

Moderne Messempfänger für voll CISPR-normkonforme EMV-Messungen in Echtzeit

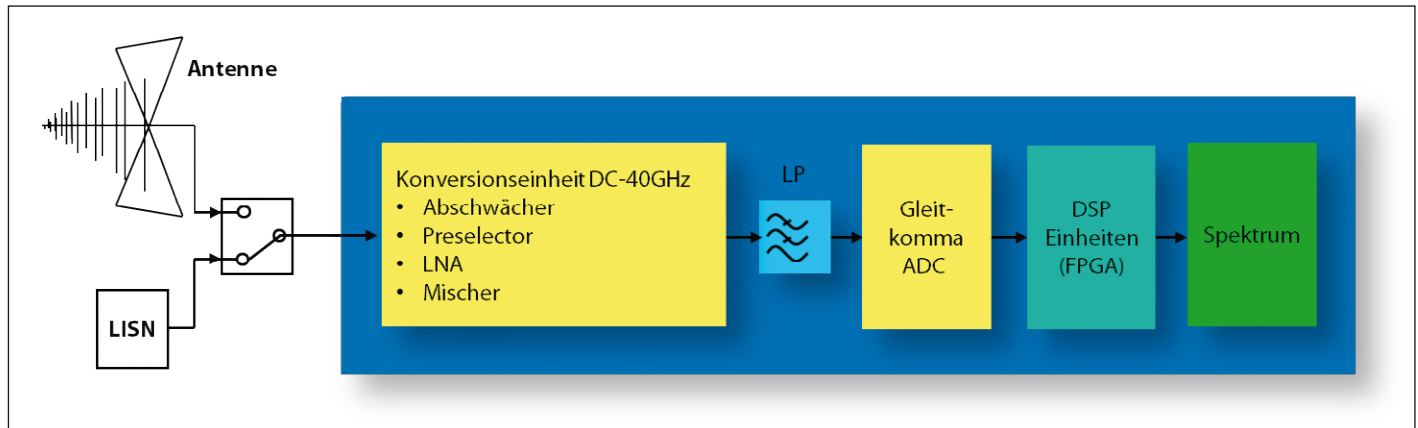


Bild 1: Blockschaltbild eines EMV-Zeitbereichsmesssystem TDEMI X

Einleitung

Durch die immer weiter fortschreitende Digitalisierung unseres Alltags, Vernetzung unserer Umgebung sowie der Einsatz von immer mehr elektronischen Assistenzsystemen in allen Bereichen unseres täglichen Lebens, wird die Dichte der uns umgebenden elektronischen Systeme und Komponenten immer höher. Gleichzeitig werden immer mehr Teilsysteme oder Komponenten zusammen integriert und zu immer komplexeren Produkten oder Gesamtsystemen mit meist deutlich erhöhtem Funktionsumfang kombiniert. Entsprechend zeitaufwendig und komplex kann eine Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (kurz: EMV) bzw. die Einhaltung der in den CISPR-Produktstandards bzw. in den auf diesen basierenden Standards vorgegebenen Grenzwerte werden. So muss sichergestellt werden, dass der Worst Case der Emissionen des zu prüfenden Systems oder Komponente erfasst und auf Einhaltung geprüft wird. Dies kann bei komplexen Prüflingen mit vielen unterschiedlichen Betriebsarten, schnell oder gar ständig wechselnden Lasten oder auch intermittierendem Emissionsverhalten eine Herausforderung darstellen und den Auf-

wand für eine EMV-Prüfung mit klassischen altherkömmlichen Verfahren drastisch erhöhen bis nahezu unmöglich machen.

Eine Alternative hierzu bieten moderne Messempfänger, welche digitale Signalverarbeitung in Echtzeit durchführen. Sie nutzen alle Vorteile heutiger EMV-Zeitbereichsmesssysteme und können damit eine Echtzeitbandbreite von bis zu 645 MHz realisieren. Setzt man hier sehr leistungsfähige, hochauflösende Gigasample-ADCs für deren Hardware ein, so kann man eine extrem hohe Dynamik erreichen. Nachdem bei solch modernen Messempfängern gleichzeitig eine sehr hohe Rechenleistung zur Verfügung steht, können mit diesen viele tausend Frequenzpunkte gleichzeitig erfasst und gemessen und die EMV-Messungen um mehrere Größenordnungen beschleunigt werden. Auch eine vollständige Charakterisierung des Prüflings in Echtzeit mit dem üblicherweise sehr zeitaufwendigen Quasi-Peak-Detektor ist erstmalig möglich, so dass eine vollständige Bewertung des Prüflings mit dem QP-Detektor vorliegt.

Die generellen technischen Anforderungen an ein Messgerät zur Messung von Störemissionen sind in der Norm CISPR 16-1-1

vorgegeben. Seit der im Jahr 2010 offiziell erschienenen Edition der CISPR 16-1-1, wird darin auch explizit das sogenannte „FFT-based measuring instrument“ definiert und beschrieben. Dabei handelt es sich um ein EMV-Zeitbereichsmesssystem, das im Gegensatz zum klassischen Messempfänger eine Vielzahl von Frequenzpunkten gleichzeitig auswertet und dabei alle Anforderungen der CISPR 16-1-1 Norm vollständig einhält. Auch wird in der CISPR 16-2-3 explizit auf den Vorteil eines Einsatzes solcher Messgeräte und eine entsprechend direkte Messung bzw. Maximierung hingewiesen.

Am Beispiel des Messsystems TDEMI X sieht man, dass es heute möglich ist, eine sehr große Echtzeitbandbreite von über 645 MHz in Echtzeit an allen Frequenzpunkten mit Quasi-Peak zu messen. Die große Dynamik von sehr hochperformanten Analog/Digital Wandlern (kurz: ADC) sowie der Einsatz mehrerer solcher ADCs, kombiniert mit einer ausgeklügelten intelligenten Vorselektion erlauben es, eine Dynamik zu erreichen, welche die von analogen Empfängern mittlerweile sogar übertrifft. Mit dem Messempfänger TDEMI X können somit leitungsgeführte Messungen

Arnd Frech, Stephan Braun,
GAUSS INSTRUMENTS,
München

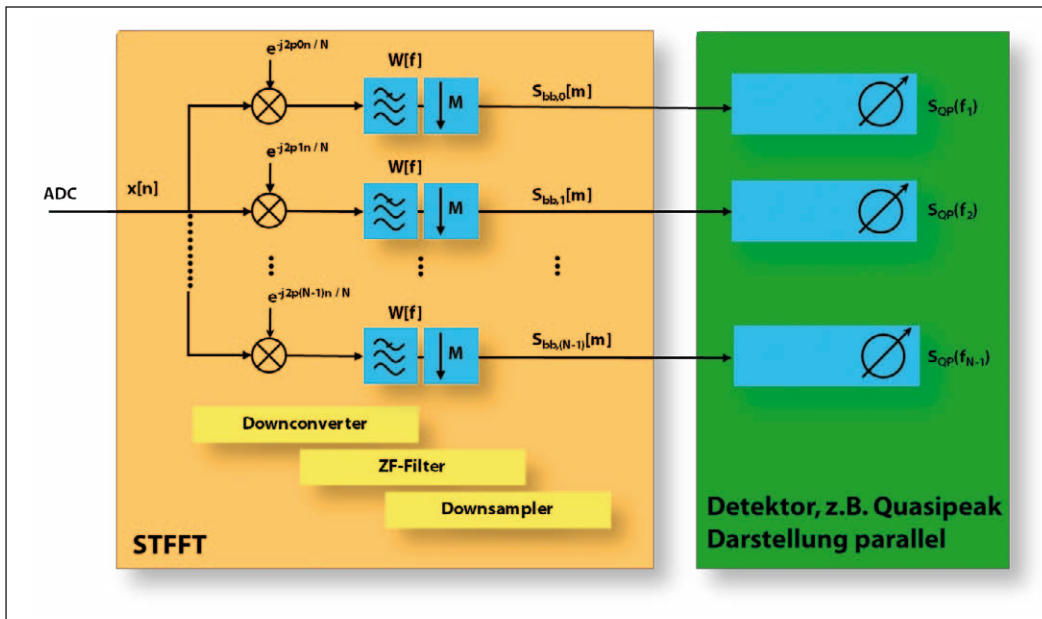


Bild 2: Mehrkanalmessempefänger – Set von bis zu 64000 Empfängern parallel.

direkt an allen Frequenzpunkten erfolgen, ohne dass es einer aufwendigen und fehleranfälligen Vor- und Nachmessung bedarf.

Bei Störleistungsmessungen kann das Spektrum 30 MHz - 300 MHz mit Quasi-Peak und Mittelwert, vollständig in Echtzeit, gleichzeitig an allen Frequenzpunkten gemessen werden. Für die gestrahlte Emissionsmessung von 30 MHz - 1 GHz ist es möglich, den Frequenzbereich in zwei einzeln zu messende Abschnitte zu zerlegen. Entsprechend jeweils der Bandbereich von 30 MHz - 645 MHz beziehungsweise von 645 MHz - 1 GHz in Echtzeit gemessen werden. Dieses Verfahren reduziert die Messzeit ganz erheblich. So entspricht die gesamte Testzeit im Wesentlichen der Zeit, die früher nötig war, um an lediglich zwei Frequenzpunkten die abschließende Maximierung durchzuführen. Zusätzlich erhält man die vom Prüfling emittierte Feldstärke mit Quasi-Peak bewertet über alle Winkelpositionen und Höhen. Oberhalb 1 GHz kann mittels Multi-GHz-Echtzeitscanning die Emissionsmessung mit Peak, Average und alternativ RMS-AVG durchgeführt werden. Der Vorteil ist auch hierbei wiederum, dass die Testzeiten deutlich verkürzt werden.

Funktionsweise des Zeitbereichsmesssystems TDEMI X

Das von der Antenne empfangene Signal, sprich die Emission des Prüflings, wird im Basisband (Frequenzbereich DC - 1 GHz) mittels einer hochlinearen Analog-Digital-Wandler-Einheit mit einer Rate von mehreren Giga-samples/Sekunde abgetastet und digitalisiert. Für Messungen im Bereich oberhalb des Basisbands von 1 GHz erfolgt eine sehr breitbandige Frequenzumsetzung mit integrierter Vorselektion. Die spektrale Darstellung des Messsignals kann einerseits digital superheterodyn oder mittels Kurzzeit-FFT erfolgen. Ein vereinfachtes Blockschaltbild der Funktionsweise eines TDEMI eXtreme (kurz TDEMI X) Messempefängers ist in Bild 1 dargestellt. Durch das mehrstufige Analog-Digital-Wandler-System erfolgt die Digitalisierung des Messsignals in Gleitkommazahlarithmetik mit entsprechend hoher Dynamik. Hierzu werden nach neuestem Stand der Technik mehrere Analog-Digital-Wandler in Kombination eingesetzt.

Dieses Verfahren bietet einen äquivalenten Dynamikbereich von ca. 22 Bit, womit es einerseits möglich ist, eine sehr gute

Sensitivität von z. B. ca. -25 dB μ 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 in einer Bandbreite von bis zu 645 MHz vollständig lückenlos in Echtzeit. Mit dem vorliegenden System können so bis zu 64.000 Frequenzpunkte gleichzeitig gemessen werden.

Integrierte Vorselektion

Im Eingangspfad des Empfängers befindet sich standardmäßig eine breitbandige Vorselektion gemäß den CISPR-Frequenzbändern für optimale Performenzen bei allen EMV-Messungen. Zusätzlich kann optional eine weitere Vorselektion zugeschaltet werden, um den Rauschboden und die Dynamik nochmals zu verbessern. Bei standardmäßigen EMV-Messungen nach kommerziellen oder militärischen EMV-Standards ist die Zuschaltung der zusätzlichen Vorselektion nicht notwendig. Sollen allerdings sogenannte „out-of-band spur“, insbesondere Harmonische von Funksignalen, ohne

den Einsatz externer Notchfilter, unterhalb von 1 GHz gemessen werden, so kann durch Zuschalten der optionalen Vorselektion die Dynamik hierfür nochmals deutlich verbessert werden.

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 (engl. prescan) 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-Detektoren durchgeführt werden. Technisch wird dies durch eine hochgradige Parallelisierung erreicht. Die Kurzzeit-FFT ist hierbei einer der mathematischen Bausteine, der es ermöglicht Berechnungen auf effiziente Weise durchzuführen und Symmetrieeigenschaften auszunutzen. Die gemäß CISPR 16-1-1 erforderlichen Detektoren müssen an allen Frequenzpunkten vollständig parallel realisiert werden, was zu sehr hohen Anforderungen an die Rechenleistung führt. Ein vereinfachtes Blockschaltbild einer Kombination von Kurzzeit-FFT und Mehrkanalempfänger ist in Bild 2 dargestellt. Das TDEMI X enthält eine Vielzahl solcher Funktionsblöcke.

Auch ein Echtzeitspektrumanalysator ist im TDEMI X bereits standardmäßig integriert, der an bis zu allen 64.000 Frequenzpunkten eine Messung, gemäß einer Zero-Span-Messung eines herkömmlichen Spektrumanalysators an einem einzigen Frequenzpunkt, durchführen kann. Der Echtzeit-Spektrumanalysator des TDEMI X vereint damit auf einzigartige Weise die Vorteile der Zero-Span Funktion mit der Möglichkeit diese an bis zu

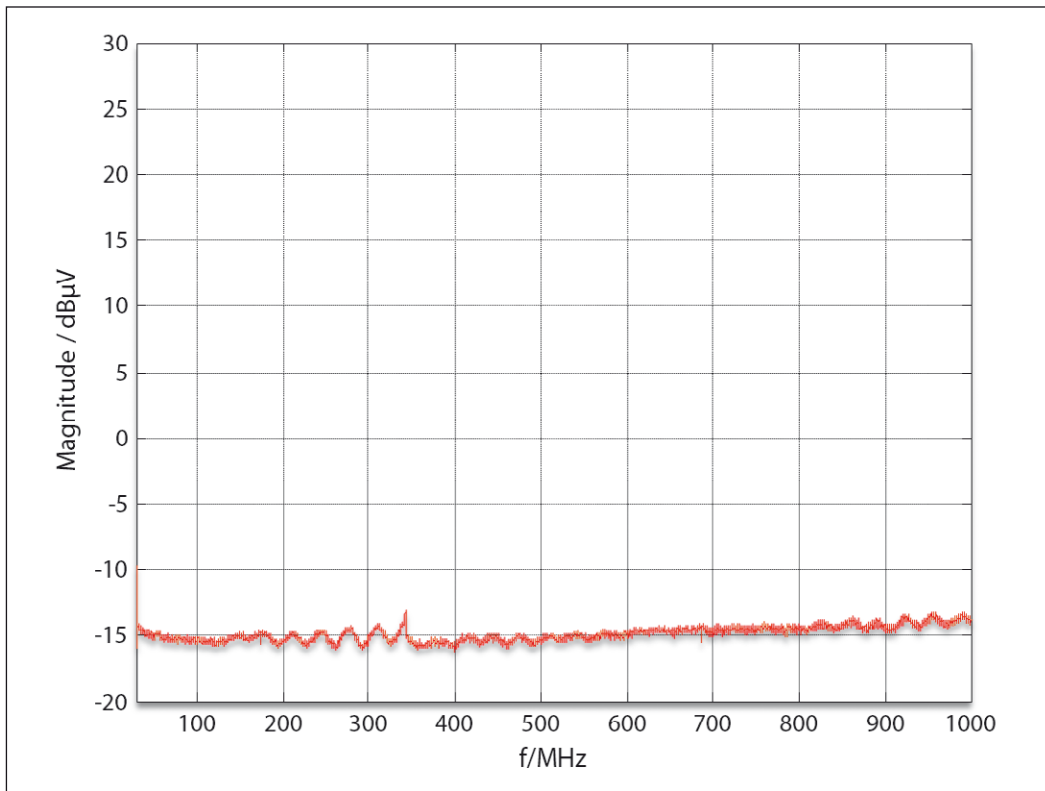


Bild 3: Typischer Rauschboden des TDEMI X im Bereich 30 MHz bis 1GHz.

64000 Frequenzen gleichzeitig durchführen zu können.

Rauschboden und Frequenzumsetzung

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 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 dBµV, wie anhand der Messung in Bild 3 zu

sehen ist. Dies entspricht einer Verbesserung von 5 bis 10 dB gegenüber anderen aktuell am Markt verfügbaren Lösungen.

Gleichzeitig kann optional der Messbereich hinunter bis DC erweitert werden. Der hier typischerweise erreichte Rausch-

boden bei 20 Hz liegt bei ca. 0 dBµV.

Im Frequenzbereich oberhalb des Basisbands von 1 GHz wird, bis hinauf zu 40 GHz, eine breitbandige Vorselektion verwendet. Die Konvertereinheit arbeitet derart, dass Spiegelfrequenzen und andere Mischprodukte optimal unterdrückt werden. Die Echtzeitbandbreite von 325 MHz steht bei aktivierter Vorselektion zu Verfügung. Auch dies ist technisch einmalig. Durch den Einsatz von separaten rauscharmen Vorverstärkern (engl. low noise amplifier) pro Pfad und speziellen MMICs wird ein exzellenter Rauschboden über den gesamten Bereich von DC bis 40 GHz erreicht. Bild 4 zeigt den typischen Verlauf des mittleren Rauschbodens (ca. -5 dBµV) im Bereich 6 GHz – 26.5 GHz eines TDEMI X für eine ZF-Bandbreite von 1 MHz.

Erreichte Scanzeiten mit dem FFT-based Measuring Instrument

Üblicherweise werden Emissionsmessungen nach zivilen Normen mit dem Quasi-Peak-

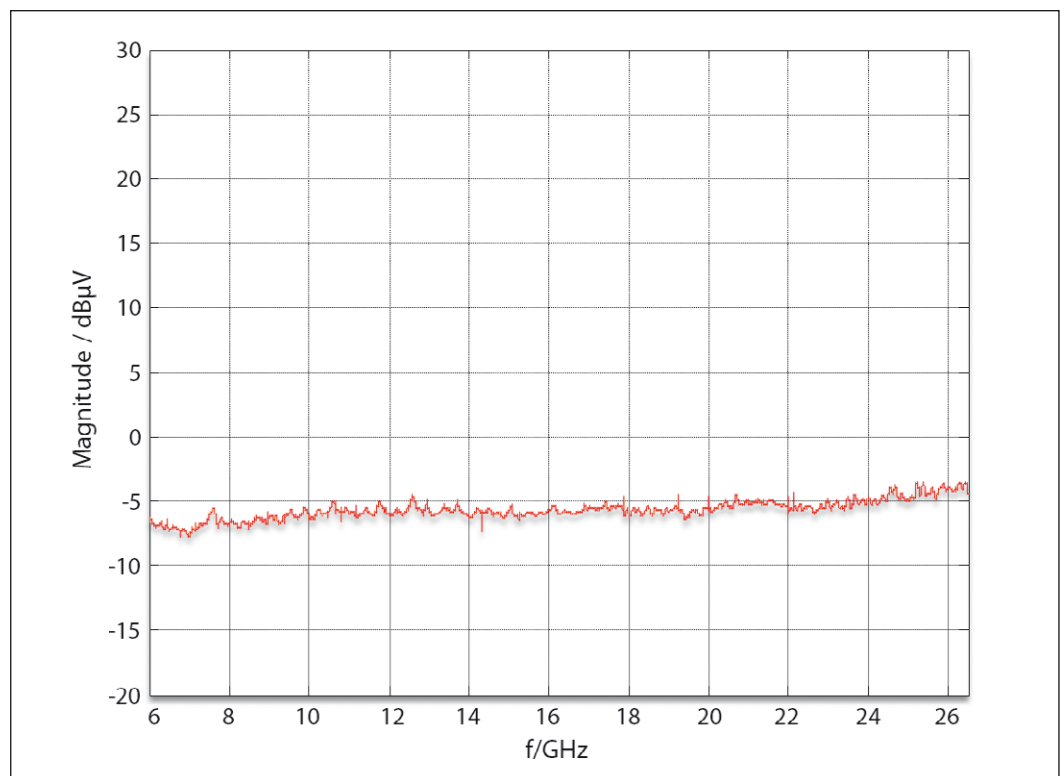


Bild 4: Typischer Rauschboden des TDEMI X im Bereich von 6 GHz – 26.5 GHz, RBW=1 MHz.

| Frequenzbereich | Band | Scanzeit analoger Empfänger ca. | Scanzeit TDEMI X ca. |
|------------------|------|---------------------------------|----------------------|
| 9 kHz - 150 kHz | A | 24 Minuten | 1s |
| 150 kHz - 30 MHz | B | 1:40 Stunden | 1s |
| 30 MHz - 300 MHz | C | 1:30 Stunden | 1s |
| 30 MHz - 1 GHz | C/D | 5:25 Stunden | 3s |

Tabelle 1: Typische Scanzeiten Superhetempfänger im Vergleich zu TDEMI X mit Quasi-Peak und CISPR-AVG parallel

| Frequenzbereich | Band | Scanzeit analoger Empfänger ca. | Scanzeit TDEMI X ca. |
|-----------------|------|---------------------------------|----------------------|
| 1 GHz – 6 GHz | E | 50 s | 0,4 s |

Tabelle 2: Typische Scanzeiten im Band E

Detektor durchgeführt. Typische Scanzeiten für die Emissionsmessungen mit dem Quasi-Peak-Detektor, unter Verwendung eines Superheterodynempfängers, stellt Tabelle 1 exemplarisch dar und vergleicht sie mit dem TDEMI X (mit 645 MHz Echtzeitbandbreite).

In Tabelle 2 sind die Scanzeiten für typische Messungen mit dem Peak und Average Detektor bei einer typischen Verweildauer von 10 ms im Band E angegeben

Emissionsmessungen in Echtzeit

Der TDEMI X Messempfänger ist sowohl im Empfängerbetrieb als auch im Echtzeit-Spektrogrammbetrieb vollständig norm-

konform und kann daher in beiden Betriebsarten für Full Compliance Messungen eingesetzt werden. Der Spektrogrammmodus vereint die Vorteile des Single-Frequency Modus eines klassischen Messempfängers mit der Möglichkeit, die Messung an allen Frequenzpunkten über einen Bandbereich von 645 MHz in Echtzeit durchzuführen. Die Timing Analyse des Signals oder Prüflings kann, während oder nach der Messung, an einem oder mehreren Frequenzpunkten durchgeführt werden. Selbstverständlich können alle Betriebsarten ferngesteuert werden, um z. B. Abnahmemessungen voll zu automatisieren und die Daten für Dokumentationszwecke zu exportieren.

Messungen nach CISPR 25

Messungen nach CISPR 25 erfordern eine Messung in vielen einzelnen bestimmten Bändern, in denen Funkdienste, z. B. FM Radio, nicht gestört werden dürfen. Zwischen diesen Bändern ist meistens kein Grenzwert definiert. Lediglich durch Gesamtstrahlungsmessung der CISPR 12 werden diese Bereiche spezifiziert. Beim TDEMI X Messempfänger ist es möglich diese Grenzwertlinien direkt so zu spezifizieren, den gesamten Bereich in einem einzigen Scan zu erfassen und einen Report zu erhalten. Es ist keine Zusatzsoftware notwendig. Ein Beispiel einer solchen typischen Messung

ist in Bild 5 dargestellt. Bei diesen Messungen wurden Grenzwerte für Spitzenwert (blau im Bild) und Mittelwert eingeblendet und die Messung mit den drei Detektoren Spitzenwert, Mittelwert und Quasi-Peak gleichzeitig durchgeführt. Anhand des Verlaufs der Quasi-Peak Kurve sind die FM-Radio Sender zu erkennen, da für den Quasi-Peak Detektor kein Grenzwert eingeblendet wurde. Bei Spitzenwert und Mittelwert sind diese ausgeblendet und lediglich die Bereiche zu sehen, für welche ein Grenzwert angewandt wurde.

Messungen nach CISPR 12

Messungen nach CISPR 12 werden schließlich am Gesamtfahrzeug durchgeführt. Dabei liegen die Grenzwerte zwar höher, allerdings muss auch hier die Emissionsmessung des Fahrzeugs aus mehreren Richtungen und in mehreren Betriebszuständen durchgeführt werden. Durch den Einsatz einer hohen Echtzeitbandbreite können derartige Messungen nun signifikant beschleunigt und vereinfacht werden. Die Messungen können sowohl im Empfängermodus als auch im Echtzeit-Spektrogrammmodus durchgeführt werden. Auch sporadische oder kurzzeitige Vorgänge können mit dem TDEMI Messempfänger so auf einfachste und hocheffiziente Weise sicher erfasst werden. In Bild 6 ist die Emissionsmessung eines Anlassvorgangs eines Kfz über einen Zeitraum von ca. 15 Sekunden für den unteren Frequenzbereich bis zum FM Radio Band dargestellt. Bei Betätigung der Zündung wird das Autoradio ab-, und erst nachdem alle Systeme und Komponenten vollständig gebootet haben, wieder angeschaltet.

Messung eines Mikrowellenherdes durch Multi-GHz-Echtzeit-scanning

Messungen von Sendesystemen, z. B. WLAN-Routern im ISM Band oder auch Mikrowellenherde, verlangen eine sehr hohe

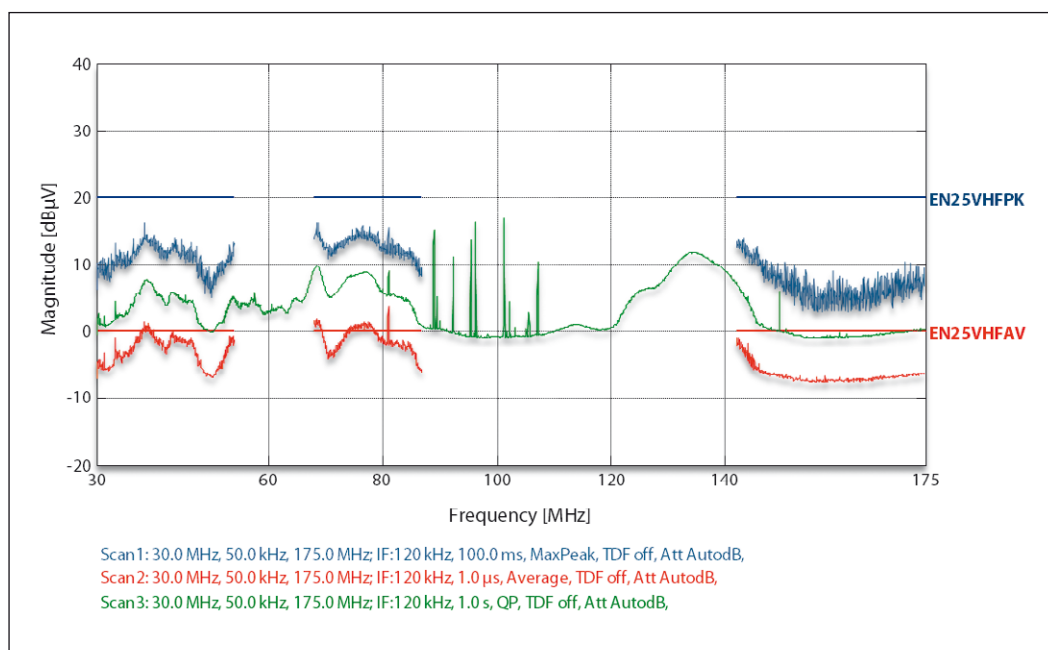


Bild 5: Typische Emissionsmessung nach CISPR 25 Standard mit Grenzwerten in vielen Segmenten

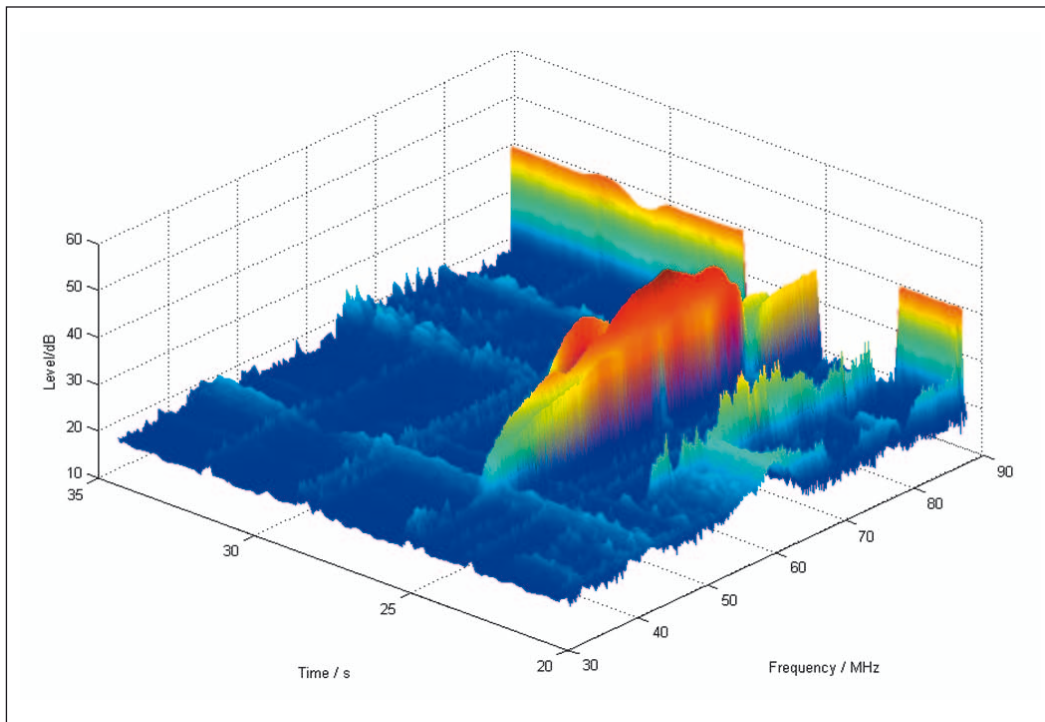


Bild b. 6: Beispielmessung des Anlassvorgangs eines Kraftfahrzeugs.

Dynamik von Messempfängern. Spektrumanalysatoren sind deshalb nur eingeschränkt einsetzbar. Die CISPR 16-1-1 Norm erklärt hierzu, dass der Anwender oberhalb 1 GHz zusätzlich auf Übersteuerung und Spiegel frequenzen zu achten hat. In der Praxis werden deshalb auch oft externe Filter zur Emissionsmessung von Harmonischen des ISM Bandes bei 2,4 GHz benutzt.

Das TDEMI X hat eine Vorselektion, die Oberwellen und Nebenempfangsstellen effizient unterdrückt. Gleichzeitig verfügt das TDEMI X über ein sehr niedriges Grundrauschen, so dass bei den üblichen Prüfverfahren, z. B. der Messung von Mikrowellenherden, keine externen Verstärker mehr notwendig sind. Die Vorselektion ist bei allen Betriebsarten aktiv, so dass in jedem Betriebsmodus eine wirksame Unterdrückung parasitärer Effekte des Mixers stattfinden und in jeder Betriebsart voll normkonform gemessen werden kann. So können z. B. harmonische Signale des ISM Bands bei 2,4 GHz hinsichtlich der 2. Harmonischen mit ca. 70-90 dB Unterschied gegenüber dem Träger gemessen wer-

den. Oberhalb 6 GHz wird dann typischerweise mehr als 100 dB erreicht. Werden Messbereiche gescannt, welche übersteuern,

so werden derartige Bereiche aus der Messung ausgeblendet und dokumentiert. Ein derartiger Betriebsmodus ist auch äußerst

hilfreich bei der Messung von sog. Spurious Emissions.

Bild 7 zeigt die Emission des Magnetrons eines Mikrowellenherds im ISM-Band. Wie zu erkennen ist, hat das emittierte Signal eine Periodizität von 20 ms. Es ergibt sich damit eine Puls wiederholrate von 50 Hz, welche der Netzfrequenz der Stromversorgung (230 V, 50 Hz) entspricht. Die Gesamtmesszeit betrug 100 ms und die Auflösung 1 ms.

Das TDEMI X verfügt über die Möglichkeit große Bänder sehr schnell und gleichzeitig hoch präzise zu messen und somit auch stark fluktuierende Störer sicher zu erfassen. In jedem Band werden bis zu 64000 parallele Messempfänger auf einem FPGA berechnet und zur Anzeige gebracht. Durch die hohe Dynamik ist das Gerät auch für gepulste Signale optimal einsetzbar und kann sie mit einer sehr hohen zeitlichen Auflösung in Echtzeit darstellen.

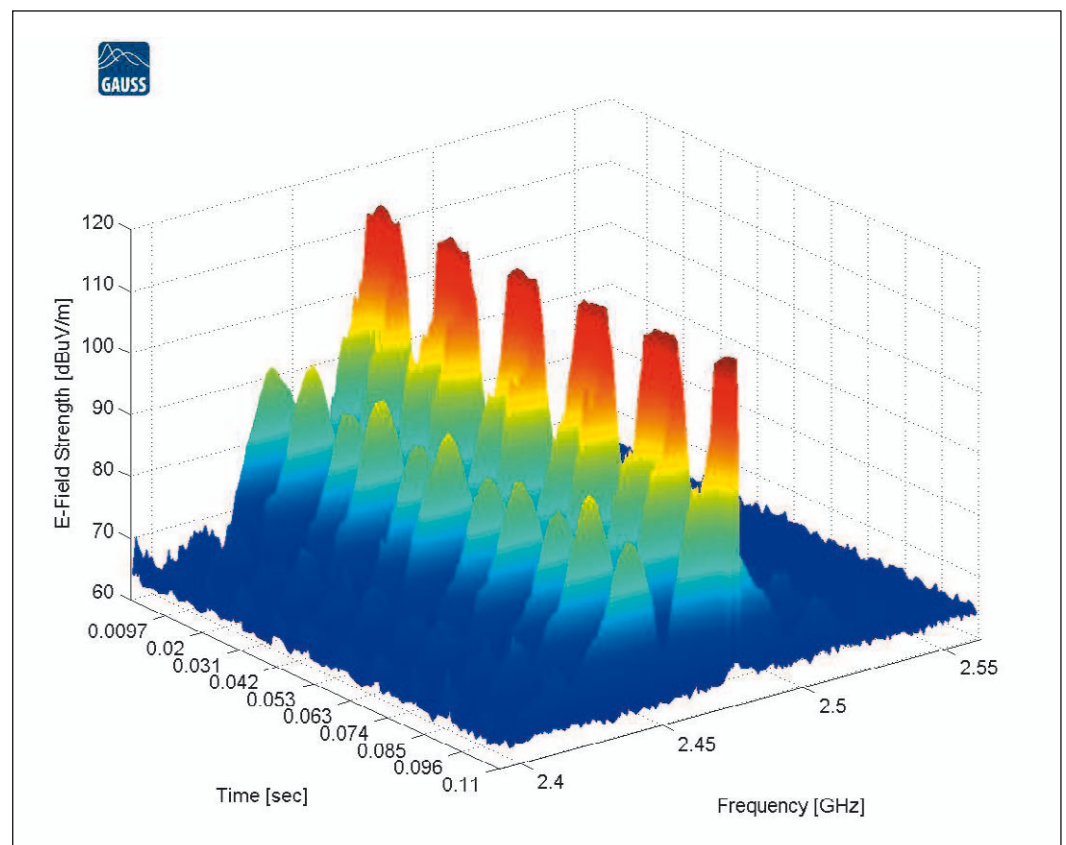


Bild 7: Emissionsmessung eines Mikrowellenherds bei 2,45 GHz in Echtzeit.

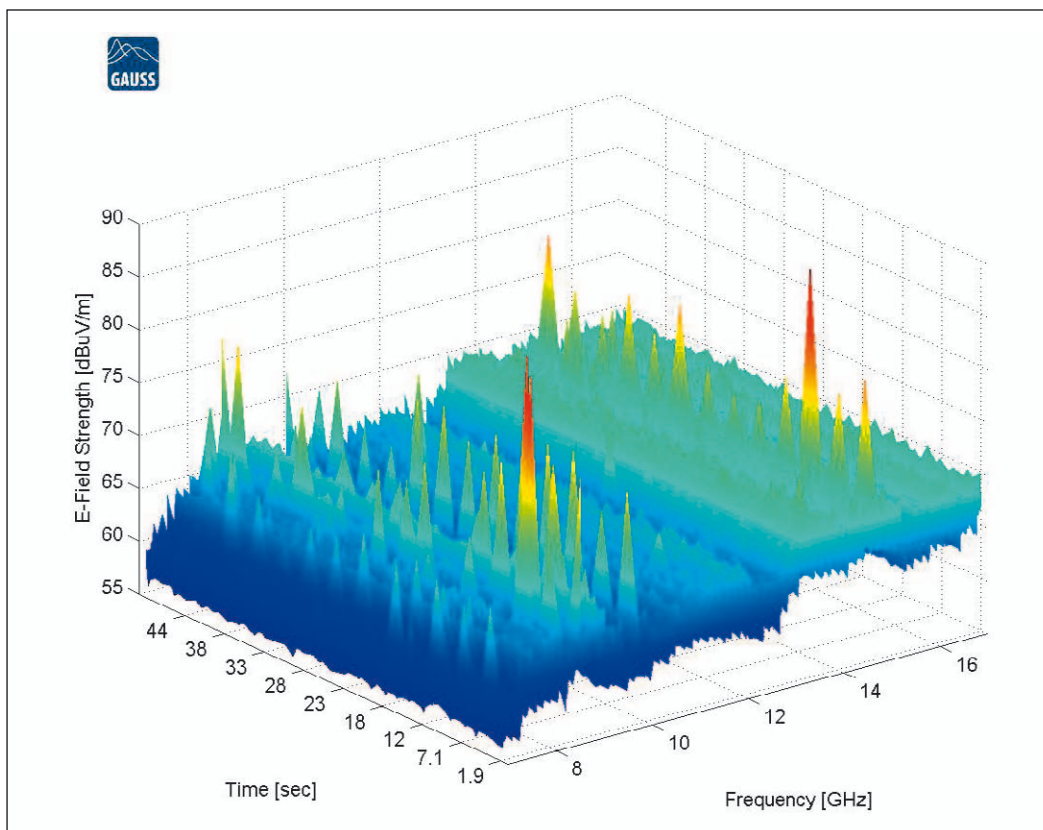


Bild 8: Messung eines Mikrowellenherdes im Frequenzbereich 6 GHz – 17 GHz

Bild 8 zeigt den Bandbereich 6 GHz – 17 GHz. Mit der Option UFSPA-UG kann man mehrere GHz sehr schnell erfassen und sämtliche Ergebnisse speichern. Die Darstellung als Spektrogramm erlaubt zudem eine Analyse des zeitlichen Verhaltens. Bild 7 zeigt den Verlauf der vierten und sechsten Harmonischen des Magnetrons. Es ist gut zu erkennen, dass im zeitlichen Verlauf des Pegels der Oberwellen eine starke Störung zum Zeitpunkt 12 s bei 9,8 GHz und bei 14,8 GHz existiert. Aufgrund der Vorselektion und der zuvor beschriebenen parallelen Struktur von Vorverstärkern, weist das System eine hervorragende Dynamik bei gleichzeitig extrem niedrigem Rauschboden auf und bietet auch für solche Messungen mit sehr hohen schwankenden Pegeln eine hervorragende Performance.

4. Zusammenfassung

Die ganz entscheidende Aufgabe einer Emissionsmessung besteht darin, festzustellen, ob ein Prüfling an allen Frequenzpunkten -

bei Anwendung der normativen Detektoren, d. h. beispielsweise Quasi-Peak und CISPR-Average - die vorgegebenen Grenzwerte einhält. Basierend auf diesen Ergebnissen ist es selbstverständlich auch möglich, eine Ausgabe von Worst Case Frequenzen zu erstellen, um der international unterschiedlichen Dokumentationspflicht nachzukommen. Ein Prescan oder Vormessung wird dabei nicht benötigt, da es der Echtzeitmodus des TDEMI X mit 645 MHz Echtzeitbandbreite erlaubt, gleichzeitig an allen Frequenzpunkten mit mehreren Detektoren parallel voll normgerecht zu messen. Damit entfallen auch alle Unsicherheiten, welche sich aus dem Prescan ergeben.

Der Einsatz eines modernen Full Compliance Messempfängers wie dem TDEMI X mit 645 MHz Echtzeitbandbreite hat den unschlagbaren Vorteil, dass das Ergebnis nicht nur zur Analyse sondern auch direkt zur Konformitätsaussage genutzt werden kann. Bei der Zertifizierung wird der Prüfablauf

erheblich vereinfacht und die Messqualität deutlich erhöht. Das System erschließt auch neue Prüfverfahren, z. B. im Bereich der E-Mobility [5].

Zusammen mit der 64-Bit-Automatisierungssoftware EMI64k können alle Betriebsarten ferngesteuert und vollautomatisiert werden. Es ist damit möglich, Prüflinge über alle Abstrahlwinkel in kürzester Zeit vollständig zu charakterisieren und gleichzeitig 2D- und 3D-Richtdiagramme zu erstellen. Dadurch wird die Testzeit signifikant verkürzt und man erhält parallel dazu deutlich mehr Informationen und Einblicke in das zeitliche Emissionsverhalten des Prüflings. Solche modernen Messgeräte sind somit äußerst wirtschaftlich und hocheffizient, da sie Messzeiten drastisch verkürzen, Fehlmessungen vermeiden und in der Analyse helfen, EMV-Störquellen schnell und sicher zu identifizieren. Damit tragen sie mit dazu bei, die Wirtschaftlichkeit im Laborbetrieb deutlich zu erhöhen und die Ergebnisqualität weiter steigern.

Literatur

[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.

[6] S. Braun und A. Frech
Höchste Prüfqualität von EMV-Messungen durch Normgerechte Messung an allen Frequenzen In SMT emv-esd, Fachzeitschrift für ADVANCED PACKAGING & ELEKTRONIKFERTIGUNG, Nov., 2016, Seite 44-48