

# Anwendung der EMV Zeitbereichsmesstechnik für Schienenfahrzeuge und E-Mobilität

Referent: Dr.-Ing Stephan Braun, GAUSS INSTRUMENTS GmbH, Agnes-Pockels-Bogen 1, 80992 München, braun@tdemi.com

Co-Referent: Dipl.-Ing. Arnd Frech, GAUSS INSTRUMENTS GmbH, Agnes-Pockels-Bogen 1, 80992 München, frech@tdemi.com

## 1 Einleitung

Traditionell wurden Emissionsmessungen im Frequenzbereich mit Superheterodynempfängern durchgeführt. Durch die Anwendung der EMV Zeitbereichsmesstechnik wurden die Messzeiten für Emissionsmessungen um mehrere Größenordnungen reduziert. Dabei wurde es möglich auch spezielle Prüflinge zu vermessen, deren Betriebszustand nicht über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten werden kann. Bei der Messung von Schienenfahrzeugen nach EN50121 [2] wird z.B. ein Zug in der Vorbeifahrt gemessen. Da die Messung mittels herkömmlicher Messempfänger zu langsam ist, werden Spektrumanalysatoren eingesetzt. Allerdings besteht der Nachteil darin, dass aufgrund der Sweepzeiten eines Spektrumanalysators, nicht die Frequenzbänder z.B. zwischen 30 MHz - 1 GHz komplett gemessen werden können. Aus diesem Grund werden diese Bänder nochmals unterteilt, und in mehreren Vorbeifahrten gemessen. Mit der Einführung der neuen Richtlinie EMV06 [3] müssen die Bänder 419,7 - 468,3 MHz sowie 873 - 925 MHz gemessen werden. Wird zunächst bei der Standmessung der sehr niedrige Grenzwert überschritten, so muss eine Detailmessung als Vorbeifahrtsmessung erfolgen. Dabei muss das Feldstärke-Weg-Profil hinsichtlich der Häufigkeit der Grenzwertüberschreitung ausgewertet werden. Durch die Anwendung der EMV Zeitbereichsmesstechnik für die Emissionsmessung von Schienenfahrzeugen können mehrere Frequenzbänder parallel gemessen und ausgewertet werden. Im folgenden wird auch die Anwendung der Vorbeifahrtsmessung für Elektroautos gezeigt und unterschiedliche Betriebszustände analysiert.

## 2 EMV Zeitbereichsmesstechnik

In den letzten Jahren wurden mehrere EMV Zeitbereichsmesssysteme vorgestellt [4]. Im Rahmen dieses Artikels wird eine EMV Zeitbereichsmesssystem für Messungen von Schienenfahrzeugen vorgestellt, welches es erlaubt mit einer Messgeschwindigkeit von 40 ms, einem quasi Echtzeitmodus die Emission während der Zugvorbeifahrt aufzuzeichnen und auszuwerten. Ein Blockschaltbild eines EMV Zeitbereichsmesssystems bis 40 GHz ist in Abbildung 1 dargestellt.

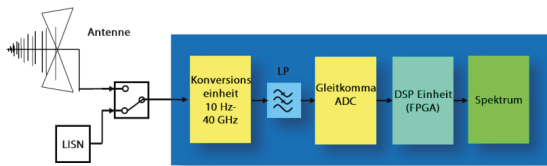


Abbildung 1 EMV Zeitbereichsmesssystem

Das Eingangssignal wird mittels eines Leistungsteilers auf zwei 12 Bit, 2,6 GS/s Analog-Digital-Wandler aufgeteilt [4]. Anschließend folgen mehrere parallele

Einheiten zur digitalen Frequenzumsetzung. Die jeweils umgesetzten Bänder werden dann mittels Kurzzeit-Fourier-Transformation (engl. Short term fast Fourier transform, STFFT) und Anwendung der Detektoren z.B. Spitzenwert und Mittelwert direkt als frequenzselektive Messung nach CISPR 16-1-1 [1] durchgeführt. Durch die Anwendung mehrerer paralleler Einheiten können bis zu 64000 Frequenzpunkte gleichzeitig berechnet werden.

## 2.1 Digitale Abwärtsmischung

Das Signal des Gleitkomma Analog-Digital-Wandlers wird mittels eines digitalen Überlagerungsempfängers (engl. Digital Downconversion DDC) zunächst breitbandig in einer Bandbreite von 162,5 MHz ins Basisband gemischt. Dabei wird die Abtastrate reduziert. Durch die Reduktion der Bandbreite ist eine Echtzeitverarbeitung durch die weitere Signalverarbeitung möglich. In Abbildung 2 ist das vereinfachte Blockschaltbild dargestellt.

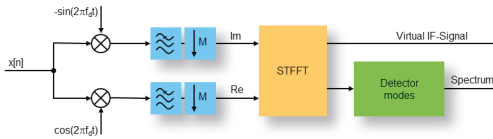


Abbildung 2 Digitale Abwärtsmischung ins Basisband mit Kurzzeit-FFT und Detektoren

Ein wesentlicher Vorteil gegenüber einem analogen Abwärtsmischer ist eine höhere Dynamik sowie steilere Filter ohne Verzerrungen. Typischerweise wird eine Welligkeit von 0,1 dB im Durchlassbereich und 100dB im Sperrbereich erreicht.

## 2.2 Mehrkanalempfänger

Die Kurzzeit-FFT (STFFT) wird als eine FFT-Berechnung über einen begrenzten Abschnitt verstanden, welche im Zeitbereich verschoben wird. Mittels Kurzzeit-FFT wird ein Spektrogramm berechnet, welches einer Darstellung des Spektrums über der Zeit entspricht. Während stationäre Signale ein konstantes Spektrum über der Zeit aufweisen, zeigt sich beim Spektrogramm außerdem das instationäre Verhalten des Störsignals. Um einen Mehrkanalmesempfänger zu erhalten, muss anschließend an jedem Frequenzpunkt digital demoduliert werden, sowie eine digitale Implementierung der Detektoren erfolgen. Die Realisierung eines solchen Mehrkanalempfängers, wie im TDEMI X realisiert, ist in Abbildung 3 dargestellt.

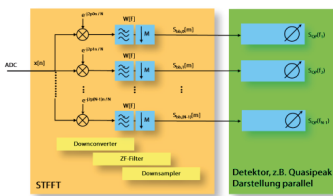


Abbildung 3 Mehrkanalmesempfänger - Umsetzer, Filterbank, Dezimator und Detektor

### 2.3 Parallelisierung

Field Programmable Gate Arrays (FPGAs) ermöglichen es mehrere Tausend Multipliziereinheiten parallel zu betreiben. Es ist daher möglich mehrere Abwärtsmischer sowie mehrere parallele Mehrkanalempfänger auf einem FPGA zu realisieren. Darüber hinaus können Mehrkanalempfänger parallel auf mehrere Frequenzbänder eingestellt werden, oder die Bänder mit einer Geschwindigkeit von wenigen  $\mu\text{s}$  wechseln. Dadurch ist es möglich einen Bandbereich von 1 GHz quasi in Echtzeit darzustellen.

### 2.4 Frequenzumsetzung

Im Frequenzbereich bis 40 GHz wird eine breitbandige Vorselektion verwendet. Die Konvertereinheit besitzt ein Mischerschema, welches es erlaubt Spiegelfrequenzen und andere Mischprodukte zu unterdrücken und gleichzeitig eine Echtzeitbandbreite von 325 MHz zur Verfügung zu stellen. Ein vereinfachtes Blockschaltbild der Konvertereinheit im Frequenzbereich von 6 GHz bis 40 GHz ist in Abbildung 3 dargestellt. Im Bereich 6 GHz - 26,5 GHz wird eine feste Filterbank verwendet, wobei in jedem Filterpfad ein Low Noise Amplifier mit einer Rauschzahl von ca. 2 dB integriert ist. Oberhalb von 26,5 GHz wird ein Hochpassfilter verwendet gefolgt von Low Noise Amplifiern mit einer Rauschzahl von ca. 1.5 dB und durchstimmbaren MMIC Filtern bis 40 GHz.

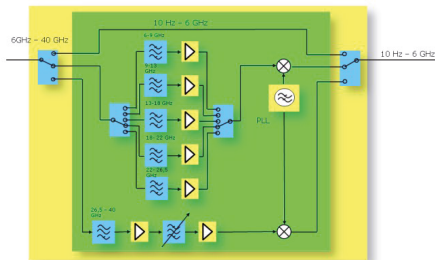


Abbildung 4 Frequenzumsetzung 6 GHz - 40 GHz

## 3. Anwendung der EMV Zeitbereichsmesstechnik

### 3.1 Schnelle Messung nach EN50121

Bei der Emissionsmessung gemäß EN50121 in der Zugvorbeifahrt ist es notwendig die elektrische Feldstärke im Bereich 30 MHz – 1 GHz zu messen. Des Weiteren erfolgt die Emissionsmessung der magnetischen Feldstärke im Frequenzbereich 9 kHz – 150 kHz sowie 150 kHz – 30 MHz. Traditionell werden hier Spektrumanalysatoren eingesetzt. Die Herausforderung welche sich ergibt ist, dass die Zeit für einen Sweep zu lange dauert um ein verlässliches Ergebnis zu erhalten. Daher mussten die Bänder jeweils in mehrere Frequenzbänder aufgeteilt werden und die Zugvorbeifahrt musste mehrfach durchgeführt werden. Ein Aufbau von mehreren parallelen Spektrumanalysatoren zur Reduktion der Anzahl der Vorbeifahrten wurde in [5] vorgestellt.

Die einzelnen Bandbereiche sind in Tabelle 1 dargestellt. Es ist notwendig insgesamt zwei Vorbeifahrten in Band A, vier Vorbeifahrten in Band B und drei Vorbeifahrten in Band C/D durchzuführen.

Band	Teilbereiche	Bandbreite	Sweepzeit / Durchlaufzeit
A	9 kHz – 50 kHz	1 kHz / 200 Hz	300ms
	50 kHz – 150 kHz	1 kHz / 200 Hz	300ms
B	150 kHz – 1,15 MHz	9 kHz / 10 kHz	37 ms
	1 MHz – 11 MHz	9 kHz / 10 kHz	370 ms
	10 MHz – 20 MHz	9 kHz / 10 kHz	370 ms
	20 MHz – 30 MHz	9 kHz / 10 kHz	370 ms
C/D	30 MHz – 230 MHz	100 kHz / 120 kHz	42 ms
	230 MHz – 500 MHz	100 kHz / 120 kHz	63 ms
	500 MHz – 1 GHz	100 kHz / 120 kHz	100 ms

**Tabelle 1** Teilbereiche für Spektrumanalysatoren aus [2]

Mittels EMV Zeitbereichsmesssysteme welche eine Analog-Digital-Wandler Bandbreite von 1 GHz besitzen ist es möglich die geforderten Sweepzeiten für eine Messung eines kompletten Bandes einzuhalten, so dass jeweils ein Band mit einer Zugvorbeifahrt gemessen werden kann. Bei dem Einsatz eines EMV Zeitbereichsmesssystems vereinfacht sich daher der Test gemäß Tabelle 2 auf insgesamt 3 Vorbeifahrten

Band	Teilbereiche	Bandbreite	Durchlaufzeit
A	9 kHz – 150 kHz	1 kHz / 200 Hz	ca. 50 ms
B	150 kHz – 30 MHz	9 kHz / 10 kHz	ca. 37 ms
C/D	30 MHz – 1000 MHz	100 kHz / 120 kHz	ca. 40 ms

**Tabelle 2** Teilbereiche für EMV Zeitbereichsmesssysteme

### 3.2 Schnelle Messung nach EMV06

Seit 2014 ist die Funkschutzmessung nach der neuen Richtlinie EMV06 für Schienenfahrzeuge auf dem Streckennetz der Deutschen Bahn verpflichtend. Der Grundgedanke der Norm ist den Nachweis der Funkverträglichkeit von Schienenfahrzeugen sicherzustellen. Dies betrifft den Funk des Lokführers, weiterer Sicherheitssysteme sowie den Funk des Rangierpersonals. Wesentlich hierbei sind quasi stationäre Störer welche dauerhaft oder bei der Vorbeifahrt oder beim Vorbeigehen am Zug den Funk stören können. Eine Übersicht hinsichtlich der zu analysierenden Funkbänder ist in Tabelle 3 dargestellt

Band	Frequenzbereich / MHz	Bereich	Einsatzbereich	Detailmessung
H	457,425 MHz - 458,300 MHz	0,7 m	Europaweit	10% Regelung
I	467,425 MHz – 468,300 MHz	0,7 m	Europaweit	10% Regelung
L	419,730 MHz (20 kHz BW)	0,7 m	DB	10% Regelung
L	419,770 MHz (20 kHz BW)	0,7 m	DB	10% Regelung
L	419,790 MHz (20 kHz BW)	0,7 m	DB	10% Regelung
L	429,730 MHz (20 kHz BW)	0,7 m	DB	10% Regelung
L	429,770 MHz (20 kHz BW)	0,7 m	DB	10% Regelung
L	429,790 MHz (20 kHz BW)	0,7 m	DB	10% Regelung
GSM-R UL	873 MHz – 880 MHz	0,3 m	Europaweit	Maximum < Limit
GSM-R DL	918 MHz – 925 MHz	0,3 m	Europaweit	Maximum < Limit

**Tabelle 3** Bänder nach EMV 06 Anhang A aus [3]

### **3.2.1 Messung der Antennen am Fahrzeug**

Es erfolgt eine Messung des Störpegels an den Antennen des Schienenfahrzeugs. Hierbei müssen die Störungen welche vom Schienenfahrzeug stammen unterhalb des Grenzwerts sein, um die Eigenstörung des Fahrzeugs zu begrenzen. Sofern Umgebungsstörungen vorhanden sind, werden Methoden wie z.B. die Verwendung des Min Peak Detektors vorgeschlagen um die fluktuierende Umgebungsstörung von der stationären Störung zu trennen. Dies findet Anwendung bei der Antennenmessung und bei der Übersichtsmessung.

### **3.2.2 Übersichtsmessung und Detailmessung**

Die Übersichtsmessung der elektrischen Feldstärke erfolgt mittels einer logarithmisch periodischen Antenne in den Bändern gemäß Tabelle 3. Liegt die Feldstärke an einzelnen Frequenzpunkten welche vom Schienenfahrzeug stammen oberhalb des Grenzwertes so muss eine Detailmessung erfolgen.

Die Detailmessung muss an jedem Frequenzpunkt durchgeführt werden. Bei der Anwendung eines Spektrumanalysators muss für jeden Frequenzpunkt eine Zugvorbeifahrt durchgeführt werden. Bei der Anwendung eines EMV Zeitbereichsmesssystems ist es möglich alle Frequenzen gleichzeitig herunterzumischen und aufzuzeichnen. Im 0,7 m Band wird ein Feldstärke-Weg-Profil erstellt, und es erfolgt eine statistische Auswertung die im Wesentlichen berücksichtigt, dass über eine Länge von 12 m in maximal 1,2 m Länge der Grenzwert überschritten werden darf. Dies entspricht einer 10% Regelung. Im 0,3 m Band darf der Grenzwert generell nicht überschritten werden.

## **4 Herausforderungen im Bereich E-Mobility**

Übliche Emissionsquellen von konventionellen Kraftfahrzeugen sind die Zündanlage, verschiedene Aktuatoren sowie die Bordelektronik. Bei Fahrzeugen mit Elektroantrieb hingegen, besitzt das Fahrzeug unterschiedliche Betriebszustände, wie z.B. Ladevorgang, Beschleunigungsvorgang und Bremsvorgang. Beim Laden sind die EMV Störungen zu untersuchen, welche als Rückwirkung in die Netzleitung stattfinden. Bei Induktiven Laden ist eine Herausforderung die magnetische Funkstörfeldstärke zu begrenzen. Während der Fahrt verändern sich die Betriebszustände und daher auch die Emissionsfrequenzen sowie die Pegel der Funkstörfeldstärke.

Ähnlich wie bei Funkschutzmessungen EMV 06 der Bahn, müssen die Störpegel der internen Antennen nach CISPR 25 analysiert werden. Des Weiteren muss die Abstrahlung des Fahrzeugs während der Fahrt nach CISPR 12 gemessen werden. Beide Messungen werden heute auf Rollenprüfständen in EMV Hallen durchgeführt.

Eine alternative Methode wäre während der Fahrt die Messung an den Fahrzeugantennen zu messen und durch Korrelationsverfahren Umgebungsstörung und Eigenstörung zu trennen. Aufgrund der Verfügbarkeit von schnellen EMV Zeitbereichsmesssystemen, wie sie bei der Emissionsmessung bei Schienenfahrzeugen bereits eingesetzt werden, könnten man auch Kraftfahrzeuge mit Elektroantrieb in der Vorbeifahrt messen. Im Folgenden wird an einem Beispiel eine derartige Messung gezeigt.

## 5. Messergebnisse

### 5.1 Emissionsmessungen Zugvorbeifahrt nach EN50121

Im Rahmen von Untersuchungen wurde eine Vorbeifahrt eines Schienenfahrzuges mittels einer Antenne durchgeführt. Die Sweepzeit betrug 40ms, die ZF Bandbreite 120 kHz. Die Messung erfolgte mit dem Spitzenwertdetektor.

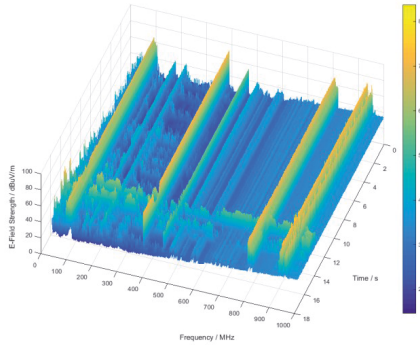


Abbildung 5 Spektrogramm Vorbeifahrtsmessung 30 MHz – 1 GHz

In Abbildung 5 ist das Emissionsspektrum bei der Vorbeifahrt eines Schienenfahrzeugs dargestellt. Die einzelnen Spektren welche mit 40 ms Abstand aufgenommen wurden, sind über die Zeit von ca. 15 s dargestellt. Man kann deutlich erkennen dass bei ca. 11 s eine Breitbandstörung mit ca. 1 GHz Bandbreite auftritt. Es folgen weitere Breitbandstörungen mit einer Bandbreite von 600 MHz. Die stationären Umgebungsstörungen sind ebenfalls zu erkennen. Die FM-Rundfunksender, Funk, sowie unterschiedliche GSM Bänder.

### 5.2 Messung nach EMV06

Es wurde eine Detailmessung mittels einer bikonischen Antenne an einem Schienenfahrzeug durchgeführt. Die Messung erfolgte in allen Bändern gleichzeitig. Es werden hier zwei Beispiele gezeigt und analysiert.

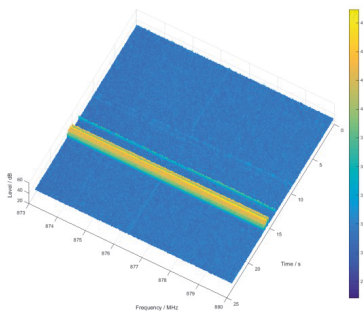
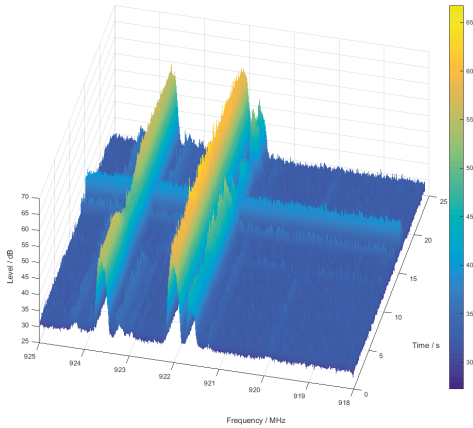


Abbildung 6 Spektrogramm Detailmessung EMV06 GSM-R UL 873 MHz – 880 MHz

In Abbildung 6 ist die Spektrogrammdarstellung des GSM-R UL Bandes dargestellt. Es ist zu erkennen, dass kurzzeitig eine Breitbandstörung auftritt.

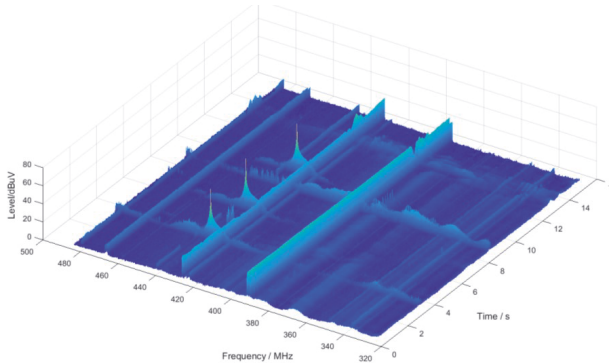


**Abbildung 7** Spektrogramm Detailmessung EMV06 GSMR DL 918 MHz – 925 MHz

In Abbildung 7 ist die Spektrogrammdarstellung des GSM-R DL Bandes dargestellt. Deutlich sind die GSM-R Signale der Basisstation zu erkennen. Bei ca. 20 s ist wiederum die Breitbandstörung zu erkennen.

### 5.3 Vorbeifahrtmessung eines Elektroautos

Im Rahmen einer Emissionsmessung wurde ein Elektroauto im Frequenzbereich von 30 MHz - 1 GHz in der Vorbeifahrt gemessen. In Abbildung 8 ist ein Ausschnitt des Frequenzbereichs als Spektrogramm dargestellt.



**Abbildung 8** Vorbeifahrtmessung 30 MHz - 1 GHz, Ausschnitt 320 MHz - 480 MHz

Das Fahrzeug wurde hierzu gestartet und es erfolgte direkt die Vorbeifahrt, wobei zunächst beschleunigt und dann gebremst wurde. Man kann zunächst stationäre Umgebungsstörungen erkennen. Des Weiteren sendet ein Kommunikationsmodul bei ca. 440 MHz. Die Beschleunigungsvorgänge sind als Breitbandstörung mit veränderlichem Pegel insbesondere zwischen 400 MHz und 420 MHz gut zu erkennen. Der Bremsvorgang verursacht eine breitbandige Störung beim Zeitpunkt ca. 14 s. Während des Gesamt-vorgangs finden noch weitere Schaltvorgänge statt.

## 6. Abschluss

Es konnte gezeigt werden, dass für Messungen an Schienenfahrzeugen die EMV Zeitbereichsmesstechnik die Zugvorbeifahrt mit hoher zeitlicher Auflösung über den Frequenzbereich 30 MHz - 1 GHz auf einmal durchgeführt werden kann. Auch im Bereich 9 kHz – 30 MHz können die Messungen je Band auf eine Zugvorbeifahrt reduziert werden. Durch die Möglichkeit der Auswertung über mehrere interne Frequenzkonvertereinheiten ist es möglich zwei nicht aufeinander folgende Bänder wie z.B. in der EMV06 Messung verlangt an allen Frequenzpunkten gleichzeitig zu messen. Hierzu wurden ebenfalls Messungen vorgestellt. Es wurde eine Vorbeifahrtsmessung an einem Elektroauto in Anlehnung an die Vorbeifahrtsmessung nach EN50121 durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, dass neben der maximalen Emission auch unterschiedliche Betriebszustände analysiert werden können.

## Literaturangaben

- [1] 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.
- [2] EN 50121, *Railway applications - Electromagnetic compatibility*
- [3] EMV 06, *Regelung Nr. EMV 06 Technische Regeln zur Elektromagnetischen Verträglichkeit, Nachweis der Funkverträglichkeit von Schienenfahrzeugen mit Bahnfunkdiensten*
- [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] A.J. Rowell, D. Bozec, S.A. Sellar, L.M. McCormack, C.A. Marshman, A.C. Marvin *Improved measurement of radiated emissions from moving rail vehicles in the frequency range 9 kHz to 1 GHz*, International Conference on Electromagnetic Compatibility, 2004. EMC 2004, 19 - 24 vol.1