch einen zusätzlichen, besonders rauscharmen Vorverstärker, speziell für die Anforderungen im Frequenzbereich 30 MHz – 1 GHz, kann ein äußerst niedriger Rauschboden erreicht werden. Der neuartige, optional erhältliche Vorverstärker verfügt über extrem niedriges Eigenrauschen sowie über einen sehr hohen Dynamikbereich. Die Kombination aus einem patentierten Verfahren zur Überwachung der Linearitätsreserve des Vorverstärkers sowie einer Vorselektion ermöglicht es, Emissionsmessungen auch mit höchsten Anforderungen hinsichtlich Dynamik und Rauschboden schnell und zuverlässig erfolgreich durchzuführen.

Der erreichte Rauschboden mit Mittelwertdetektor und 120 kHz ZF-Bandbreite liegt über den gesamten Frequenzbereich bis 1 GHz bei ca. -15 dBuV, wie aus der Messung in Bild 1 zu ersehen ist. Dies entspricht einer Verbesserung von 5 bis 10 dB



**Bild 4 Breitbandimpuls und hohe Linearität (150 kHz – 30 MHz)**

gegenüber anderen aktuell am Markt verfügbaren Lösungen. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Messung in ca. 3 – 4 Sekunden über den gesamten Bereich von 30 MHz – 1 GHz mit Quasispitzenwert und CISPR-Average gleichzeitig erfolgen kann. Damit kombiniert das TDEMI X höchste Messgeschwindigkeit mit dem besten verfügbaren Rauschboden.

**3.2 645 MHz Echtzeitbandbreite vs. Dynamik**

Das TDEMI X mit 645 MHz Echtzeitbandbreite stellt dem Anwender, wie zuvor gerade beschrieben, eine sehr hohe Dynamik bereit. Diese Dynamik ist unter anderem von signifikantem Vorteil, wenn z. B. leitungsgeführte Messungen bis 110 MHz bzw. 200 MHz durchgeführt werden müssen. Gerade im Automotive-Bereich existieren starke gepulste Störer, welche besonders hohe Anforderungen an die Dynamik eines Messempfängers stellen. In Bild 3 ist deshalb die Messung eines Pulses mit niedriger Pulswiederholrate dargestellt. Der breitbandige Impuls verlangt von einem

Messgerät einen Aussteuerungsbereich der weit über 100 dB Dynamik umfasst. Der Puls, der hier mit einer Maximalanzeige von 60 dBµV gewichtet angezeigt wird, hat mehrere Volt Spitzenspannung und würde ein System aus Mischer und Vorverstärker benötigen, dessen 1 dB-Kompressionspunkt bei einem sehr hohen Wert von ca. 26 dBm liegen würde.

Hier kommt der Vorteil der vorgestellten Basisbandtechnologie mit solch hoher Dynamik wie des TDEMI X voll zu tragen. Der Rechteckimpuls, der im Frequenzbereich ein SI-Spektrum ergibt, wird verzerrungsfrei wiedergegeben. Es sind keinerlei Verzerrungen der einzelnen Spitzen nach unten zu erkennen. Die beiden Kurven verlaufen absolut parallel.

**3.3 Anspruchsvolle Messungen im Automotive und Verteidigungsbereich**

In Bild 4 haben wir einen Breitbandimpuls, welcher z. B. von der Zündanlage eines Kfz stammen könnte eingespeist. Der Pulspegel, mit Quasipeak bewertet, beträgt 60 dBµV. Die

Amplitude in diesem Bereich beträgt mehrere Volt. Es ist gut zu erkennen, dass beispielsweise beim Average-Detektor parallel dazu für Pulse eine Empfindlichkeit von -10 dBµV erreicht wird. Dies stellt die besten Voraussetzungen dar, um z. B. anspruchsvolle Messungen nach OEM-Normen durchzuführen, welche Grenzwerte von 0 dBµV haben. Auch ein Schmalbandträger bei -10 dBµV könnte hier exakt gemessen werden. Derartige anspruchsvolle Messungen sind mit herkömmlichen Superheterodynempfängern schlicht nicht realisierbar.

**3.4 Anwendung für Emissionsmessungen in einer 10-m-Absorberhalle**

In der Praxis bedeutet dies, dass Messungen der EMV in einer 10-m-Absorberhalle nun mit höchster Empfindlichkeit erfolgen können. Die Performance steht sowohl im Receiver Modus mit 325-MHz-Segmenten, im klassischen Empfängermodus als auch im Spektrogrammmodus mit 645 MHz Echtzeitbandbreite zur Verfügung. Die Verwendung eines zusätzlichen externen Vor-

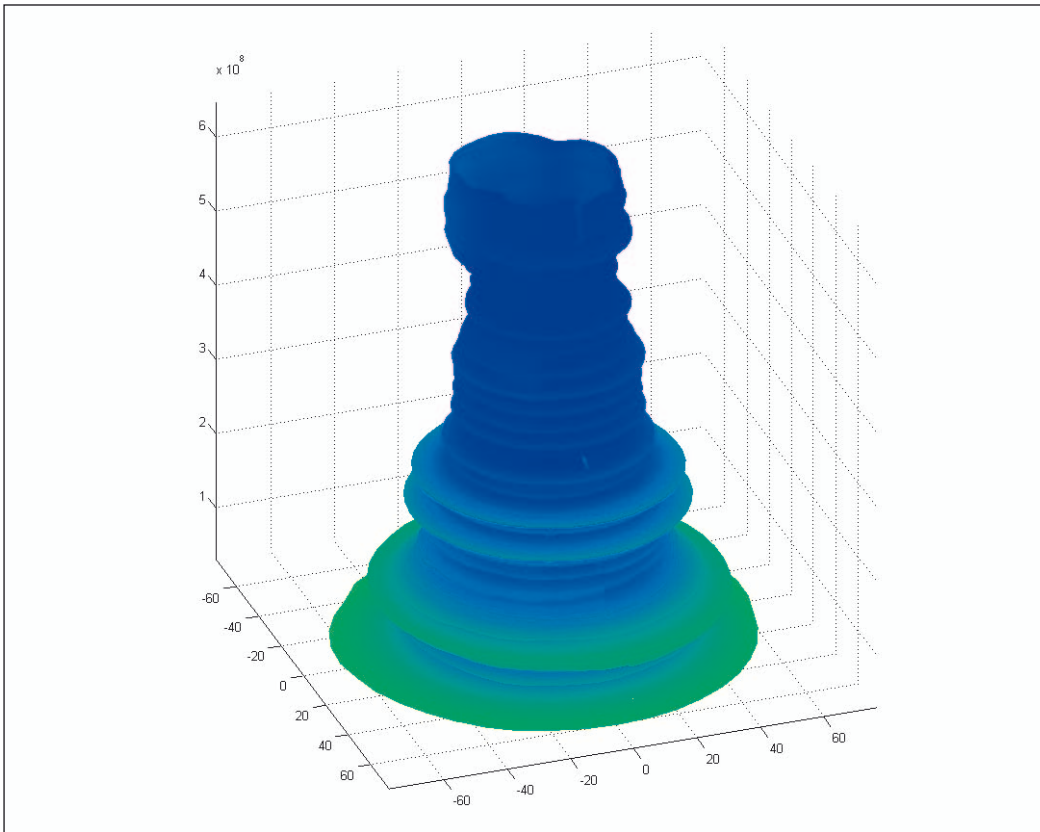
verstärkers ist für typische Messungen in einer 10-m-Halle damit nicht mehr von Notwendigkeit. Einerseits wird somit die Messunsicherheit weiter reduziert und gleichzeitig auch die Zuverlässigkeit und die Messgenauigkeit nochmals erhöht, zum anderen werden die laufenden Kosten, wie auch Kalibrierkosten, weiter gesenkt und die Auslastung der Halle bzw. der Durchsatz an Messungen weiter verbessert.

Zusammen mit der Automatisierungssoftware EMI64k lassen sich die vielfältigen Möglichkeiten nahezu beliebig kombinieren. So können Messungen selbstverständlich mit Vormessung und Nachmessung mit finaler Maximierung auf klassische Weise durchgeführt werden. Sollen die Messabläufe jedoch effizienter, schneller und mit höherer Qualität durchgeführt werden, so kann die Messung mit dem TDEMI X direkt mit dem Quasispitzenwert an sämtlichen Frequenzpunkten erfolgen. Aufgrund des exzellenten Rauschbodens ohne jegliche Eigenstörungen, vgl. Bild 1, kann das Messsystem hervorragend für Emissionsmessungen nach CISPR 25 oder diversen OEM-Standards sowie VG-Normen eingesetzt werden. Erstmalig wird für diesen Frequenzbereich bei CISPR-konformen Messempfängern ein DANL von ca. -171 dBm/Hz erreicht.

Ein Beispiel einer Quasipeakmessung in Echtzeit über alle Abstrahlwinkel ist in Bild 5 dargestellt.

**4 Wirtschaftliche Aspekte und Risikominimierung**

Durch den zuvor beschriebenen rauscharmen Vorverstärker (Option ULNA-UG) wird für anspruchsvolle Emissionsmessungen nach MIL, OEM und VG Normen der Rauschboden also derart abgesenkt, dass erstmalig Signale empfangen werden können, welche derzeit nicht sichtbar sind. Dies ermöglicht auch neue Anwendungsfelder. Darüber hinaus benötigt man keine



**Bild 5: Abstrahlung eines Motors im Frequenzbereich 30 – 650 MHz**

externen Vorverstärker mehr, um solche sehr anspruchsvollen Messungen durchführen zu können. Der Vorteil der Überwachung des internen Vorverstärkers ermöglicht es außerdem,

Übersteuerungen zuverlässig und sofort zu erkennen und durch die Funktion Autorange automatisch zu vermeiden. Zusätzlich werden darüber hinaus Hardware und Kalibrierkosten für externe

Komponenten, wie zusätzliche Vorverstärker eingespart. Durch den Einsatz solcher Messgeräte ist es darüber hinaus möglich, den Prüfling erstmals mit hoher Echtzeitbandbreite voll-

ständig zu charakterisieren. Es wird häufig davon ausgegangen, dass Messungen mit Vormessung, basierend auf Templates von Messsoftware, den Benutzer davon entbinden würden, die Suche nach der maximalen Emission zu verantworten. Hier ist jedoch anzumerken, dass die Vormessung (sog. Prescan) nur eine Methode aufzeigt, um mit dem Peak Detektor die Maxima zeitsparend zu suchen. Befinden sich die Maxima bei Quasipeak Messung jedoch an anderen Frequenzpunkten, so stellt dies ein wesentliches Risiko dar. Die CISPR 22 geht hier sogar so weit, dass beschrieben wird, dass die Peak Messung zwar zulässig ist, aber im Streitfall nur die Quasipeakmessung entscheidend ist.

In der Praxis ist das Prescan-Verfahren also nicht immer zuverlässig. Dieses Risiko kann man nun jedoch gezielt durch eine Messung an allen Frequenzpunkten mit Quasi-Peak Detektor über alle Winkel und Frequenzpunkte vollständig beseitigen. Ein Labor, welches eine Emissionsmessung an allen Frequenzpunkten mit Quasipeak durchführt, ist beim Thema EMV damit deutlich geringeren Risiken ausgesetzt. ◀

## Literaturhinweise

[1] S. Braun und A. Frech

645 MHz Echtzeitbandbreite für Full-Compliance-Messungen mit dem TDEMI X

In hf-praxis 3/2016, Fachzeitschrift für HF- und Mikrowellentechnik, Mrz. 2016, Seite 44-47.

Link zum Artikel <http://www.beam-verlag.de/app/download/24071892/HF-Praxis+3-2016+III.pdf>

[2] CISPR16-1-1 Ed 3.1, Specification for radio disturbance and immunity measuring apparatus and methods Part 1-1: Radio disturbance and immunity measuring apparatus – Measuring apparatus.

International Electrotechnical Commission, 2010.

[3] S. Braun, M. Aidam, P. Russer

Development of a multiresolution time domain EMI measurement system that fulfills CISPR 16-1-1

International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 8-12 Aug. 2005, Chicago.

Braun, M. Aidam and P. Russer

[4] S. Braun und A. Frech Anforderungen der CISPR 16-1-1 an Messempfänger, Spektrumanalysatoren und FFT-basierende Messinstrumente In EMC Europe Guide 2013, Interference Technology - The International Journal of Electromagnetic Compatibility, Dec., 2012, pages 66-73

[5] S. Braun und A. Frech

Anwendung der EMV Zeitbereichsmesstechnik für Schienenfahrzeuge und E-Mobility

emv 2016 – Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit, Düsseldorf, Germany, Feb 23-25, 2016.

Ausgezeichnet mit dem BEST PAPER AWARD 2016.