

Echtzeit-Spektralanalyse zur Identifikation von Störquellen in Kraftfahrzeugen

Dr.-Ing. Sebastian Koj, IAV GmbH, EMC & Antenna
Dipl.-Ing. Sven Fisahn, Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe, Leibniz Universität Hannover,
Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik

1 Motivation und Gliederung

Der Automobilsektor ist derzeit in seiner vermutlich größten Veränderungsphase seit seinem Bestehen. Die Elektrifizierung des Antriebstranges, automatisiertes bzw. autonomes Fahren und Connectivity – diese Schlüsselworte beschreiben diesen Prozess und bringen eine Vielzahl von Herausforderungen bei der Sicherstellung der EMV im Gesamtfahrzeug mit sich. Um den straffen Entwicklungszeitplan einzuhalten, sind strukturierte Vorgehensweisen bei der Fehlersuche in frühen Entwicklungsstadien notwendig. In diesem Beitrag wird anhand eines realen Beispiels gezeigt, wie mithilfe von sukzessiver messtechnischer Echtzeit-Spektralanalyse eines Einsatzleitfahrzeugs der Berufsfeuerwehr Hannover sporadische Störungen des Sprechfunks, welche nur während der Einsatzfahrt auftraten, behoben werden konnten. Hierzu wird zunächst in Kapitel 2 die Ausgangssituation vorgestellt. Anschließend wird in Kapitel 3 kurz auf klassische EMV Messungen mit einem Oszilloskop (Zeitbereich) und mit einem Spektrumanalysator (Frequenzbereich) eingegangen. In Kapitel 4 wird schließlich mithilfe von Echtzeitanalyse der Antennenfußpunktspannung, der Gleichtaktströme auf dem Bordnetz und des abgestrahlten elektrischen Felds in der Nähe des Fahrzeugs die Störquelle und der Störkoppelweg anhand von sporadisch auftretenden Störmustern identifiziert. Die Analyse dieser Störmuster führt zur schnellen Identifikation der Störquelle samt Koppelpfad und stellt den Neuheitsgehalt dieses Beitrags dar. Der in dieser Arbeit präsentierte Ansatz basiert auf den in [1] präsentierten Messergebnissen.

2 Beschreibung der Herausforderung

Bei einem neu beschafften Einsatzleitfahrzeug der Berufsfeuerwehr Hannover sind sporadische Störungen im Sprechfunk festgestellt worden. Für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) wie Feuerwehren sind zuverlässige Funkkommunikationsdienste von besonderer Bedeutung. Selbst vorübergehende Ausfälle der Funkkommunikation können für die Feuerwehrleute zu lebensbedrohlichen Situationen führen, da viele Tätigkeiten wie beispielsweise die Brandbekämpfung äußerst gefährliche Einsatzsituationen darstellen. Elektromagnetische Störungen der Funksysteme sind hier nicht tolerierbar. Daher müssen nicht nur die Funkkommunikationsgeräte selbst die EMV-Anforderungen hinsichtlich der Störfestigkeit und der Störaussendung erfüllen, sondern auch die mit diesen Geräten ausgestatteten Spezialfahrzeuge, wie das hier betrachtete Einsatzleitfahrzeug.

2.1 Allgemeiner Aufbau des Einsatzleitfahrzeugs

Die Feuerwehr setzt mehrere Spezialfahrzeuge ein. Für die operative Führung ist neben den Löschfahrzeugen immer ein Einsatzleitfahrzeug erforderlich. Grundsätzlich handelt es sich bei dem Einsatzleitfahrzeug um ein Basisfahrzeug eines Erstausrüsters (OEM, original equipment manufacturer), das typischerweise die in der CISPR 25 [2] gelisteten Grenzwerte zum Schutz der Funkdienste an den Fahrzeugeigenen Antennen einhält. Ein Fachunternehmen für Fahrzeugausbau hat anschließend dieses Basisfahrzeug modifiziert und mit zusätzlichen Einbauteilen wie dem Lagetisch, mehreren Funkgeräten für die verschiedenen Sprechkreise, sowie zusätzlichen Bürogeräten und IT-Komponenten ausgestattet. Aufgrund dieser weiteren elektrischen Komponenten wird das ursprüngliche Bordnetz durch ein zusätzliches 12-V-Gleichstromnetz ergänzt, das über ein Schütz gekoppelt ist (vgl. Bild 1). Das Schütz schließt nur bei eingeschalteter Zündung oder laufendem Fahrzeugmotor. Mit Ausnahme der Funkausrüstung benötigen viele der zusätzlichen Komponenten nach Industriestandards 230 V Wechselspannung. Daher ist ein Wechselrichter für Wechselstromverbraucher wie dem multifunktionalen Laserdrucker erforderlich, der vom zusätzlichen 12-V-Gleichstromnetz gespeist wird. Der Wechselrichter selbst wird durch ein zusätzliches ferngesteuertes EIN / AUS-Signal eingeschaltet und arbeitet nur bei laufendem Fahrzeugmotor.

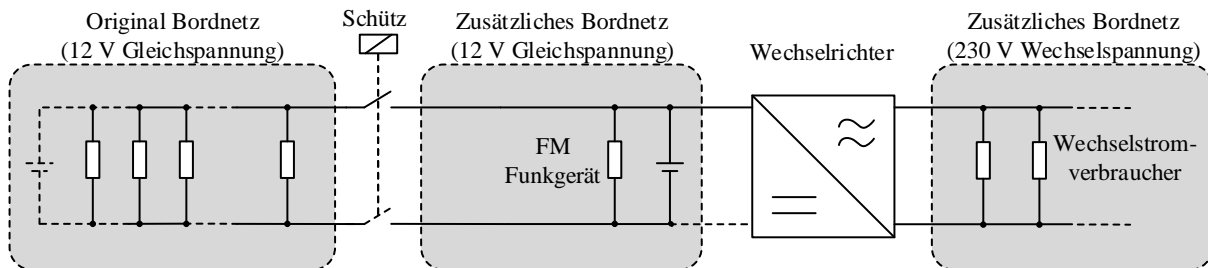


Bild 1: Aufbau des Bordnetzes des Einsatzleitfahrzeuges.

2.2 Von den Feuerwehren genutzte Funkdienste

Derzeit nutzen die Feuerwehren in Deutschland zwei verschiedene Funkdienste. Das erste ist ein analoges Funksystem mit Frequenzmodulation (FM), das seit vielen Jahren im Einsatz ist, aber durch das zweite, das digitale Bündelfunksystem TETRA BOS (Terrestrial Trunked Radio), ersetzt werden soll. Das analoge System arbeitet im sogenannten "4-Meter-Band" und im "2-Meter-Band", d. h. im Frequenzbereich von ca. 74 bis 87,5 MHz bzw. 165 bis 174 MHz. Das analoge und das digitale Funksystem basieren auf unterschiedlichen Technologien, so dass sich beide Systeme bei elektromagnetischer Störbeeinflussung unterschiedlich verhalten. Während das digitale Bündelfunksystem oberhalb einer bestimmten Schwelle der elektromagnetischen Beaufschlagung vollständig ausfällt, kann das analoge FM-Funksystem eine ausreichende Sprachübertragung ggf. immer noch bereitstellen. Somit ist das analoge FM-Funksystem nach wie vor ein unverzichtbarer Funkdienst für die deutschen Feuerwehren. Ein zweiter Grund für diesen Zustand ist die Tatsache, dass gerade die freiwilligen Feuerwehren im Gegensatz zu den Berufsfeuerwehren nicht vollständig mit digitalen Bündelfunkgeräten ausgestattet sind. Um bei Katastrophen (z. B. Großbrand, Naturkatastrophen) die Zusammenarbeit und Kooperation zwischen Berufsfeuerwehren und freiwilligen Feuerwehren zu ermöglichen, ist die Verwendung des analogen FM-Funksystems derzeit immer noch erforderlich.

2.3 Beschreibung der Funkstörung aus Anwendersicht

Die Benutzer des Einsatzleitfahrzeugs nehmen bei Übertragungen in den analogen FM-Bändern ein starkes Rauschen wahr. Aus organisatorischen Gründen und aufgrund von Einschränkungen ist die Nutzung dieser Kanäle in einem Kanalplan genau definiert. Somit kann zur Überwindung des skizzierten Problems eine alternative Frequenz nicht zufällig ausgewählt werden. Um ein extrem lautes Rauschsignal am Lautsprecher oder am Headset zu vermeiden, muss der Schwellwert des Rauschunterdrückungskreises („Rauschsperr“) auf einen sehr hohen Wert eingestellt werden. Dies bewirkt, dass die Rauschunterdrückungsschaltung nicht ausreichend zwischen Rauschen und gewünschtem Signal unterscheidet, wodurch wichtige Sprachinformationen verloren gehen können. Das Auftreten des Rauschsignals beruht aus Anwendersicht auf folgenden Kausalzusammenhängen:

- Ein Benutzer beschreibt, dass dieses Problem ständig auftritt.
- Ein zweiter Benutzer gibt an, dass der Funkdienst nur in bestimmten Bereichen des Einsatzgebiets gestört ist.
- Ein weiterer Nutzer behauptet, dass bestimmte Ampeln und öffentliche Verkehrsmittel, z. B. eine spezielle Art von Bussen die Störung verursachen.

Jede Beschreibung für sich betrachtet erscheint grundsätzlich sinnvoll, die Gesamtbeschreibung ist jedoch sehr diffus, sodass eine messtechnische Analyse am Einsatzleitfahrzeug notwendig ist.

3 Konventionelle EMV Untersuchungen

Zunächst wird mit einem Oszilloskop die Versorgungsspannung eines gestörten Funkgeräts analysiert. Dieses arbeitet im Gegensatz zu anderen Zusatzgeräten des Einsatzleitfahrzeugs auch bei abgeschaltetem Fahrzeugmotor. (Das Schütz in Bild 1 ist geöffnet und der Umrichter ausgeschaltet.) Die Verwendung des DC-Kopplungsmodus (Gleichspannungskopplung) des Oszilloskops führt zu einer konstanten Spannung von 13,65 V. Bei laufendem Fahrzeugmotor erhöht sich die Spannung auf 14,5 V, wie in Bild 2 dargestellt. Dies ist plausibel, da die Zweitbatterie im zusätzlichen Bordnetz nun ebenfalls über das Schütz mit der Lichtmaschine des laufenden Motors verbunden ist und der Laderegler typischerweise auf Spannungen zwischen 14,5 und 15 V regelt.

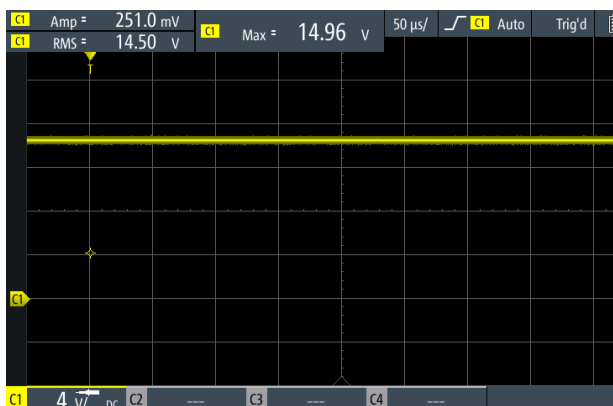


Bild 2: Spannungsverlauf am Bordnetz, Fahrzeugmotor an, Oszilloskop in DC-Kopplungsmodus. © 2020 IEEE. Reprinted, with permission, from [1].

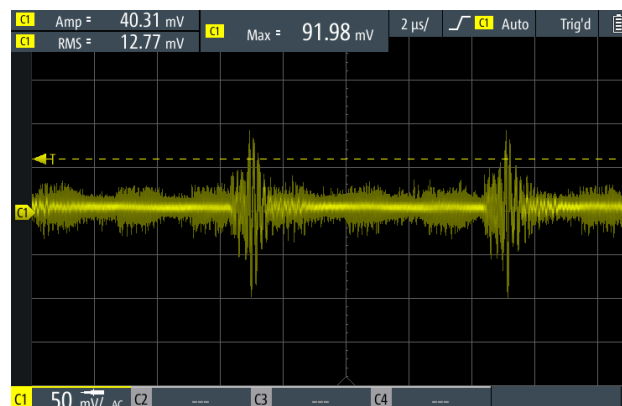


Bild 3: Spannungsverlauf am Bordnetz, Fahrzeugmotor an, Oszilloskop in AC-Kopplungsmodus. © 2020 IEEE. Reprinted, with permission, from [1].

Weiterhin ist ein überlagertes Rauschen zu beobachten, das durch die Abspaltung des Gleichanteils im AC-Kopplungsmodus (Wechselstromkopplung) des Oszilloskops besser aufgelöst werden kann (vgl. Bild 3). Dieses scheinbare Rauschen ist ein periodisches Signal, welches von einem Subsystem oder einer Komponente verursacht wird. Die Vermutung, dass dieses Rauschen die sporadischen Störungen hervorruft, kann damit aber nicht bestätigt werden, weil bei diesen Messungen keine Störungen der Funkdienste aufgetreten sind.

Weiterhin wird das Antennensignal der 4-Meter-Bandantenne mit einem Spektralanalysator im Frequenzbereich von 50 bis 90 MHz gemessen. Da der Kanalabstand der gestörten Sprachübertragung 20 kHz beträgt, sollte eine Auflösungsbandbreite (RBW) von 10 kHz oder 3 kHz verwendet werden, was jedoch Wobbelzeiten von 1 s bzw. 4,5 s bedingt. Folglich wird das Spektrum in Bezug auf die zeitliche Auflösung nicht kontinuierlich gemessen, so dass eine sporadische Störung nicht zuverlässig erfasst werden kann. Selbst eine Erhöhung der Auflösungsbandbreite auf 1 MHz und mit einhergehender Verkürzung der Wobbelzeit bringt keine Verbesserung. Das Hauptergebnis der Messungen im Frequenzbereich ist, dass mögliche Störsignale beobachtet werden, wenn der Fahrzeugmotor im Betrieb ist. Eine akustische Überwachung der Störung mit einem Handfunkgerät zeigt auf, dass der Sprachkanal immer wieder vorübergehend gestört ist. Diese Aussagen liefern ein diffuses Gesamtbild des Problems, obwohl jede Beschreibung für sich betrachtet sinnvoll erscheint.

4 Echtzeit-Spektralanalyse

Untersuchungen der Funkstörungen mit konventionellen Zeit- und Frequenzbereichsmessungen zeigen, dass bei eingeschaltetem Motor sowohl im Bordnetz als auch im empfangenen Antennensignal eine Störkomponente feststellbar ist. Da die beobachteten Störeffekte prinzipiell sporadisch auftreten, werden zusätzlich die Echtzeitspektren gemessen, um ein bestimmtes Teilsystem oder Komponente als mögliche verantwortliche Störquelle zu identifizieren bzw. auszuschließen [3]. Eine solche Messung liefert ein Spektrogramm mit einer kontinuierlichen Anzeige des Spektrums über der Zeit (sogenanntes Wasserfalldiagramm), so dass auch sporadische Störsignale zuverlässig erfasst werden können, während herkömmliche Frequenzbereichsmessungen sporadische Signale nur gelegentlich erfassen. Bei allen Echtzeitspektrummessungen dient ein Handfunkgerät als akustisches Überwachungsgerät für die Funkstörungen.

4.1 Antennenfußpunktspannung

Bild 4 zeigt ein Echtzeitspektrum des empfangenen Antennensignals im 4-Meter-Band. Die Mittenfrequenz des Spektrums wird auf die Mittenfrequenz des gestörten Sprachkanals eingestellt, wobei der Kanalabstand 20 kHz beträgt. Da während der Messung keine Sprach- und Zustandsnachrichten empfangen werden, treten nur CW-Signale mit einem Frequenzabstand von 125 kHz auf, die vom Funkmeldesystem (FMS) hervorgerufen werden, welches codierte Zustandsnachrichten überträgt. Weiterhin sind driftende Signale mit einem Frequenzabstand von ca. 62 kHz zu beobachten, die durch systematische Abschaltungen mehrerer Teilsysteme als Störsignal durch den Wechselrichter erkannt werden können. Das Echtzeitspektrum zeigt den Einschaltvorgang des Wechselrichters.

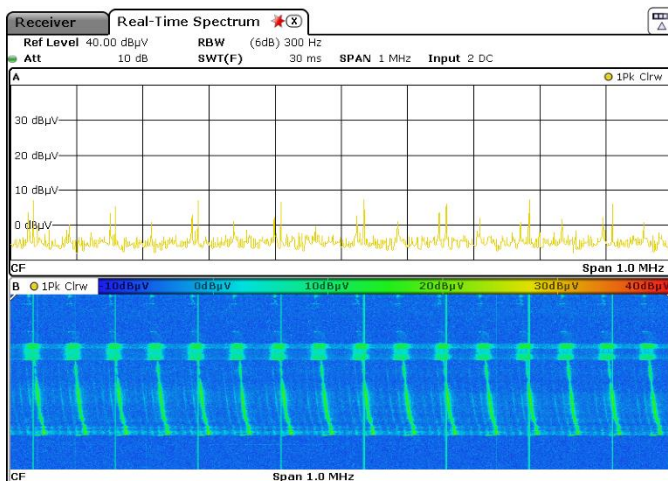


Bild 4: Spektrum (oben) und Spektrogramm (unten) des Antennensignals am Eingang des gestörten Funkgeräts im 4-Meter-Band. © 2020 IEEE. Reprinted, with permission, from [1].

Es wird deutlich, dass der Wechselrichter elektromagnetische Störungen verursacht, die hinsichtlich der Frequenz nicht stabil sind und die erheblich driften. Der FM-Funkdienst wird gestört, wenn das driftende Störsignal den Sprachkanal übersteuert. Somit können sowohl das Originalbordnetz als auch der Fahrzeugmotor als Störquellen ausgeschlossen werden. Weiterhin sind auch Intermodulationseffekte mit den CW-Signalen des Funkmeldesystems unplausibel, da der Frequenzabstand des Driftsignals (ca. 62 kHz) mit einem Frequenzabstand von 125 kHz kein ganzzahliges Vielfaches des CW-Signals ist.

Da der Wechselrichter eindeutig als die Störquelle identifiziert wird, besteht die Herausforderung nun darin, den Kopplungsmechanismus (Kopplungspfad) zu identifizieren. Daher werden weitere Echtzeitspektren an verschiedenen Messpunkten gemessen.

4.2 Bordnetzanalyse

Bild 5 zeigt das Echtzeitspektrum der Versorgungsspannung am 12-V-Bordnetz des gestörten FM-Funkgeräts. Die Driftsignale mit einem Frequenzabstand von ca. 62 kHz

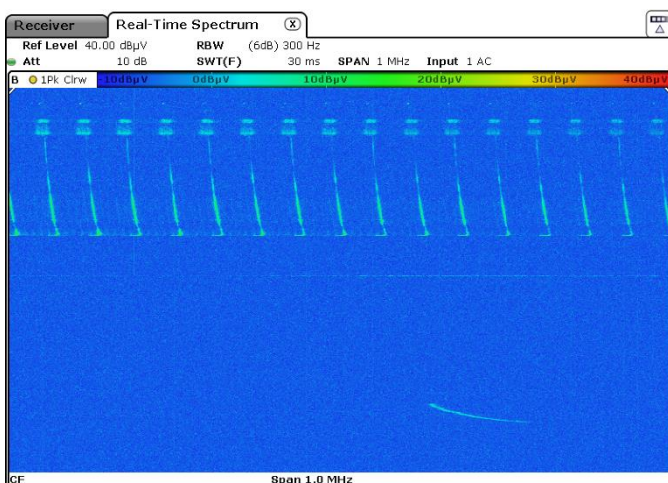


Bild 5: Spektrogramm der Versorgungsspannung am 12-V-Bordnetz im 4-Meter-Band. © 2020 IEEE. Reprinted, with permission, from [1].

sind denen in Bild 4 sehr ähnlich, welche bereits als vom Wechselrichter verursachte Störsignale identifiziert sind. Das Aus- und Wiedereinschalten des Wechselrichters bestätigte dies. Eine erste Annahme für einen möglichen Kopplungspfad ist die direkte Kopplung vom Wechselrichter ins FM-Funkgerät über das zusätzliche Gleichstromnetz. Zwei Aspekte widerlegen diese Annahme. Zum einen ist das FM-Funkgerät mit einem integrierten Netzfilter und einem Entkopplungsnetzwerk ausgestattet, so dass eine direkte Einkopplung des Störsignals unterdrückt werden sollte. Darüber hinaus tritt die Störung auch dann auf, wenn das FM-Funkgerät von einer externen 12-V-Batterie gespeist wird, die keine Verbindung zum ursprünglichen Bordnetz bzw. zum zusätzlichen 12-V-Gleichstromnetz hat. Zum anderen wird auch das Handfunkgerät gestört, das als akustisches Überwachungsgerät für die Störeffekte dient. Trotzdem muss das zusätzliche Gleichstromnetz ein wichtiger Bestandteil des Koppelmechanismus sein. Dies führt zu der weiteren Annahme, dass das zusätzliche Gleichstromnetz als parasitärer Strahler dienen könnte, da es eine Antennenstruktur nachbildet. Das zusätzliche Stromversorgungssystem ist im Wesentlichen mit zweiadrigen Kabeln ausgeführt, sodass das beim Auftreten von Gleichtaktströmen feldgeführte Störungen zu erwarten sind.

4.3 Gleichtaktströme

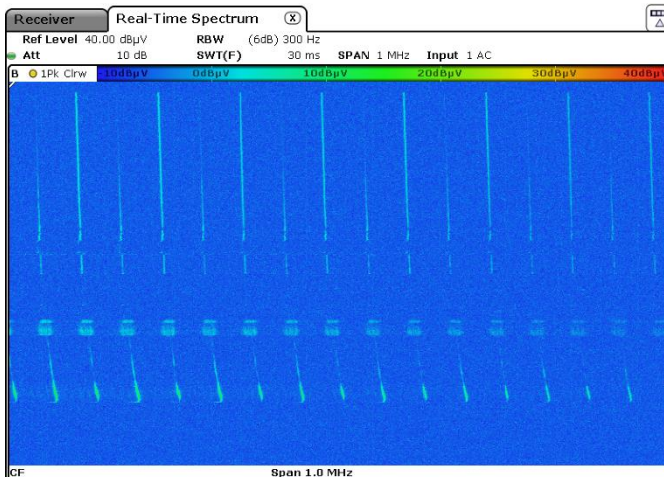


Bild 6: Spektrogramm des Gleichtaktstroms im 4-Meter-Band gemessen an einem Strang des Bordnetzes. © 2020 IEEE. Reprinted, with permission, from [1].

Der Gleichtaktstrom des zusätzlichen Gleichstromnetzes wird ebenfalls untersucht, da unerwünschte oder parasitäre Strahlung angenommen wird und Gleichtaktströme typischerweise für die Strahlungsemissionen verantwortlich sind [4, 5]. Bild 6 zeigt den gemessenen Gleichtaktstrom. Die Driftsignale mit einem Frequenzabstand von ca. 62 kHz sind denjenigen in den Bildern 4 und 5 sehr ähnlich. Diese Driftsignale wurden bereits als vom Wechselrichter hervorgerufene Störsignale identifiziert. Um die Annahme einer parasitären Abstrahlung nachzuweisen, muss geprüft werden ob sich das auf dem Bordnetz gemessene Störspektrum auch außerhalb des unmittelbaren Nahfelds des Fahrzeugs messtechnisch feldgebunden nachweisen lässt.

4.4 Feldgeführte Störemissionen

Das Auftreten von Gleichtaktströmen führt zu der Erkenntnis, dass die vom Wechselrichter verursachten leitungsgeführten Störungen vom zusätzlich installierten

Gleichstromnetz abgestrahlt werden müssen. Diese Annahme wird bestätigt, indem das abgestrahlte Feld in einer Entfernung von 10 m gemessen wird, wie im Bild 7 gezeigt. Das Spektrum zeigt auch eine Sprachübertragung (rote Linie in der Mitte des Spektrogramms) sowie die CW-Signale des Funkmeldesystems. Störungen auf FM-Funkdienste können während des Einschaltvorgangs des Wechselrichters festgestellt werden, wenn das driftende Störsignal den Sprachkanal übersteuert. Die abgestrahlten Störungen koppeln direkt in die Empfangsantenne der gestörten Funkgeräte ein. Diese Art der Kupplung wird auch Front-Door-Kopplung genannt [6].

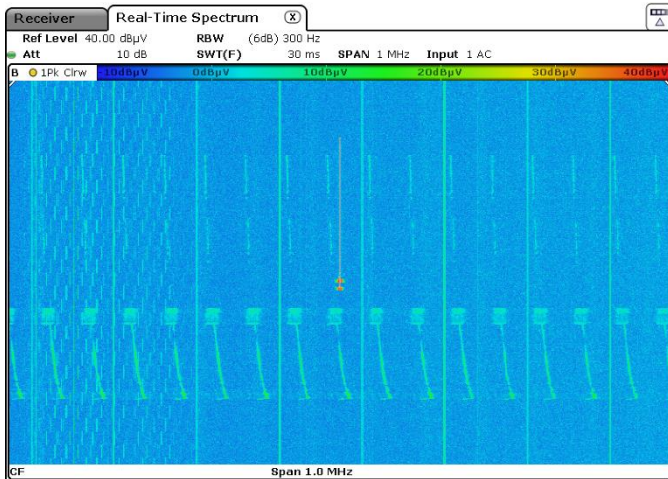


Bild 7: Spektrogramm des elektrischen Feldes in 10 m Abstand vom Fahrzeug im 4-Meter-Band.
© 2020 IEEE. Reprinted, with permission, from [1].

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird am Beispiel eines Einsatzleitfahrzeugs der Feuerwehr ein Vorgehen zur strukturierten messtechnischen Störanalyse eines komplexen Systems gezeigt. Es wird verdeutlicht, dass die bewährten Methoden der klassischen Messtechnik – Zeitbereichsmessungen mit einem Oszilloskop am Bordnetz und Frequenzbereichsmessungen mit einem Spektrumanalysator am Antennenfußpunkt – nur bedingt Hilfestellung bei sporadisch auftretenden Störphänomenen liefern. Hingegen ermöglicht eine Echtzeit-Spektralanalyse von verschiedenen Messgrößen, wie der Antennenfußpunktspannung, den Gleichtaktströmen auf den Bordnetz und des abgestrahlten elektrischen Felds in der Nähe des Fahrzeugs, eine schnelle und zuverlässige Identifikation von Störmustern, die zu sporadischen Störeffekten führen. Die Analyse dieser Störmuster führt zur schnellen Identifikation der Störquelle (Wechselrichter) samt Koppelpfad (Abstrahlung über das Bordnetz und die Fahrzeugkarosse) und stellt den Neuheitsgehalt dieses Beitrags dar. Das skizzierte Vorgehen erlaubt in kürzester Zeit eine Aufstellung von Strategien für gezielte Abhilfemaßnahmen bei sporadischen Störeffekten.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich ganz herzlich beim Herrn Jörn Engel und seinen Kollegen von der Berufsfeuerwehr Hannover, sowie bei Felix Burghardt von der Leibniz Universität Hannover für die Unterstützung während der Messkampagne.

Literatur

- [1] S. Fisahn, S. Koj, H. Garbe: EM Interferences between Power Converters and FM Radio Services on Vehicles of Security Authorities, Proc. 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal and Power Integrity (EMC+SIPI 2018), pp. 427-431, Long Beach, CA, U.S.A., July - August 2018, DOI: 10.1109/EMCSI.2018.8495316
- [2] CISPR 25:2016, Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement for the protection of on-board receivers
- [3] S. Braun, P. Russer,: Requirements and solutions for emission measurements in time-domain according to international EMC Standards, Symposium on Electromagnetic Compatibility 2012 Asia-Pacific (APEMC), Singapore, Singapore, July, 2012
- [4] S. Fisahn, S. Koj, H. Garbe: Modelling of multi-megawatt wind turbine for EMI and EMS investigations by a topological approach, XXXII International Union of Radio Science General Assembly & Scientific Symposium (URSI 2017 GASS), Montreal, Canada, Aug. 2017
- [5] S. Koj, C. Reschka, S. Fisahn, H. Garbe: Radiated electromagnetic emissions from wind energy conversion systems, 2017 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), Washington DC, USA, Aug. 2017
- [6] W. A. Radasky, C. E. Baum, M.W.Wik: Introduction to the special issue on High-Power Electromagnetics (HPEM) and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI)", IEEE Transactions on EMC, Vol. 46, Issue 3, Aug. 2004