

Entwicklung und Verifikation eines Mess- und Bewertungsverfahrens der elektromagnetischen Immission durch ITS-G5

M. Sc. Lisa-Marie Schilling, TU Ilmenau, FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik
Dr.- Ing. Christian Bornkessel, TU Ilmenau, FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik
Prof. Dr. rer. nat. habil. Matthias A. Hein, TU Ilmenau, FG Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik

1 Einleitung

Immer mehr Bereiche des alltäglichen Lebens werden von drahtlos kommunikationsfähigen elektronischen Geräten beeinflusst, so dass die Relevanz für die persönliche Exposition der Nutzer durch hochfrequente elektromagnetische Felder rapide zunimmt. So soll auch der Straßenverkehr stetig weiter automatisiert und per Funk vernetzt werden, indem so genannte *intelligente Transportsysteme* (ITS) entwickelt werden. Im Rahmen des vernetzten Fahrens sollen Fahrzeuge im Verkehr untereinander, aber auch mit Infrastruktur und weiteren Verkehrsteilnehmern kommunizieren, um Sensor-, Zustands- und Ortsinformationen austauschen zu können. Hierfür wird der Begriff *vehicle-to-everything* (V2X)-Kommunikation verwendet. Zukünftig wird somit der Straßenverkehr als ein weiterer und erheblicher Teil der Alltagsumgebung von neuen Funktechnologien durchdrungen, die per Konstruktion einen signifikanten zusätzlichen Beitrag zur persönlichen Exposition liefern.

Für die technische Umsetzung der V2X-Kommunikation etabliert sich neben der auf Mobilfunk basierenden Funktechnik *cellular-V2X* (C-V2X) der Kooperation *3rd Generation Partnership Project* derzeit in Europa die Kommunikationstechnologie ITS-G5, die auf dem Standard 802.11p [1] des Verbands *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) basiert. Für den europäischen Einsatz wird ITS-G5 durch das europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) spezifiziert und genormt. Ein zuverlässiges und praktikables Verfahren zur Bestimmung der elektromagnetischen Immission durch ITS-G5-Geräte existiert allerdings bislang nicht. Um die Exposition der Allgemeinbevölkerung in Verkehrsumgebungen durch die neuen ITS-Funksysteme abschätzen zu können, ist die Entwicklung eines Immissionsmessverfahrens für ITS-G5 dringend erforderlich. Vorliegender Beitrag beschreibt die Entwicklung eines ITS-G5-spezifischen Mess- und Bewertungsverfahrens unter Verwendung des frequenzselektiven Messgeräts SRM-3006 von *Narda STS* [2].

Abgesehen von der physikalischen Zugangsschicht weist der Standard ITS-G5 Ähnlichkeiten mit dem *Sidelink* des LTE-Derivats C-V2X auf, so dass die hier beschriebenen Schlussfolgerungen sinngemäß für beide Standards Anwendung finden können.

2 Ermittlung expositionsrelevanter ITS-G5-Signalparameter

Damit durch die Absorption von hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung keine gesundheitlichen Schäden für den Menschen entstehen, wurden von der *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) Basisgrenzwerte (spezifische Absorptionsrate, SAR) und Referenzwerte (elektrische und magnetische Feldstärken) für

das elektromagnetische Feld formuliert, die in den für die Allgemeinbevölkerung zugänglichen Bereichen nicht überschritten werden dürfen [3]. Im für ITS-G5 genutzten Frequenzbereich um 5,9 GHz wird als Basisgrenzwert eine Ganzkörper-SAR von 0,08 W/kg und ein entsprechender Referenzwert für die elektrische bzw. magnetische Feldstärke von 61 V/m bzw. 0,16 A/m festgelegt.

Diese Grenzwerte der ICNIRP basieren auf dem nachgewiesenen biologischen Effekt, dass die Absorption elektromagnetischer Leistung primär eine thermische Wirkung auf den menschlichen Organismus besitzt. Die Temperaturerhöhung steht im direkten Zusammenhang mit dem zeitlichen Mittelwert der Signalleistung, so dass die Referenzwerte auf quadratischen Mittelwerten (*root-mean-square*, RMS) basieren. Das bedeutet einerseits, dass bei digital modulierten Signalen mit rauschartig schwankender Signalamplitude nicht der kurzzeitig auftretende Maximalwert, sondern der zeitliche Mittelwert erfasst werden muss. Andererseits muss bei gepulsten Signalen das Puls-Pausen-Verhältnis (*duty cycle*) berücksichtigt werden. Die korrekte messtechnische Erfassung dieses RMS-Wertes stellt somit die zentrale Herausforderung bei der Entwicklung des Mess- und Bewertungsverfahrens zur Untersuchung der Immission dar.

Die Basis hierfür bildet die theoretische und praktische Analyse der expositionsrelevanten Signalparameter des Funkstandards. Erst wenn die Struktur des Signals in Zeit- und Frequenzbereichen bekannt ist, kann festgelegt werden, wie die Feldstärke des Signals korrekt gemessen und auf eine mögliche Maximalauslastung des ITS-Systems im Sinne einer *Worst-Case*-Abschätzung für Bewertungen der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit extrapoliert werden kann.

2.1 Standardisierung der Funktechnologie ITS-G5

Für die theoretische Analyse von ITS-G5 hinsichtlich der expositionsrelevanten Signalparameter ist vor allem die Zugriffsschicht (*access layer*) [4] von Bedeutung, die unter anderem die Bitübertragungsschicht (*physical layer*) enthält. Die Bitübertragungsschicht ist für die physikalische Verbindung und die Übertragung der Informationen über elektromagnetische Wellen zuständig. So wird auf dieser Ebene geregelt, mit welchen Modulationsarten und Leistungsparametern die einzelnen Bits übertragen werden und wie somit das resultierende Signal geformt wird.

Für die Datenübertragung wird das Mehrträger-Verfahren OFDM spezifiziert, das den Datenstrom in mehrere Teile aufspaltet und parallel auf einzelnen schmalbandigen Unterträgern überträgt. Über verschiedene Modulationsarten (BPSK, QPSK, 16-/64-QAM) und Kodierungsraten werden unterschiedliche Datenübertragungsraten realisiert. Bild 1 zeigt wie ein resultierendes Datenpaket der Bitübertragungsschicht von ITS-G5 aufgebaut ist und wie viele Bits pro Paket übertragen werden. ITS-G5 besitzt im Zeitbereich einen gepulsten Rechtecksignalverlauf, wobei ein einzelner Rechteckimpuls genau einem Datenpaket der Bitübertragungsschicht entspricht.

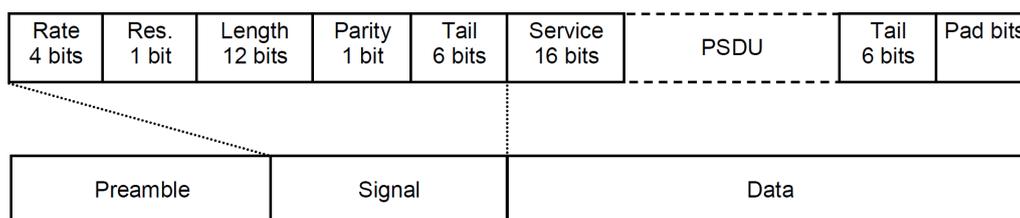


Bild 1: Aufbau eines ITS-G5-Datenpakets der Bitübertragungsschicht, PSDU: *physical service data unit* [4]

Der erste Teil des Datenpakets, die Präambel (*Preamble* in Bild 1), besitzt eine festgeschriebene Übertragungsdauer von 32 μs und dient der Synchronisierung mit dem Empfänger. Die folgenden Informationen (*Signal* in Bild 1) werden immer mit 24 Bit bei einer Übertragungsrate von 3 MBit/s gesendet, was gemäß dem Standard 802.11p [1] genau einem OFDM-Symbol mit einer Übertragungsdauer von 8 μs entspricht. Die Länge des abschließenden Datenteilpakets (*Data* in Bild 1) ist abhängig von den Datenbits, die von den übergeordneten Protokollschichten übermittelt werden (vgl. *physical service data unit*, PSDU in Bild 1). Die PSDU kann bis zu 1540 Bytes enthalten, so dass das gesamte Datenpaket maximal 12342 Bits umfassen kann. Bei der niedrigsten möglichen Datenübertragungsrate von 3 MBit/s entsprechen 12342 Bits 515 OFDM-Symbolen zu je 8 μs Übertragungsdauer. Die maximale Dauer eines ITS-G5-Impulses, bestehend aus der Präambel, dem Signal- und Datenteilpaket, beträgt somit theoretisch 4160 μs .

Experimentelle Simulationen eines typischen Straßenverkehrsszenarios, in dem ITS-G5-Nachrichten vom Typ *cooperative awareness message* (CAM) gesendet wurden, zeigten allerdings, dass die Impulsdauer im Bereich zwischen 345 und 650 μs liegt. Eine CAM entspricht einem Rechteckimpuls im ITS-G5-Zeitsignalverlauf, wobei diese mit einer Periodendauer zwischen 100 und 1000 ms verschickt werden [5].

2.2 ITS-G5-Signalanalyse im Zeit- und Frequenzbereich

Zur praktischen Analyse des Zeit- und Frequenzbereichs wurde das Signal des ITS-G5 Fahrzeugmoduls (*on-board-unit*, OBU) MK5 der Firma *Cohda Wireless* [6] aufgenommen, während dieses ITS-G5-Nachrichten vom Typ CAM aussendete. Bild 2 zeigt das Spektrum mit einer Signalbandbreite von 8,5 MHz, die unterhalb der vorgeschriebenen Kanalbandbreite von 10 MHz liegt. In Bild 3 sind zwei unterschiedlich lange Zeitabschnitte des ITS-G5-Zeitsignalverlaufs dargestellt. Im linken Bild ist eine Pulsfolge über einen Zeitraum von vier Sekunden gezeigt. Ein Impuls entspricht dabei einer CAM, wobei die Periodendauer 1000 ms beträgt und somit vier Pulse dargestellt werden. Im rechten Bild wurde der gezeigte Zeitabschnitt auf 0,8 ms gekürzt, um einen Rechteckimpuls detailliert zu betrachten. Die Impulslänge beträgt 345 μs , wobei diese je nach Länge des Datenpakets bis 4160 μs variieren kann (vgl. Teilkapitel 2.1).

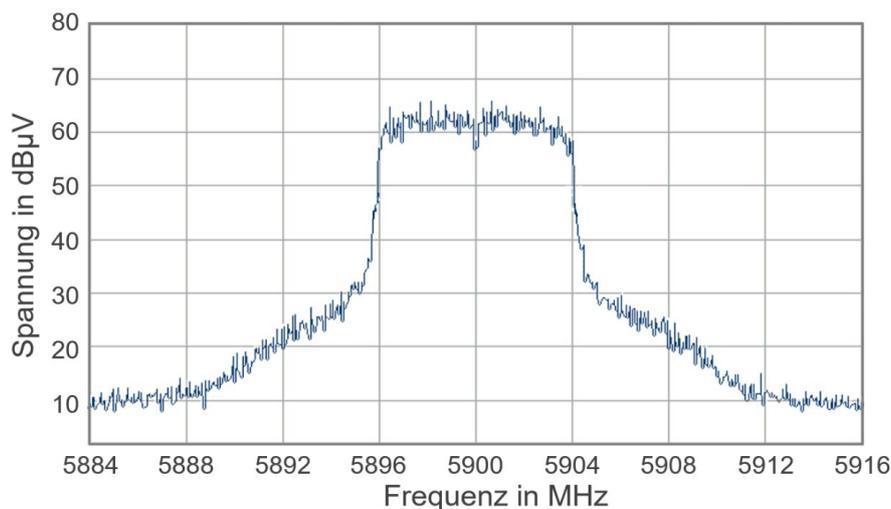


Bild 2: Spektrum des von einem ITS-G5 Fahrzeugmodul MK5 generierten Signals während der Aussendung von CAMs bei 5,9 GHz. Die Signalbandbreite beträgt ca. 8,5 MHz.

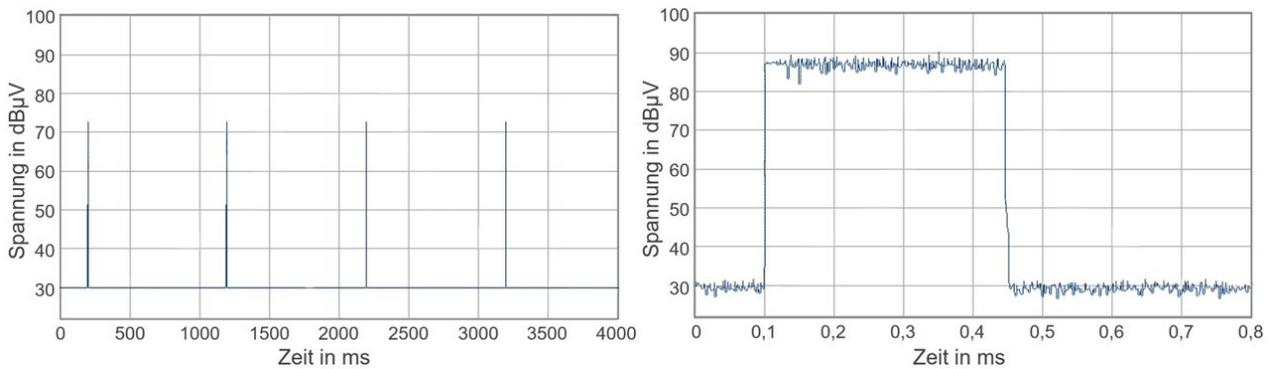


Bild 3: Zeitbereichsausschnitte des von einem ITS-G5 Fahrzeugmodul MK5 generierten Signals während der Aussendung von CAMs bei 5,9 GHz. Die Periodendauer der links gezeigten Impulsfolge beträgt 1000 ms und der rechts dargestellte Rechteckimpuls ist ca. 345 µs lang.

Die Messungen zeigen, dass das Signal einen nennenswerten Crest-Faktor (Verhältnis von Spitzenwert zu RMS-Wert) von bis zu 7 dB besitzt, der bei der zeitlich gemittelten Bewertung der Immission berücksichtigt werden muss, da bei einer reinen Spitzenwertmessung das Signal ansonsten in Höhe des Crest-Faktors überbewertet werden würde. Zu Beginn jeden Impulses ist ein etwa 32 µs langer Abschnitt bestimmbar, der einen geringeren Crest-Faktor verglichen mit dem restlichen Impulsdach besitzt (s. Bild 3 rechts). Dieser Abschnitt ist der Präambel zuzuordnen, die meist mit einer niedrigwertigeren Modulation für eine höhere Störfestigkeit als die weiteren Informationsdaten übertragen wird. Die Ergebnisse der theoretischen und praktischen Signalanalyse zur Erfassung der expositionsrelevanten Parameter von ITS-G5 fasst Tabelle 1 zusammen.

Signalparameter	ITS-G5
Frequenzbereich	5470 ... 5725 MHz, 5865 ... 5925 MHz
Strahlungsleistung (EIRP)	Maximal 33 dBm
Kanalbandbreite	10 MHz
Signaltyp	Rechteckimpulse mit Crest-Faktor bis 7 dB
Impulslänge	Länge des Datenpakets (Maximal: 4160 µs)
Periodendauer	Bei CAM: 100 ... 1000 ms

Tabelle 1: Expositionsrelevante Signalparameter von ITS-G5

3 Immissionsmessverfahren für ITS-G5

Für die Immissionsmessung von ITS-G5-Signalen wurde das frequenzselektive Messgerät SRM-3006 [2] verwendet, das sich vielfach für die Bewertung verschiedener Funktechnologien bewährt hat [7]. Das Gerät wird mit der zugehörigen isotropen Antenne (z.B. Typ 3502/01, Frequenzbereich 420 ... 6000 MHz) des gleichen Herstellers zur Ermittlung der elektrischen Feldstärke verwendet. Die Herausforderung bei der Messung des gepulsten ITS-G5-Signals besteht darin, dass das Messgerät die Impulse vollständig erfasst und sie nicht in eine Totzeit des Messgeräts fallen. Totzeiten entstehen im Gerät durch 20 ms lange Umschaltphasen der drei orthogonalen Messachsen während einer isotropen Messung und durch Pausen der digitalen Signalverarbeitung [8].

Als am besten geeignete Betriebsart des SRM-3006 für ITS-G5 Impulse wurde der *Level Recorder* identifiziert, bei dem ein Signal lückenlos bei fest eingestellter Mittenfrequenz und Auflösungsbreite aufgenommen werden kann. Totzeiten durch Umschaltphasen bei

der isotropen Messung können vermieden werden, indem die elektrische Feldstärke in den drei orthogonalen Raumachsen einzeln gemessen und anschließend zu einem isotropen Wert durch quadratische Summation zusammengefasst wird. Ein RMS-Detektor ist im SRM-3006 nicht vorhanden, allerdings kann die Glättung des Signals mit einem nachgeschalteten Videofilter erfolgen, dessen Mittelungszeit in der Größenordnung der Pulsdauer liegen sollte [9]. So wird der Signalpegel im Impulsdach nicht in Höhe des Crest-Faktors überbewertet. Bei der Ermittlung des RMS-Werts der Rechteckimpulsfolge wird für eine korrekte Immissionsbewertung zusätzlich mit einem Korrekturfaktor entsprechend des Puls-Pausen-Verhältnis gewichtet. Zur Ermittlung der größtmöglichen Immission werden für den Korrekturfaktor K_{\max} die größtmögliche Impulsdauer τ_{\max} und Impulsendefrequenz bzw. reziprok die geringste Periodendauer T_{\min} verwendet, die aus der ITS-G5-Signalanalyse (vgl. Kapitel 2) ermittelt wurden:

$$K_{\max} = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{\tau_{\max}}{T_{\min}} \right) = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{4160 \mu\text{s}}{100 \text{ ms}} \right) = -13,8 \text{ dB} \quad (1)$$

Zusammenfassend wird zur Bestimmung der Maximalimmission durch ITS-G5 die elektrische Feldstärke, die durch das Impulsdach erzeugt wird, als RMS-Wert gemessen und durch Verknüpfung des Korrekturfaktors K_{\max} somit auf das maximale Puls-Pausen-Verhältnis korrigiert. Die gemäß dem beschriebenen Verfahren ermittelten elektrischen Feldstärken von ITS-G5 sind zur Bestimmung der Grenzwertausschöpfung auf den ICNIRP-Referenzwert 61 V/m zu beziehen.

4 Immissionsmessungen

Um die Immission durch ITS-G5 mit Hilfe des vorgestellten Mess- und Bewertungsverfahrens zu ermitteln, wurden Messungen in der Forschungsmesseinrichtung VISTA (Virtuelle Straße – Simulations- und Testanlage) im Thüringer Innovationszentrum Mobilität in Ilmenau sowie in einem KFZ (Typ: Opel Corsa) durchgeführt. VISTA ist eine elektromagnetisch abgeschirmte Messkammer, die vollständig mit Absorbern ausgekleidet ist, um Funkmessungen im Labor unter Freifeld- bzw. Freiraumbedingungen zu ermöglichen [10]. Für die Immissionsmessungen wurden die OBU MK5 und die *road-side-unit* RSU MK5 [11] der Firma *Cohda Wireless* verwendet, die sich in ihrem Gehäuse und den verwendeten Antennen unterscheiden. Die OBU mit angeschlossener Dachantenne (Typ: MGW-303 von *Mobile Mark* [12]) und die RSU mit omnidirektionalen Antennen (Typ: ECO6-5500 von *Mobile Mark* [13]) sind mit den jeweiligen Richtdiagrammen in Bild 4 gezeigt. Beide Geräte waren so konfiguriert, dass sie im Rahmen einer Straßenverkehrssimulation Nachrichten vom Typ CAM versendeten.

Die Messunsicherheit des SRM-3006 wird im Frequenzbereich zwischen 5 und 6 GHz vom Hersteller mit +1,9 / -2,5 dB angegeben [2]. Zur Berücksichtigung weiterer Unsicherheiten bei Messaufbau und Messdurchführung wird pauschal eine Messunsicherheit von insgesamt ± 3 dB angenommen, die nicht zu den Messwerten addiert wurde.

Der Messaufbau in VISTA und die Platzierung der Prüflinge ist im Bild 5 gezeigt. In einem Abstand von 25 cm in der im Datenblatt angegebenen Hauptstrahlrichtung zu den Antennen der OBU und RSU wurden die in Tabelle 2 aufgelisteten Immissionswerte ermittelt. Obwohl die OBU und RSU identisch konfiguriert waren, wurde bei der RSU ein höherer Immissionswert von 7,8 V/m ermittelt, da die Antenne u. a. einen höheren Gewinn besitzt als die Dachantenne der OBU. Die Differenz der Immissionswerte liegt unter der Berücksichtigung des unterschiedlichen Gewinns im Rahmen der Messunsicherheit.

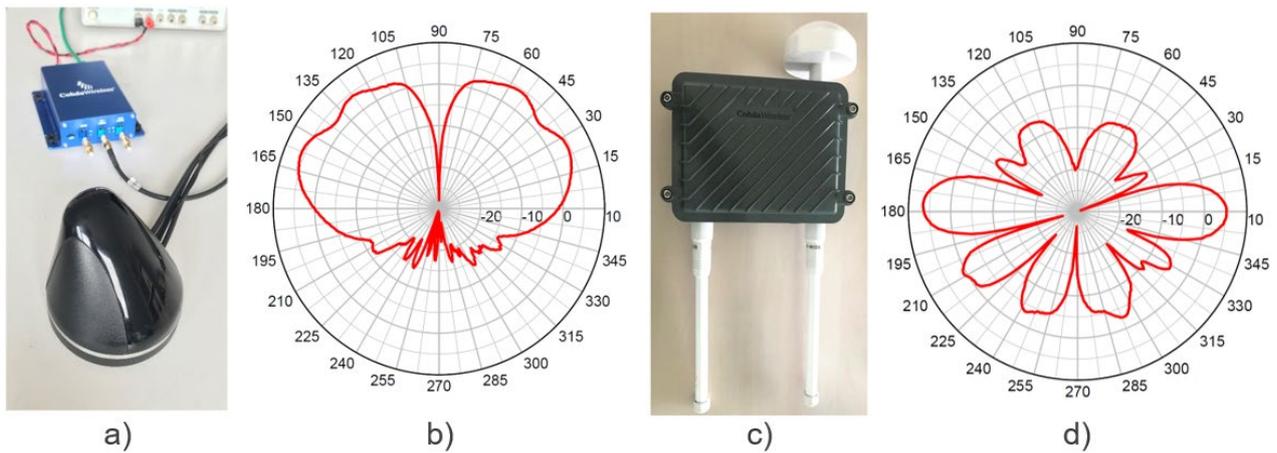


Bild 4: a) OBU MK5 mit Dachantenne MGW-303, Gewinn 5 dBi [12], b) vertikale Richtcharakteristik MGW-303 bei 5500 MHz (horizontal: isotrop), c) RSU MK5 mit Antennen ECO6-5500, Gewinn 6 dBi [13], d) vertikale Richtcharakteristik ECO6-5500 bei 5500 MHz (horizontal: isotrop)

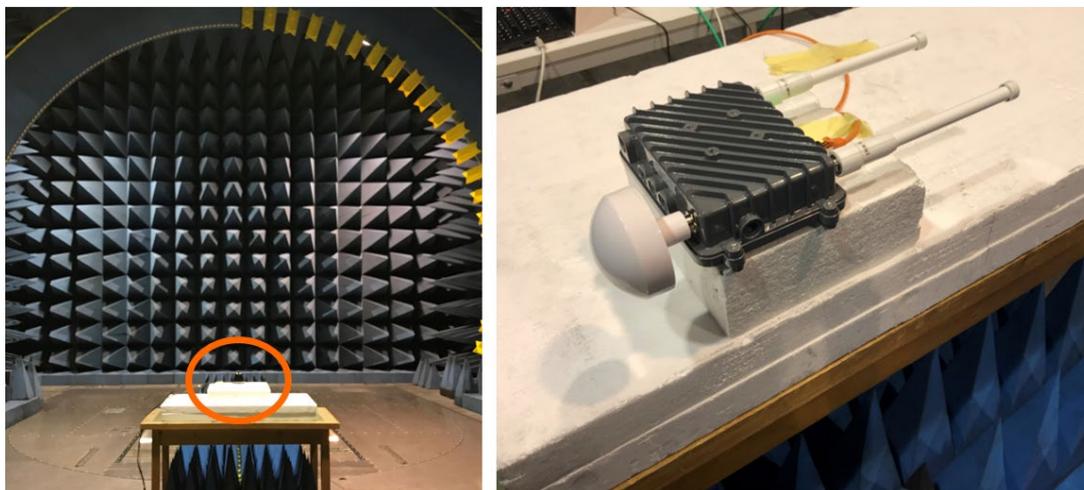


Bild 5: Messaufbau in VISTA und Platzierung der Prüflinge (links: OBU orange markiert, rechts: RSU)

Prüfling	Max. Immissionswert	Grenzwertausschöpfung
OBU	4,7 V/m	7,7 %
RSU	7,8 V/m	12,8 %

Tabelle 2: Maximale Immissionswerte und deren Grenzwertausschöpfung bzgl. 61 V/m der OBU und RSU, die in VISTA im Abstand von 25 cm zu den Antennen in Hauptstrahlrichtung ermittelt wurden.

Für die Immissionsmessungen im Fahrzeug wurde die OBU zum einen mit der Antenne MGW-303 auf dem Fahrzeugdach und zum anderen mit einer Di-Patch-Antenne (Gewinn 3,25 dBi) für die V2X-Kommunikation [14], [15] an der Frontscheibe des Fahrzeugs betrieben. Die Antennen sowie ihre Montageorte am Fahrzeug und die vordefinierten Messpunkte im Fahrzeuginneren sind in Bild 6 gezeigt. Neben den acht ausgewählten Messorten im Fahrzeug wurde ein weiterer Messpunkt jeweils direkt vor den Antennen aufgenommen. Die Ergebnisse der Immissionsmessung sind anhand ihrer Grenzwertausschöpfung in Bild 7 gezeigt.

Für die Immission im Fahrzeug kann zusammenfassend festgestellt werden, dass der Einbauort der Sendeantenne einen starken Einfluss auf die vorherrschenden Feldstärken im Fahrerraum hat. So wurden bei der ITS-G5-Variante, die die Di-Patch-Antenne direkt im Fahrerraum an der Frontscheibe enthält, deutlich höhere Immissionen ermittelt als bei

der Dachvariante. Die von der Dachantenne verursachten Feldstärken werden erwartungsgemäß durch Karosserie und Fahrzeugscheiben stark gedämpft. Die elektrische Feldstärkeimmission direkt vor der Dachantenne außerhalb des Fahrzeugs ist durchschnittlich um den Faktor 65 höher als die im Fahrzeuginneren erfassten Werte. Der höchste Immissionswert wurde im Fahrzeug direkt vor dem Di-Patch an der Frontscheibe mit 9,2 V/m ermittelt. Dies entspricht einer maximalen Grenzwertausschöpfung von 15,1 %. Um eine Exposition durch ITS-G5 im Sinne des Bevölkerungsschutzes im Fahrzeug zu minimieren, sollten die Sendeantennen möglichst nicht direkt im Fahrzeuginnenraum, indem sich Personen aufhalten, angebracht werden. Während der vorgestellten Messreihen wurden allerdings keine Grenzwertüberschreitungen bzgl. der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung festgestellt.

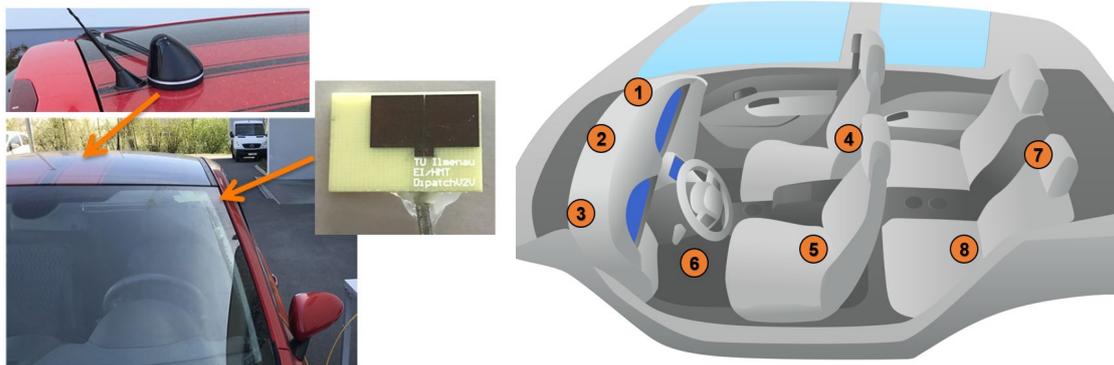


Bild 6: ITS-G5-Messaufbau für Immissionserfassung im KFZ: Antenne MGW-303 auf Fahrzeugdach und Di-Patch-Antenne an Frontscheibe (links), Skizze der acht vordefinierten Messpunkte im Fahrzeuginnenen (rechts)

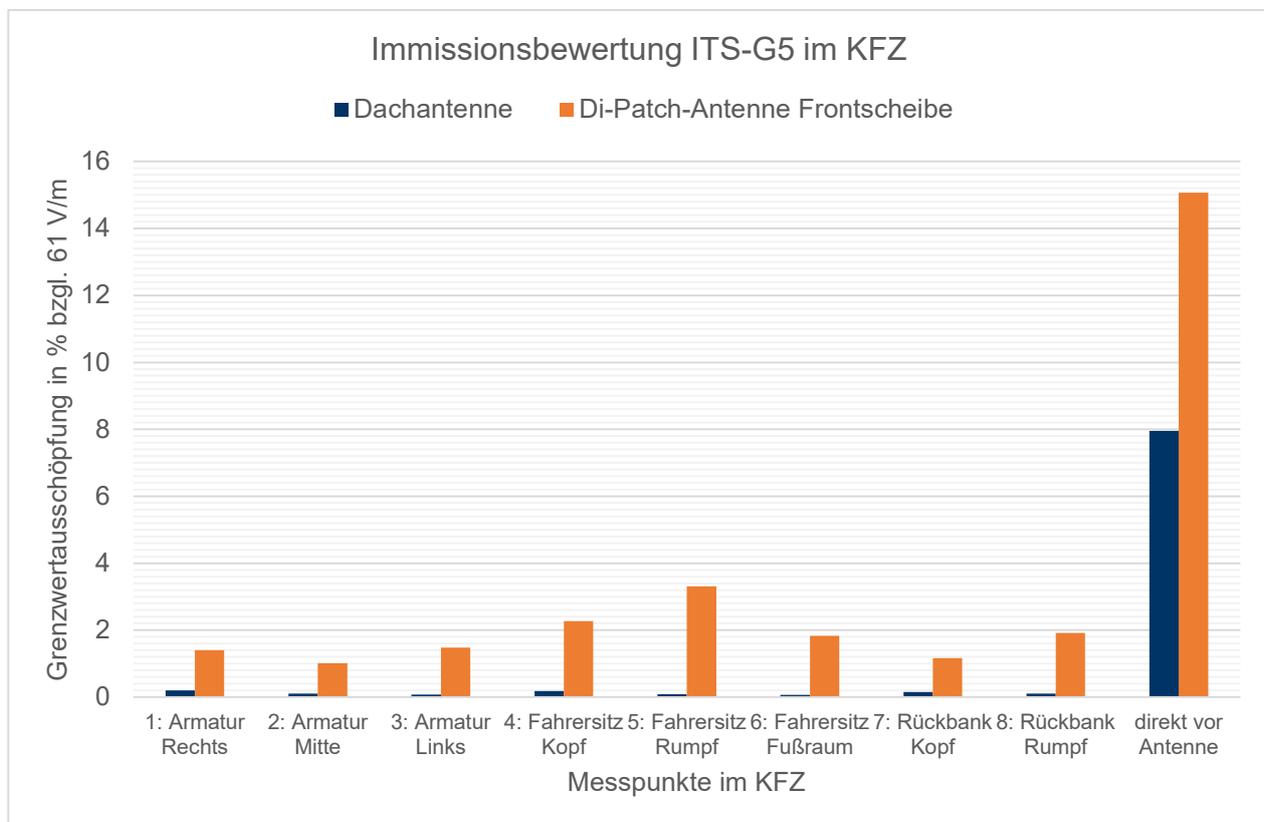


Bild 7: Ergebnisse der Immissionsbewertung durch eine ITS-G5-OBU im KFZ mit verwendeter Dachantenne MGW-303 und Di-Patch-Antenne an der Frontscheibe. Die maximale Grenzwertausschöpfung für die Allgemeinbevölkerung beträgt 15,1 %.

5 Abschluss

Im Rahmen des vernetzten Fahrens wird in Europa zukünftig die V2X-Kommunikationstechnologie ITS-G5 eingesetzt, die die Exposition der Allgemeinbevölkerung im Verkehr maßgeblich erhöhen wird. Um die Immission durch den neuen Funkstandard vor dessen flächendeckender Einführung abschätzen zu können, wurde erstmalig ein speziell auf ITS-G5 angepasstes Mess- und Bewertungsverfahren entwickelt. Mit Hilfe des Messgerätes Narda SRM-3006 und eines Korrekturfaktors zur Berücksichtigung des standard-spezifischen Puls-Pausen-Verhältnisses können die zeitlich gemittelten elektrischen Feldstärken des ITS-G5-Signals ermittelt und hinsichtlich ihrer Grenzwertausschöpfung bezüglich der ICNIRP-Referenzwerte bewertet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl in einer abgeschirmten Messkammer, als auch an typischen Aufenthaltsorten von Personen in einem PKW die Exposition durch ITS-G5 ermittelt. Es wurde eine maximale Grenzwertausschöpfung von 15,1 % erfasst. Der vorliegende Beitrag stellt ein neues, funkdienstspezifisches Verfahren bereit, um Expositionsmessungen der neuen V2X-Funktechnologie ITS-G5 auch in anderen Umgebungen oder Anwendungsszenarien zuverlässig und praktikabel durchführen zu können.

6 Literatur

- [1] IEEE: Std. 802.11p - 2010 Part11 Amendment 6, IEEE Standard, 2010
- [2] Narda Safety Test Solutions: Operating Manual SRM-3006, www.narda-sts.com
- [3] ICNIRP: Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Physics: vol. 74, no. 4, 1998, S. 494 - 522
- [4] ETSI: EN 302 663 (V1.2.1), Europäische Norm, 2014
- [5] ETSI: EN 302 637 - 2 (V1.3.1), Europäische Norm, 2014
- [6] Cohda Wireless: MK5 OBU Specification, www.cohdawireless.com
- [7] M. Wuschek: Measuring RF Electromagnetic Fields at Mobile Communications Base Station and Broadcast Transmitter Sites, Narda Safety Test Solutions, 2019
- [8] H. Keller: Principles of the Selective Radiation Meter SRM-3006, Application Note, 22.12.2009
- [9] H. Keller: Bewertung rauschartiger Impulse moderner Kommunikationssysteme, Jahrestagung des Fachverbandes für Strahlenschutz e.V., 2011, S. 209 - 223
- [10] M. A. Hein et. al.: Emulation of virtual radio environments for realistic end-to-end testing for intelligent traffic systems, 2015 IEEE MTT-S International Conference on Microwaves for Intelligent Mobility (ICMIM), Heidelberg, 2015, S. 1 - 4
- [11] Cohda Wireless: MK5 RSU Specification, www.cohdawireless.com
- [12] Mobile Mark: MGW-303 Series Antennas – Patterns, www.mobilemark.com
- [13] Mobile Mark: ECO6-5500 Series Antennas – Patterns, www.mobilemark.com
- [14] J. Singh, R. Stephan, M. A. Hein: Low-Profile Wideband Differentially Fed Di-Patch Antenna Closely Above Metallic Ground, IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 18, no. 5, Mai 2019, S. 976 - 980
- [15] J. Singh, R. Stephan, M. A. Hein: Strahlungselement, Deutsches Patent- und Markenamt, Appl. 10 2017 011 225.8, 30.11.2017