

# FAT-Schriftenreihe 335

Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion



n

# Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion

## **Projektleitung beim Auftragnehmer**

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Matthias A. Hein

Technische Universität Ilmenau

Thüringer Innovationszentrum Mobilität (ThIMo)

Fachgebiet Hochfrequenz- und Mikrowellentechnik

Prof. Dr.-Ing. Matthias Richter

Forschungs- und Transferzentrum (FTZ) e.V.

an der Westsächsischen Hochschule Zwickau

## **Autoren**

Dr. Christian Bornkessel, TU Ilmenau

M.Sc. Willi Hofmann, TU Ilmenau

M.Sc. Lisa-Marie Schilling, TU Ilmenau

Dr. Bernd Körber, FTZ Zwickau

Dipl.-Ing. Norman Müller, FTZ Zwickau

Dipl.-Ing. Matthias Trebeck, FTZ Zwickau

## **Projektleitung beim Auftraggeber**

Wolfram Meyer

Obmann FAT AK23-EMV

AVL Software and Functions GmbH

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	4
1 Einleitung und Aufgabenstellung .....	5
2 Ermittlung der elektromagnetischen Umwelt .....	6
2.1 Vorgehensweise .....	6
2.2 Rundfunk.....	7
2.3 Allgemeinzuteilungen und ISM-Bänder .....	10
2.4 Mobilfunk.....	12
2.5 Satellitennavigation.....	16
2.6 WLAN .....	18
2.7 Bluetooth.....	19
2.8 Verkehr .....	20
2.9 Zusammenfassung der Recherche .....	25
3 Ableitung von Anforderungen für Fahrzeug und Komponenten .....	28
3.1 Vorgehensweise .....	28
3.2 Feldstärkeerfassung für Funkdienste im Fahrzeugbereich .....	28
3.3 Numerische Feldanalyse von ITS-G5 .....	46
3.4 Ableitung der Anforderungen an Störfestigkeitsprüfungen .....	51
3.5 Robustheit leitungsgebundener Fahrzeugvernetzungs-systeme.....	53
3.6 Mess- und Prüfverfahren auf Komponentenebene.....	55
3.7 Messungen und Ergebnisse auf Komponentenebene .....	57
3.8 Mess- und Prüfverfahren auf Fahrzeugebene .....	65
3.9 Messungen und Ergebnisse auf Fahrzeugebene.....	66
3.10Fazit der Störfestigkeitsanforderungen.....	70
4 Vorschlag und Untersuchung von Testmethoden zur Störfestigkeit – Betrachtungen zur Messökonomie.....	71
4.1 Messökonomie auf Komponentenebene .....	71
4.2 Messökonomie auf Fahrzeugebene .....	74
5 Anhang .....	93
5.1 Tabellarische Ergebnisse AP1.....	93
6 Literaturverzeichnis .....	99
7 Abkürzungsverzeichnis .....	104

## Kurzfassung

Zur digitalen Vernetzung des Verkehrs hin zum autonomen Fahren etablieren sich derzeit die V2X-Kommunikationstechnologien ITS-G5 und C-V2X. Darüber hinaus existieren weitere funkbasierte Systeme, die in der elektromagnetischen Umwelt heutiger und zukünftiger Fahrzeuge auftreten und diese beeinflussen können. Um sicherzustellen, dass die Funktionen des autonomen und vernetzten Fahrens aus Sicht der EMV nicht gestört werden, muss die veränderte elektromagnetische Umgebung bei der EMV-gerechten Entwicklung und EMV-Prüfung eines Fahrzeugs und seiner Komponenten berücksichtigt werden.

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts für den Arbeitskreis (AK) 23-EMV der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) wurden daher Funkdienste aus dem Verkehrsumfeld hinsichtlich ihrer EMV-relevanten Parameter recherchiert, wobei ein Fokus auf die V2X-Technologien gelegt wurde. Die Recherche ergab, dass die V2X-Funksysteme aufgrund des neu genutzten Frequenzbereichs um 5,9 GHz und ihrer im Vergleich zu WLAN- oder Bluetooth-Systemen höheren zugelassenen EIRP potentiell ein neues Risiko für EMV-bedingte Störungen im Fahrzeug darstellen können, das bislang in den Prüfnormen nicht immer abgedeckt wird. Im Zuge dessen wurden elektrische Feldstärken ausgehend von ITS-G5-Systemen sowohl unter idealisierten Freiraumbedingungen als auch direkt im Fahrzeug gemessen, um zu untersuchen, welche Störpegel durch die neue Technologie auftreten können. Die Untersuchungen ergaben, dass im Abstand von 5 cm zur ITS-G5-Strahlungsquelle elektrische Feldstärken größer als 100 V/m (Peak-Werte) auftreten können. Im Abstand von 10 cm sinken die Werte allerdings überwiegend auf unter 100 V/m. ITS-G5 besitzt eine pulsartige Signalstruktur, so dass die hohen elektrischen Feldstärken nur kurzzeitig während der Pulse vorkommen.

Die Ergebnisse der Messungen wurden dazu genutzt, das tatsächliche Störpotential auf typische Komponenten bzw. Opfersysteme und auf das Fahrzeug selbst zu prüfen. Dabei wurden verschiedene leitungsgebundene Fahrzeugkommunikationssysteme ausgewählt und mittels eines realen ITS-G5-Systems sowie eines äquivalenten normativen Prüfsystems hinsichtlich ihrer Störfestigkeit geprüft. Die untersuchten leitungsgebundenen Systeme zeigten in ihrer Kommunikation dabei keine Fehler. Erst bei einer deutlichen Übertestung (vierfach überhöhte Feldstärke) zeigten sich am System *PCIe Gen3* (höchste Analogbandbreite der verwendeten Testsysteme) sporadische Kommunikationsfehler bei einer Störeinkopplung direkt im Steckerbereich. Auf Fahrzeugebene zeigten die leitungsgebundenen Systeme keine Auffälligkeiten bei Störeinkopplung auf Zuleitungen, Stecker und direkt auf die Steuergeräte.

Zusätzlich wurden Untersuchungen von Testmethoden zur Störfestigkeit sowie Betrachtungen zur Messökonomie im Hinblick auf die neuen Anforderungen durchgeführt, da die genormten Messverfahren derzeit viele Einzelmessungen zur Prüflingsbewertung benötigen. Die alternative innovative Testmethode mit einer VIRC (*Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber*) wurde dabei den etablierten Verfahren gegenübergestellt. Die Methodik der VIRC ermöglicht eine komplette Abdeckung großer Prüflinge sowie vergleichbare Prüffeldstärken im Vergleich zu einer klassischen Antennenmessung. Allerdings unterscheidet sich die VIRC-Methode hinsichtlich der Feldhomogenität, der Polarisierung und des zeitlichen Feldstärkeverlaufs von den etablierten Prüfnormen. Mit dem VIRC-Verfahren lassen sich deutliche Zeitersparnisse erzielen. Inwieweit ein mit den zulassungsrelevanten Antennenmessverfahren vergleichbares Störfestigkeitsverhalten des Prüflings im Fahrzeug auftritt, ist durch weitere Untersuchungen zu verifizieren.



# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Der AK23-EMV der Forschungsvereinigung Automobiltechnik (FAT) im Verband der Automobilindustrie (VDA) beauftragte die Projektgemeinschaft Thüringer Innovationszentrum Mobilität (ThIMo) der Technischen Universität Ilmenau und Forschungs- und Transferzentrum e.V. (FTZ) an der Westsächsischen Hochschule Zwickau mit der Durchführung einer Studie „Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion“.

Im Zuge des digitalen Wandels werden verschiedene Alltagsbereiche zunehmend von kommunikationsfähigen elektronischen Systemen beeinflusst. So wird auch der Verkehr immer weiter vernetzt und Fahrzeuge sollen zukünftig autonom fahren. Die Entwicklung dieser intelligenten Transportsysteme (ITS) ist ein wichtiges aktuelles Thema der internationalen Forschung, wobei bereits heute eine Vielzahl an drahtlosen Kommunikationssystemen im Verkehr und im Fahrzeug eingesetzt werden. Im Rahmen des vernetzten und autonomen Fahrens sollen Fahrzeuge im Verkehr untereinander, aber auch mit Infrastruktureinrichtungen und weiteren Verkehrsteilnehmern kommunizieren, um diverse Daten auszutauschen. Hierfür etablierte sich der Begriff der *vehicle-to-everything* (V2X) – Kommunikation, die einhergeht mit der Einführung der neuen Funktechnologien für das vernetzte Fahren: ITS-G5 und *cellular-V2X* (C-V2X). Darüber hinaus existieren eine Vielzahl weiterer Funktechnologien, die im Verkehr eingesetzt werden oder in dessen Umgebung vorzufinden sind. Die Fahrzeuge werden somit durch fahrzeuginterne als auch externe Funksysteme beeinflusst, deren elektromagnetische Felder eine Auswirkung auf die elektronischen Fahrzeugfunktionen im Sinne der EMV haben können. Dabei muss sichergestellt werden, dass keine elektromagnetischen Störungen im Fahrzeug auftreten können.

Ziel des Projektes ist es, die veränderte elektromagnetische Umwelt des Kraftfahrzeugs (Kfz) und deren Einfluss auf die Funktion des autonomen Fahrens zu ermitteln. Hieraus sollen Vorgehensweisen unter Anwendung von Mess- und Simulationsverfahren abgeleitet werden, die es ermöglichen, den Einfluss der elektromagnetischen Umwelt sowohl für das Kfz, als auch für die Komponenten im Entwicklungsprozess zu bewerten. Das Projekt ist in folgende Arbeitspakete untergliedert, an denen sich die Struktur des vorliegenden Berichts orientiert:

- Arbeitspaket 1: Ermittlung der elektromagnetischen Umwelt
- Arbeitspaket 2: Ableitung von Anforderungen für Fahrzeuge und Komponenten
- Arbeitspaket 3: Vorschlag und Untersuchung von Testmethoden zur Störfestigkeit

Im ersten Arbeitspaket erfolgt eine Recherche hinsichtlich der Ermittlung der elektromagnetischen Umwelt des Kfz, wobei Funkdienste hinsichtlich ihrer EMV-relevanten Parameter erfasst werden. Im zweiten Arbeitspaket sollen diese ermittelten Parameter in Anforderungen für Fahrzeuge und Komponenten abgeleitet werden. Dies betrifft insbesondere eine Abschätzung bzw. Erfassung von Feldstärkewerten für Funkdienste, für die in der Recherche keine oder nur unzureichende Daten vorhanden sind. Mit den ermittelten neuen Anforderungen werden die leitungsgebundenen Systeme zur Fahrzeugvernetzung geprüft und Messungen der Störfestigkeit auf Komponenten- und Fahrzeugebene durchgeführt. Im dritten Arbeitspaket werden die Testmethoden zur Störfestigkeit hinsichtlich der Neuerungen im vernetzten und autonomen Fahren bewertet und Betrachtungen zur Messökonomie durchgeführt. Eine alternative Testmethodik wird validiert und deren Durchführung sowie der Vergleich mit etablierten Verfahren der EMV-Störfestigkeitsprüfung bewertet.

## 2 Ermittlung der elektromagnetischen Umwelt

### 2.1 Vorgehensweise

Vorliegendes Kapitel adressiert das erste Arbeitspaket der Studie, in welchem eine Recherche hinsichtlich der Ermittlung der elektromagnetischen Umwelt erfolgt. Hierbei werden Funkdienste, die potentiell für vernetztes und autonomes Fahren verwendet werden bzw. in dessen Frequenzbereiche fallen, hinsichtlich der folgenden EMV-relevanten Parameter recherchiert:

- Sende- und Empfangsfrequenzen
- abgestrahlte Leistungen bzw. *equivalent isotropically radiated power* (EIRP)
- Übertragungs-/Zugriffsverfahren
- Modulation
- Polarisation am Ort des Fahrzeugs
- Kanal- und Signalbandbreite
- typische Feldstärkewerte am Ort des Fahrzeugs, sofern verfügbar (wenn aus Literatur nicht bekannt, werden diese Werte im Rahmen von AP 2 erfasst)

Die Zusammenstellung basiert auf dem Frequenzplan der Bundesnetzagentur [BNA18].

Die Angaben zur Polarisation der abgestrahlten elektromagnetischen Wellen beziehen sich auf ortsfeste Sendeanlagen. Die Polarisationsrichtung kann sich auf dem Übertragungsweg vom Sender zum Empfänger durch Ausbreitungseffekte wie Reflexion ändern. Für mobile Endgeräte kann keine Aussage über die Polarisation getroffen werden, da sie nicht fest im Raum positioniert sind und somit die Polarisationsrichtung variabel ist.

Um einen Eindruck von möglichen Feldstärken im Bereich eines Fahrzeugs zu gewinnen, sind für die recherchierten Funkdienste maximale Sende- bzw. Strahlungsleistungen und Empfangsfeldstärken aufgeführt, die in verschiedenen Messkampagnen ermittelt wurden. Die Sendeleistung von Basisstationen und Endgeräten kann variabel sein (z.B. im Mobilfunk). Bei den aus der Literatur recherchierten Messreihen wurden primär diejenigen Signalanteile der Basisstationen gemessen, die unabhängig von der Auslastung konstant mit maximaler Sendeleistung abgestrahlt werden. Anschließend wurden die Messwerte auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnet. Die Endgeräte waren so konfiguriert, dass sie mit ihrer maximalen Sendeleistung funken. So werden maximal mögliche Feldstärkepegel erzeugt, die für die „EMV-Worst-Case“-Betrachtungsweise von Interesse sind.

In der Recherche werden nicht nur fahrzeuginterne Quellen, sondern auch fahrzeugexterne, für das vernetzte und autonome Fahren relevante Quellen, berücksichtigt. Die Recherche umfasst Funkdienste aus den Bereichen Rundfunk, Allgemeinzuteilungen der Bundesnetzagentur, Mobilfunk, Satellitennavigation und Infotainment. Außerdem werden hauptsächlich Technologien aus dem Verkehrsbereich betrachtet, wobei im Fokus der Frequenzbereich für intelligente Transportsysteme (ITS) bei 5,9 GHz liegt. Diese Funkdienste werden unter dem Begriff *vehicle-to-everything* (V2X) zusammengefasst. Sie dienen zur Kommunikation von Fahrzeug zu Fahrzeug (*vehicle-to-vehicle*, V2V), mit der Verkehrsinfrastruktur (*vehicle-to-infrastructure*, V2I), mit Fußgängern (*vehicle-to-pedestrian*, V2P) sowie mit Datenzentren (*vehicle-to-network*, V2N). Eine detaillierte Betrachtung zu diesem Frequenzband soll aufzeigen,

ob Interferenzen zwischen den ITS-Technologien und anderen Funkanwendungen möglich sind. Das betrifft sowohl die Möglichkeit von mehreren Sendern des gleichen Funkdienstes, als auch Sender unterschiedlicher Funkdienste im gleichen oder angrenzenden Frequenzbereich.

Das elektromagnetische Umfeld des Kfz wird aufgrund der unmittelbaren Nähe vorwiegend durch die Strahlung ausgehend von Endgeräten *innerhalb* des Fahrzeugs bestimmt, wobei hier Angaben zu maximalen Sendeleistungen aus Normen, Standards oder gesetzlichen Bestimmungen recherchiert wurden. Aussagen über maximal vorliegende Feldstärken in der Nähe oder im direkten Kontakt zu einem Endgerät sind schwierig zu treffen, da sich die recherchierten Daten meist auf das Fernfeld einer Strahlungsquelle beziehen. Im Nahfeld des Geräts können weitaus höhere elektrische Feldstärken vorliegen, als die in der Literatur angegebenen Werte. Des Weiteren finden sich in der Literatur häufig Feldstärkewerte, die aus Messungen der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit (EMVU) hervorgegangen sind. Diese Werte wurden gemäß EMVU-Messvorschriften zeitlich gemittelt (z.B. mit einem *root-mean-square* (RMS)-Detektor) erfasst, so dass Peak-Werte nicht gemessen wurden. Um eine Aussage über maximal auftretende Feldstärkepegel für eine „EMV-Worst-Case“-Abschätzung treffen zu können, darf die Strahlung nicht zeitlich gemittelt erfasst werden, auch wenn die Pegelspitzen nur kurz auftreten können (vgl. Teilkapitel 3.3.1.1). Prinzipiell können die recherchierten RMS-Werte allerdings auf Peak-Werte hochgerechnet werden, wenn der Crest-Faktor (Verhältnis von Peak- zu RMS-Wert) bekannt ist. Darüber hinaus wurden im vorliegenden Projekt auch Messungen im Fern- und Nahfeld verschiedener Endgeräte ohne eine Mittelung durchgeführt.

Die folgenden Teilkapitel enthalten ausführliche Informationen und Tabellen zu den recherchierten Inhalten des ersten Arbeitspakets. Im Anhang des vorliegenden Abschlussberichts sind die wichtigsten Informationen pro Funkdienst auch in verkürzten Tabellen als Handreichung zusammengefasst, wobei für ausführliche Beschreibungen auf die Erläuterungen in diesem Kapitel verwiesen wird.

## 2.2 Rundfunk

Ein Großteil der modernen Fahrzeuge besitzt nach wie vor Rundfunkempfänger, daher sollen im Folgenden Daten primär zum Ultrakurzwellen (UKW)-Rundfunk sowie zu den terrestrischen Rundfunktechniken *Digital Audio Broadcasting* (DAB) und *Digital Video Broadcasting – Terrestrial* (DVB-T) gesammelt werden (siehe Tabelle 2.1...Tabelle 2.3). Langfristig soll der UKW-Rundfunk allerdings vollständig von der digitalen Übertragungstechnik DAB abgelöst werden.

Obwohl für Deutschland mittlerweile Amplitudenmodulierte (AM) Rundfunksender keine Rolle mehr spielen, werden sie aufgrund ihrer Bedeutung für den außereuropäischen Markt mit in die Recherche aufgenommen. AM-Sender lassen sich in die drei Kategorien Lang-, Mittel- und Kurzwelle anhand ihrer Frequenz- bzw. Wellenlängenbereiche einteilen. Sie wurden im deutschsprachigen Raum in den vergangenen Jahren abgeschaltet, wobei die letzte noch aktive Sendeanlage am Standort Felsberg-Berus in Deutschland den Betrieb Ende 2019 einstellte. Die EMV-relevanten Parameter des AM-Rundfunks sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

Tabelle 2.5 enthält recherchierte Empfangsfeldstärken der Rundfunksender, die in typischen Alltagsumgebungen gemessen wurden und somit auch in der Fahrzeugumgebung auftauchen können. Die Feldstärkepegel der empfangenen Rundfunksender wurden frequenzselektiv mit einem Spektrumanalysator gemessen.

Tabelle 2.1: Parameter zu UKW

Parameter	UKW	Literatur
Frequenz	87,5 ...108 MHz	[BNA18]
Kanal-/ Signalbandbreite	300 kHz (Kanal) 200 kHz (Signal)	[BNA18], [SBWS06]
Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	-	
Modulation	Frequenzmodulation	[BNA19]
Sendeleistung	bis zu 100 kW	[BNA19]
Polarisation	Primär horizontal	[EMVU20]

Tabelle 2.2: Parameter zu DAB (*coded orthogonal frequency-division multiplexing*, COFDM; *differential quadrature phase-shift keying*, DQPSK)

Parameter	DAB	Literatur
Frequenz	174 ... 230 MHz	[BNA18]
Kanal-/ Signalbandbreite	1,536 MHz (Kanal)	[ETSI17]
Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	COFDM	[BNA19]
Modulation	DQPSK	[ETSI17]
Sendeleistung	bis zu 10 kW	[BNA19]
Polarisation	Primär vertikal	[EMVU20]

Tabelle 2.3: Parameter zu DVB-T (*quadrature phase-shift keying*, QPSK; *Quadraturamplitudenmodulation*, QAM)

Parameter	DVB-T	Literatur
Frequenz	174 ... 223 MHz 470 ... 790 MHz	[BNA18]
Kanal-/ Signalbandbreite	7/8 MHz (Kanal) 6,6/7,6 MHz (Signal)	[SBWS06]
Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	COFDM	[BNA19]
Modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	[BNA19]
Sendeleistung	bis zu mehreren 100 kW	[BNA19]
Polarisation	Vertikal und horizontal	[EMVU20]

Tabelle 2.4: Parameter zu AM

Parameter	AM	Literatur
<b>Frequenz</b>	148,5 ... 283,5 kHz (Langwelle) 526,5 ... 1606,5 kHz (Mittelwelle) 3,95 ... 26,1 MHz (Kurzwellen)	[BNA18]
<b>Kanal-/ Signalbandbreite</b>	9 kHz (Lang-/Mittelwelle) 10 kHz (Kurzwellen)	[BNA18]
<b>Übertragungs-/ Zugriffsverfahren</b>	-	-
<b>Modulation</b>	AM	[BNA19]
<b>Sendeleistung</b>	bis zu 2000 kW (Langwelle) bis zu 1000 kW (Mittelwelle) bis zu 500 kW (Kurzwellen)	[BNA19]
<b>Polarisation</b>	Primär vertikal	[EMVU20]

Tabelle 2.5: Rundfunk Empfangsfeldstärken

<b>UKW-Empfangsfeldstärke (RMS-Wert = Peak-Wert)</b>	<b>Literatur</b>
Mindestversorgung: 0,5 ... 5 mV/m	[ITU98]
Einzelne UKW-Sender: 1,8 ... 8,9 mV/m	[EMVU20]
Median Summe UKW-Sender: 7,9 ... 17,8 mV/m	[SBWS06]
<b>DAB-Empfangsfeldstärke (RMS-Wert bzw. Peak-Wert)</b>	<b>Literatur</b>
Mindestversorgung: 0,07 mV/m bzw. 0,35 mV/m	[SBWS06]
Messung einzelner DAB-Sender: 1,8 ... 2,2 mV/m bzw. 8,9 ... 11,2 mV/m	[EMVU20]
Median Summe DAB-Sender: 0,9 ... 5,6 mV/m bzw. 4,5 ... 28,2 mV/m	[SBWS06]
<b>DVB-T-Empfangsfeldstärke (RMS-Wert bzw. Peak-Wert)</b>	<b>Literatur</b>
Median Summe DVB-T-Sender: 1,8 ... 56,2 mV/m bzw. 8,9 ... 281,8 mV/m	[SBWS06]
1,6 V/m bzw. 7,9 V/m	[SBWS07]
0,4 V/m bzw. 2,0 V/m	[LSUA16]
0,04 ... 0,3 V/m bzw. 0,2 ... 1,6 V/m	[JM13]
<b>AM-Empfangsfeldstärke (Peak-Wert)</b>	<b>Literatur</b>
Langwelle: bis 100 V/m	[FAT93]
Mittelwelle: bis 35 V/m	[FAT93]
Kurzwellen: bis 100 V/m	[FAT93]

Die maximalen Feldstärken, die in der Literatur im Rahmen von Feldmessungen gefunden wurden, betragen 17,8 mV/m (UKW), 5,6 mV/m (DAB), 1,6 mV/m (DVB-T) und 100 V/m (AM). Die Werte für UKW, DAB und DVB-T wurden während einer Messkampagne für das Bundesamt für Strahlenschutz im Großraum München und Nürnberg ermittelt, wohingegen die typischen Empfangspegel für AM-Rundfunk aus der FAT-Schriftenreihe Nr. 101 übernommen wurden.

Die Ergebnisse beziehen sich meist auf zeitliche Mittelungen (RMS-Wert) bzgl. der EMVU, so dass tatsächliche Feldstärkespitzen bei DAB und DVB-T höher sein können. UKW besitzt eine zeitlich konstante Hüllkurve und somit einen Crest-Faktor (Verhältnis von Spitzenwert zu Effektivwert) von eins (0 dB). Die erfassten Feldstärkepegel aus den EMVU-Messreihen entsprechen somit für UKW den Peak-Werten. DAB und DVB-T verwenden ein OFDM-Verfahren für die Signalübertragung, so dass sie eine rauschartige Hüllkurve mit einem nennenswerten Crest-Faktor von 12 bis 14 dB besitzen [Wu19]. Um mögliche Spitzenwerte zu bestimmen, kann der Crest-Faktor auf die recherchierten Empfangspegel addiert werden. So ergeben sich die möglichen Peak-Werte 28,2 mV/m (DAB) und 7,9 V/m (DVB-T).

### 2.3 Allgemeinzuteilungen und ISM-Bänder

In der nachfolgenden Tabelle 2.6 sind diverse Funkquellen aufgelistet, welchen durch Allgemeinzuteilungen der Bundesnetzagentur Frequenzen zugewiesen wurden. Diese Frequenzen sind zur Nutzung durch die Allgemeinheit bestimmt und die damit verbundenen Anwendungen dürfen keine funktechnischen Störungen verursachen. Es werden alle Frequenzen aufgelistet, die entweder in relevante Frequenzbereiche für Funktechnologien am Fahrzeug fallen oder in dessen Umwelt typischerweise auftreten können. Ein Großteil der Anwendungen sind den *Short Range Devices* (SRD) zuzuordnen, welche Funkgeräte mit geringer Ausgangsleistung und somit auch geringer Reichweite umfassen. Darüber hinaus finden sich verschiedenste weitere Anwendungsgebiete in den Allgemeinzuteilungen, wie beispielsweise *Radio-Frequency Identification* (RFID). Ein Großteil der Anwendungen funken in einem *Industrial, Scientific and Medical* (ISM)-Band (s. Tabelle 2.6), das für industrielle, wissenschaftliche, medizinische oder häusliche Nutzung der Allgemeinheit zugeteilt ist. Eine Übersicht aller aktuellen Allgemeinzuteilungen ist unter [BNA19-3] abrufbar.

Zu den ISM-Anwendungen gehören eine Vielzahl von Funkanwendungen, die u.a. auch in Tabelle 2.7 aufgelistet sind. Ortungsradare für Schiffe und Systeme der Verkehrstelematik können auch mit höheren Sendeleistungen funken als die in Tabelle 2.7 angegebenen Werte. So sind auch EIRP-Werte bis zu 80 MW bei Ortungsradaren möglich. Allerdings sind typische Funkanwendungen der ISM-Bänder und Allgemeinzuteilungen darauf ausgelegt andere Funk-systeme nicht zu stören und besitzen daher eher geringe Strahlungsleistungen im Milliwatt- bis unteren Watt-Bereich.

Tabelle 2.6: Auswahl aus Allgemeinzuteilungen und ihren Nutzungsvorschriften (*effective radiated power*, ERP; EIRP = 1,64\*ERP)

Frequenz	Anwendung	Strahlungsleistung	Allgemeinzuteilung	Bemerkung
27,285 MHz	Baustellenwarnsystem (SRD)	10 mW (ERP)	[Vfg48]	Kanalbandbreite: 10 kHz ISM-Band
149,01875 ... 149,11875 MHz	Kurzzeitpeilfunk/Sprachkommunikation	500 mW (ERP)	[Vfg52], [Vfg54]	Kanalbandbreite: 12,5 kHz
169,4 ... 169,475 MHz	Tracking, Tracing, Data Acquisition, SRD	500 mW (ERP)	[Vfg65]	Kanalbandbreite: 50 kHz
174 ... 230 MHz	Drahtlose Mikrofone / Hörhilfen	50 mW (ERP)	[Vfg59], [Vfg91]	Frequenznutzung wie DAB
433,05 ... 433,79 MHz	SRD	10 mW (EIRP)	[Vfg5]	ISM-Band
446 ... 446,2 MHz	Sprachkommunikation	500 mW (ERP)	[Vfg42]	Kanalbandbreite: 12,5 kHz
863 ... 865 MHz	Drahtlose Mikrofone (SRD)	10 mW (ERP)	[Vfg107]	-
865 ... 868 MHz	RFID	0,1...2 W (ERP)	[Vfg4]	-
869,3 ... 869,4 MHz	SRD	10 mW (EIRP)	[Vfg5]	Kanalbandbreite: 25 kHz
869,4 ... 870 MHz	SRD	5...500 mW (EIRP)	[Vfg5]	-
2,446 ... 2,454 GHz	RFID	500 mW (EIRP außerhalb von Gebäuden)	[Vfg4]	ISM

Tabelle 2.7: ISM-Bänder in Deutschland [BNA15]

Frequenzbereich	Maximal zugelassene Feldstärke bzw. Strahlungsleistung
9 ... 10 kHz	Max. magnetische Feldstärke in 10 m Entfernung: 0,13 mA/m
6,765 ... 6,795 MHz	
13,553 ... 13,567 MHz	
24,00 ... 24,25 MHz	
26,957 ... 27,283 MHz	
40,66 ... 40,70 MHz	Max. ERP: 50 nW ... 500 mW
150 MHz	
433,05 ... 434,79 MHz	
2400 ... 2500 MHz	Max. EIRP: 0,01 ... 10 W
5725 ... 5875 MHz	
61 ... 61,5 GHz	
122 ... 123 GHz	
244 ... 246 GHz	

## 2.4 Mobilfunk

Dieses Teilkapitel umfasst die Literaturrecherche zu den EMV-relevanten Parametern von Mobilfunkdiensten. Es wird dabei auf die in Deutschland verbreiteten folgenden Standards eingegangen:

- *Global System for Mobile Communications* (GSM)
- *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) / *High Speed Packet Access* (HSPA)
- *Long Term Evolution* (LTE)

Der neue Mobilfunkstandard 5G ist bisher nur an wenigen Standorten in Deutschland installiert. Eine belastbare Datenbasis zu möglichen Feldstärken liegt daher zum Zeitpunkt der Bearbeitung dieses Projekts nicht vor. Es kann jedoch bereits jetzt abgeschätzt werden, dass bei 5G-Basisstationen aufgrund höherer Sendeleistungen und aufgrund der stärkeren Fokussierung des Antennendiagramms bei Anlagen mit massive MIMO Antennen örtlich begrenzt höhere Feldstärken auftreten können als bei den konventionellen GSM-, UMTS- und LTE-Basisstationen. Die Versteigerung der Frequenzbereiche um 2 GHz und 3,6 GHz fand im Frühjahr 2019 statt [BNA18-1]. Die 5G-Technologie könnte bedeutend für die zelluläre V2X (C-V2X)-Kommunikation werden, da sie noch höhere Datenübertragungsgeschwindigkeiten, geringere Latenzzeiten und eine verbesserte Zuverlässigkeit ermöglicht als der bisher verwendete LTE-Standard.

Allgemein arbeitet Mobilfunk im Duplex-Betrieb, so dass die Bereiche Uplink (UL) und Downlink (DL) getrennt betrachtet werden. UL beschreibt die Verbindung vom mobilen Endgerät zur Basisstation und DL die entgegengesetzte Kommunikationsrichtung. Basisstationen und mobile Endgeräte besitzen unterschiedliche maximale Sendeleistungen, so dass sich auch gemessene Feldstärken im DL und UL unterscheiden können. Es ist zu erwarten, dass im Fahrzeugbereich die UL-Strahlung durch Endgeräte dominieren wird, da diese Geräte in unmittelbarer Nähe der Fahrzeuge verwendet werden oder sogar im Kfz verbaut sind.

In der Literatur sind einige Messergebnisse zur Exposition durch Mobilfunkquellen vorhanden, wobei der Großteil der Feldstärkewerte auf einer zeitlich gemittelten RMS-Messung basieren und nicht in unmittelbarem Kontakt zu Endgeräten ermittelt wurden. Im Rahmen dieses Projektes wurden daher in AP 2 Immissionsmessungen an LTE-Endgeräten durchgeführt, um typische Feldstärken am Kfz verifizieren zu können.

### 2.4.1 GSM

GSM ist der Mobilfunkstandard der 2. Generation und wurde 1990 eingeführt. Dabei wird GSM hauptsächlich für Telefonie eingesetzt, kann aber auch für die leitungsvermittelte Datenübertragung verwendet werden. Die Erweiterung des Standards auf *General Packet Radio Service* (GPRS) und *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE) ermöglicht die paketvermittelte Datenübertragung, die auch in modernen Mobilfunknetzwerken die entsprechende Grundlage bildet [Sau18]. Die folgenden Tabelle 2.8 und Tabelle 2.9 fassen die EMV-relevanten Parameter des GSM-Standards zusammen.



Tabelle 2.8: Frequenzen für GSM in Deutschland [BNA18]

Bezeichnung	DL-Frequenzen	UL-Frequenzen	Kommentar
GSM-R	918 ... 925 MHz	873 ... 876 MHz	Funkanwendung der Eisenbahnen
GSM-900	925 ... 960 MHz	880 ... 915 MHz	auch LTE-900
GSM-1800	1805 ... 1880 MHz	1710 ... 1785 MHz	auch LTE-1800

Tabelle 2.9: EMV-relevante Parameter des GSM-Standards (*time division multiple access*, TDMA; *gaussian minimum shift keying*, GMSK; *phase-shift keying*, PSK)

Parameter	Wert	Literatur
Kanal-/Signalbandbreite	200 kHz (Kanal)	[EMVU20]
Übertragungs-/Zugriffsverfahren	TDMA (gepulst)	[BNA19-2]
Modulation	GMSK, 8-PSK (EDGE)	[Sau18]
Sendeleistung	10-15 W pro Kanal (DL) Max. 1-2 W (UL)	[BFS19-1]
Empfangsfeldstärke DL RMS-Wert bzw. Peak-Wert	5,4 V/m bzw. 7,6 V/m 0,044 V/m bzw. 0,06 V/m	[BSWS07] [DMD12]

Um die Feldstärkepegel von GSM-Signalen zu messen, wird ein Spektrumanalysator mit einer Auflösebandbreite von 200 kHz benötigt. Das GSM-Signal einer Trägerfrequenz im DL ist in acht Zeitschlitzten aufgeteilt, die jeweils ein Endgerät ansprechen können. Wenn also mehr als acht Nutzer in einer Funkzelle versorgt werden sollen, müssen weitere Kanäle, sog. *Traffic Channels*, zugeschaltet werden. Mit der Anzahl der eingeschalteten Kanäle und belegten Zeitschlitzte steigt die abgestrahlte Leistung der Basisstationsantenne, wodurch sie auslastungsabhängig ist. Um die Feldstärkewerte auf das „Worst-Case“-Szenario (alle Kanäle an und alle Zeitschlitzte belegt) hochrechnen zu können, wird die Feldstärke des ersten Kanals, des sog. *Broadcast Control Channels*, gemessen, da dieser unabhängig von der Verkehrsauslastung immer mit maximaler Leistung gesendet wird. Zusammen mit der Information der Netzbetreiber, wie viele Kanäle pro Sektor vorhanden sind, kann die gemessene DL-Feldstärke dann auf maximale Anlagenauslastung hochgerechnet werden [EMVU20].

Für den DL wird ein gemessener Maximalwert von 5,4 V/m in der Literatur angegeben, wobei dieser Wert im Rahmen einer EMVU-Messung ermittelt wurde. GSM verfügt in der ursprünglichen Variante (Modulation GMSK) über keinen nennenswerten Crest-Faktor; bei der EDGE-Modulation beträgt dieser aber typisch 3 dB, so dass sich ein maximaler Peak-Wert von 7,6 V/m ergibt. Elektrische Feldstärkepegel von GSM-Endgeräten im UL wurden in der Literatur nicht gefunden. Für EMVU-spezifische Zulassungen von Endgeräten wird statt der elektrischen Feldstärke die spezifische Absorptionsrate (SAR) bestimmt, die ein Maß für die im menschlichen Gewebe absorbierte Energie beschreibt [EMVU20].

## 2.4.2 UMTS/HSPA(+)

UMTS ist der Nachfolger des Mobilfunkstandards GSM und beinhaltet das leitungsvermittelnde Sprachnetzwerk und das paketvermittelnde Datennetzwerk. HSPA bzw. HSPA+ sind Erweiterungen des UMTS-Mobilfunkstandards, die u.a. durch höhere Modulationsarten schnellere Datenübertragungsraten ermöglichen [Sau18]. Die folgende Tabelle 2.10 fasst EMV-relevante Parameter von UMTS zusammen.

Tabelle 2.10: EMV-relevante Parameter des UMTS-Standards (*wideband code division multiple access, W-CDMA*)

Parameter	Wert	Literatur
<b>Frequenz</b>	1920 ... 1980 MHz (DL), 2110 ... 2170 MHz (UL)	[BNA18]
<b>Kanal-/ Signalbandbreite</b>	5 MHz (Kanal) 4,6 MHz (Signal)	[EMVU20]
<b>Übertragungs-/ Zugriffsverfahren</b>	W-CDMA	[BNA19-2]
<b>Modulation</b>	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	[BNA19-2]
<b>Sendeleistung</b>	20 ... 40 W pro Kanal (DL) Max. 250 mW (UL)	[BFS19-1]
<b>Empfangsfeldstärke DL RMS-Wert bzw. Peak-Wert</b>	5,1 V/m bzw. 16,1 V/m 0,09 V/m bzw. 0,28 V/m	[BSWS07] [DMD12]

Zur EMVU-Bewertung von UMTS-Signalen im DL wird ein Analysator benötigt, der mittels einer codeselektiven Messung die Feldstärke des Pilotsignals, sog. *Common Pilot Channel*, aufnehmen kann. Das Pilotsignal wird mit einer konstanten Leistung abgestrahlt, die einen bestimmten prozentualen Anteil an der maximalen Sendeleistung des Sektors einnimmt. Dieses Verhältnis der Sendeleistungen muss bei den Netzbetreibern erfragt werden. Anschließend kann damit die gemessene Feldstärke auf maximale Anlagenauslastung für EMVU-Betrachtungen hochgerechnet werden [EMVU20].

Im DL wird in der Literatur als maximaler Wert der elektrischen Feldstärke 5,1 V/m angegeben, wobei dieser Wert für eine EMVU-Studie ermittelt wurde. Der Crest-Faktor bei UMTS-Basisstationen beträgt nach [Wu19] typisch 8 ... 10 dB, so dass sich ein maximaler Peak-Wert von 16,1 V/m ergibt. Analog zur GSM-Recherche wurden keine Feldstärkeangaben für Endgeräte im UL gefunden. Für die Zulassung von UMTS-Endgeräten wird ebenfalls der SAR-Wert verwendet.

## 2.4.3 LTE(+)

LTE ist der nachfolgende Mobilfunkstandard für UMTS und verwendet das Übertragungsverfahren *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM), um negative Effekte der Mehrwegeausbreitung zu minimieren. OFDM überträgt nicht mehr einen langen Datenstrom, sondern zerteilt diesen in mehrere Teildatenströme, die verschiedenen orthogonalen Unterträgern zugeordnet werden. Wenn der Datenstrom in kleinere Abschnitte aufgeteilt wird, kann die

Symbolrate pro Unterträger verringert werden. Ist die Symboldauer somit pro Unterträger deutlich höher als die maximale Laufzeitverzögerung des Kanals, welche durch Mehrwegeausbreitung auftritt, wird der Effekt der Inter-Symbol-Interferenz (ISI) minimiert. ISI tritt auf, wenn sich benachbarte Datensymbole aufgrund von Laufzeitverzögerungen überlappen und somit negativ interferieren können. Bei größerer Bandbreite können mehrere Unterträger verwendet werden und somit auch mehr Daten verschickt werden, um die Datenrate zu erhöhen [Sau18].

LTE wurde stetig weiterentwickelt, so dass der verbesserte Standard *LTE-Advanced* (LTE+) eingeführt wurde. LTE+ ermöglicht aufgrund der technischen Verbesserungen höhere Datenraten und kürzere Latenzzeiten als sein Vorgänger.

Die folgenden Tabelle 2.11 und Tabelle 2.12 enthalten die derzeit gültigen Frequenzbänder für LTE und die EMV-relevanten Parameter des Standards. Mitte 2019 wurden allerdings die Frequenzen 1920 ... 1980 MHz, 2110 ... 2170 MHz und 3400 ... 3700 MHz in Deutschland von der Bundesnetzagentur neu versteigert, so dass es anschließend dort zu Veränderungen in den Nutzungsbereichen kommen kann [BNA18-1].

Tabelle 2.11: LTE-Frequenzen, grün hervorgehobene Bänder werden bevorzugt in Deutschland genutzt [BNA18]

Band	DL-Frequenzen	UL-Frequenzen	Kommentar
700	703 ... 733 MHz	758 ... 788 MHz	Möglich für 5G
800	791 ... 821 MHz	832 ... 862 MHz	-
900	925 ... 960 MHz	880 ... 915 MHz	Auch GSM-900
1500	1452 ... 1492 MHz	-	Vorher L-Band für DAB; nur DL
1800	1805 ... 1880 MHz	1710 ... 1785 MHz	Auch GSM-1800
2000	2110 ... 2170 MHz	1900 ... 1980 MHz 2010 ... 2025 MHz	Auch UMTS; möglich für 5G
2600	2620 ... 2690 MHz	2500 ... 2570 MHz	-
	2570 ... 2620 MHz		ungepaart
3500	3510 ... 3590 MHz	3410 ... 3490 MHz	Möglich für 5G

Tabelle 2.12: EMV-relevante Parameter des LTE-Standards (*single carrier frequency division multiple access*, SC-FDMA; *orthogonal frequency division multiplexing access*, OFDMA)

Parameter	Wert	Literatur
Kanal-/ Signalbandbreite	1,08 ... 18 MHz (Signal) 1,4 ... 20 MHz (Kanal)	[EMVU20]
Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	OFDMA mit 15 kHz Trägerabstand (DL) SC-FDMA mit 15 kHz Trägerabstand (UL)	[BNA19-1]
Modulation	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	[BNA19-1]
Sendeleistung	20 ... 50 W pro Kanal (DL) Max. 200 mW (UL)	[BFS19]
Polarisation	+/- 45° (am Sender)	[EMVU20]

Da die abgestrahlte Leistung der LTE-Basisstationsantennen verkehrslastabhängig ist, wird auch hier für die Erfassung der Feldstärkepegel im „Worst-Case“-Szenario ein Analysator benötigt, der LTE codeselektiv messen kann. Jeder Sektor sendet konstante Referenzsignale aus, wobei alle MIMO-Pfade gemessen werden müssen. Pro Sektor wird die Feldstärke beider Referenzsignale vom Spektrumanalysator ermittelt. Wenn vom Netzbetreiber der prozentuale Anteil der Leistung des Referenzsignals an der Gesamtleistung der Zelle bekannt ist, kann dieses Verhältnis zur Hochrechnung auf maximale Anlagenauslastung für EMVU-Betrachtungen verwendet werden [EMVU20].

Um Feldstärken ausgehend von LTE-Endgeräten zu messen, muss das Frequenzband ermittelt werden, in welchem diese im Uplink senden. Mit Hilfe eines Spektrumanalysators kann dann im entsprechenden Frequenzband die maximale Feldstärke gemessen werden, wobei das Endgerät möglichst so konfiguriert werden sollte, dass es mit maximaler Leistung sendet. Für diese Messungen sollte ein LTE-Basisstationssimulator verwendet werden, der den UL des Endgeräts steuern kann. So können Ergebnisse unter definierten Laborbedingungen gewonnen werden. Im Rahmen von AP 2 vorliegenden Projektes werden Messungen durchgeführt, um maximal mögliche Feldstärkepegel ausgehend von LTE-Endgeräten zu ermitteln.

Die folgende Tabelle 2.13 listet recherchierte Messergebnisse zu LTE-Feldstärkewerten auf, die sowohl im DL als auch im UL gemessen wurden, wobei die Werte im Rahmen von EMVU-Messungen ermittelt wurden und somit RMS-Werten entsprechen. Der Crest-Faktor bei LTE-Basisstationen beträgt nach [Wu19] typisch 6...10 dB, so dass sich ein maximaler Peak-Wert aufseiten des Downlinks von 11,6 V/m ergibt.

Tabelle 2.13: LTE-Empfangsfeldstärken

Frequenz	LTE-Empfangsfeldstärke (RMS-Wert bzw. Peak-Wert)	Literatur
2640 MHz, DL	3,5 V/m bzw. 11,0 V/m	[LDS14]
LTE-800, DL	2,9 V/m bzw. 9,0 V/m	[BSW13]
LTE-1800, DL	3,7 V/m bzw. 11,6 V/m	[BSW13]
LTE-800, UL	3,0 V/m bzw. 9,6 V/m	[Bor15]
LTE-800, UL	2,5 V/m bzw. 7,8 V/m	[Bor15]
LTE-800, UL	3,0 V/m bzw. 9,5 V/m	[Bor15]

## 2.5 Satellitennavigation

Satellitennavigationssysteme werden im Fahrzeugbereich verwendet, um den aktuellen Standort bestimmen zu können. Mit Hilfe dieser Positionsdaten können Navigationssysteme mögliche Fahrtrouten zu einer Zieladresse berechnen. Dabei sind in modernen Fahrzeugen bereits Navigationssysteme direkt eingebaut, wobei auch eine Vielzahl an externen Endgeräten zur Navigation auf dem Markt verfügbar ist. Bei der V2X-Kommunikation werden u.a. die Positionsdaten der Verkehrsteilnehmer ausgetauscht, die über die Satellitennavigation bestimmt wurden. Weltweit gibt es mehrere Navigationssysteme, die durch verschiedene Länder betrieben werden. Für den deutschen Markt besonders relevant sind das US-amerikanische Navigationssatellitensystem NAVSTAR GPS (*Global Positioning System*) und das europäi-

sche Pendant Galileo, weswegen die Parameter dieser Systeme im Folgenden aufgeführt werden. Darüber hinaus existieren das russische GLONASS- und das chinesische Beidou-Navigationssystem.

### 2.5.1 Galileo

Galileo ist das von der europäischen Union beauftragte Satellitennavigationssystem, das seit 2016 für die Allgemeinheit verfügbar ist. Das System wird von der europäischen Weltraumorganisation ESA betrieben und verwendet 30 Satelliten, die alle seit Ende 2019 betriebsbereit sind. Die folgenden Tabelle 2.14 und Tabelle 2.15 listen die Frequenzbänder und EMV-relevanten Parameter des Systems auf.

Tabelle 2.14: Frequenzbänder des Galileo Satellitennavigationssystems [Man10]

Bezeichnung	Frequenzband	Mittenfrequenz
E5a/b	1164 ... 1215 MHz	1176,45 MHz (E5a), 1207,14 MHz (E5b)
E6	1260 ... 1300 MHz	1278,75 MHz
E1	1559 ... 1591 MHz	1575,42 MHz

Tabelle 2.15: EMV-relevante Parameter des Galileo Satellitennavigationssystems (*code division multiple access, CDMA; binary phase-shift keying, BPSK; binary offset carrier, BOC; alternative BOC, AltBOC; right hand circular polarisation, RHCP*)

Parameter	Wert	Literatur
Kanal-/Signalbandbreite	24 MHz (E5), 32 MHz (E1), 40 MHz (E6)	[Man10]
Übertragungs-/Zugriffsverfahren	CDMA	[ESA19]
Modulation	BPSK, BOC, AltBOC	[Man10]
Sendeleistung	50 W (Nennwert Satellit)	[Man10]
Polarisation	RHCP	[Man10]
Min. Empfangsleistung	-155 ... -157 dBW	[EAKS07]

### 2.5.2 GPS

NAVSTAR GPS ist das globale Satellitennavigationssystem, das seit den 1970er Jahren vom US-amerikanischen Verteidigungsministerium entwickelt wurde. Ursprünglich wurde das System im Militär eingesetzt, wobei seit dem Jahr 2000 GPS auch für die Allgemeinbevölkerung zur genauen Positionsbestimmung verwendet werden kann. Seitdem wird es häufig im Verkehrsbereich zur Navigation eingesetzt. Die Tabelle 2.16 und Tabelle 2.17 listen die Frequenzbänder und EMV-relevanten Parameter von GPS auf.

Tabelle 2.16: Frequenzbänder des NAVSTAR GPS Satellitennavigationssystems [Man10]

Bezeichnung	Frequenz	Mittenfrequenz
L5	1164 ... 1188 MHz	1176,454 MHz
L2	1215 ... 1239 MHz	1227,6 MHz
L1	1563 ... 1587 MHz	1575,42 MHz

Tabelle 2.17: EMV-relevante Parameter des NAVSTAR GPS Satellitennavigationssystems

Parameter	Wert	Literatur
Kanal-/Signalbandbreite	24 MHz	[Man10]
Übertragungs-/Zugriffsverfahren	CDMA	[ESA19-1]
Modulation	BPSK, BOC	[ESA19-1]
Sendeleistung	50 W (Nennwert Satellit)	[Man10]
Polarisation	RHCP	[Man10]
Min. Empfangsleistung	-154 ... -166 dBW (L1, L2, L5)	[EAKS07], [NAV19]
Mittl. Empfangsleistung	-163,50 ... -157,5 dBW (L1, L2, L5)	[NAV19]
Max. Empfangsleistung	-150 dBW (L5)	[NAV19]

Die Empfangsleistung auf der Erde für die Satellitennavigation ist mit maximal -150 dBW so gering, dass diese Funksignale für eine Betrachtung der EMV-Störwirkung auf Fahrzeuge irrelevant sind.

## 2.6 WLAN

*Wireless Local Area Network* (WLAN) ist eine Funktechnologie zur drahtlosen Vernetzung, die von IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) mit dem 802.11-Standard spezifiziert wurde. Die Technologie basiert überwiegend auf den Protokollen der drahtgebundenen LAN-Technik, wobei die physikalische Bitübertragungsschicht (PHY-Layer) für die drahtlose Übertragung mit Funkwellen komplett neu entwickelt wurde. Im Zuge von Weiterentwicklungen der Funkübertragung wurden mehrere PHY-Layer standardisiert, die mit verschiedenen Buchstaben gekennzeichnet sind (z.B. 802.11a / 802.11g / 802.11p). Die verschiedenen Standards unterscheiden sich u.a. in den genutzten Frequenzbereichen und maximalen Datenraten. Die EMV-relevanten Parameter der 802.11-Standards sind in Tabelle 2.18 zusammengefasst.

WLAN besitzt eine gepulste Signalstruktur, wobei die rechteckförmigen Impulse aufgrund ihres rauschartigen Pulsdachs einen nennenswerten Crest-Faktor haben. Bei der Erfassung der WLAN-Feldstärke mit einem Spektrumanalysator müssen diese Signaleigenschaften berücksichtigt werden. Um die maximale Feldstärke einer Pegelspitze zu erfassen, sollte keine Mittelung mit einem RMS-Detektor bei der Messung durchgeführt werden. Für EMVU-Bewertungen ist allerdings eine Mittelung notwendig, um die Signale nicht in Höhe des Crest-Faktors zu überbewerten. In der Literatur finden sich daher häufig gemittelte Feldstärkewerte, die in ihren Ergebnissen den Crest-Faktor nicht enthalten. Um Werte für maximal mögliche

Pegelspitzen zu erhalten, wurden im Rahmen von AP 2 vorliegenden Projektes auch Feldstärkemessungen an WLAN-Geräten durchgeführt. Recherchierte Empfangspegel von WLAN, die in EMVU-Studien ermittelt wurden, sind in Tabelle 2.19 aufgelistet.

Tabelle 2.18: EMV-relevante Parameter der WLAN-Standards (*direct sequence spread spectrum*, DSSS; *differential BPSK*, DBPSK)

Parameter	Wert	Literatur
<b>Frequenz</b>	2400 ... 2483,5 MHz, 5150 ... 5350 MHz, 5470 ... 5725 MHz	[Vfg151], [Vfg10]
<b>Kanalbandbreite</b>	20 MHz, 40 MHz, 80 MHz, 160 MHz	[Sau18]
<b>Übertragungs-/ Zugriffsverfahren</b>	DSSS, OFDM	[Sau18]
<b>Modulation</b>	DBPSK, DQPSK, BPSK, QPSK, 16/64/256-QAM	[Sau18]
<b>Sendeleistung</b>	2,4 GHz – Band: max. 0,1 W EIRP Unteres 5 GHz – Band: max. 0,2 W EIRP Oberes 5 GHz – Band: max. 1 W EIRP Sonderfall für Kfz im Frequenzbereich 5150...5250 MHz: max. 0,025 W	[Vfg151], [Vfg10]
<b>Interferenz</b>	Bluetooth (geringe Interferenz bei wenig Auslastung)	[Sau18]

Tabelle 2.19: WLAN-Empfangsfeldstärken

WLAN-Empfangsfeldstärken (RMS-Wert)	Literatur
2,1 V/m im Abstand 0,5 m zum Access Point	[Bor15]
4,0 V/m im Abstand 0,5 m zum WLAN-Adapter	[Hof17]
3,0 V/m im Abstand 0,5 m zum Smartphone	[Hof17]

## 2.7 Bluetooth

Bluetooth ist eine Funktechnologie zur drahtlosen Verbindung zwischen elektronischen Geräten und wird im Fahrzeug häufig zwischen Smartphones und Kfz-Audioendgeräten zur Telefonie oder Musikwiedergabe verwendet. Damit Endgeräte herstellerübergreifend über Bluetooth kommunizieren können, wurde diese Technologie von der IEEE-Arbeitsgruppe 802.15 standardisiert. Neben dem klassischen Bluetooth existiert mittlerweile auch die Erweiterung *Bluetooth Low Energy* (BLE), die einen geringeren Stromverbrauch besitzt. Die EMV-relevanten Parameter der Bluetooth-Technologien sind in Tabelle 2.20 zusammengefasst.

Da Bluetooth mit wechselnder Trägerfrequenz Daten überträgt, muss vor der Immissionsmessung mit einem Spektrumanalysator ein geeigneter Frequenzbereich ermittelt werden, der vorwiegend vom betrachteten Bluetooth-Signal und nicht von WLAN genutzt wird. Im identifizierten Frequenzbereich kann dann der maximale Pegel des Signals bestimmt werden [Hof17]. In der Literatur wurden Bluetooth-Feldstärken für EMVU-Betrachtungen gemessen, so dass die Ergebnisse gemittelten RMS-Feldstärken entsprechen und nicht die maximal möglichen Peak-Werte wiedergeben. Im Rahmen vorliegenden Projektes wurden daher in AP 2 auch Bluetooth-Signale gemessen, um Feldstärken gemäß der „EMV-Worst-Case“-Betrachtung zu erhalten.

Tabelle 2.20: EMV-relevante Parameter der Bluetooth-Standards (*frequency hopping spread spectrum*, FHSS; *gaussian frequency shift keying*, GFSK)

Parameter	Wert	Literatur
Frequenz	2400 ... 2483,5 MHz	[Hof17]
Kanal-/Signalbandbreite	1 ... 2 MHz	[Hof17]
Übertragungs-/Zugriffsverfahren	FHSS	[Sau18]
Modulation	GFSK, DQPSK, 8PSK	[Sau18]
Sendeleistung	1 ... 100 mW	[Sau18]
Interferenz	WLAN (geringe Interferenz bei wenig Auslastung)	[Sau18]
Empfangsfeldstärke (RMS-Wert)	1,3 V/m im Abstand 0,5 m zum Smartphone	[Hof17]

## 2.8 Verkehr

Für deutsche Verkehrssysteme ist der Einsatz verschiedener Funkanwendungen durch die Bundesnetzagentur spezifiziert. In verschiedenen Allgemeinzuteilungen werden dabei Frequenzbereiche und maximale Strahlungsleistungen für ITS, Fahrzeugradare und diverse weitere Verkehrstelematiksysteme geregelt. Die nachfolgenden Abschnitte zeigen einen Überblick über diese Regulierungen.

Da die ITS-Funktechnologien aufgrund ihres Neuheitswertes derzeit besonders im Fokus bei der Betrachtung von EMV-Störungen im Fahrzeugbereich stehen, wurde zusätzlich eine Recherche zu ITS-Regularien in der USA durchgeführt. Die Ergebnisse und Unterschiede zu deutschen bzw. europäischen Regularien sind ebenfalls in diesem Kapitel zusammengefasst.

### 2.8.1 Fahrzeugradare

Diverse Assistenzsysteme in modernen Fahrzeugen verwenden Radarsysteme, um die Entfernung, den Winkel und die Relativgeschwindigkeiten von Objekten im Umkreis des Fahrzeugs bestimmen zu können. Die Radarsensorik wird dabei häufig von Kameras, Ultraschall, Laser und weiteren Sensoren unterstützt, um die Umwelt des Fahrzeuges bestimmen zu können. Ursprünglich nutzen diese Radarsysteme das 24 GHz-Band, wobei sowohl schmalbandige als auch breitbandige Systeme verwendet werden. Die schmalbandige Radartechnik arbeitet über 200 MHz zwischen 24,05 GHz und 24,25 GHz, wohingegen die Ultra-Breitband (UWB)-Systeme 5 GHz von 21,65 GHz bis 26,65 GHz verwenden [NMN18]. Die UWB-Technologie kann für Nahbereichsfunkkommunikation und -sensorik in diversen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. Allerdings läuft die Nutzung der UWB-Technik bis zum Jahr 2022 aus und wird durch Kfz-Radarsysteme im Frequenzbereich von 76 GHz bis 81 GHz ersetzt. Der Wechsel auf den höheren Frequenzbereich ist mit mehreren Verbesserungen für die Radarsysteme verbunden. So sollen diese Systeme eine höhere Genauigkeit und Auflösung bei Entfernungsmessungen ermöglichen. Dafür werden frequenzmodulierte Dauerstrich-Radare verwendet, die über einen Frequenzvergleich des empfangenen Reflexionssignals und des gesendeten Referenzsignals die Entfernung zum reflektierenden Objekt bestimmen können.



Die nachfolgende Tabelle 2.21 fasst die Frequenzbänder und die maximal erlaubten Strahlungsleistungen für automobiler Radarsysteme in Deutschland zusammen.

Tabelle 2.21: Parameter für automobiler Radarsysteme in Deutschland [GBM10], [Vfg125]

	24 GHz UWB	24 GHz ISM	77 GHz	79 GHz
<b>Frequenzbereich in GHz</b>	21,65 ... 26,65	24 ... 24,25	76 ... 77	77 ... 81
<b>Max. mittl. Leistungsdichte (EIRP)</b>	0,07 $\mu$ W/MHz	-	-	126 $\mu$ W/MHz
<b>Max. EIRP</b>	-	0,1 W	316 W	316 W

Die Anwendung von UWB-Technologien, die in Kraftfahrzeugen eingesetzt werden dürfen, ist in der Allgemeinverteilung Vfg. 73/2018 der Bundesnetzagentur geregelt [Vfg73]. Die maximale mittlere spektrale Leistungsdichte dieser Geräte liegt bei 0,07  $\mu$ W/MHz. Allgemein werden Fahrzeugradarsysteme von der Bundesnetzagentur zu den Verkehrstelematiksystemen in der Allgemeinverteilung Vfg. 125/2017 zugeordnet, wobei maximale EIRP-Werte bis 316 W möglich sind [Vfg125].

## 2.8.2 Intelligente Transportsysteme bei 5,9 GHz in Deutschland

Für die V2X-Kommunikation werden Transportsysteme benötigt, die entsprechende Funkanwendungen in diesem Bereich unterstützen. Die Bundesnetzagentur setzt für diese Systeme in der Allgemeinverteilung Vfg. 69/2009 Frequenzbereiche und maximale EIRP-Werte fest (s. Tabelle 2.22) [Vfg69]. Derzeit etablieren sich die zwei Kommunikationssysteme ITS-G5 und C-V2X, die beide im gleichen Frequenzbereich eingesetzt werden sollen. Um für den ITS-relevanten Frequenzbereich um 5,9 GHz mögliche interferierende Funkssysteme zu ermitteln, wurde sowohl der europäische als auch der deutsche Frequenzplan detailliert betrachtet. Die Ergebnisse dazu sind in der Tabelle 2.23 aufgelistet.

Viele Funkanwendungen in der Nähe des ITS-Frequenzbereichs sind im ISM-Band angesiedelt und funken nicht im sicherheitskritischen ITS-Frequenzband außer Anwendungen vom Militär, von Satelliten und Tank-Radare. Von diesen Funksystemen sind eher keine Störungen durch Interferenzen zu erwarten, da sie sehr geringe Sendeleistungen besitzen oder im Verkehrsumfeld nicht auftreten. Nur die Funkanwendung *Maritime Broadband Radio* (MBR) für Kommunikation im maritimen Bereich verwendet den gleichen Frequenzbereich und könnte aufgrund der hohen maximalen Sendeleistung möglicherweise die V2X-Kommunikation stören. Damit MBR-Sender die ITS-Kommunikation im küstennahen Bereich nicht stören, soll ein Mindestabstand von 77 km zwischen den Systemen eingehalten werden [ECC17]. Laut dem europäischen Ausschuss für elektronische Kommunikation kann es auf küstennahen Straßen trotz der 77 km Abstand zu Interferenzen kommen, wobei diese als eher unwahrscheinlich bewertet wurden und somit keine weiteren Schutzmaßnahmen vorgesehen sind [ECC17].

Tabelle 2.22: Allgemeinzuteilung für ITS [BNA18], [Vfg69]

Frequenz	Max. spektrale Leistungsdichte	Max. äquivalente Strahlungsleistung	Bemerkung
5855 ... 5875 MHz	0,2 W/MHz (EIRP)	2 W (EIRP)	-
5875 ... 5905 MHz			Ausschließlich für sicherheitsbezogene Funkanwendungen
5905 ... 5925 MHz	-	-	Zukünftige ITS-Anwendungen geplant

Tabelle 2.23: Potentiell interferierende Funkanwendungen in Nähe zum ITS-Frequenzbereich bei 5,9 GHz in Deutschland [BNA18], [ECC18] (*Broadband Fixed Wireless Access*, BFWA; *Wireless Industrial Application*, WIA; *Direct Air-to-Ground Communication*, DA2GC)

Frequenz	Max. Strahlungsleistung	Anwendung	Bemerkung
5795 ... 5815 MHz	8 W	Elektronische Mauterhebung	ISM-Band
5725 ... 5875 MHz	4 W	BFWA	ISM-Band
	25 mW	SRD	
	400 mW	WIA	
5850 ... 5875 MHz	1 W	Betriebsfunk	ISM-Band
5850 ... 5875 MHz	5 W	Demonstrationsfunk	ISM-Band
5855 ... 5875 MHz	- (s. EN 303 316)	DA2GC (breitbandige Flugzeuganbindung)	ISM-Band, endgültige Zuteilung auf europäischer Ebene noch ausstehend
5852 ... 5872 MHz 5880 ... 5900 MHz	316 W	MBR	ISM-Band und ITS-Frequenzbereich
5850 ... 5925 MHz	-	Militär	Koordination durch Bundesnetzagentur
5850 ... 5925 MHz	3 mW	Satelliten-Aufwärtsverbindung	Internationale Koordination
4500 ... 7000 MHz	250 mW	SRD	Tank Level Probing Radar

Für die elektronische Mauterhebung wird in Europa ein Frequenzband verwendet, das direkt unterhalb des für ITS vorgesehenen Bereichs liegt. Um gegenseitige Störungen der Funkanwendungen durch Interferenzen zu vermeiden, veröffentlichte das europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) einen technischen Report mit einem Leitfaden zur Koexistenz beider Systeme [ETSI09-1]. So werden beispielsweise Obergrenzen für Emissionen von ITS-G5 in Frequenzbereichen außerhalb ihrer Frequenzzuteilung beschrieben, um die Mautsysteme nicht zu stören. Diese Begrenzung der Nebenband-Emissionen ist in der europäischen Norm zu ITS-G5 bereits als technische Anforderung enthalten [ETSI16].

### 2.8.3 Intelligente Transportsysteme bei 5,9 GHz in den USA

Im Folgenden werden die Regularien für den ITS-Einsatz in den USA gezeigt, die unter dem Begriff „*Wireless Access in Vehicular Environments*“ (WAVE) vereint werden. Diese Erweiterung der Recherchearbeit umfasst Informationen zur Frequenzuteilung von ITS und den jeweiligen erlaubten Sendeleistungen in den USA.

Die Spezifikationen von WAVE sind in amerikanischen Standards festgelegt, die Unterschiede zu den ITS-G5-Standards in Europa aufweisen. Das unterste Protokoll des *Physical Layer* basiert in beiden Regionen allerdings auf dem IEEE-Standard 802.11p. Nichtsdestotrotz ist die Frequenzuteilung für ITS in den USA unterschiedlich zu der in Deutschland bzw. Europa und ist in Tabelle 2.24 aufgelistet.

Tabelle 2.24: ITS-Frequenzuteilung der USA [FCC02]

Frequenz	Max. Sendeleistung	Max. äquivalente Strahlungsleistung (EIRP)	Bemerkung
5850 ... 5855 MHz	-	-	Vorbehalten, Spezifikation noch ausstehend
5855 ... 5865 MHz	28,8 dBm (0,76 W)	33 dBm (2 W)	Kanal 172
5865 ... 5885 MHz	28,8 dBm (0,76 W)	33 dBm (2 W)	Kanal 175 (174+176) 2 x 10 MHz oder 1 x 20 MHz
5885 ... 5895 MHz	28,8 dBm (0,76 W)	33 dBm (2 W) / 44,8 dBm (30 W)	Kanal 178
5895 ... 5915 MHz	20 dBm (0,1 W)	23 dBm (0,2 W)	Kanal 181 (180+182) 2 x 10 MHz oder 1 x 20 MHz
5915 ... 5925 MHz	28,8 dBm (0,76 W)	40 dBm (10 W)	Kanal 184

Die EIRP ist mit 44,8 dBm im Kanal 178 angegeben, wobei diese nur für öffentliche ITS-Stationen verwendet werden darf. Privat genutzte OBU's dürfen nur eine maximale EIRP von 33 dBm nutzen. Die maximale Sendeleistung der Geräte ist vom IEEE-Standard 802.11p auf 28,8 dBm begrenzt [IEEE10], wobei der Unterschied zu den höheren EIRP-Angaben der Behörden aus den jeweiligen erlaubten Antennengewinnen resultiert [FCC02].

Die Kanalbandbreiten variieren zwischen 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz. Die 10 MHz - Kanäle 174+176 und 180+182 können zu den 20 MHz breiten Kanälen 175 und 181 zusammengefasst werden. Der 5 MHz breite Kanal zu Beginn des ITS-Spektrums ist noch nicht weiter spezifiziert, so dass die Festlegung der maximalen EIRP und des Anwendungsbereichs in den USA noch aussteht.

In den USA wird ein weiteres Frequenzband bei 900 MHz (902 ... 928 MHz) für Kommunikationstechnologien im Verkehr eingesetzt. Dieser Bereich wird vor allem für die elektronische Mauterhebung und -kontrolle genutzt und ist eher ungeeignet für die V2X-Kommunikation, da der Frequenzbereich in den USA bereits von vielen Funkgeräten genutzt wird und nicht genügend Bandbreite für weitere Anwendungen bereitstellt. Im Gegensatz dazu ist das Interferenzpotential im 5,9 GHz - Band geringer, da dieses nur wenigen staatlich kontrollierten Anwendungen zugeordnet ist, die in Tabelle 2.25 aufgelistet sind.

Tabelle 2.25: Funkanwendungen im ITS-Frequenzbereich bei 5,9 GHz in den USA [FCC02], [FCC20], [CFR97]

Frequenz	Anwendung	Bemerkung
5850 ... 5925 MHz	Fixed Satellite Service (FSS) Uplink	Antennen zur geostationären Umlaufbahn gerichtet, ITS nicht in Nähe der Erdstationen (wenige Stationen vorhanden)
5850 ... 5925 MHz	Militär	Radarsysteme (staatliche Anwendung, wenige Stationen vorhanden)
5650 ... 5925 MHz	Amateurfunk	Ergänzung im US-Frequenzplan: nicht-staatliche Funkanwendungen nur für ITS zwischen 5850 – 5925 MHz erlaubt
5725 ... 5875 MHz	ISM-Band	Keine vollständige Überlappung mit ITS-Frequenzband

Da im 5,9 GHz-Bereich in den USA bereits Funkanwendungen existieren, wurden 75 MHz für ITS zugeordnet, um einen störungsfreien Betrieb zu ermöglichen. Gemäß einer Prüfung der *Federal Communications Commission* [FCC02] sind Interferenzen zu Anwendungen aus den Bereichen Militär und FSS möglich, wurden aber als unbedenklich eingestuft. Diese Bereiche werden staatlich reguliert, so dass bei der Errichtung neuer Basisstationen Interferenzaspekte zu ITS berücksichtigt werden. Um Störungen zu nicht-staatlichen Funkanwendungen zu vermeiden, wurde im Bundesrecht der USA festgelegt, dass im Frequenzbereich 5850 ... 5925 MHz ausschließlich ITS-Anwendungen funken dürfen und somit die Nutzung anderweitiger ISM- bzw. Amateurfunkanwendungen dort unterbunden wird.

Abbildung 2.1 zeigt graphisch für einen Vergleich, welche Regularien für das Spektrum um 5,9 GHz in den USA und in Europa derzeit gültig sind. Es wurden jeweils der Frequenzbereich von 5855 ... 5925 MHz den ITS-Anwendungen zugeteilt, wobei in den USA noch weitere 5 MHz zu Beginn des Spektrums dafür reserviert wurden. Europa verwendet fest Kanäle mit einer Bandbreite von 10 MHz, wohingegen in den USA 5 MHz, 10 MHz und 20 MHz möglich sind. Bezüglich der EIRP sind in Europa maximal 33 dBm erlaubt, in den USA hingegen bis zu 44,8 dBm für RSUs der öffentlichen Einrichtungen. Die maximale Sendeleistung ist jedoch sowohl in den USA als auch in Europa durch den Standard 802.11p auf 28,8 dBm begrenzt.

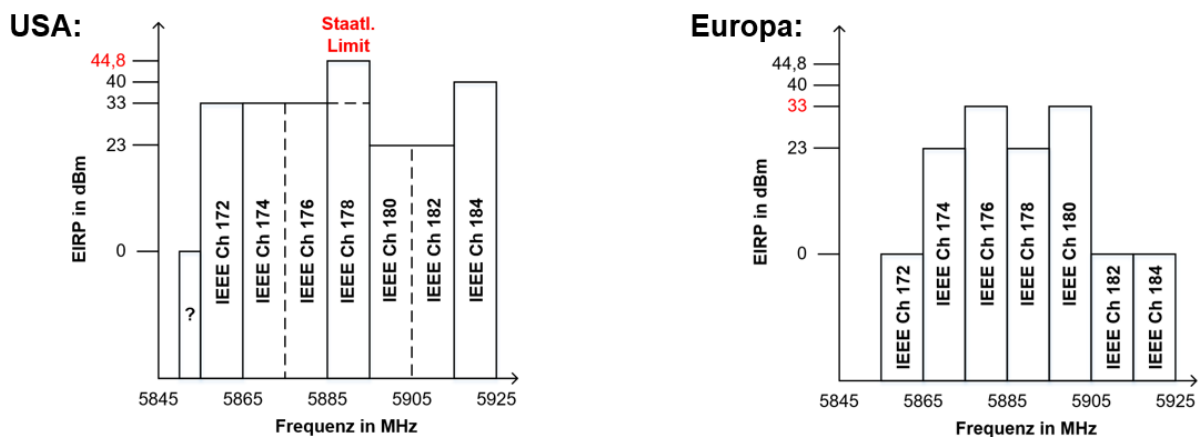


Abbildung 2.1: Vergleich der ITS-Frequenzbereiche und der erlaubten EIRP in USA und Europa

Ende 2019 wurde in den USA diskutiert, ob der Frequenzbereich für ITS gekürzt werden und die somit freiwerdenden Frequenzen wieder unlicenzierten Funkanwendungen (z.B. WLAN) zugeteilt werden sollte [FCC19-1]. Grund für die Diskussion sei, dass in den letzten zwei Dekaden 75 MHz im Spektrum für ITS-Anwendungen reserviert, aber nicht effektiv genutzt wurden. Es wird vorgeschlagen, die oberen 30 MHz (5895 ... 5925 MHz) weiterhin für ITS zu reservieren und die unteren 45 MHz (5850 ... 5895 MHz) wieder freizugeben. Derzeit sind die 75 MHz noch für ITS im Frequenzplan der USA reserviert [FCC20].

## 2.9 Zusammenfassung der Recherche

Vorliegendes Kapitel enthält die Ergebnisse der Recherche zu relevanten Funkdiensten der Umwelt beim Kfz (AP1). Es wurden Funkanwendungen aus den Bereichen

- Rundfunk
- Allgemeinzuteilungen und ISM-Bänder
- Mobilfunk
- Satellitennavigation
- WLAN
- Bluetooth
- Verkehr

betrachtet, wobei ein besonderer Fokus auf das Frequenzband bei 5,9 GHz gelegt wurde, der ITS-Anwendungen in Deutschland zugeteilt ist. Eine graphische Übersicht über den Frequenzbereich von 1 MHz bis 6 GHz mit den entsprechenden Funkdiensten ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Die Grafik zeigt maßstabsgetreu die Frequenzbereiche der recherchierten Funkquellen und wo sich Dienste einen bestimmten Frequenzbereich teilen. Die einzelnen Frequenzbänder im Mobilfunk (LTE, UMTS, GSM) sind in Deutschland nochmals unterteilt, so dass einzelne Teilbereiche bestimmten Mobilfunkbetreibern in Deutschland zugeordnet sind. Es treten im Mobilfunk also keine störenden Interferenzen zwischen den verschiedenen Anbietern oder Technologien auf. Diese feine Unterteilung der Mobilfunkbänder ist in Abbildung 2.2 nicht enthalten.

Zu vielen der recherchierten Funkdienste wurden in den vergangenen Jahren Messreihen durchgeführt, die allerdings primär eine Feldstärkeerfassung mit Hinblick auf den Schutz von Personen in elektromagnetischen Feldern zum Ziel hatten. Hierfür wird gemäß einschlägiger Personengrenzwertbestimmungen primär ein zeitlicher Mittelwert (RMS-Wert), allerdings bei maximaler Anlagenauslastung, benötigt, der in vorliegendem Bericht funkdienstspezifisch ausgewiesen ist. Für EMV-Untersuchungen kann jedoch aus *Worst-Case*-Gründen auch der maximal mögliche Wert (Peak-Wert) relevant sein. Dieser lässt sich aus dem RMS-Wert und dem so genannten Crest-Faktor bestimmen und ist ebenfalls ausgewiesen, sofern verfügbar.

Für eine Reihe von Funkdiensten, insbesondere zu Mobilfunk-Endgeräten im Nahfeld zur Quelle, konnten in der Literatur keine oder nur unzureichende Feldstärkewerte recherchiert werden. Eine messtechnische Ermittlung dieser Werte wurde in AP 2 vorliegendem Projektes vorgenommen.

Zukünftig wird die elektromagnetische Umwelt der Fahrzeuge maßgeblich von ITS-Funkgeräten beeinflusst, da diese in unmittelbarer Nähe oder direkt im Kfz verbaut werden. Jeder Verkehrsteilnehmer soll vernetzt werden, so dass diese Technik langfristig in allen Fahrzeugen eingebaut wird. Die ITS-Geräte können zudem auch mit einer höheren Strahlungsleistung als LTE/WLAN/Bluetooth funken, die ebenfalls häufig als Funkquellen direkt im Fahrzeug vorzufinden sind. Konkrete Feldstärkewerte in unterschiedlichen Abständen zu V2X-Modulen und -Antennen wurden im nachfolgenden Arbeitspaket des vorliegenden Projektes erhoben.

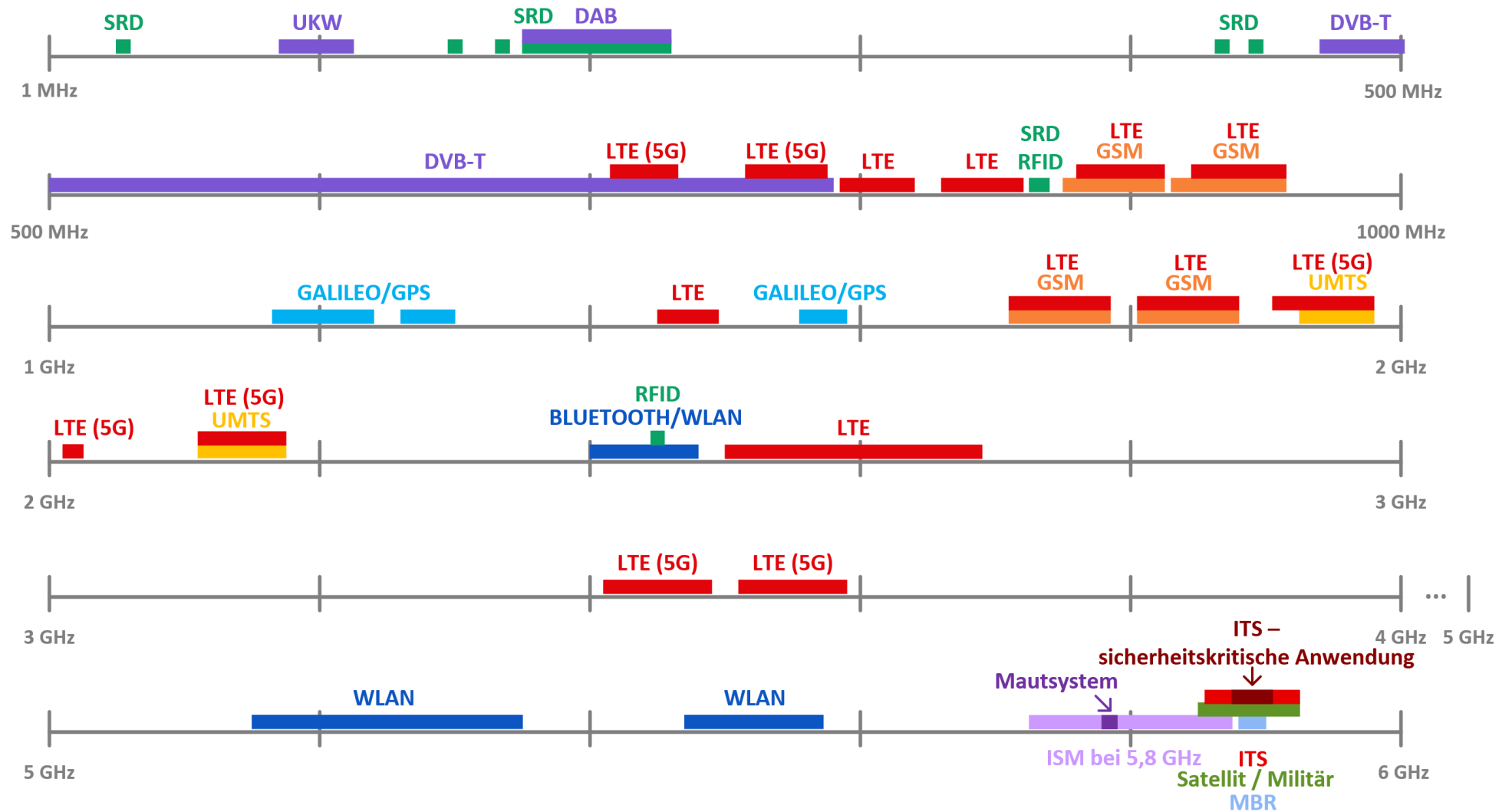


Abbildung 2.2: Übersicht über recherchierte Funkdienste in der Kfz-Umwelt im Frequenzbereich von 1 MHz bis 6 GHz

## 3 Ableitung von Anforderungen für Fahrzeug und Komponenten

### 3.1 Vorgehensweise

Die im ersten Arbeitspaket recherchierten Funkdienste werden im zweiten Arbeitspaket in Anforderungen für EMV-Tests überführt. Dafür wurden insbesondere Feldstärken, die durch fahrzeuginterne und -externe Funkdienste am Ort des Fahrzeugs erzeugt werden, abgeschätzt bzw. erfasst. Die messtechnische Erfassung der elektrischen Feldstärke erfolgte durch den Einsatz spezieller Immissionsmesstechnik, wobei sich der Messbereich vom Kontakt mit dem Gehäuse des Funkgeräts bis zu einem Abstand von 6 m erstreckt. Die Messungen fanden unter idealisierten Freifeldbedingungen, als auch innerhalb eines Fahrzeugs statt. Im Fokus standen die Funkdienste der V2X-Kommunikation (ITS-G5) und des Infotainmentbereichs (LTE, Bluetooth, WLAN), für die in der Literatur aus Kapitel 2 nur wenige Angaben zur elektrischen Feldstärke vorhanden sind. Begleitend wurden elektromagnetische Vollwellensimulationen zur Feldstärkeerfassung von ITS-G5 in einem Fahrzeug durchgeführt.

Die ermittelten Anforderungen an die Störfestigkeitspegel durch die neuen Funkdienste wurden für Untersuchungen der Robustheit leitungsgebundener Systeme der Fahrzeugvernetzung genutzt. Dabei wurde vor allem das Störpotential der V2X-Funkdienste betrachtet, da sie aufgrund ihrer Sendeleistung und des genutzten Frequenzbereichs das potentiell höchste Risiko für eine EMV-Störung der Fahrzeugvernetzungssysteme darstellen. Die Untersuchungen dazu fanden sowohl auf Komponenten- als auch auf Fahrzeugebene statt.

### 3.2 Feldstärkeerfassung für Funkdienste im Fahrzeugbereich

#### 3.2.1 Verwendete Funksysteme, Messtechnik und Labore

##### 3.2.1.1 ITS-System

ITS-G5 ist ein Funkstandard für die V2X-Kommunikation, der auf dem IEEE-Standard 802.11p [IEEE10] basiert und im 5,9 GHz-Bereich eingesetzt wird. Neben ITS-G5 entwickelte sich in den letzten Jahren die konkurrierende ITS-Technologie C-V2X, die auf Mobilfunktechnik basiert und von der Kooperation *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) spezifiziert wird. 3GPP veröffentlichte dabei im Jahr 2017 erste Änderungen im LTE-Standard für die V2X-Kommunikation (LTE-V2X) in ihrem *Release 14* [3G19].

LTE-V2X enthält zwei verschiedene Funkschnittstellen, welche mit *Uu* und *PC5* bezeichnet werden. *Uu* bezeichnet die Schnittstelle zwischen LTE-Endgeräten und den Basisstationen zum Mobilfunknetz (UL). Die direkte Kommunikation zwischen zwei Endgeräten, auch *LTE-Sidelink* genannt, wird über die *PC5*-Schnittstelle unterstützt. Diese Schnittstelle unterstützt verschiedene Modi, u.a. *Modus 4*, der eine Kommunikation zwischen zwei Endgeräten vollständig ohne die Anbindung zum Mobilfunknetz über eine Basisstation realisieren kann. *Modus 4* stellt somit eine vergleichbare Alternative zum WLAN-basierten ITS-G5-Standard dar. Nachfolgende Tabelle 3.1 zeigt eine vergleichende Übersicht der EMV-relevanten Parameter von ITS-G5 und LTE-V2X.



Tabelle 3.1 Übersicht EMV-relevanter Parameter von ITS-G5 und C-V2X

Parameter	ITS-G5	C-V2X (Sidelink)
Grundlage	WLAN 802.11p	Mobilfunk (LTE)
Frequenzen	5855 MHz...5925 MHz	
Kanalbandbreite	10 MHz	10 MHz, 20 MHz
Übertragung	OFDM	SC-FDMA
Modulation	BPSK, QPSK, 16-/64-QAM	QPSK, 16-/64-QAM
Max. Sendeleistung	0,76 W (28,8 dBm)	0,4 W (26 dBm)
Max. EIRP	2 W (33 dBm) in Europa	



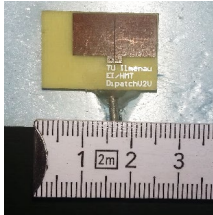

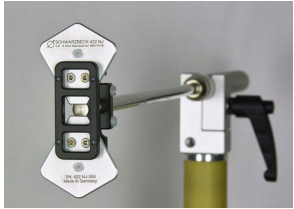
Bezüglich ihrer EMV-relevanten Parameter unterscheiden sich die beiden V2X-Kommunikationsarten nur wenig. So verfügt ITS-G5 zwar über eine höhere maximale Sendeleistung als C - V2X für Endgeräte, die maximale EIRP ist allerdings technologieneutral auf 33 dBm für ITS-Anwendungen in Europa begrenzt. Beide Varianten sind für das gleiche Frequenzband um 5,9 GHz ausgelegt, so dass sie im parallelen Betrieb sich gegenseitig durch Interferenzen stören können. Möglicherweise kann das ITS-Frequenzband zwischen den Technologien aufgeteilt werden, wobei zukünftige Entwicklungen in diesem Bereich zeigen werden, welche Technologie sich durchsetzen wird oder ob eine Koexistenz möglich sein wird. Um das Störpotential durch ITS-Systeme im Sinne der EMV zu untersuchen, wurde im Weiteren ein ITS-G5-System verwendet. ITS-G5-Systeme waren anders als C-V2X zur Projektlaufzeit bereits verfügbar und suggerieren aufgrund der höheren Sendeleistung vorerst ein höheres Störpotential.

Für das Senden von ITS-G5-Signalen wurde die *On-Board-Unit* (OBU) MK5 von *Cohda Wireless* [Coh17] (s. Abbildung 3.1) mit verschiedenen Antennen verwendet, die in Tabelle 3.2 aufgelistet sind. Des Weiteren stand die *Road-Side-Unit* (RSU) MK5 von *Cohda Wireless* [Coh17-1] zur Verfügung, die dieselbe Hardware wie die OBU enthält, aber ein anderes Gehäuse und andere Antennen besitzt.



Abbildung 3.1: ITS-G5-System OBU MK5 von *Cohda Wireless* (links) und ITS-G5-Systemaufbau: PC mit Software für Simulation der Straßenrundfahrt und angeschlossener OBU mit Kfz-Dachantenne (rechts)

Tabelle 3.2: Übersicht der Testantennen für das ITS-G5-System

Testantenne	Datenblatt	Antennengewinn	Foto
Dachantenne MGW-303	[MM19]	5 dBi	
RSU MK5 mit Monopol ECO6-5500	[MM19-1]	6 dBi	
Di-Patch TU Ilmenau, FG HMT	[SSH17], [SSH19]	3,25 dBi	
Breitbandantenne FTZ UWB2-6	-	Nahfeld-Einkopplung	
Schwarzbeck SBA 9119 mit Elemente 422 NJ	[Sch20]	Nahfeld-Einkopplung	

Sowohl die OBU als auch die RSU wurden über eine linuxbasierte Software angesteuert, um GPS-Daten einer virtuellen Straßenrundfahrt zu erhalten, damit sie auf deren Basis ITS-G5-Nachrichten erzeugen und aussenden können (s. Abbildung 3.1). Die Software wurde so konfiguriert, dass die ITS-G5-Module sog. *Cooperative Awareness Messages* (CAM) verschickten. CAMs werden im ITS-G5-Netzwerk regelmäßig von einzelnen Teilnehmern verschickt, um sich gegenseitig aufeinander aufmerksam zu machen. Für diesen Zweck enthält die Nachricht Informationen über den Zustand und die Eigenschaften des sendenden Verkehrsteilnehmers, beispielsweise Daten über ihre Position, Geschwindigkeit, Fahrtrichtung, geometrischen Abmessungen und aktive Sicherheitssysteme. Fahrzeuge sollen dabei alle 100 ... 1000 ms eine CAM senden, was einer Senderate von 10 ... 1 Hz entspricht. Das Senden einer CAM wird durch folgende Ereignisse ausgelöst:

- Änderung der Fahrtrichtung  $\geq 4^\circ$
- Änderung der Position  $\geq 4$  m
- Änderung der Geschwindigkeit  $\geq 0,5$  m/s

Die maximale Ausgangsleistung der Module kann zwischen 0...33 dBm (0...2 W) in 1 dB Schritten variiert werden. Für die nachfolgenden Feldstärkeuntersuchungen wurden die Module stets auf maximaler Ausgangsleistung betrieben und die CAM-Senderate wurde auf das Maximum 10 Hz konfiguriert, um den „Worst-Case“ für EMV-Störfeldstärken abzubilden.

Abbildung 3.2 zeigt das Spektrum mit einer Signalbandbreite von 8,5 MHz, die unterhalb der vorgeschriebenen Kanalbandbreite von 10 MHz liegt. In Abbildung 3.3 und 3.4 sind zwei unterschiedlich lange Zeitabschnitte des ITS-G5-Zeitsignalverlaufs dargestellt. In Abbildung 3.3 ist eine Pulsfolge über einen Zeitraum von vier Sekunden gezeigt. Ein Impuls entspricht dabei einer CAM, wobei die Periodendauer 1000 ms beträgt; es werden somit vier Pulse dargestellt. In Abbildung 3.4 wurde der gezeigte Zeitabschnitt auf 0,8 ms gekürzt, um einen Rechteckimpuls detailliert zu betrachten. Die Impulslänge beträgt 345  $\mu$ s, wobei diese je nach Länge des Datenpakets bis 4160  $\mu$ s variieren kann [Sch19].

Die Messungen zeigen, dass das Signal einen nennenswerten Crest-Faktor (Verhältnis von Spitzenwert zu RMS-Wert; „rauschartiger“ Dachverlauf des Signals in Abbildung 3.4) von bis zu 7 dB besitzt, der bei der zeitlich gemittelten Bewertung der EMVU-bezogenen Immission (RMS-Messung) das Signal in Höhe des Crest-Faktors im Sinne einer Spitzenwertbetrachtung unterbewerten werden würde. Für eine „Worst-Case“-Betrachtung zur Ermittlung von EMV-Störfeldstärken ist es also notwendig die Spitzenwerte (Peak-Werte) des Signals und nicht ausschließlich den RMS-Wert zu erfassen.

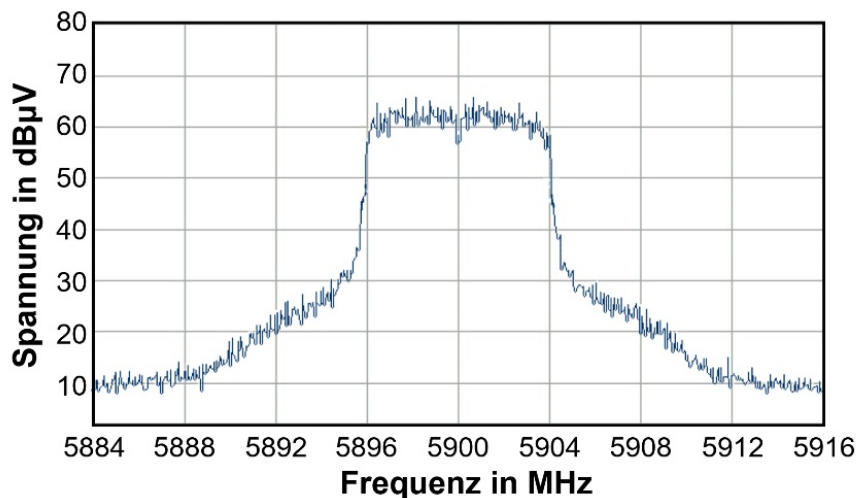


Abbildung 3.2: Spektrum des von einem ITS-G5 Fahrzeugmodul MK5 generierten Signals während der Aussendung von CAMs bei 5,9 GHz. Die Signalbandbreite beträgt ca. 8,5 MHz.

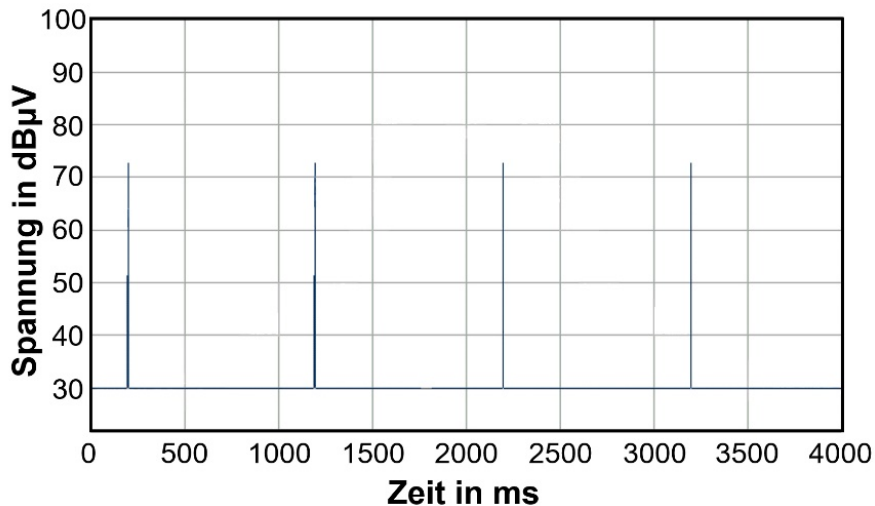


Abbildung 3.3: Zeitbereichsausschnitt des ITS-G5-Signals während der Aussendung von CAMs bei 5,9 GHz. Die Periodendauer der gezeigten Impulsfolge beträgt 1000 ms.

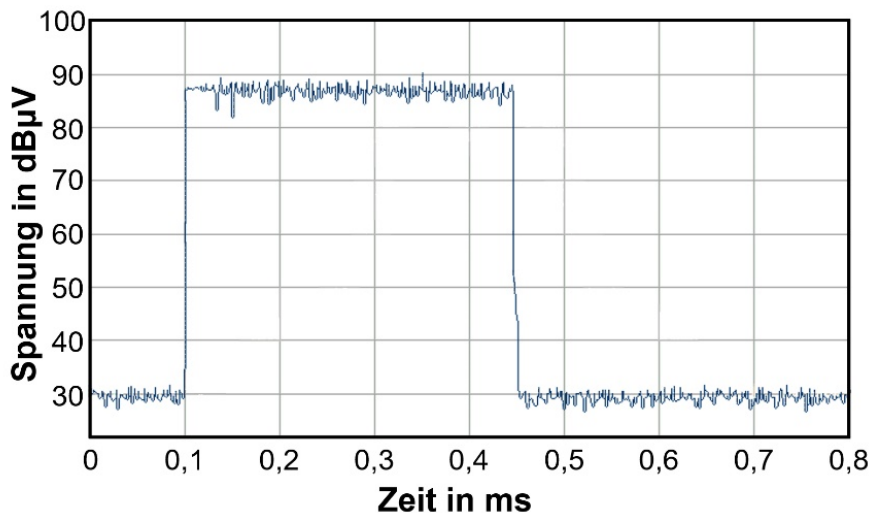


Abbildung 3.4 Detailausschnitt des ITS-G5 Zeitsignals aus Abbildung 3.3. Die Länge des gezeigten Rechteckimpulses beträgt ca. 345 µs.

### 3.2.1.2 Weitere Testsysteme

Neben ITS-G5 wurden auch weitere Funkssysteme, die im Fahrzeugbereich eingesetzt werden, für die Messungen verwendet, um potentielle EMV-Störfeldstärken zu ermitteln. Es wurden Bluetooth-, WLAN- und LTE-Endgeräte sowie ein WLAN-Access-Point für abstandsabhängige Messungen unter Freifeldbedingungen in einer abgeschirmten Absorberkammer genutzt. Für die LTE-Messungen wurde ein Basisstationssimulator (CMW 500 von Rohde & Schwarz) in der Absorberhalle aufgebaut, um ein Mobilfunknetz in der abgeschirmten Umgebung zu erzeugen. Darüber hinaus wurden speziell für Feldstärkemessungen in verschiedenen Fahrzeugen auch interne Bluetooth- und WLAN-Dienste des jeweiligen Fahrzeugs genutzt. Eine übersichtliche Auflistung der verwendeten Testsysteme ist in Tabelle 3.3 enthalten.

Tabelle 3.3: Weitere Testsysteme für Feldstärkemessungen zur Abschätzung von EMV-Störfeldstärken im Fahrzeugumfeld

Testsystem	Gerät/Fahrzeug	Frequenz	Foto
WLAN Handy	iPhone 7	2,412 GHz	
WLAN Access Point (AP)	Fritz Box	2,437 GHz	
Internes WLAN Fahrzeug	Audi Q5 40 TDI quattro S tronic	2,462 GHz	-
Bluetooth Freisprechanlage	TaoTronics BR03 / extern in Opel Corsa D 1.2 (3-Türer)	2,4 GHz	
Internes Bluetooth Fahrzeug	Audi A3 Sportback 8 VA	2,4 GHz	-
LTE Surfstick	Huawei E3372	1,7475 GHz	
LTE Handy	Sony Xperia Z	1,7475 GHz	

### 3.2.1.3 Messtechnik und Labore

Für die abstandsabhängigen Messungen unter Freifeldbedingungen und im Fahrzeug wurde verschiedenste Messtechnik zur Erfassung der elektrischen Feldstärke eingesetzt, die in nachfolgender Tabelle 3.4 zusammengefasst ist. Die Messgeräte sind kalibriert und unterliegen einem regelmäßigen Kalibrierturnus. Die Messunsicherheit beträgt  $\pm 3$  dB, die nicht in die Messergebnisse mit einbezogen wurde.

Die Messungen fanden in den EMV-Absorberhallen der Technischen Universität Ilmenau (Virtuelle Straße – Simulations- und Testanlage, VISTA) und des FTZ an der Westsächsischen Hochschule Zwickau statt.



Tabelle 3.4: Verwendete Messtechnik

Messtechnik	Hersteller	Art
SRM-3006	Narda Safety Test Solutions	Tragbarer Spektrumanalysator 9 kHz ... 6 GHz
3502/01	Narda Safety Test Solutions	3-Achsen E-Feld Antenne 420 MHz ... 6 GHz
ESR-7	Rohde & Schwarz	Spektrumanalysator 10 Hz ... 26,5 GHz
RS E 02, RS E 10	Rohde & Schwarz	Nahfeldsonden 30 MHz ... 3 GHz
LSProbe 1.2	LumiLoop GmbH	3-Achsen E-Feldsonde 10 Hz ... 8,2 GHz

### 3.2.2 Abstandsabhängige Feldstärkemessungen unter Freiraumbedingung

Es wurde die elektrische Feldstärke ausgehend von verschiedenen Endgeräten, die im Kfz-Bereich vorkommen können, abstandsabhängig in ihrer Hauptstrahlrichtung gemessen. So kann eine Obergrenze für die maximale Feldstärke ermittelt werden, die von einem Gerät mit einer bestimmten Funktechnologie zu erwarten ist und die abstandsabhängige Abnahme der Feldstärke wird erfasst. Die Messungen fanden in VISTA statt, um konstante idealisierte Freiraumbedingungen nachzubilden. Die Ergebnisse der Feldstärkemessungen können somit direkt miteinander verglichen werden und es wird ersichtlich, von welchem Funkssystem die höchsten Feldstärken in der Fahrzeugumwelt zu erwarten sind.

Der prinzipielle Messaufbau für die abstandsabhängigen Feldstärkemessungen wird in Abbildung 3.5 gezeigt. Die Prüflinge wurden auf einem Holztisch mit Styroporplatten platziert, um die Beeinflussung durch den Prüftisch möglichst gering zu halten. Entlang der 6 m langen Messstrecke war der Boden mit Pyramidenabsorbieren ausgelegt, damit Bodenreflexionen reduziert werden. Somit konnten Messwerte in definierten Abständen bis zum Prüfling aufgenommen werden.

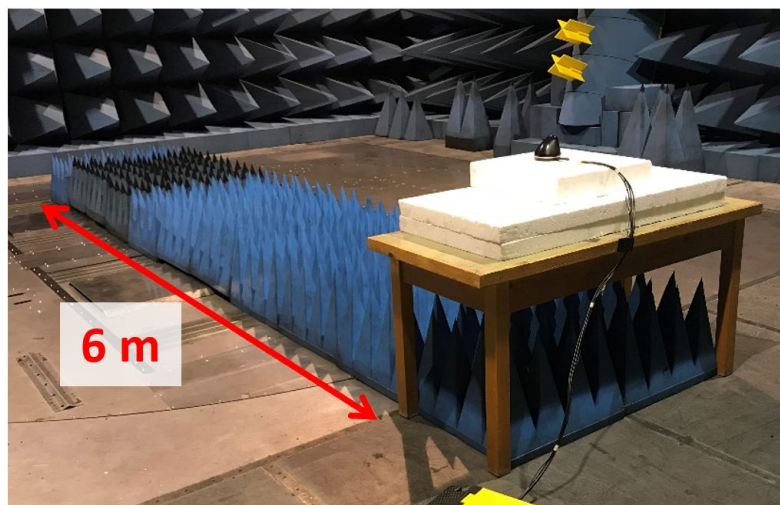


Abbildung 3.5: Messaufbau für Feldstärkemessung: 6 m lange Messstrecke mit Bodenabsorbieren, Prüftisch aus Holz und Styropor mit Prüfling

Für die Messungen zwischen 25 cm und 6 m Abstand zum Prüfling wurde der tragbare Spektrumanalysator Narda SRM-3006 mit der zugehörigen isotropen Feldsonde verwendet. Die Messhöhe lag etwa bei 100 cm über dem Boden, wobei an jedem Messpunkt die Antenne um wenige Zentimeter bewegt wurde, um z.B. durch Restreflexionen an den Wänden verursachte *Fast-Fading* Effekte zu berücksichtigen und die maximale Feldstärke aufzunehmen. Vor der Messung wurde bei jedem Messobjekt die Hauptstrahlrichtung des Prüflings ermittelt, indem bei konstantem Abstand die Feldstärke in verschiedenen Richtungen gemessen wurde. Die Prüflinge wurden dann auf dem Prüftisch so platziert, dass entlang der Messstrecke die maximal mögliche Feldstärke messbar war.

Da der Durchmesser der Feldsonde des SRM-3006 12 cm beträgt, ist eine Messung im Abstand weniger Zentimeter zu und im direkten Kontakt mit den Geräten nicht möglich. Da in Fahrzeugen allerdings meist nur wenige Zentimeter Abstand zwischen verschiedenen Einbauteilen oder Kabelbäumen liegen, ist von besonderem Interesse, welche Feldstärken in kürzeren Abständen (Gehäuse- oder Antennenkontakt bis ca. 5 cm Abstand) von der Funkquelle entfernt vorherrschen. Im Nahfeld der Sendeantennen können signifikante reaktive Feldanteile auftreten, weshalb die charakteristische  $1/r$ -Abhängigkeit der Feldstärke vom Abstand  $r$  erst im Fernfeld der Antenne uneingeschränkt gültig ist. Wenn die Messergebnisse aus dem Fernfeld zu geringeren Abständen gemäß der Freiraumausbreitung extrapoliert werden, würden die so berechneten Feldstärken wohlmöglich unterbewertet werden. Aufgrund dessen wurde eine Methodik der Nahfeldmessung gesucht, um Feldstärken im Kontakt mit den Endgeräten messen zu können.

Um Nahfeldmessungen an elektronischen Baugruppen im EMV-Bereich durchzuführen, existieren Nahfeldsonden, die an einen  $50 \Omega$  – Eingang eines Spektrumanalysators o.ä. angeschlossen werden können. Die Firma Rohde&Schwarz bietet hierfür die elektrischen Feldsonden RS E 02 und RS E 10 an. Die größere Sonde RS E 02 (2 cm x 5 cm) eignet sich dazu, um die Störaussendung von größeren Strukturen zu erfassen, wohingegen die schmalere Sonde RS E 10 (0,2 mm) einzelne Leiterzüge selektiv untersuchen kann. Die Kennlinien der Sonden sind bis zu einer Frequenz von 3 GHz angegeben, so dass für den ITS-Frequenzbereich um 5,9 GHz ein Kalibrierfaktor ermittelt werden musste, um die vom Spektrumanalysator angezeigten Leistungs- bzw. Spannungswerte in Feldstärkewerte umrechnen zu können. Für die Kalibrierung wurde eine Antenne mit einem CW-Signal bei der Zielfrequenz (ITS-G5: 5,9 GHz) gespeist und anschließend im Abstand von 2 m zur Antenne die elektrische Feldstärke mit dem SRM-3006 aufgenommen. Am gleichen Punkt wurde dann im zweiten Schritt eine Messung mit der Nahfeldsonde durchgeführt. Die Differenz zwischen dem gemessenen Spannungswert der Nahfeldsonde und der gemessenen elektrischen Feldstärke des SRM-3006 ergibt dann den Kalibrierfaktor für die Nahfeldsonde.

Um die Kalibrierfaktoren verifizieren zu können, wurden Vergleichsmessungen mit dem SRM-3006 und den Nahfeldsonden im Abstand von 25 cm zu den verschiedenen Funkgeräten durchgeführt, die in Tabelle 3.5 zusammengefasst sind. Für ITS-G5, WLAN und Bluetooth stimmen die gemessenen Feldstärken der Nahfeldsonde mit einer Abweichung von etwa 0,5 dB gut mit den Messergebnissen des SRM-3006 überein, wobei bei der reinen Kalibrierung für ITS-G5 nicht in Hauptstrahlrichtung gemessen wurde. Bei LTE tritt eine größere Differenz von etwa 5 dB auf. Ein Grund dafür könnte sein, dass bei LTE während den Messungen nicht die größtmögliche Pegelspitze mit der Nahfeldsonde erfasst wurde. Die Differenz

liegt in der Größenordnung des Crest-Faktors von LTE, der in der einschlägigen Literatur mit Werten zwischen 6 dB und 10 dB angegeben wird.

Die Messungen im Nahfeld wurden jeweils an einem Endgerät von ITS-G5, LTE, Bluetooth und WLAN durchgeführt. Es wurde im 5 cm Abstand zum Endgerät bzw. zu der entsprechenden Antenne sowie im direkten Kontakt ein Messpunkt aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.6 zusammengefasst.

Tabelle 3.5 Vergleichsmessung in 25 cm Abstand zu den Endgeräten verschiedener Funktechnologien mit SRM-3006 und Nahfeldsonde RS E 02 zur Verifizierung der Kalibrierfaktoren

Funksystem	Frequenz in MHz	Elektr. Feldstärke (Peak) in V/m, 25 cm Abstand	
		SRM-3006	RS E 02
ITS-G5 OBU mit Dachantenne	5900	29,9	31,6
LTE Handy	1747,5	24,3	13,5
WLAN AP	2437	5,3	5,3
Bluetooth	2448	1,7	1,6

Tabelle 3.6 Ergebnisse der Nahfeldmessung an verschiedenen Funksystemen

Funksystem	Frequenz in MHz	Elektr. Feldstärke (Peak) in V/m	
		Direkter Kontakt	5 cm Abstand
ITS-G5 OBU mit Dachantenne	5900	562,3	79,4
LTE Handy	1747,5	302,0	51,3
WLAN AP	2437	160,3	18,2
Bluetooth Freisprechanlage	2448	24,5	6,0

Weitere Ergebnisse der Feldstärkemessungen in größeren Abständen, die mit dem SRM-3006 durchgeführt wurden, sind in Abbildung 3.6 dargestellt. Dabei wurden Messkurven zu folgenden Funksystemen aufgezeichnet (vgl. Tabelle 3.3):

- ITS-G5 OBU mit Dachantenne
- ITS-G5 RSU
- WLAN AP
- WLAN Handy
- LTE Surfstick
- LTE Handy
- Bluetooth Freisprechanlage

Beim Vergleich der Messkurven wird deutlich, dass ITS-G5 auch im Fernfeld höhere elektrische Feldstärken erzeugt als die Vergleichssysteme. Die elektrische Feldstärke von ITS-G5 ist im Schnitt etwa um den Faktor 3 größer als bei LTE, was höchstwahrscheinlich aus der um 10 dB (entspricht ca. Faktor 3) höheren EIRP bei ITS-G5 resultiert. Wenn ITS-G5-Systeme in Fahrzeugen und im Verkehr eingesetzt werden, taucht in der elektromagnetischen Umwelt des Kfz somit eine neue Funktechnologie auf, die deutlich höhere Feldstärken erzeugen kann als bisher etablierte Funksysteme.



### Abstandsabhängige Feldstärkemessungen

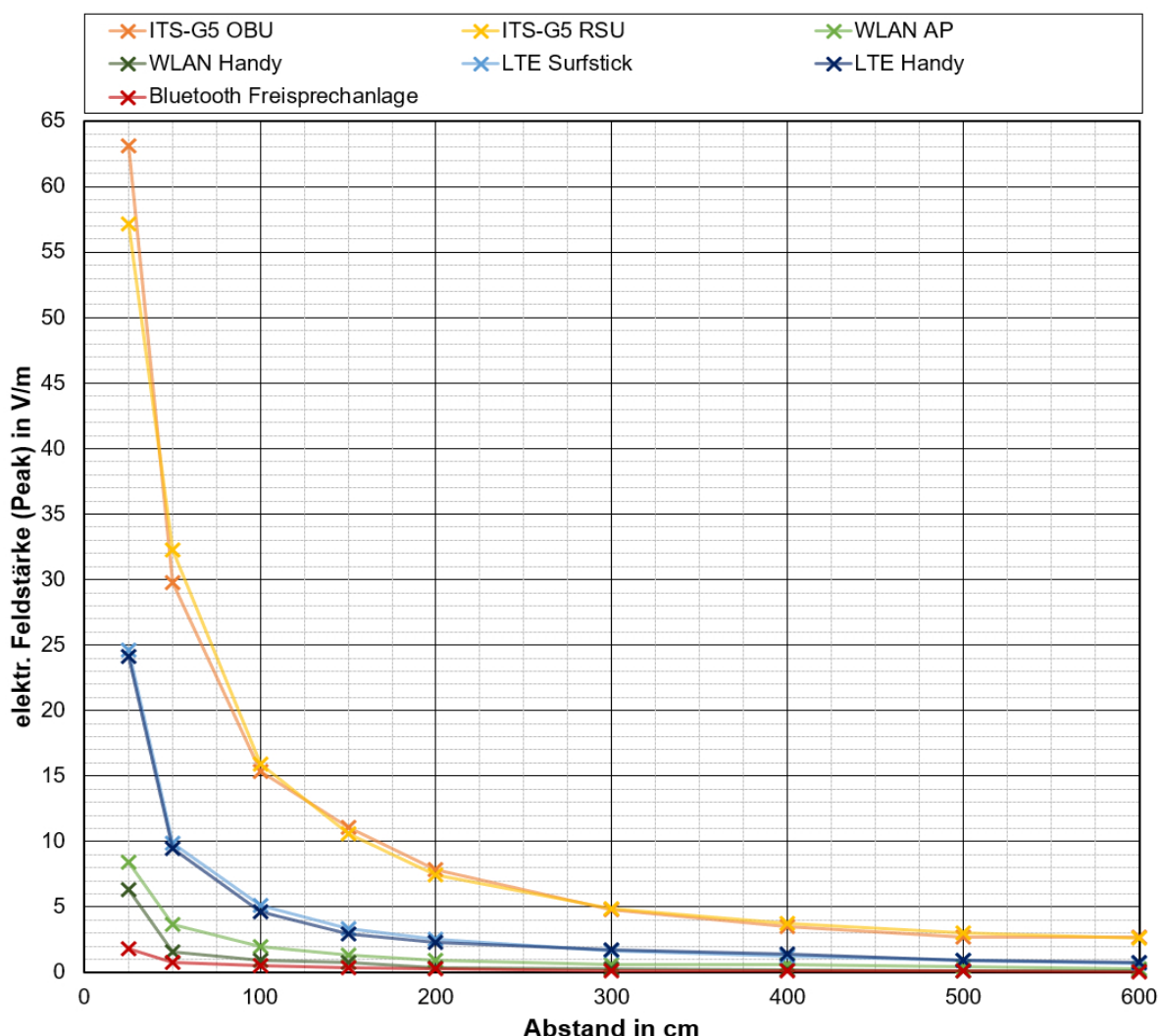


Abbildung 3.6 Ergebnisse der abstandsabhängigen Feldstärkemessungen unter Freiraumbedingung an verschiedenen Funksystemen

Nachfolgend werden Messungen mit verschiedenen Funksystemen in diversen Fahrzeugen gezeigt. Eine reflektive Umgebung, wie sie in typischen Einbauorten im Fahrzeug auftreten kann, kann durch konstruktive Überlagerung der Reflexionen elektromagnetischer Wellen zu einer signifikanten Überhöhung der vorherrschenden Feldstärken führen. Somit ist es unerlässlich die Funksysteme nicht nur unter idealisierten Freiraumbedingungen zu testen, sondern auch in realistischen Anwendungsszenarien.

#### 3.2.3 Funksysteme in Fahrzeugen

Für die Messungen wurden verschiedene Endgeräte in Fahrzeugen eingesetzt, um die elektrische Feldstärke an definierten Stellen innerhalb des Kfz zu bewerten. Die elektrische Feldstärke, die durch ein internes WiFi- und Bluetooth-System, eine externe Bluetooth-Freisprecheinrichtung und zwei ITS-G5-Varianten erzeugt wurde, wurde in verschiedenen Fahrzeugen gemessen (vgl. Tabelle 3.3). Für die ITS-G5-Messungen im Fahrzeuginneren wurde die OBU MK5 mit der Antenne MGW-303 auf dem Autodach betrieben und alternativ die Di-Patch-Antenne an der oberen Ecke der Windschutzscheibe vor dem Fahrersitz montiert, die jeweils mit einer EIRP von 2 W betrieben wurden (vgl. Tabelle 3.2). Die OBU wurde so konfiguriert, dass

sie im Rahmen einer Straßenverkehrssimulation CAMs sendet. Die Messungen wurden mit dem SRM-3006 zusammen mit der entsprechenden isotropen elektrischen Feldsonde durchgeführt (vgl. Messvorgehen im Freifeld in Teilkapitel 3.2.2). Um die Ergebnisse systematisch vergleichen zu können, wurden Messpositionen an mehreren Stellen im Inneren der Fahrzeuge vordefiniert, wie in Abbildung 3.7 dargestellt. Eine zusätzliche Messung wurde im direkten physischen Kontakt der Messsonde mit der jeweiligen Sendeantenne durchgeführt.

Abbildung 3.7 fasst die Ergebnisse aus den Messungen mit den ausgewählten Funksystemen an neun verschiedenen Messpositionen zusammen, wobei jeweils der Peak-Wert der elektrischen Feldstärke aufgenommen wurde.

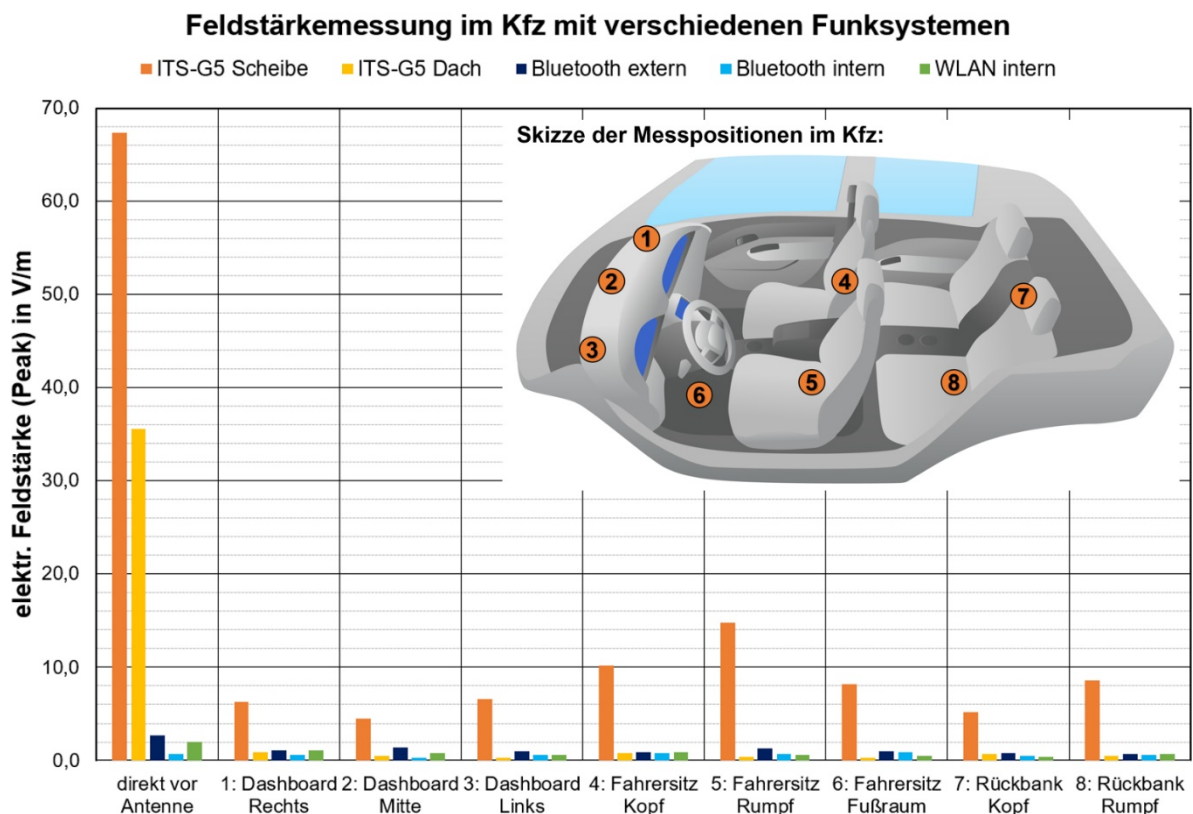


Abbildung 3.7 Feldstärkemessung verschiedener Funksysteme im Kfz an definierten Messpositionen

Es wurde festgestellt, dass die Montageposition der Sendeantennen einen großen Einfluss auf die vorherrschenden Feldstärken hat. Die ITS-G5-Variante, bei der sich die Antenne auf der Innenseite der Windschutzscheibe befindet, verursacht deutlich höhere Feldstärken als die anderen Funksysteme. Die Feldstärke der Autodachantenne wird durch die Autokarosserie und Windschutzscheibe stark gedämpft. Die Feldstärken der Bluetooth- und WiFi-Signale lagen in einem vergleichbaren Bereich, wobei die externe Bluetooth-Freisprecheinrichtung tendenziell höhere Feldstärken erzeugt als die intern installierten Infotainmentsysteme. Die Sendeantenne der externen Freisprecheinrichtung befand sich direkt im Fahrerraum und war nur durch ein dünnes Kunststoffradom abgeschirmt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das elektrische Feld der drahtlosen Endgeräte im Kfz von ITS-G5 dominiert wird, wenn sich die Sendeantenne innerhalb des Fahrerinnenraums befindet. Daher beschränken sich die nachfolgenden detaillierten Analysen zu möglichen Feldstärken im Fahrzeug auf das Funksystem ITS-G5.

### 3.2.4 ITS-G5 im Fahrzeug

Für die Messung von Feldstärken im Fahrzeug durch den Funkdienst ITS-G5 wurden zwei Sendeantennen an vier typischen Einbauorten in einem Testfahrzeug (Audi A8) installiert. Die Anregung erfolgte mittels ITS-G5 OBU (vgl. Abbildung 3.1). Die elektrische Feldstärke wurde mit einer optisch-gespeisten Feldsonde (LumiLoop LSProbe 1.2) im Umfeld der Antennenpositionen mittels Punktrastermethode erfasst. Ziel war es Anforderungsprofile für Störfestigkeitsverfahren abzuleiten und zudem Anhaltspunkte für mögliche Packaging-Abstände zu schaffen. Folgende vier Einbauorte wurden untersucht:

- 1) Frontscheibe
- 2) Frontschürze
- 3) Seitenfenster
- 4) Fahrzeugdach

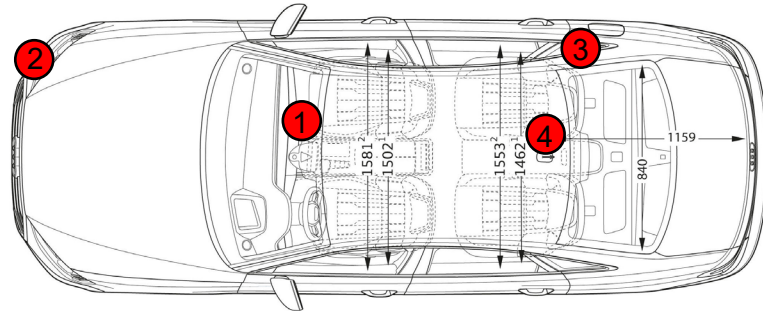


Abbildung 3.8 Positionen der Sendeantenne bei den Messungen der elektrischen Feldstärke im Fahrzeug durch eine ITS-G5 OBU

Diese Positionen wurden priorisiert, da dort typisch entweder bereits Antennen anderer Funkdienste verbaut sind oder sie sich durch die Nähe zu potentiellen Opfersystemen auszeichnen. Entsprechend Eignung der Antennen wurde für Messungen an Positionen 1 bis 3 die Di-Patch Antenne, und bei Position 4 die Magnetfußantenne verwendet (vgl. Tabelle 3.2). Entsprechend der Sondengröße von 5 cm (Durchmesser) wurde ein Messpunktabstand von 5 cm um die Antennenposition gewählt. Die nachfolgenden Ergebnisse beziehen sich auf eine maximale EIRP von 2 W (+33 dBm) und entsprechen Peak-Werten.



Abbildung 3.9 Messaufbau mit Testfahrzeug (Audi A8) in der Absorberhalle des FTZ in Zwickau

### 3.2.4.1 Frontscheibe

Bei dieser Messposition wurde die Sendeantenne (Di-Patch) mittels Distanzstück (1 cm) an der Frontscheibe mit ca. 5 cm Abstand zur Dachkante befestigt. Die Nähe der Sendeantenne zum Rückspiegel, potentiellen Fahrerassistenzsystemen sowie das 5 cm-Messraster an der Scheibeninnenseite sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Die Ergebnisse bei Kontakt mit der Frontscheibe sind in Abbildung 3.11 zusammengefasst. In Abbildung 3.12 und Abbildung 3.13 sind zudem die Ergebnisse von zwei Messreihen in vergrößertem Abstand zur Frontscheibe (5 cm) dargestellt.

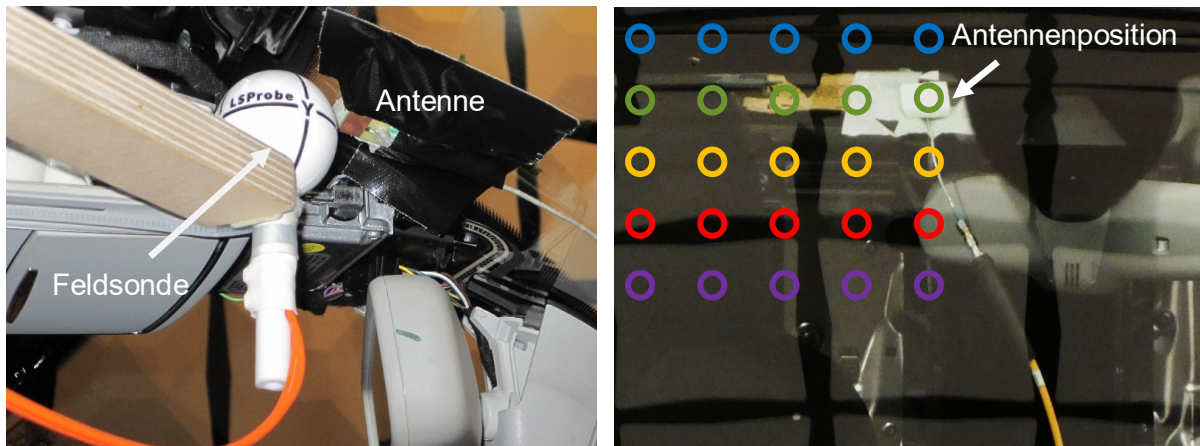


Abbildung 3.10 links - Innenansicht des Testfahrzeugs mit Di-Patch Antenne in 1 cm Abstand zur Frontscheibe; rechts - Außenansicht mit eingezeichneten Messpunkten entsprechend der Messreihen in Abbildung 3.11.

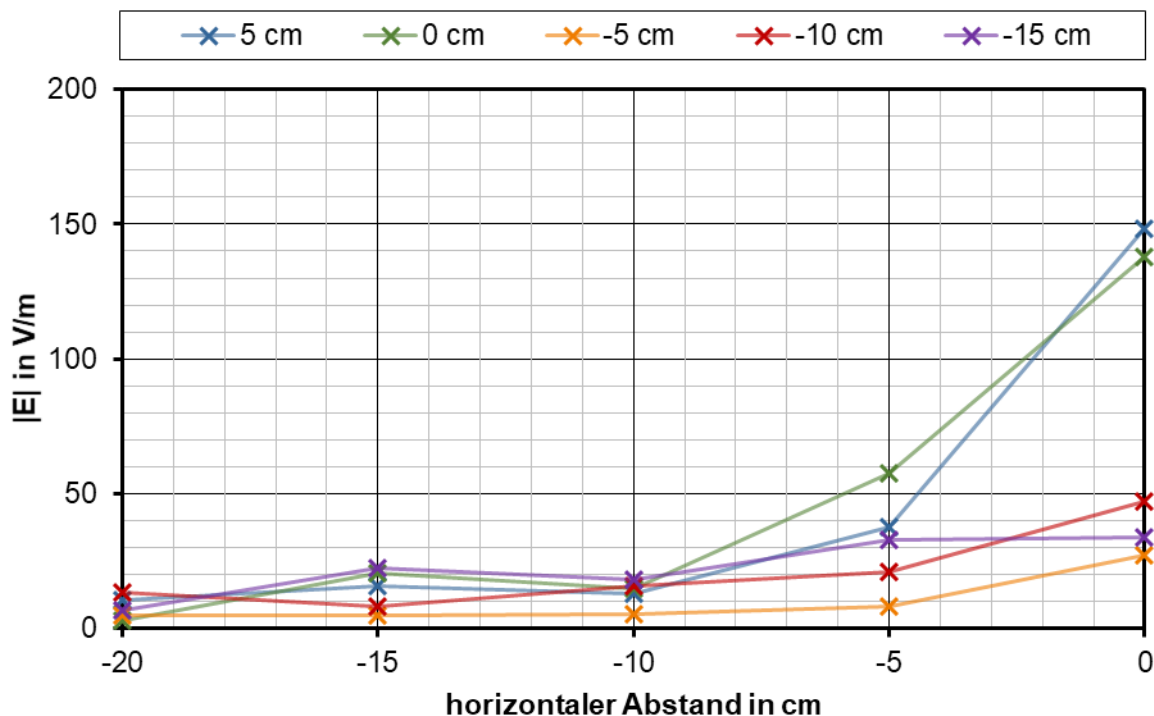


Abbildung 3.11 Ergebnisse der elektrischen Feldstärke  $|E|$  bei 2 W EIRP am Verbauort 1) Frontscheibe für fünf horizontale Messreihen. Der Abstand bezieht sich auf die Antennenposition. Negative Vorzeichen bezeichnen Punkte links bzw. unterhalb der Antenne.

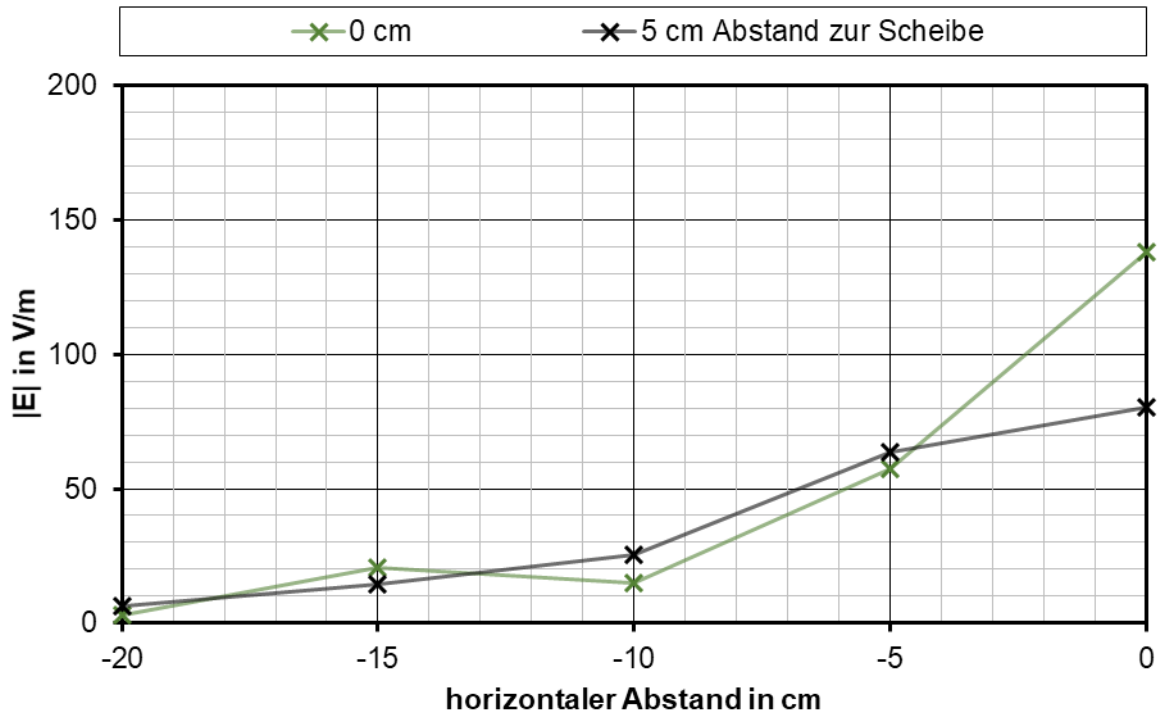


Abbildung 3.12 Ergebnisse bei 5 cm Abstand zur Frontscheibe im Fahrzeuginneren im Vergleich mit der horizontale Messreihe (0 cm, vgl. Abbildung 3.11) bei Kontakt mit der Scheibe. Negative Vorzeichen bezeichnen Punkte links der Antenne.

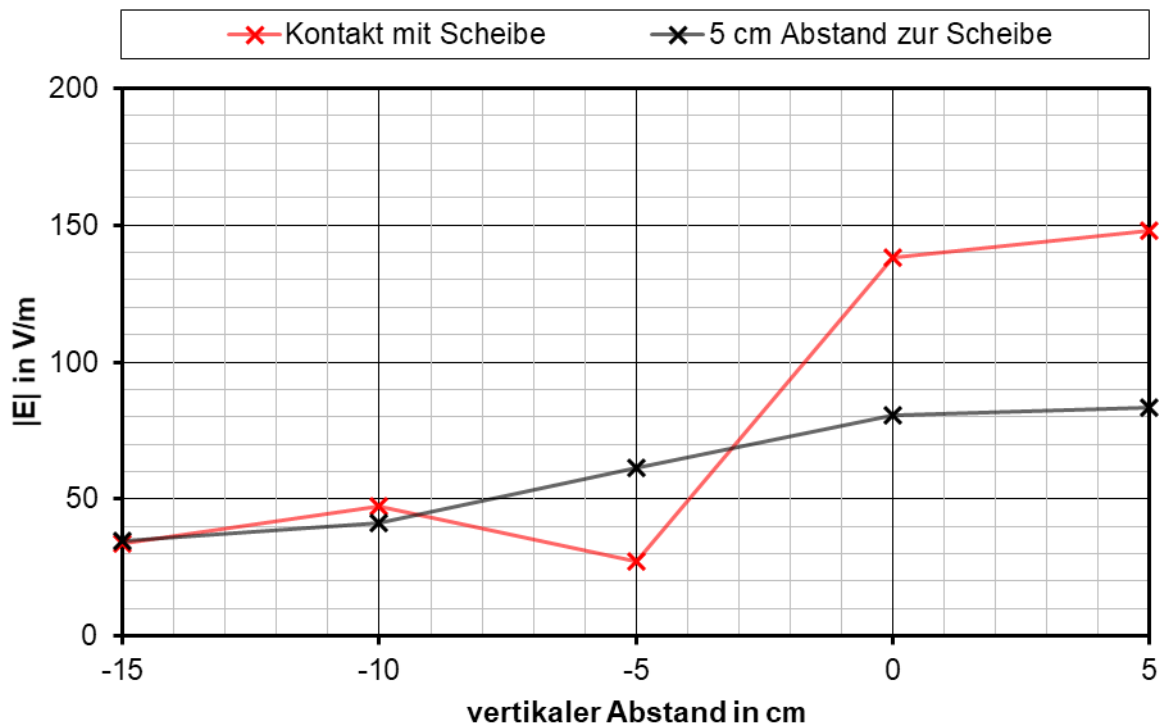


Abbildung 3.13 Ergebnisse bei 5 cm Abstand zur Frontscheibe im Fahrzeuginneren als vertikale Messreihen bei der Antennenposition. Negative Vorzeichen bezeichnen Punkte unterhalb der Antenne (vgl. Abbildung 3.10).



### 3.2.4.2 Frontschürze

Für diese Messungen wurde die Sendeantenne (Di-Patch Antenne) an der Rückseite einer Styroporhalterung (Dicke: 2 cm) befestigt und an der Frontschürze platziert. Die Umgebung der Antenne (potentieller Verbauort für Frontradar und Parksensoren) wurde im 5 cm Raster abgetastet. Der Verbauort und die Messpunkte sind in Abbildung 3.14 dargestellt. Messungen an der Rückseite der Antenne im Fahrzeuginneren (vgl. rechte Seite Abbildung 3.14) lieferten Feldstärken von 50,6 V/m bei 5 cm Abstand und 43,6 V/m bei 10 cm Abstand. Die weiteren Ergebnisse an der Fahrzeugaußenseite sind in Abbildung 3.15 sowie ein Höhenscan in Abbildung 3.16 dargestellt.

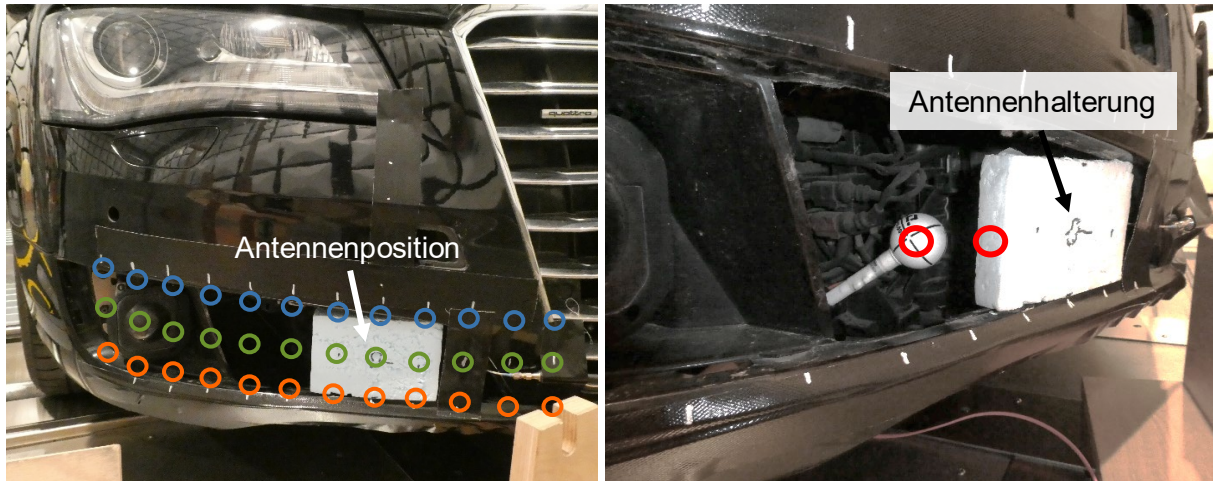


Abbildung 3.14 links - Frontschürze mit Antennenhalterung (Di-Patch Antenne an der Rückseite) und Messpunkten (Kreise). rechts – Detailansicht mit zwei Messpunkten hinter der Sendeantenne in der Frontschürze.

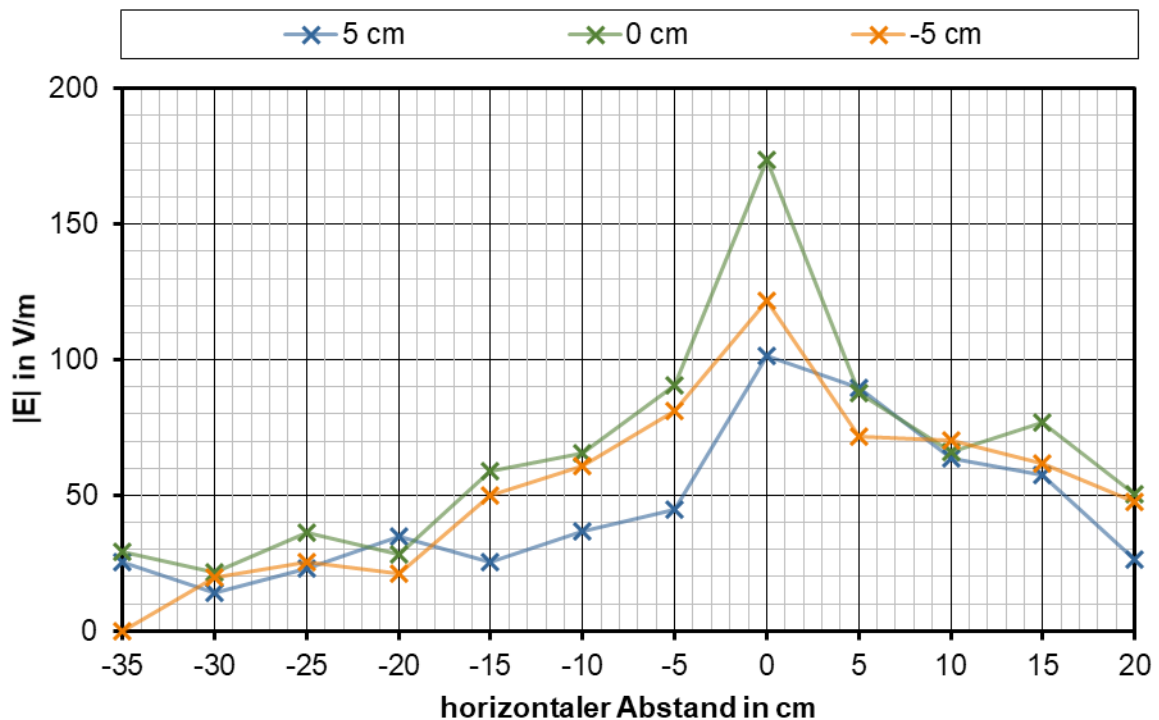


Abbildung 3.15 Ergebnisse der elektrischen Feldstärke  $|E|$  bei 2 W EIRP am Verbauort 2) Frontschürze in drei horizontalen Messreihen. Der Abstand bezieht sich auf die Antennenposition. Negative Vorzeichen bezeichnen Punkte links bzw. unterhalb der Antenne.

Bei unveränderter Antennenposition wurde zusätzlich die elektrische Feldstärke an der Fahrzeugaußenseite in Richtung der Scheinwerfer als potentielle Opfersysteme gemessen (s. Abbildung 3.16). Die Ergebnisse der elektrischen Feldstärke sind in Abbildung 3.17 zusammengefasst.

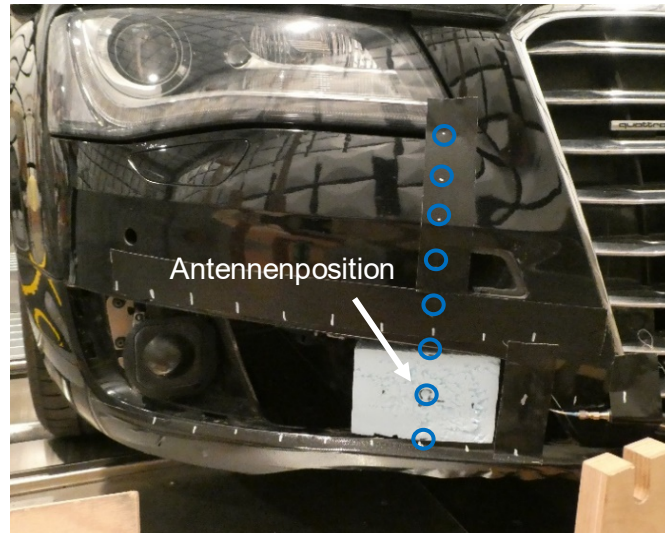


Abbildung 3.16 Vertikale Messreihe an der Fahrzeugaußenseite um den Verbauort 2) Frontschürze mit Messpunkten im Abstand von 5 cm von der Antennenposition ausgehend.

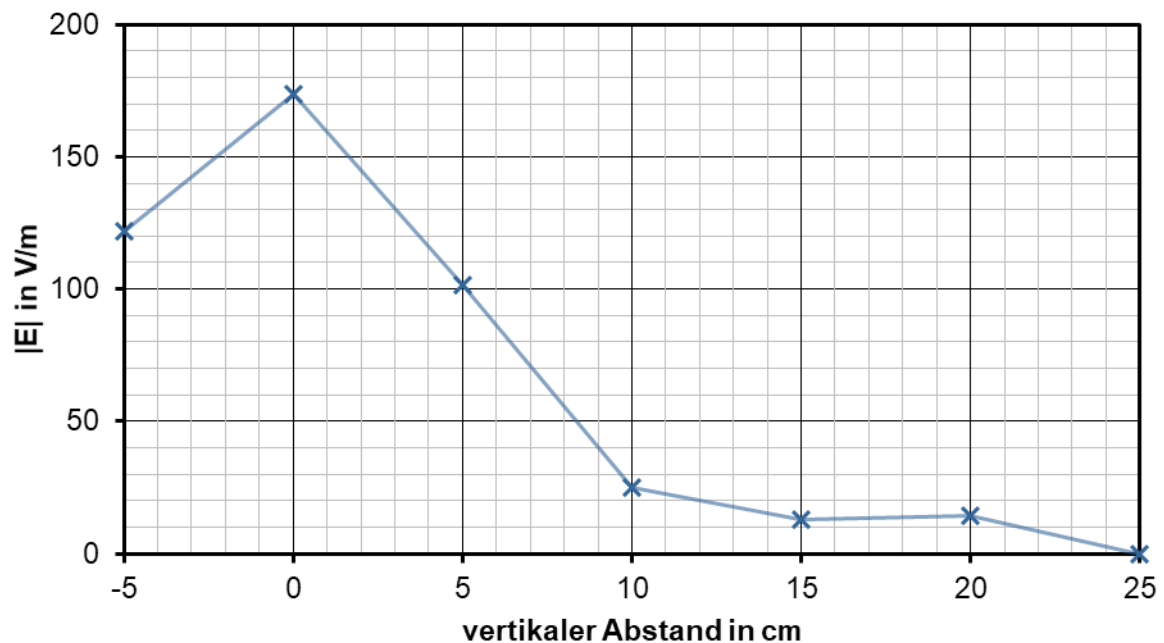


Abbildung 3.17 Ergebnisse der elektrischen Feldstärke  $|E|$  bei 2 W EIRP am Verbauort 2) Frontschürze in vertikalem Abstand zur Antennenposition. Negative Abstände bezeichnen Abstände unterhalb der Antennenposition.

### 3.2.4.3 Seitenfenster

Als weiterer Verbauort wurde ein Seitenfenster gewählt, da dort eine signifikante Beeinflussung der Feldverteilung durch umliegende Metallstrukturen (z.B. C-Säule und Rückbank) und zahlreiche Daten- und Versorgungsleitungen zu erwarten ist (s. Abbildung 3.18). Die Di-Patch Antenne wurde mittels Distanzstück (1 cm) an der Scheibe befestigt. Durch umliegende Strukturen konnten die Messungen nur bis zu maximalen Abständen von 10 cm durchgeführt werden. Die Ergebnisse entsprechend der Richtungen aus Abbildung 3.18 sind in Abbildung 3.19 dargestellt.



Abbildung 3.18 links – Außenansicht mit Di-Patch im Einbauzustand am hinteren Seitenfenster. rechts - Innenansicht mit Feldsonde und Messpunkten im 5 cm Raster um den Einbaupunkt.

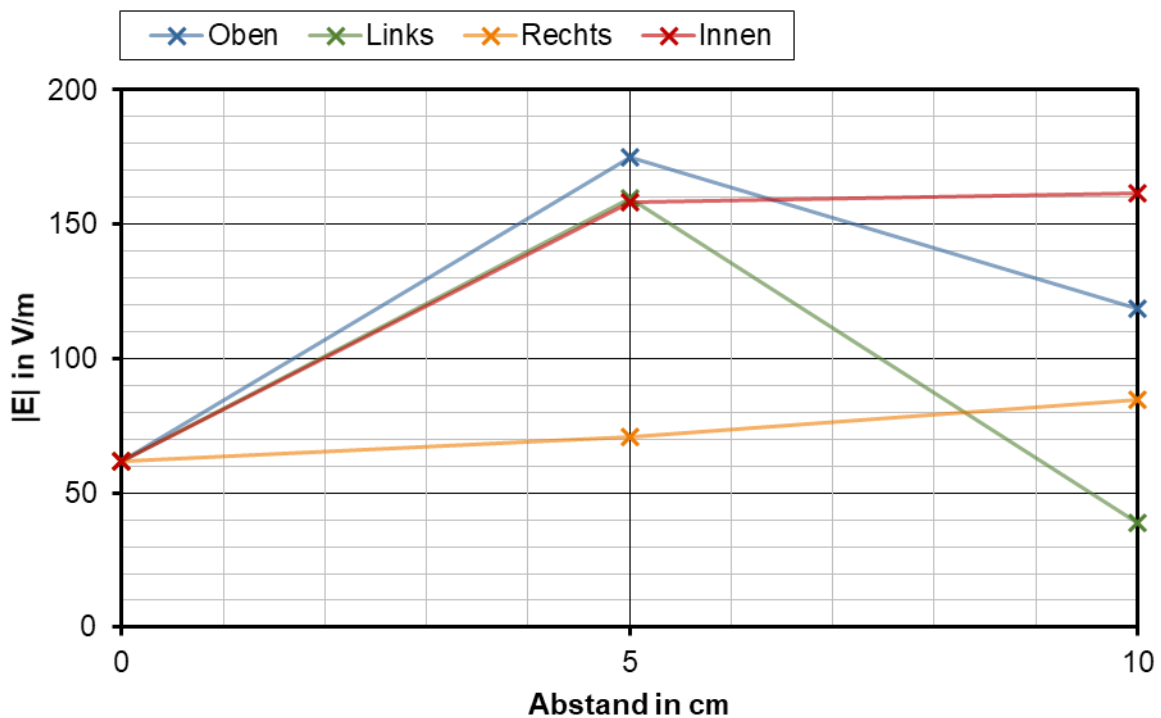


Abbildung 3.19 Ergebnisse der elektrischen Feldstärke  $|E|$  bei 2 W EIRP am Verbauort 3) Seitenfenster in vier Messrichtungen (vgl. Abbildung 3.18)



### 3.2.4.4 Dachantenne

Bei diesen Messungen wurde eine Magnetfußantenne (vgl. Tabelle 3.2) auf dem hinteren Fahrzeugdach platziert. Die Speisung erfolgt aus dem Fahrzeuginneren, wobei die Leiter von der OBU durch eine Dachdurchführung zur Antenne geführt wurden. Die Messpunkte im Fahrzeuginneren in Richtung der Bremsleuchte sowie seitlich zur Dachdurchführung sind in Abbildung 3.20 dargestellt. Exemplarische Messungen entlang der Fensterränder im Fahrzeuginneren lieferten Feldstärken unter 10 V/m.



Abbildung 3.20 links – Außenansicht mit der Heckscheibe mit montierter Magnetfußantenne auf dem Fahrzeugdach. Die Antenne ist mit der OBU im Fahrzeuginneren verbunden. rechts - Innenansicht mit Messpunkten im 5 cm Raster um die Dachdurchführung.

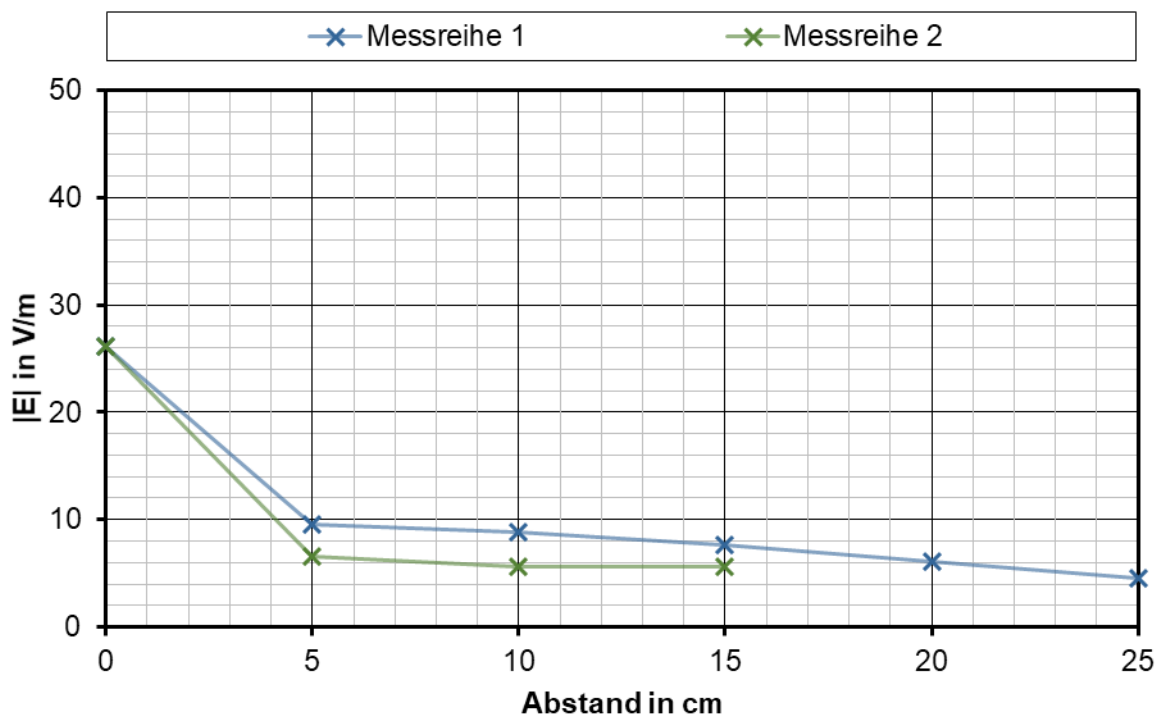


Abbildung 3.21 Ergebnisse der elektrischen Feldstärke  $|E|$  bei 2 W EIRP am Verbauort 4) Fahrzeugdach in zwei Messreihen an der Dachinnenseite. Der Abstand ist jeweils bezogen auf die Durchführung.

### 3.3 Numerische Feldanalyse von ITS-G5

Begleitend zu den Messungen in Teilkapitel 3.2 wurden numerische Feldsimulationen auf Grundlage des Funkdienstes ITS-G5 durchgeführt, um dessen Störpotential besser bewerten zu können, wobei zwei Ansätze verfolgt wurden: In generischen Modellen wurden elektrische Feldstärken einer ITS-Sendeantenne unter Freiraumbedingung bzw. in reflektierenden Umgebungen analysiert, um mögliche Sicherheitsabstände abzuleiten und eine Vergleichsgrundlage für die Feldstärkemessungen aus Abschnitt 3.2.2 zu gewinnen. Zur Bewertung des Störvermögens von ITS-G5 Signalen im Fahrzeug wurde für eine Beispielkonfiguration die Verteilung des elektrischen Felds im Fahrzeug simuliert und hinsichtlich auftretender Feldstärken und Resonanzerscheinungen untersucht. Bei allen Simulationen kam das Modell eines Halbwellen-Dipols als Sendeantenne zum Einsatz, welcher auf 5,9 GHz abgestimmt wurde. Die dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die normgerechte maximale EIRP von 2 W (+33 dBm).

#### 3.3.1 Generische Modelle

Um mögliche Beeinflussungen der Wellenausbreitung durch benachbarte metallische Fahrzeugteile am Einbauort einer ITS-G5 Sendeantenne bewerten zu können, wurde zunächst die Feldverteilung eines Halbwellendipols im Freiraum als Vergleichsgrundlage simuliert (s. Abbildung 3.22). In nachfolgenden Simulationen wurden metallische Bauteile durch eine perfekt leitende Fläche im Abstand  $d$  zur Sendeantenne modelliert (s. Abbildung 3.23). Dabei wurde die Entfernung  $d$  in verschiedenen Simulationen zwischen  $\lambda/5$  und  $5\lambda$  ( $\cong 1 \dots 25$  cm) variiert, um verschiedene Interferenzszenarien zu untersuchen. Die aus der Überlagerung des ursächlichen und reflektierten Felds resultierende elektrische Feldstärke wurde abhängig vom Abstand zur Sendeantenne ausgewertet. Ausgewählte Ergebnisse für die größte beobachtete Felderhöhung ( $d = 1$  cm) und Feldabschwächung ( $d = 2,5$  cm) sind als Beträge der elektrischen Feldstärke  $|E|$  in Abbildung 3.24 dargestellt.

Im direkten Umfeld der Antenne sind Feldstärken von mehreren hundert Volt pro Meter zu beobachten, die mit zunehmendem Abstand zur Sendeantenne abnehmen. Im Freiraum werden Feldstärken größer 100 V/m im Nahbereich um die Antenne bis etwa 10 cm Abstand erreicht. Durch konstruktive Interferenz, z.B. bei  $d = 1$  cm, treten Felderhöhungen auf, sodass Feldstärken von über 100 V/m in 19 cm Abstand zur Antenne auftreten (s. Abbildung 3.3). Metallische Strukturen in der Nähe einer Sendeantenne können auftretende Störfeldstärken beeinflussen und notwendige Sicherheitsabstände drastisch vergrößern. Bereits kleine Änderungen der Distanz  $d$  im Zentimeterbereich bedeuten eine signifikante Veränderung auf der Skala der Wellenlänge ( $\lambda \approx 5$  cm) und entsprechend können die auftretenden Feldstärken einen großen Einfluss auf die Feldverteilung haben. Folglich können der Einbauort der Antenne und umliegende Metallstrukturen das Störvermögen einer ITS-Sendeinheit entscheidend beeinflussen.

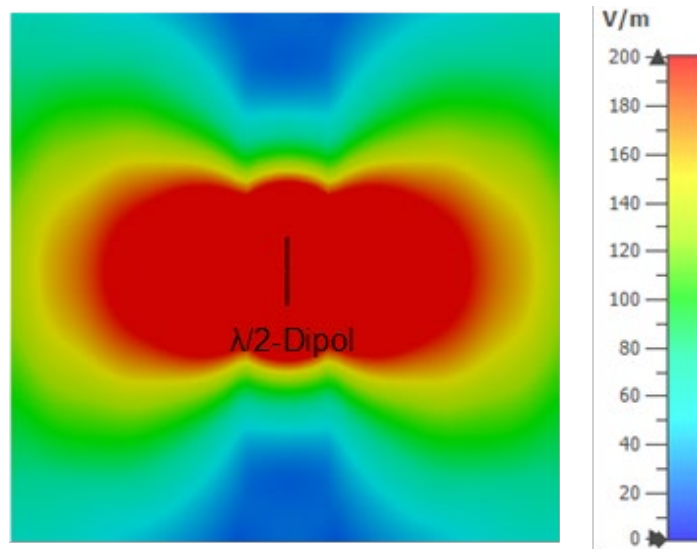


Abbildung 3.22 Falschfarbendarstellung des Betrags der elektrischen Feldstärke  $|E|$  eines Halbwellen-Dipols im Freiraum bei 5,9 GHz und 2 W EIRP.

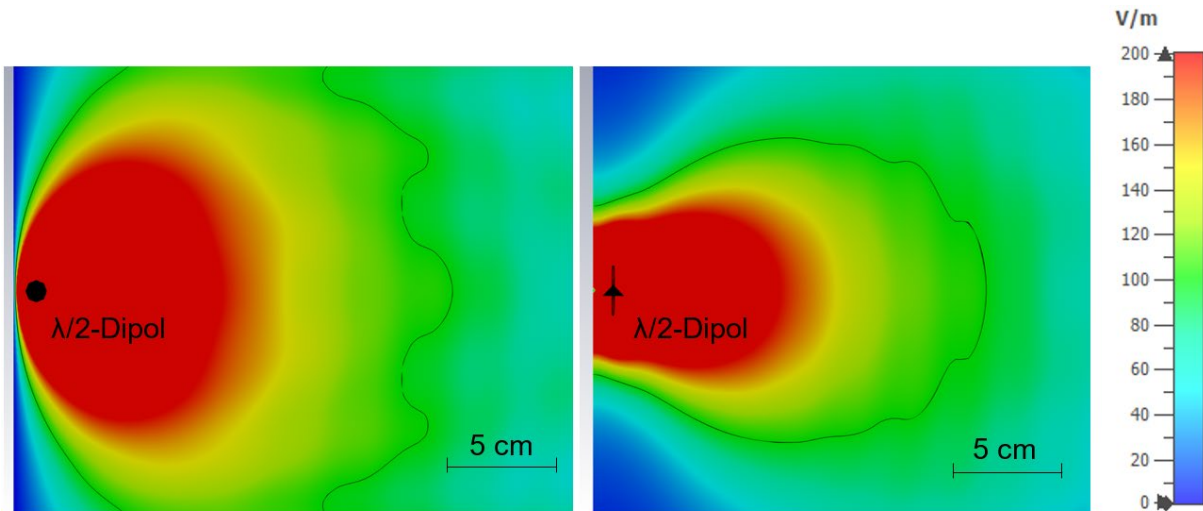


Abbildung 3.23 Betrag der elektrische Feldstärke eines Halbwellen-Dipols im Abstand  $d = 10$  mm zu einer perfekt leitenden Massefläche (jeweils am linken Bildrand) bei 2 W EIRP als Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts). Die Feldstärke von 100 V/m ist als schwarze Isokonturlinie eingezeichnet.

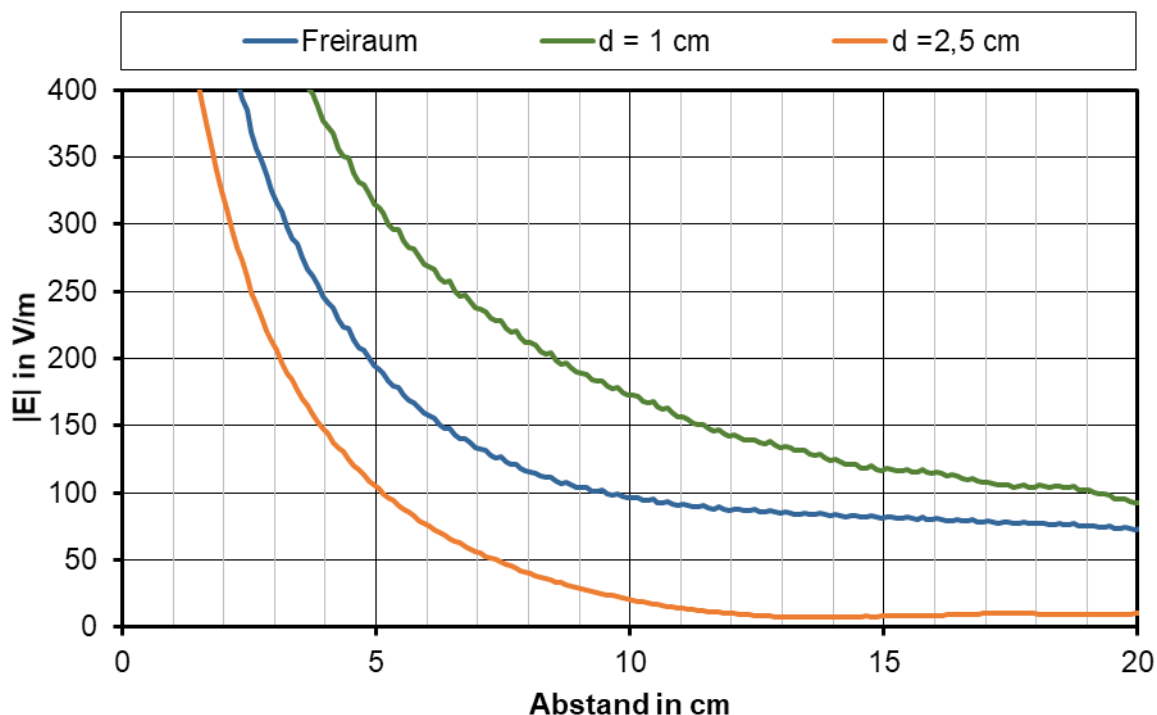


Abbildung 3.24 Maximum der elektrischen Feldstärke in Hauptstrahlrichtung in Abhängigkeit vom Abstand zum Halbwellendipol. Dargestellt sind die Feldstärken bei Freiraum-ausbreitung und Beeinflussung durch eine Metallwand im Abstand  $d$ .

### 3.3.2 Feldstärke im Fahrzeug

Ausgehend von den generischen Modellen wurde in einer weiteren Simulation die Feldverteilung einer ITS-Antenne im Einbauzustand untersucht. Als Sendeantenne diente dabei der zuvor beschriebene Halbwellen-Dipol sowie ein vom Arbeitskreis bereitgestelltes Fahrzeugmodell (Audi A8). Weiterführende Details wie das Glas der Windschutzscheibe oder Passagiersitze wurden aus Komplexitätsgründen in der Simulation nicht berücksichtigt. Ziel war die Feldverteilung von ITS-G5 im Kfz unter Berücksichtigung eines typischen Einbauorts qualitativ zu bewerten und exemplarisch auf Resonanzerscheinungen zu untersuchen. Als Einbauort wurde die Mitte der Frontscheibe in der Nähe des Rückspiegels gewählt und der Dipol parallel zur Frontscheibe ausgerichtet (s. Abbildung 3.25).

Da die Fahrzeugabmessungen Vielfache der Wellenlänge betragen, bildet sich anstelle einer einzelnen starken Resonanz ein unregelmäßiges Interferenzbild mit vielen schwächeren Maxima aus (s. Abbildung 3.26 und Abbildung 3.27). Die Ergebnisse der maximalen elektrischen Feldstärke in Abbildung 3.26 zeigen, dass Feldstärken von über 100 V/m auf das Nahfeld der Antenne beschränkt sind. Da die verwendete Dipolantenne Rundstrahlcharakter besitzt, wird in diesem Beispiel ein Großteil der abgestrahlten Leistung in das Fahrzeug gestrahlt und stellt für die EMV einen eher ungünstigen Fall dar. Dennoch sind keine kritischen Feldüberhöhungen von über 100 V/m im Fahrzeuginnenraum zu beobachten, sondern die Feldstärke sinkt ab Abständen von circa 20 cm zur Sendeantenne auf maximal 40 V/m ab. Das generische Modell zeigte hingegen, dass konstruktive Interferenz besonders im Bereich bis 20 cm Abstand zur Strahlungsquelle in einer reflektiven Umgebung zu



Feldstärkeüberhöhungen führen kann. Ähnlich erhöhte Feldstärken konnten messtechnisch im Kfz (Verbauort Seitenfenster) nachgewiesen werden und verdeutlichen somit den Einfluss der Antennenumgebung auf das tatsächliche Störvermögen einer V2X-OBUs.

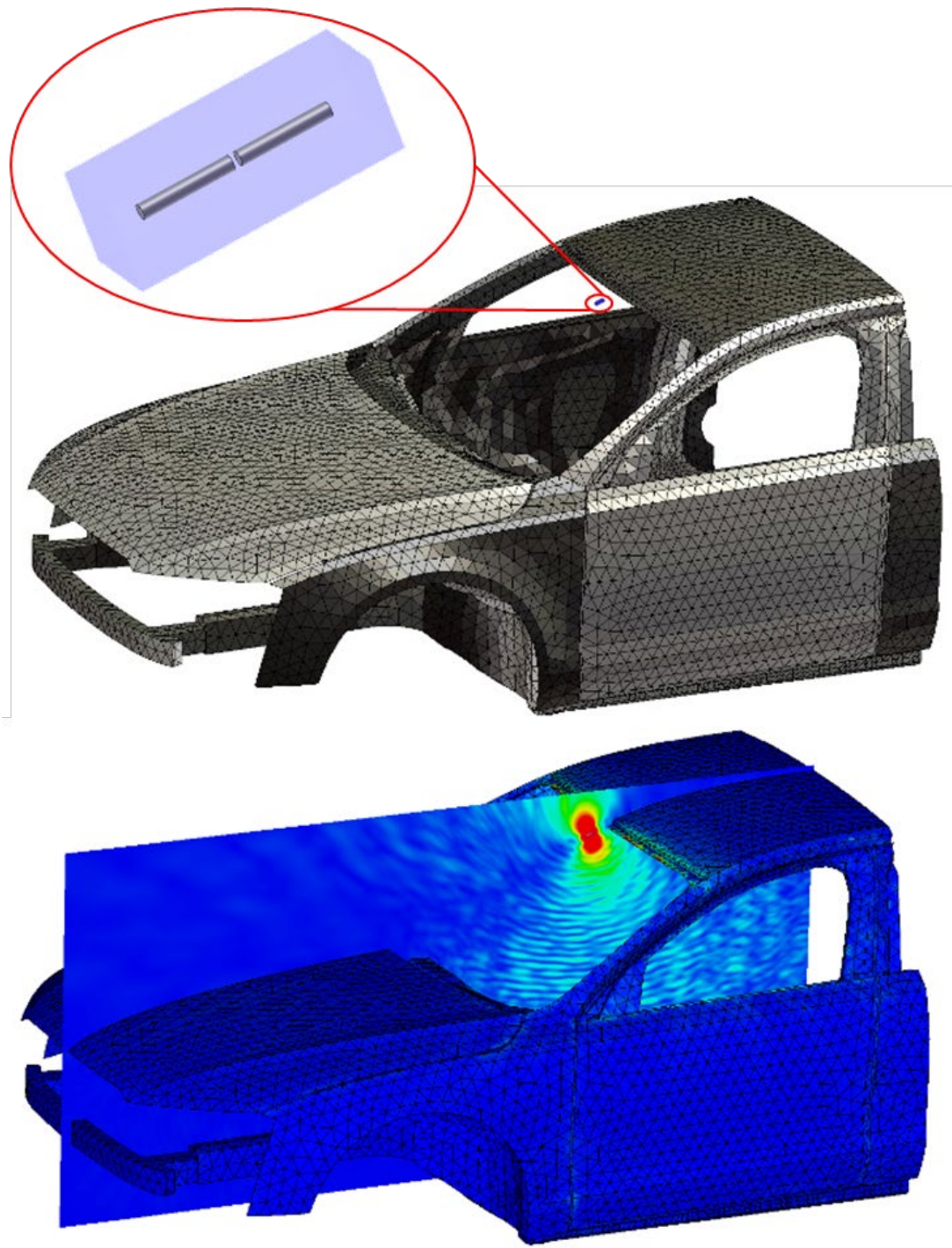


Abbildung 3.25 oben – Simulationsmodell zur Bewertung der Feldverteilung im Kfz, bestehend aus Vorderteil der metallischer Fahrzeugkarosserie und der Sendeantenne (Halbwellen-Dipol in Detailansicht); unten - Visualisierung der simulierten Feldverteilung als Betrag der elektrischen Feldstärke bei 5,9 GHz auf der Fahrzeugoberfläche und einer Schnitt eben

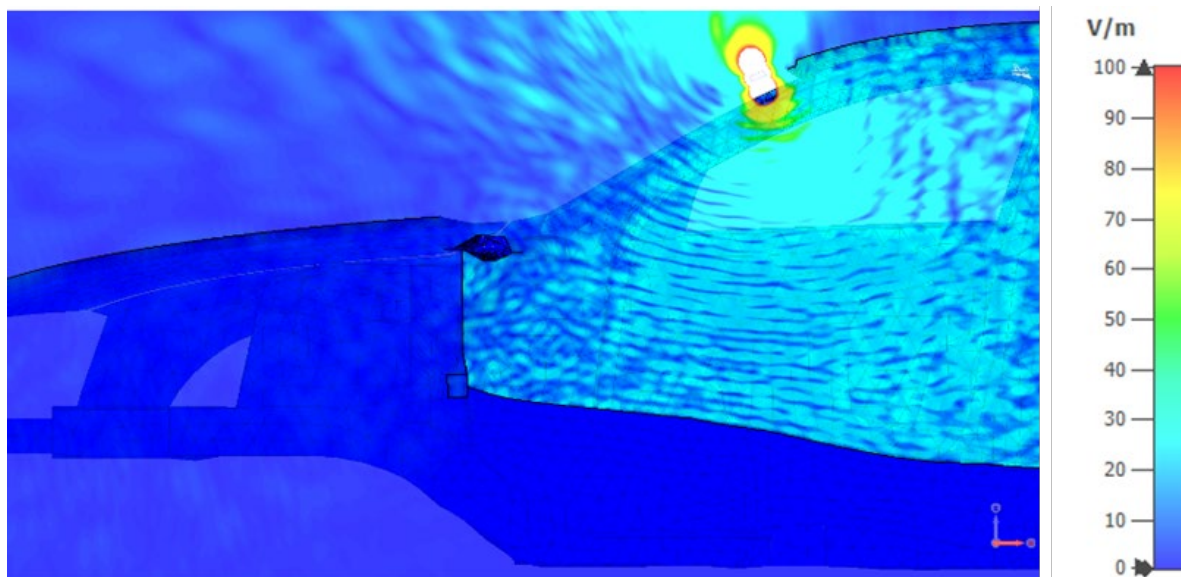


Abbildung 3.26 Betrag der maximalen elektrischen Feldstärke im Fahrzeug auf der Schnittebene längs durch das Fahrzeug. Bereiche mit Feldstärken größer 100 V/m sind ausgeblendet und konzentrieren sich auf den Nahbereich der Sendeantenne.

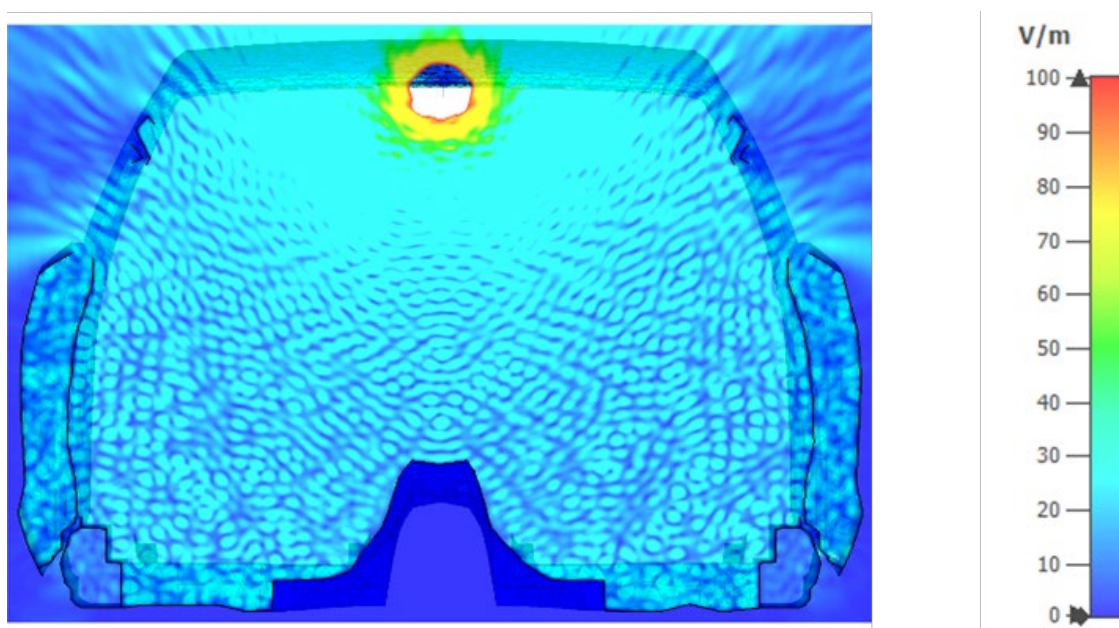


Abbildung 3.27 Resultierende Verteilung des maximalen elektrischen Felds im Fahrzeug als Schnittansicht quer durch das Fahrzeug, Frontscheibe und Strahlungsquelle. Bereiche mit Feldstärken größer 100 V/m sind ausgeblendet.

### 3.4 Ableitung der Anforderungen an Störfestigkeitsprüfungen

Nachfolgend werden die im Rahmen des zweiten Arbeitspaketes erhobenen elektrischen Feldstärken der verschiedenen relevanten Funkdienste am Fahrzeug zusammengefasst. Die Ergebnisse der abstandsabhängigen Messungen unter idealisierten Freiraumbedingungen sind in Tabelle 3.7 aufgelistet. Für ITS-G5 wurden die höchsten elektrischen Feldstärken im Vergleich zu den anderen Technologien ermittelt, so dass sich die darauffolgenden Messungen im Kfz auf ITS-G5 konzentrierten. Die Ergebnisse der Messungen im Kfz sind in Tabelle 3.8 zusammengefasst.

Unter idealisierten Freiraumbedingungen wurden für ITS-G5 ab einem Abstand von 5 cm zur Sendeantenne elektrische Feldstärken unter 100 V/m gemessen. Aufgrund der reflektiven Umgebung bei Einbau der Sendeantenne in einem Fahrzeug ergeben sich je nach Verbauort bei einem Abstand bis 5 cm elektrische Feldstärken, die deutlich über 100 V/m liegen. Bei den Verbauorten an der Frontscheibe und in der Frontschürze sinkt die elektrische Feldstärke bei einem Abstand von 10 cm allerdings unter 100 V/m. Einzig beim Verbauort am Seitenfenster ergaben sich noch elektrische Feldstärken oberhalb von 100 V/m bei einem Abstand von 10 cm zur Sendeantenne in verschiedenen Richtungen. Der Verbauort am Seitenfenster weist besonders viele metallische Strukturen in der Umgebung auf, sodass sich hier die elektromagnetischen Wellen aufgrund der Reflexionen konstruktiv überlagern und es so zu Feldstärkeüberhöhungen kommen kann. Bei den betrachteten Einbauszenarien für ITS-G5-Antennen erweist sich dieser Verbauort als „Worst-Case“-Szenario.

Tabelle 3.7 Maximale elektrische Feldstärken (Peak) für verschiedene Funktechnologien, die in unterschiedlichen Abständen unter idealisierten Freiraumbedingungen ermittelt wurden (s. Teilkapitel 3.2.2)

Funktechnologie	Elektr. Feldstärke (Peak) in V/m		
	Direkter Kontakt	5 cm Abstand	25 cm Abstand
ITS-G5	562,3	79,4	63,1
LTE	302,0	51,3	24,6
WLAN	160,3	18,2	8,4
Bluetooth	24,5	6,0	1,8

Tabelle 3.8 Zusammenfassung der maximal gemessenen Feldstärken (Peak) je Verbauort im Kfz mit ITS-G5 (s. Teilkapitel 3.2.4)

Verbauort	Elektr. Feldstärke (Peak) bei Abstand zu Sendeantenne
Frontscheibe	148,1 V/m bei 5 cm (47,2 V/m bei 10 cm)
Frontschürze	173,6 V/m bei 0 cm (70,8 V/m bei 10 cm)
Seitenfenster	175,0 V/m bei 5 cm (161,7 V/m bei 10 cm)
Dachantenne	26,2 V/m bei 0 cm (8,8 V/m bei 10 cm)

Als Ergebnis der Feldstärkestudien lassen sich folgende Aspekte für gestrahlte Störfestigkeitsuntersuchungen an elektronische Baugruppen im Kfz im Frequenzbereich für das autonome und vernetzte Fahren bei 5,9 GHz ableiten:

- Im Abstand von 5 cm kann die maximale elektrische Feldstärke Werte größer als 100 V/m annehmen.
- Im Abstand von 10 cm sinkt die maximale elektrische Feldstärke überwiegend auf unter 100 V/m (ausgenommen „Worst-Case“-Verbauort Seitenfenster: bei 10 cm elektrische Feldstärke größer als 100 V/m in zwei Richtungen).
- ITS-G5 besitzt eine gepulste Signalstruktur mit einem Crest-Faktor bis zu 7 dB. Die hohen elektrischen Feldstärken treten im Puls als kurzzeitige Peak-Werte auf.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse lässt sich weiterführend das tatsächliche Störpotential für typische Opfersysteme aus dem Kfz-Bereich ableiten. Die nachgewiesenen vergleichsweise hohen Feldstärken, die geringen Abstände von Störquelle zur Störsenke, sowie die hohe Relevanz von ITS-G5 für das autonome Fahren, waren Grund für die Fokussierung der weiteren messtechnischen Untersuchungen auf ITS-G5. Nach kurzer Vorstellung der Testsysteme im folgenden Abschnitt 3.5 werden die durchgeführten Messungen einschließlich der Ergebnisse nach Komponentenebene (Abschnitte 3.6 und 3.7) und Fahrzeugebene (Abschnitte 3.8 und 3.9) beschrieben.



## 3.5 Robustheit leitungsgebundener Fahrzeugvernetzungs-systeme

Bei den EMV-Prüfmethoden ist grundsätzlich zwischen der IC-Ebene, der Komponentenebene und der Fahrzeugebene zu unterscheiden. Die folgenden Untersuchungen sollen sowohl auf Komponenten- als auch auf Fahrzeugebene das Störpotential der V2X-Funkdienste auf leitungsgebundene Fahrzeugvernetzungs-systeme prüfen und gegebenenfalls Handlungsbedarf für genormte Störfestigkeitsprüfungen aufzeigen. Die Untersuchungen beschränken sich auf die V2X-Kommunikation, da die vorangegangenen Feldstärkemessungen ergaben, dass diese Funkdienste das potentiell größte Risiko darstellen und im Vergleich zu bereits etablierten Funksystemen im Fahrzeug in dem neu genutzten Frequenzband um 5,9 GHz arbeiten.

### 3.5.1 Einflussfaktoren auf die Robustheit und zukünftige Entwicklung

Die Entwicklung bei den Kommunikationssystemen geht in Richtung höherer Datenraten. Treiber hierfür ist die Autonomisierung der Fahrfunktionen. Die elektronische Architektur der Fahrzeuge stützt sich dazu weniger auf den bisherigen dezentralen Ansatz mit vielen verteilten Steuergeräten, sondern entwickelt sich hin zu zentralen und redundanten Steuereinheiten. Hohe Datenraten durch Kamerasysteme und die niedrigen Latenzzeiten durch die Automatisierung stellen hohen Anforderungen an die Kommunikationssysteme. Die sicherheitsrelevante Datenübertragung im Fahrzeug ist leitungsgebunden. Kritische Punkte für die Einkopplung sind damit die Ausführungen und die Eigenschaften des leitungsgebundenen Kommunikationskanals.

Die leitungsgebundene Kommunikation kann über verschiedene Leitungstypen erfolgen. Möglich ist die Datenübertragung in Abhängigkeit vom entsprechenden Standard über:

- unverdrillte / verdrillte Leitungen
- ungeschirmte / geschirmte Leitungen
- eine Kombination aus den genannten Möglichkeiten mit einer unterschiedlichen Anzahl genutzter Kanäle

Hieraus ergeben sich weitere relevante Parameter für eine mögliche Einkopplung, wie die vom Übertragungssystem abhängige maximale Kanallänge und die Anzahl der zulässigen Zwischensteckverbindungen (sog. *Inline Connectoren*).

Die parasitären resultierenden Störpegel von Funkdiensten in die leitungsgeführten Kommunikationssysteme im Fahrzeug sind von der Feldstärke im Bereich der Leitungen und Steuergeräte abhängig. Diese ergibt sich u.a. aus der Sendeleistung und dem Abstand des Senders zur leitungsgeführten Kommunikationsstrecke. Der relevante Beeinflussungsgrad der Einkopplung hängt jedoch noch von weiteren Faktoren des Kommunikationskanals, wie z.B. der Schirmdämpfung und der Unsymmetriedämpfung für differentielle Systeme, ab.

Neue Kommunikationssysteme mit höheren Baudraten werden aufgrund der gestiegenen Anforderungen an die analoge Bandbreite geschirmt ausgeführt. Allerdings sind im betrachteten Frequenzbereich von 5,9 GHz durchaus Verkopplungen zu erwarten, wenn in der Schirmung geringste Öffnungen an den Gehäusen oder nicht ideale Schirmanbindungen im Steckerbereich vorhanden sind. Weiterhin können alle leitenden Strukturen im Zentimeterbereich als Sekundärstrahler angeregt werden.

Neben der direkten Einkopplung in die Kommunikationsstrecke können sich störende Einkopplungen über den Kabelbaum in andere Anschlüsse des entsprechenden Steuergerätes, z.B. die Versorgungsleitungen, ergeben. Diese werden im Folgenden nicht untersucht, da sie von der jeweiligen Realisierung (Schaltung) im Steuergerät abhängen.

### 3.5.2 Übersicht geprüfter Systeme

In aktuellen Fahrzeugen wird eine Vielzahl von Bussystemen genutzt. Die Auswahl für die hier geprüften Derivate wurde nach den folgenden Kriterien getroffen:

- Verbreitung,
- Abstufung Bandbreite,
- Kanalausführung (geschirmt, ungeschirmt) und
- verschiedene Steckersysteme.

Alle verwendeten Teststeuergeräte sind metallisch geschirmt. Eine direkte Einkopplung der V2X-Funksignale in die Leiterplatten wurde nicht für alle Systeme geprüft. Die direkte Verkopplung von Antennen mit der Buselektronik auf der Leiterplatte ist aufgrund geringer Abstände nur für die Intrasystem-EMV zu betrachten. Im Vordergrund der durchgeführten Untersuchungen stand jedoch die Einkopplung in Leitungen und Stecker, auch im Leitungssatz. Diese sollen bei Auftreten von Störeinflüssen mit den aus den Feldstärkemessungen abgeleiteten Anforderungen abgeglichen werden.






Die genutzten Systeme verwenden übliche Kfz-Steckerlösungen (außer für die FlexRay-Knoten) und Kfz-Leitungstypen. Alle Steuergeräte nutzen reale Daten (außer PCIe: hier PRBS7-Testsignal) für die Kommunikation.

Alle Kommunikationsknoten wurden am FTZ entworfen und besitzen die zum Zeitpunkt der Messungen festgelegte Beschaltung am Kommunikationskanal für das jeweilige System. Eine Übersicht über die verwendeten leitungsgebundenen Kommunikationssysteme und der Teststeuergeräte sind in Tabelle 3.9 und in Tabelle 3.10 gezeigt.

Tabelle 3.9 Übersicht leitungsgebundener Kommunikationssysteme (*Twisted Pair*, TP: verdrehtes Aderpaar mit angepasstem Wellenwiderstand)

System	CAN-FD	FlexRay	100Base-T1	1000Base-T1	PCIe Gen3
Stecker (Kfz)	MQS	-	MQS	AMEC	HMTD
Leitung	TP ungemantelt	TP ungemantelt	TP gemantelt	TP geschirmt; TP ungeschirmt	4x TP geschirmt
Baudrate	2 MBit/s	10 MBit/s	100 MBit/s	1 GBit/s	8 GBit/s pro Lane
Analoge Bandbreite	1 MHz	5 MHz	33 MHz	600 MHz	4 GHz

Tabelle 3.10 Teststeuergeräte für die untersuchten Bussysteme

CAN-FD	FlexRay	100Base-T1	1000Base-T1	PCIe Gen3
				

### 3.6 Mess- und Prüfverfahren auf Komponentenebene

Für die Untersuchungen sind Messungen nach der ISO 11452-9 (Mobile Transmitter Test) [ISO12] und der ISO 11452-2 (ALSE-Messverfahren mit der Hornantenne) [ISO19-1] geeignet.

Der Mobile Transmitter Test bietet sich an, da er für ITS-G5 fahrzeugeigene Sendeeinheiten (OBUs) im Fahrzeug nah an der Applikation ist. Weiterhin kann bei diesem Verfahren mit verschiedenen Antennen geprüft werden. Das Verfahren mit der Hornantenne entspricht dem Szenario einer extern platzierten Sendeeinheit für V2X (RSU).

Für RSUs und OBUs gelten in der Applikation die gleichen maximale Sendeleistungen.

#### 3.6.1 Messverfahren nach ISO 11452-9

Für die ISO 11452-9 wird die Sendeantenne im Abstand von 5 cm zum Prüfling (*Device under Test*, DUT) bzw. den Zuleitungen an verschiedenen Positionen und in verschiedenen Polarisationsrichtungen positioniert (s. Abbildung 3.28). Das Szenario entspricht damit auch einer OBU mit Antenne mit geringen Packaging-Vorgaben und einer *Worst-Case* Ausrichtung der Antenne zum DUT.

Die für den Funkdienst zulässige maximale EIRP von 33 dBm (2 W) liegt über den in den Normen als Beispiel angegebenen Prüfleistungen für im Frequenzbereich angrenzende Dienste mit 30 dBm (1 W).

Die aktuelle Edition 1 des Standards deckt aufgrund der spezifizierten Testantennen nur einen Anwendungsfrequenzbereich bis 5,855 GHz ab und umfasst damit nicht die neuen Funkdienste wie ITS-G5 bei 5,9 GHz. Diese Lücke wird gegebenenfalls mit der derzeit bei ISO in Bearbeitung befindlichen Edition 2 geschlossen [ISO19].

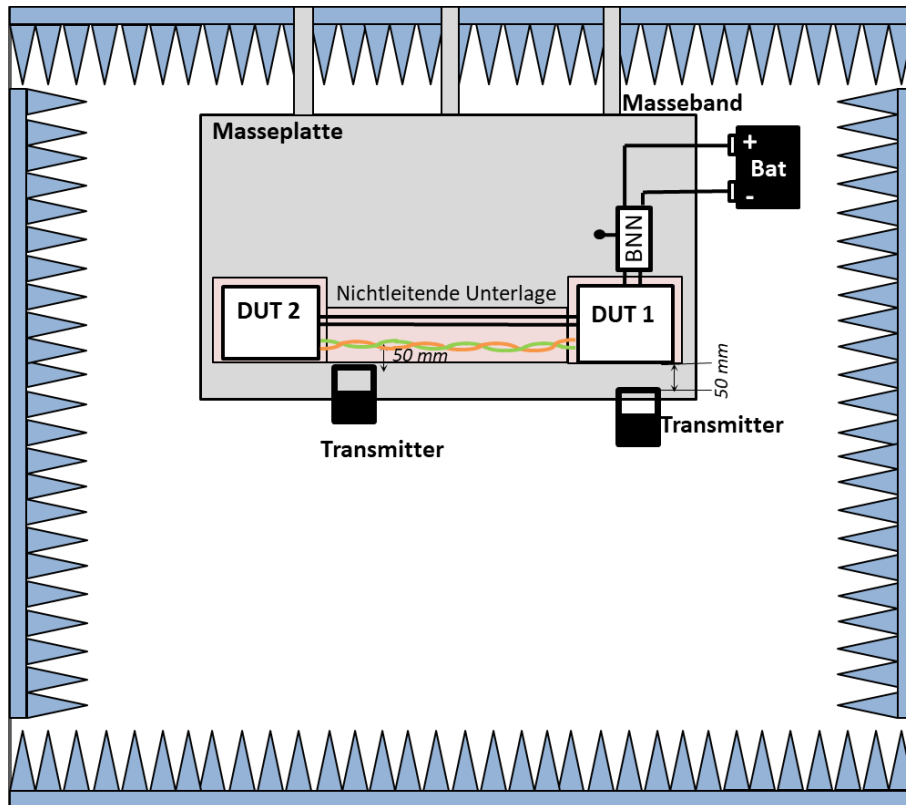


Abbildung 3.28 Messaufbau nach ISO 11452-9 [ISO12] mit zwei Kommunikationssteuergeräten (DUT 1 und DUT 2) und zwei möglichen Positionen des Transmitters

Zum Zeitpunkt der Arbeiten gültige Version der ISO 11452-9 Edition 1 (2012) enthält folgende Vorgaben [ISO12]:

- Definition bis Frequenzband für IEEE 802.11a von 5725...5850 MHz (unterhalb von ITS-G5) mit 1 W (Leistung am Antenneneingang) und Pulsmodulation (PM) 1600 Hz, 50 % Einschaltdauer
- kein Vorschlag für Testantenne im Frequenzbereich  $f > 2,7$  GHz
- Nutzung realer Sendesysteme mit Antenne für den Frequenzbereich 2,7 GHz bis 5,855 GHz ist möglich

Für die Messungen nach ISO 11452-9 kamen die Di-Patch-, die Breitband- und die Schwarzbeck-Antennen (s. Tabelle 3.2) zum Einsatz.

### 3.6.2 Messverfahren nach ISO 11452-2

Für die ISO 11452-2 wird eine Antenne im Abstand von 1 m zu DUT in den zwei Polarisierungen ausgerichtet (s. Abbildung 3.29). Das Testszenario entspricht damit der Bestrahlung durch eine RSU vergleichbar zu den Fahrzeugmessungen. Das vorgegebene Messverfahren deckt bereits den Frequenzbereich für die V2X Kommunikation ab. Tabelle 3.11 zeigt die in der Norm festgelegten Testlevel für verschiedene Frequenzbereiche, wobei im ITS-Frequenzbereich Testlevel bis 100 V/m vorgeschlagen werden. Darüber hinaus können allerdings anwenderspezifische Testlevel definiert werden.

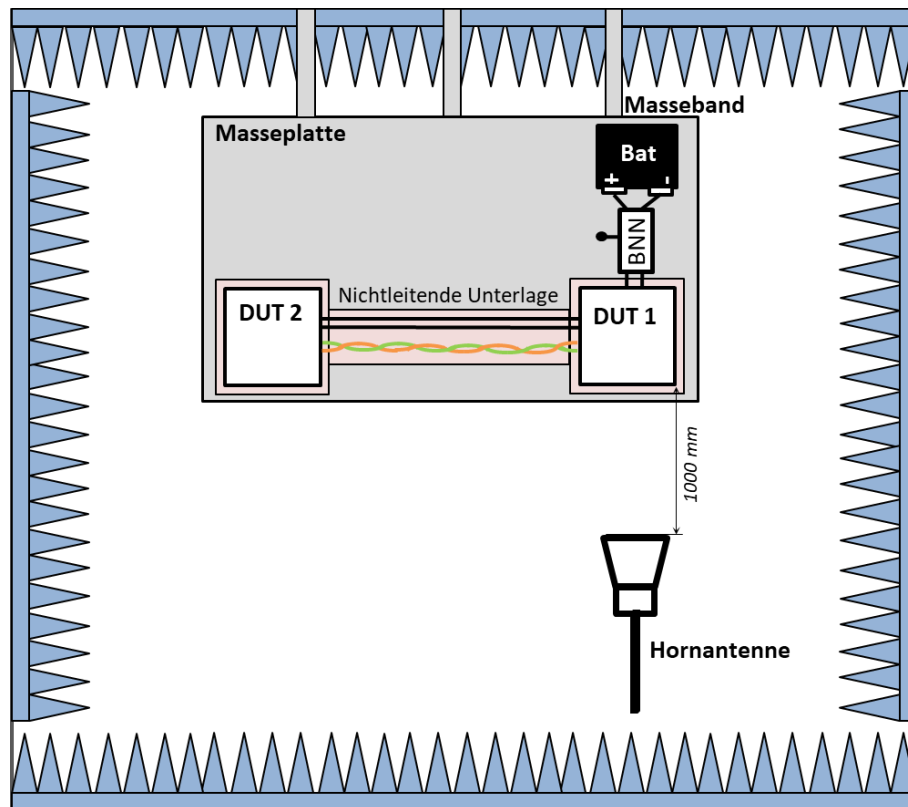


Abbildung 3.29 Messaufbau nach ISO 11452-2 mit zwei Kommunikationssteuergeräten (DUT 1 und DUT 2) [ISO19-1]

Tabelle 3.11 Testlevel nach ISO 11452-2 [ISO19-1]; ITS-G5 Frequenzbereich grün hervorgehoben

Frequenz [MHz]	Testlevel I [V/m]	Testlevel II [V/m]	Testlevel III [V/m]	Testlevel IV [V/m]	Testlevel V [V/m]
80...200	25	50	75	100	Anwenderspezifische Testlevel
200...1.000	25	50	75	100	
1.000...8.000	25	50	75	100	
8.000...18.000	25	50	75	100	

## 3.7 Messungen und Ergebnisse auf Komponentenebene

### 3.7.1 Messtechnischer Vergleich der erzeugten Testfeldstärken zwischen realem ITS-G5 System und Testaufbau mit Prüfantenne

Ziel der Untersuchungen war es, mit einem vergleichbaren Aufbau wie in der ISO 11452-9 vorgegeben die am DUT erreichbaren Feldstärkewerte zu vergleichen. Daraus lässt sich ableiten, ob mit dem Normaufbau und dem normativen Prüfsignal das DUT mit vergleichbaren Störfeldstärken beaufschlagt wird wie mit dem realen System.

Dazu wird die pulsmessfähige Feldsonde LSProbe 1.2 [LUM18] so auf dem Prüftisch platziert, dass sie mit ihrem Mittelpunkt 5 cm über der Bezugsmasseplatte liegt und so für die Messungen variiert wird, dass sie verschiedene Abstände vom Rand des Messtisches aufweist. In einer Höhe von 10 cm über der Bezugsmasseplatte wird die entsprechende Antenne platziert (s. Tabelle 3.12).

Tabelle 3.12 Prüfaufbauten für Feldstärkemessungen auf dem Komponententisch

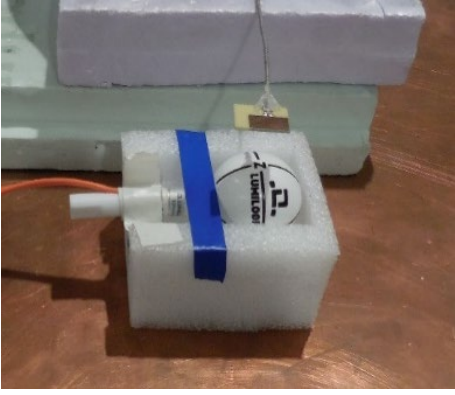
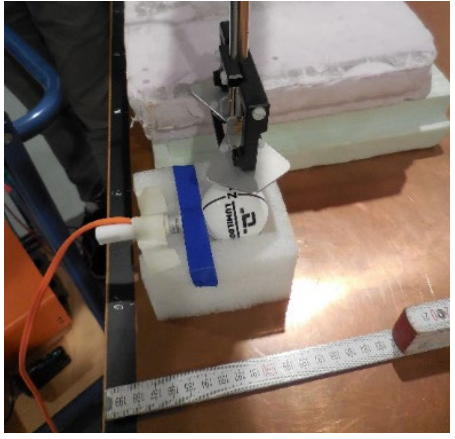
Darstellung Messaufbau	Beschreibung Messaufbau
	<p><u>Cohda Wireless ITS-G5 System:</u>                      mit Di-Patch-Antenne                      28,8 dBm max. Sendeleistung am Ausgang Sendeeinheit                      f = 5,9 GHz                      nachträgliche Hochrechnung auf 33 dBm EIRP</p>
	<p><u>Testaufbau mit Prüfantenne:</u>                      Breitbandantenne 1...6 GHz (Schwarzbeck NJ422)                      30 dBm Sendeleistung am Eingang Antenne (nominal), für Messungen variiert                      f = 5,9 GHz                      Modulation 1600 Hz, 50 % Duty Cycle                      (Signalgenerator + HF-Verstärker)</p>

Tabelle 3.13 Ermittelte Feldstärkewerte auf dem Komponententisch bei verschiedenen Verstärker- ausgangsleistungen  $P_{net}$

Position in cm / Abstand Sonde zu Rand Bezugsmasseplatte	0	5	10	15	20
<b>ITS-G5: Cohda Wireless System</b>					
Feldstärke [V/m] bei 2 W (EIRP)	180	138	<b>137</b>	120	117
<b>Prüfsystem: Schwarzbeck NJ422 / Signalgenerator / HF-Verstärker</b>					
$P_{net} = 1 \text{ W}$					
Feldstärke [V/m]	96	68	<b>74</b>	73	84
$P_{net} = 2 \text{ W}$					
Feldstärke [V/m]			<b>124</b>		
$P_{net} = 3 \text{ W}$					
Feldstärke [V/m]			<b>139</b>		
$P_{net} = 4 \text{ W}$					
Feldstärke [V/m]	169	145	<b>154</b>	159	153

Aus den Messergebnissen in Tabelle 3.13 ergibt sich, dass mit dem realen System und der maximal zulässigen Sendeleistung am Prüfpunkt eine Feldstärke erreicht wird, die mit dem normativen Prüfsystem erst bei einer Vorwärtsleistung von 3 W entsteht. Die in den vergleichbaren Bändern angegebene Prüfleistung ist mit einem 1 W in der aktuellen Norm [ISO12] deutlich geringer. Dies deutet auf eine eventuell notwendige Überarbeitung der Normvorschriften hinsichtlich der V2X-Funkdienste hin.

Für die verwendete Schwarzbeck-Breitbandantenne mit Elementen 422 NJ steht keine Angabe zum Gewinn zur Verfügung. Die nachfolgenden Diagramme (s. Abbildung 3.30 und Abbildung 3.31) zeigen ersatzweise erreichbare Feldstärken in Abhängigkeit von Frequenz und Speiseleistung sowie die Verteilung des elektrischen Feldes bei 6 GHz für diese Prüfantenne.

Mit den Prüfbedingungen nach Norm für IEEE 802.11a (5 GHz WIFI: 5725...5850 MHz) [IEEE99] und der Schwarzbeck-Antenne SBA 9119 + Elemente 422NJ wird die Feldstärke des realen Systems (5850...5925 MHz) bei einer Prüfleistung von  $P_{\text{net}} = 3 \text{ W}$  erreicht.

Die ITS-G5 Antennen werden mit Hauptstrahlrichtung „aus dem Fahrzeug“ verbaut, daher ist die Feldstärke für umgebende Elektronik bei gleichem Abstand sehr wahrscheinlich geringer als mit *Mobile Transmitter Test* in Hauptstrahlrichtung („Worst-Case“) ermittelt.

Bei den Fahrzeugmessungen (vgl. Abschnitt 3.2.4) wurden nur beim Verbauort „Seitenfenster“ Werte größer als 100 V/m im Abstand von 10 cm von der Antenne erreicht. Dieses Ergebnis gilt für das getestete Funkssystem mit der verwendeten Antenne im Technikträgerfahrzeug.

Feldstärken von 100 V/m an der Prüflingsposition sind mit 1 W im Prüfaufbau realisierbar. Die Spitzenwerte beim Sendepuls der realen Sendeeinheit werden mit der Substitutionsmethode erst mit 3 W Sendeleistung erreicht.

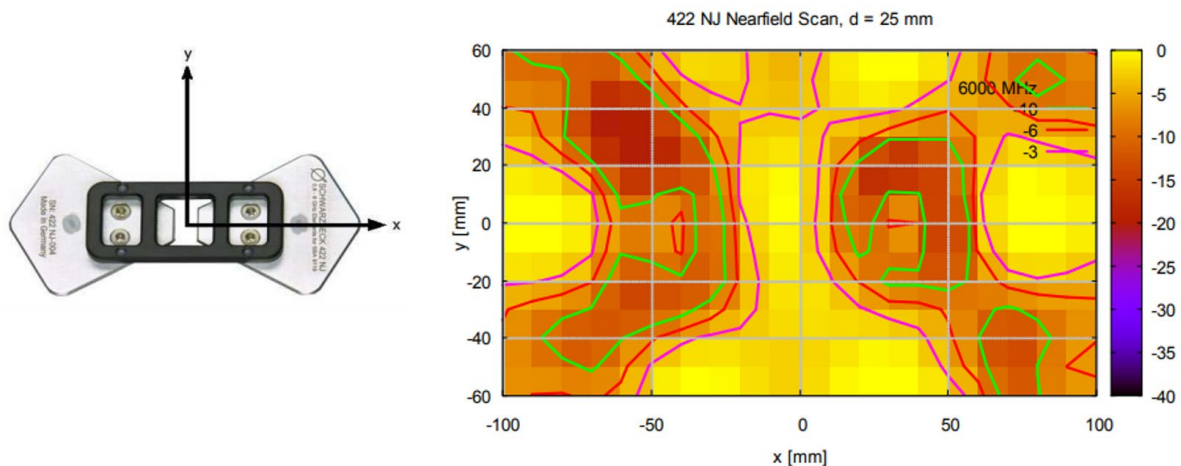


Abbildung 3.30 links: Darstellung Elemente 422NJ für die Schwarzbeck-Antenne; z-Achse in Betrachtungsebene; rechts: Feldverteilung für 6 GHz, deutlich zu erkennen die Maxima unter den beiden Flachelementen und in der Mitte der Antenne [Sch20]



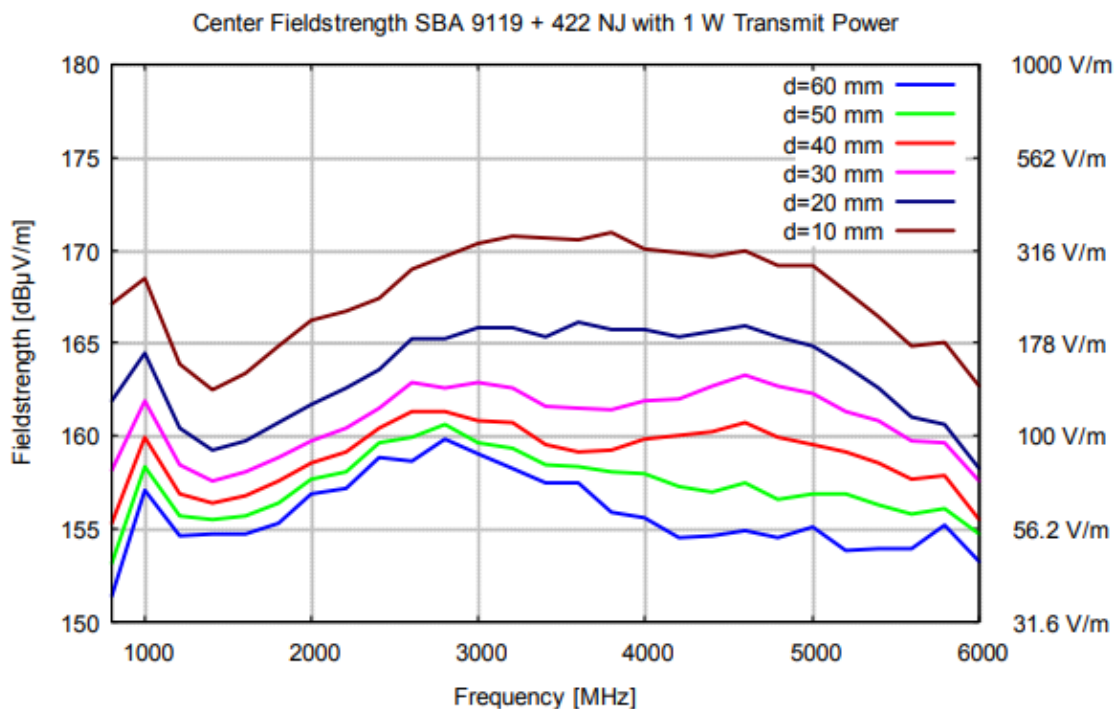


Abbildung 3.31 Maximale Feldstärke der Schwarzbeck-Breitbandantenne mit Elemente 422NJ bei 6 GHz und verschiedenen Abständen im Freifeld [Sch20]

### 3.7.2 Messaufbau Komponentenebene nach ISO 11452-9

Zum Nachweis der Störfestigkeit der untersuchten Steuergeräte ist in jedem System eine Eigendiagnose mit optischer Schnittstelle zur Übertragung des Kommunikationsstatus an eine Auswertesoftware implementiert. Für die Systeme, die auch gewichtete Informationen zur Signalqualität integriert haben (z.B. Ethernet-Systeme), wird auch der dafür relevante Wert übermittelt. Es können somit alle Fehler und deren Häufigkeit erkannt werden. Über die Signalqualitätsindikatoren können auch mögliche Beeinflussungen vor dem Auftreten von Fehlern erkannt werden (s. Abbildung 3.32). Folgende Antennenpositionen wurden bei zur Störeinkopplung messtechnisch untersucht:

- Steuergerät (mehrere Ausrichtungen der Antenne),
- Steckerbereich,
- Leitung (bis 30 cm ab Steuergerät) sowie
- Inline Konnektoren (wenn vorhanden).

Abbildung 3.33 bis Abbildung 3.36 zeigen das Testsystem sowie exemplarische Antennenpositionen während der Messungen.



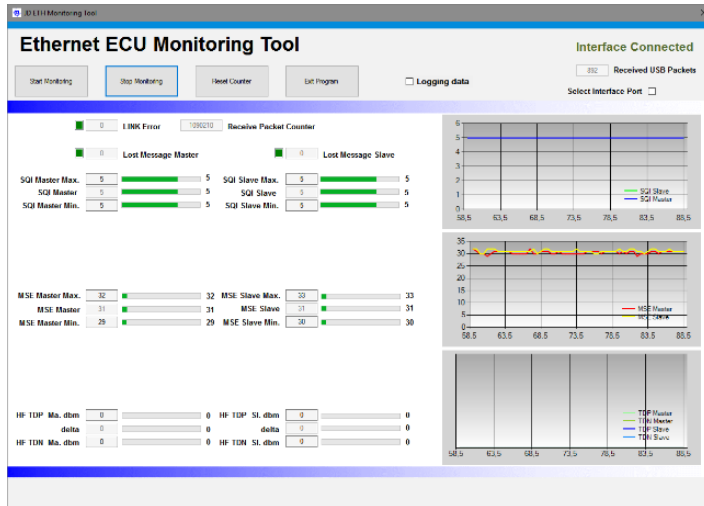


Abbildung 3.32

Beispiel für die Überwachungssoftware: 100Base-T1 Monitoring

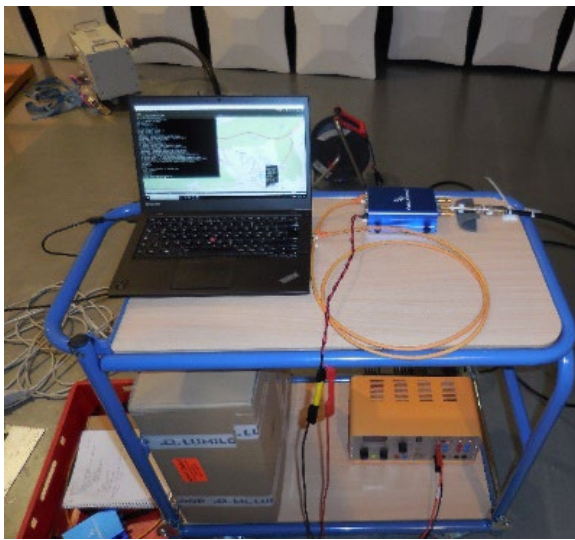


Abbildung 3.33

Steuerrechner und Sendemodul für das Cohda Wireless System



Abbildung 3.34

Signalgenerator und HF-Verstärker für die Prüfungen mit Ersatz-Prüfsignalen nach ISO 11452-9



Abbildung 3.35  
Beispiel für Messaufbau, Anordnung  
mit Prüfantenne über Kabelbaum

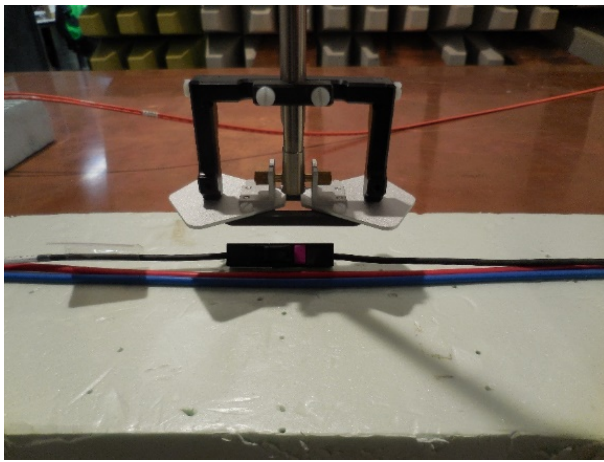


Abbildung 3.36  
Beispiel für Messaufbau; Anordnung  
mit Prüfantenne über HMTD Inline  
Connector

### 3.7.3 Ergebnisse Prüfungen Bussysteme nach ISO 11452-9

Alle Kommunikationstestsysteme wurden mit dem Cohda Wireless System als auch mit dem normativem Prüfsystem getestet, wobei für das normative Prüfsystem sowohl die FTZ Breitbandantenne als auch die Schwarzbeck-Antenne (vgl. Tabelle 3.2) zum Einsatz kam. Beide Antennen decken den ITS-G5 Frequenzbereich um 5,9 GHz ab. Die Tests wurden entsprechend den Festlegungen von ISO 11452-9 durchgeführt, auch wenn dieser Frequenzbereich in der aktuellen Version des Standards nicht angeführt ist.

Die Antennen wurden jeweils im Abstand von 5 cm und 0 cm zu Steckern und Leitungen an verschiedenen Positionen platziert. Für die Schwarzbeck-Antenne erfolgte die Prüfung nur in z-Richtung (s. Abbildung 3.35), da die Abmessung der Antenne groß gegenüber den gewählten DUT ist. Die Ausrichtung der Elemente über der Leitung und den Kommunikationsknoten wurde verändert. Diese wurden an der z-Achse um 90°gedreht. Für die beiden anderen Antennen erfolgte auch eine Prüfung in den Raumachsen x und y (vgl. Abbildung 3.30).

Das Cohda Wireless System wird mit einer maximalen EIRP von +33 dBm betrieben. Dies führt gemäß den vorangegangenen Messungen zu einer maximalen Feldstärke von 138 V/m mit der LSProbe 1.2 im Abstand von 5 cm (vgl. Tabelle 3.13) und 562 V/m (vgl. Tabelle 3.6) bei 0 cm Abstand mit einer Nahfeldsonde.

Zur Bestimmung eines eventuell vorhandenen Sicherheitsfaktors für die Störfestigkeit der Kommunikationssysteme diente ein „Übertesten“ durch Erhöhung der Prüfsendeleistung. Zu diesem Zweck wurde beim Cohda Wireless System mit fester maximaler Sendeleistung das

Ausgangssignal über den HF-Verstärker des Prüfaufbaus geleitet. Es erfolgt eine schrittweise Erhöhung um:

- 6 dB (300 V/m mit LSProbe 1.2 gemessen)
- 9 dB (400 V/m mit LSProbe 1.2 gemessen)

Die Ergebnisse sind in den Tabelle 3.14 und Tabelle 3.15 zusammengefasst.

Tabelle 3.14 Störfestigkeitsprüfungen mit dem Cohda Wireless System und Di-Patch Antenne

Sendeleistung (elektr. Feldstärke; Spitzenwert Puls)	CAN-FD	FlexRay	100Base-T1	1000Base-T1	PCIe Gen3
33 dBm (140 V/m)	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
39 dBm (300 V/m)	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
42 dBm (400 V/m)	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	n.i.O

Tabelle 3.15 Störfestigkeitsprüfungen mit Pulsmodulation und Schwarzbeck-Antenne SBA 9119 + Elemente 422NJ (angelehnt an ISO 11452-9)

Sendeleistung (elektr. Feldstärke; Spitzenwert Puls)	CAN-FD	FlexRay	100Base-T1	1000Base-T1	PCIe Gen3
30 dBm (100 V/m)	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
35 dBm (140 V/m)	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
46 dBm (400 V/m)	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	n.i.O

Bei der Prüfung mit beiden Methoden unter Verwendung des nominalen Sendepiegels des realen Systems (33 dBm EIRP) ergibt sich für alle Kommunikationssysteme eine fehlerfreie Funktion.

Nur beim PCIe-System zeigt sich eine Beeinflussung mit sporadischen Kommunikationsfehlern mit einer vierfach überhöhten Feldamplitude (400 V/m) und einer Störeinkopplung direkt im Steckerbereich.

Die Testergebnisse bestätigen somit die vorherige Annahme, dass nur die Kommunikationssysteme beeinflussbar sind, welche mit Analogbandbreiten im Bereich des ITS-G5 5,9 GHz Bandes arbeiten – allerdings nur bei deutlicher Übertestung.

### 3.7.4 Messaufbau auf Komponentenebene nach ISO 11452-2

Für die Messungen wird die Hornantenne BBHA 9120J [SCH-3] genutzt. Die Feldstärke wird auf 100 V/m kalibriert (Testlevel IV nach [ISO19-1]). Die Versorgung erfolgt über eine Bordnetz nachbildung (BNN). Ein Kommunikationsknoten hat eine kurze Masseanbindung an der

BNN, der zweite eine lange über den Kabelbaum. Die Ausrichtung der Antenne erfolgt auf das DUT, in dem Fall auf den Kommunikationsknoten mit langer Masseanbindung (s. Abbildung 3.37). Die Kommunikation wird während der Prüfungen überwacht (s. Abbildung 3.38). Alle Fehler werden bewertet.



Abbildung 3.37  
Beispiel für Messaufbau, Anordnung mit Prüfantenne BBHA 9120J auf DUT ausgerichtet

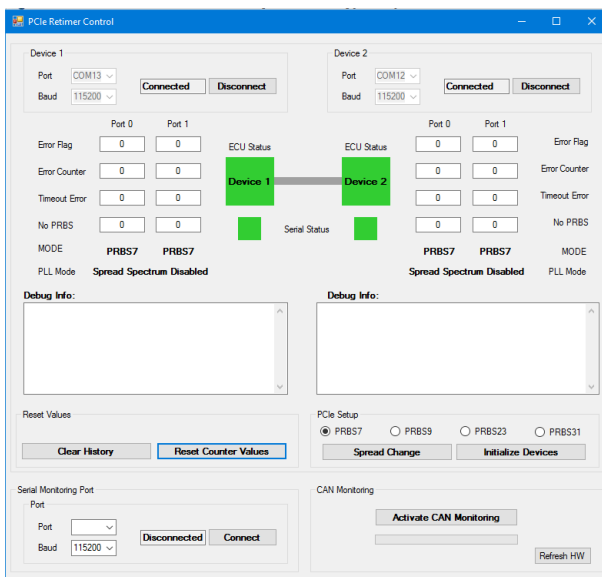


Abbildung 3.38  
Beispiel für Messaufbau; Beispiel für die Überwachungssoftware: PCIe Monitoring

### 3.7.5 Ergebnisse Prüfungen Bussysteme nach ISO 11452-2

Die im Level IV in Tabelle 3.11 definierten Feldstärken decken gegenüber einer fahrzeuginternen Störquelle eine Packaging-Vorgabe von mindestens 10 cm ab. Für die Bestrahlung durch RSUs ist aufgrund der in Europa gleichen normierten maximalen EIRP wie bei den OBUs mit geringeren Feldstärken im Fahrzeug zu rechnen. Es wurden keine Fehler festgestellt.

Tabelle 3.16 Störfestigkeitsprüfungen CW und PM mit Schwarzbeck-Antenne BBHA 9120J nach ISO 11452-2

Anregung: elektr. Feldstärke Spitzenwert Puls	CAN-FD	FlexRay	100Base-T1	1000Base-T1	PCIe Gen3
100 V/m CW	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
100 V/m PM	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.

### 3.8 Mess- und Prüfverfahren auf Fahrzeugebene

Im Bereich der Fahrzeugmessungen existieren zwei hier relevante Messvorschriften sowie ein Normvorschlag. Die ISO 11451-2 [ISO02] nutzt eine externe Antenne für die Störfestigkeitsprüfungen. Die ISO 11451-3 [ISO16] deckt auch Prüflinge ab, die als fahrzeugeigene Sendeeinheiten Antennen innerhalb als auch außerhalb des Fahrzeuges nutzen. Die Norm fokussiert sich für die internen Antennen auf portable Sendeeinheiten. Da die Antennen für das Band kurz unterhalb von 6 GHz sehr kompakt ausgeführt werden können, kommen hierfür auch neue Verbauorte im Fahrzeug in Frage, so dass das hier beschriebene Vorgehen zur Prüfung mit untersucht wird. Die gewählten Verbauorte der Antennen entsprechen den Ergebnissen der Recherche und weichen von denen in der Norm ab.

#### ISO 11451-2:

- Modulationen definiert in ISO 11451-1 [ISO15])
- zwei Ausrichtungen: vertikal, horizontal
- zwei Betriebszustände (min.)
- Messpunkte ergeben sich aus der kompletten Abdeckung des Fahrzeugs
- viele Messungen (Abhängig von Antenne und Fahrzeuggröße)

#### ISO 11451-3:

Die Norm erlaubt die Verwendung von realen Transmittereinheiten für die Tests. Für die Untersuchungen wurde somit die Cohda Wireless Einheit mit Di-Patch Antenne verwendet.

- auf Sendeband optimierte Di-Patch-Antenne mit 3,25 dBi Gewinn
- 28,8 dBm max. Sendeleistung am Ausgang der Sendeeinheit
- Modulationen: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM
- verschiedene Messpunkte

#### ISO/WD 11451-5:2019 [ISO19-2]:

Die Störfestigkeitsprüfung in einer Modenverwirbelungskammer ist ein neues Verfahren auf Fahrzeugebene und wird derzeit als Normentwurf bei ISO diskutiert. Diese besteht aus reflektierenden Wänden, wobei die Moden durch einen oder mehrere bewegliche Reflektoren erzeugt werden. Für die vorliegende Arbeit wird dabei eine Sonderform, die *Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber* (VIRC) genutzt [ROM19], [IZZ19].

Die VIRC besteht aus einem leitfähigen Stoff, der teilweise beweglich angeordnet ist und einen viereckigen Raum bildet. Im Gegensatz zu einer Modenverwirbelungskammer nutzt die VIRC keinen klassischen Modenrührer. Der aus leitfähigem Stoff gebildete Reflexionsraum wird an der Außenseite durch mechanische Anregung in Bewegung versetzt und von innen mit einer Antenne bestrahlt. Durch die leitfähigen, schwingenden Wände entstehen unterschiedliche



Mehrfachreflexionen im Raum und es entstehen somit zahlreiche Moden durch die unterschiedlichen Raumausbreitungen. Damit ergibt sich im zeitlichen Mittel eine statistische Feldverteilung mit guten, räumlich homogenen und isotropen Eigenschaften im Prüfvolumen. Abhängig von den Abmessungen der VIRC ergibt sich eine untere Grenzfrequenz für die Nutzbarkeit der Prüfeinrichtung. Innerhalb der Kammer ergibt sich ein nutzbares Prüfvolumen, dessen Abstand von den Begrenzungen von der untersten genutzten Betriebsfrequenz abhängt. Das Prüfvolumen ist in Abbildung 3.39 durch die Punkte F1 bis F8 definiert und entspricht der Realisierung des FTZ. Auch die Leitfähigkeit des Wandmaterials bestimmt die Güte der VIRC und hat damit Einfluss auf die aus der Prüfleistung erzeugbare Feldstärke [HIL07].

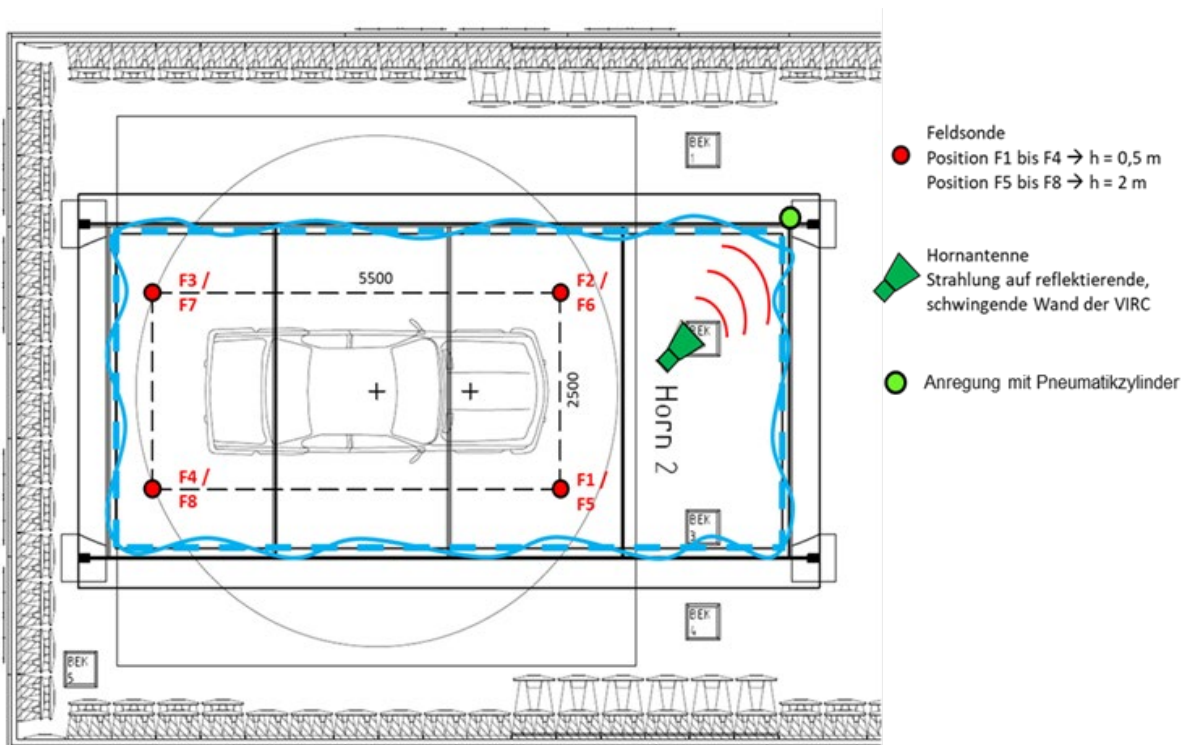


Abbildung 3.39 Schematische Darstellung VIRC in der EMV-Fahrzeughalle des FTZ

### 3.9 Messungen und Ergebnisse auf Fahrzeugebene

Die durchgeführten Prüfungen auf Fahrzeugebene basieren auf ISO 11541-3 (Mobil Transmitter Nahfeldtest für fahrzeugeigene ITS-G5 Sender).

Auf Messungen nach ISO 11451-2 (Bestrahlung Gesamtfahrzeug als Nachbildung der Störbedrohung durch eine RSU) wurde verzichtet, da hier bei den gewählten Systemen auf Basis der Ergebnisse aus den Komponententests keine Störeinflüsse zu erwarten sind. Die Feldstärken bei Fahrzeugprüfungen nach ISO 11451-2 an den Messpositionen im Fahrzeug werden geringer ausfallen, da der Abstand zur Antenne deutlich größer ist und eine Feldstärke von  $400\text{ V/m}$  am Referenzpunkt für die 3-Meter-Strecke in der FTZ-Fahrzeughalle nicht erzeugt werden kann.

Zur Nachbildung einer realistischen „Worst Case“-Bedingung ist dabei ein Bussystem exemplarisch im Fahrzeug Audi A8 mit physikalischer Nähe zu einer ITS-G5 Sendeeinheit verbaut.

Das Fahrzeug verfügt über keine Thermoverglasung mittels metallisierter Scheiben.

Für die Messungen nach ISO 11451-3 wurden zwei Systeme gewählt, um die Ergebnisse auf Komponentenebene nachzuvollziehen:

- 100Base-T1 und
- PCIe.

PCIe ist das System mit den höchsten Analogbandbreiten für alle hier geprüften Systeme und das Einzige, das Auffälligkeiten bei den Komponententests zeigte.

Für den Mobile Transmitter Test (ISO 11451-3) erfolgt eine Aufteilung der eingekoppelten Leistung auf mehrere Leitungen im Kabelbaum, da die Verlegung der Prüflingsleitungen entlang des Fahrzeugkabelbaumes erfolgte, was der Applikation entspricht.

### 3.9.1 Messaufbau Fahrzeugebene nach ISO 11451-3

Die Abbildung 3.40 zeigt den Verbauort der ITS-G5 Fahrzeugantenne und die Abbildung 3.41 die Punkte, an denen die Feldstärkewerte der Antenne ermittelt wurden. Diese sind in Abbildung 3.42 dargestellt. Die weiteren Darstellungen zeigen die geprüften Systeme im Fahrzeug (s. Abbildung 3.43 und Abbildung 3.46) und beispielhaft Messpositionen für die Prüfantennen.

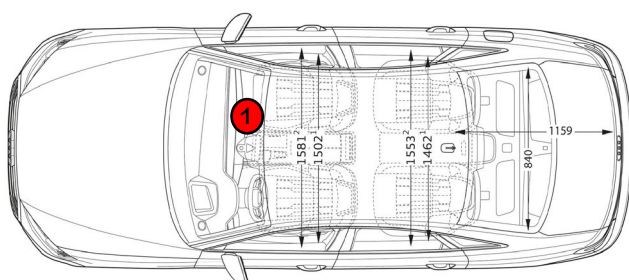


Abbildung 3.40  
Position 1: Antenne ITS-G5 Modul an der Frontscheibe beim Rückspiegel

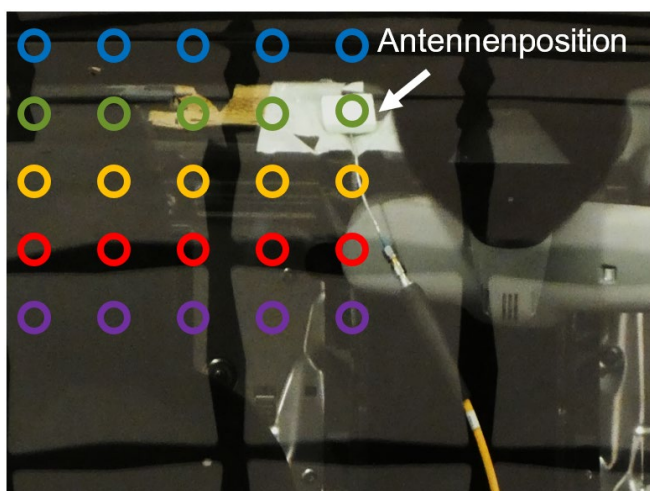


Abbildung 3.41  
Aufgenommene Messpunkte für die Antennenposition 1 (s. Abbildung 3.10)

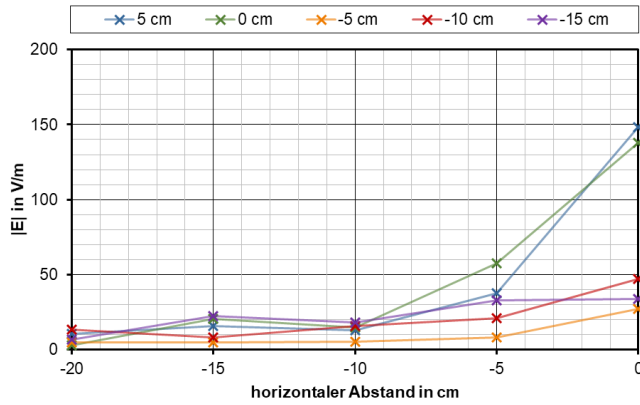
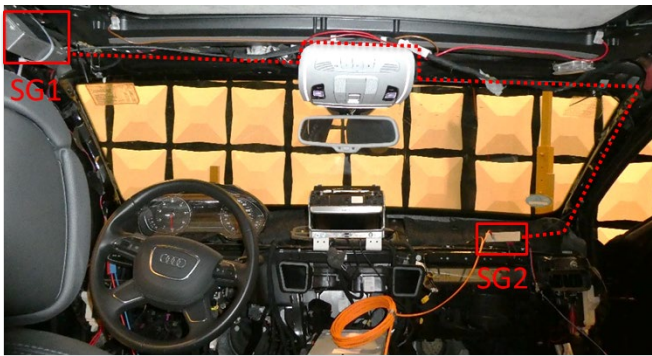


Abbildung 3.42  
Ermittelte Feldstärke Verteilung in Abhängigkeit vom Abstand mit 33 dBm EIRP für die Position 1 (vgl. Abbildung 3.11)



----- Ethernet-Leitung

Abbildung 3.43  
Prüflingssystem 100Base-T1 im Fahrzeug mit 1,8 m Leitung



Abbildung 3.44  
Beispiel für Test mit Breitbandantenne UWB2-6 des FTZ direkt auf Leitungen

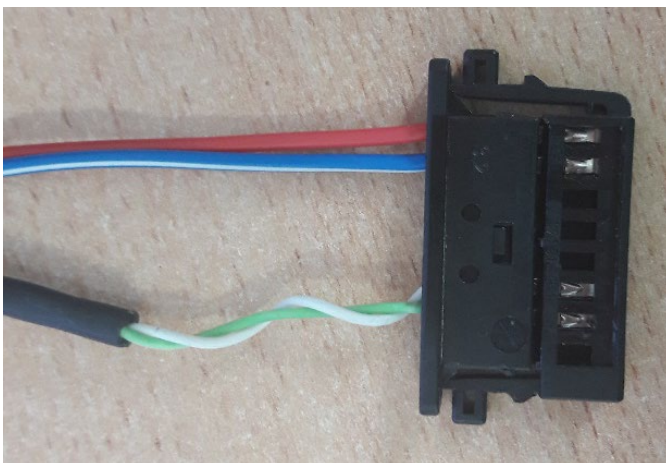


Abbildung 3.45  
Prüflingssystem 8-fach MQS-Stecker mit Leitungen für 100Base-T1 Steuergerät





Abbildung 3.46  
Prüflingsystem PCIe im Fahrzeug

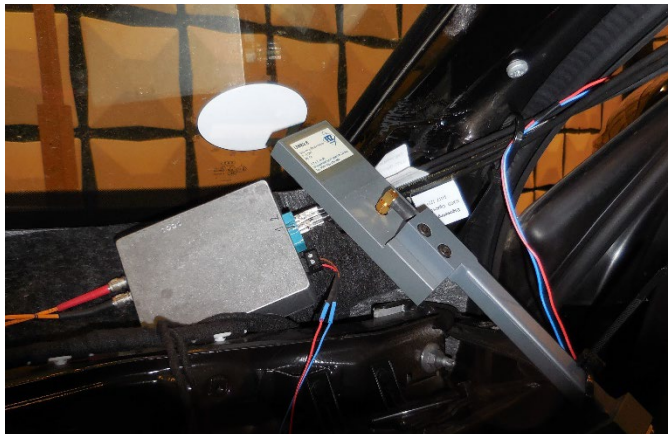


Abbildung 3.47  
Beispiel für Test mit Breitbandantenne  
des FTZ UWB2-6 direkt im Steckerbereich  
für PCIe

Die Versorgung der Steuergeräte erfolgt mittels einer Fahrzeugbatterie, wobei die Masse der Batterie direkt an die Fahrzeugkarosserie angebunden ist.

Die Leitungsverlegung entlang der A-Säule und oberhalb der Frontscheibe erfolgte entlang des Fahrzeugleitungssatzes. Damit ist davon auszugehen, dass ein Teil der Sendeleistung auch in die umliegenden Leitungen einkoppelt und nicht nur in den Testkabelbaum.

Der Prüflingskabelbaum für 100Base-T1 bestand aus einer gemantelten verdrillten Leitung für Ethernet sowie einem unverdrillten Paar für die Versorgung.

Der Kabelbaum für PCIe bestand aus vier geschirmten Datenleitungen mit HMTD-Steckern und einem unverdrillten, ungeschirmten Leitungspaar für die Versorgung.

Beide Leitungssätze wurden bereits für die Komponentenmessungen verwendet.

Die Untersuchungen an 100Base-T1 erfolgten mit der Di-Patch Antenne der TUI und der FTZ-Breitbandantenne UWB2-6. Die Überwachung der Ethernet-Kommunikation während der Prüfungen ermöglicht eine Fehlerbewertung. Die Antennenpositionen als auch die Abstände zwischen Antenne und dem Prüflingsystem wurden variiert. Die Prüfungen für PCIe erfolgten mit der UWB2-6. Auch werden beide Knoten überwacht und Fehler bei der Übertragung detektiert.

Für das reale V2X-System wurde nur mit konstanter Sendeleistung aber, anders als mit dem Testsystem, auch mit verringertem Abstand (0 cm statt 5 cm) geprüft. Für das Testsystem aus Signalgenerator, HF-Verstärker und FTZ-Antenne wurde die Sendeleistung, vergleichbar zu den Komponentenmessungen, zusätzlich um 9 dB erhöht. Beide Maßnahmen dienen dazu die Sicherheitsreserve des Kommunikationssystems durch eine gezielte Überbelastung zu prüfen.

### 3.9.2 Ergebnisse Prüfungen Fahrzeugebene nach ISO 11451-3

#### 100Base-T1:

Tabelle 3.17 Störfestigkeitsprüfungen mit dem Cohda Wireless System und einem 100Base-T1 Link (angelehnt an ISO 11451-3)

Testleistung und Abstand Cohda Wireless System zu Prüfling	Antennenposition 1	Direkteinkopplung (0 cm)		
		Steuergerät	Stecker	Leitung
33 dBm 5 cm Abstand	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
33 dBm 0 cm Abstand	_1*)	i.O.	i.O.	i.O.

<sup>1\*)</sup> Antennenposition siehe Abbildung 3.40 und Abbildung 3.41, vorgegebener Abstand zu Testsystem, daher keine Variation auf 0 cm möglich

#### PCIe:

Tabelle 3.18 Störfestigkeitsprüfungen mit FTZ Breitbandantenne UWB2-6 und einem PCIe Link (angelehnt an ISO 11451-3)

umgerechnete Testleistung am Antenneneingang und Abstand zu Prüfling	Antennenposition 1	weitere Antennenpositionen an		
		Steuergerät	Stecker	Leitung
33 dBm 5 cm Abstand	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.
39 dBm 5 cm Abstand	i.O.	i.O.	i.O.	i.O.

Die Einkopplung erfolgte auf Zuleitungen (Versorgung, Kommunikationsleitungen), Stecker und direkt auf das Steuergerät im Abstand von 5 cm und 0 cm mit zwei verschiedenen Antennen und Sendeleistungen. Es traten für die gewählten Prüflinge und den Aufbau keine Beeinflussungen der Kommunikation auf.

### 3.10 Fazit der Störfestigkeitsanforderungen

Für die Störfestigkeitsanforderungen auf Komponentenebene lassen sich folgende Aspekte zusammenfassen:

- Die erreichten Feldstärken am DUT bei Verwendung eines Original-ITS-G5 Systems liegen für das Nahfeld über den momentan verfügbaren Vorgaben der Normmessungen nach ISO 11452-9 für die benachbarten Funkdienste.
- Der betreffende Frequenzbereich wird derzeit nur von der ISO 11452-2 abgedeckt.

Für die Störfestigkeitsanforderungen auf Fahrzeugebene lassen sich folgende Aspekte zusammenfassen:

- Keine Abdeckung des Messfrequenzbereiches durch die ECE 10 R5 [ECE14].

Die Messabdeckung nach ISO 11451-2 erfordert durch die Einengung der Strahlungskeule der Antennen im ITS-G5 Frequenzbereich viele Messungen für die Abdeckung des DUT.

## 4 Vorschlag und Untersuchung von Testmethoden zur Störfestigkeit – Betrachtungen zur Messökonomie

Im folgenden Abschnitt sollen die Messverfahren der Störfestigkeitsprüfung unter ökonomischen Gesichtspunkten betrachtet werden. Der jeweils notwendige Aufwand für den Messaufbau, die Anforderungen an die Prüftechnik, die notwendige Anzahl der Tests und die Messzeiten sollen abgeglichen werden. Innovative Methoden sollten gegenüber den bereits etablierten Verfahren signifikante Vorteile bieten.

Die genormten Messverfahren mit den mobilen Transmittern erfordern viele Messungen zur Prüflingsbewertung. Die Anzahl ist hier vor allem vom DUT abhängig.

Die Antennenmessungen nach ISO 11451-2 auf Fahrzeugebene zeigen eine, durch die Antenneneigenschaften bedingte, Abhängigkeit der Anzahl der notwendigen Prüfungen von der höchsten Testfrequenz. Die Strahlungskeule von Hornantennen, die im Frequenzbereich oberhalb von 1 GHz für EMV-Messungen üblicherweise für die Störfestigkeitsuntersuchungen genutzt werden, engt sich mit zunehmender Frequenz ein. Die Messungen mit der Hornantenne auf Fahrzeugebene haben somit eine mit der Frequenz abnehmende Prüflingsabdeckung pro Messposition, was zu einem hohen Messumfang insbesondere bei Nutzfahrzeugen führt.

Die Validierung einer alternativen Testmethodik mit einer VIRC und deren Durchführung sowie der Vergleich mit den etablierten Verfahren erfolgt nachfolgend an einem Fahrzeug.

### 4.1 Messökonomie auf Komponentenebene

#### 4.1.1 Prüfspezifikationen auf Komponentenebene

Tabelle 4.1 Vergleich Messverfahren Komponentenebene

Parameter	ISO 11452-2 / ISO 11452-1	ISO 11452-9 / ISO 11452-1
Verfahren	ALSE / Hornantenne	ALSE / Mobiler Transmitter
Vorgaben im ITS-G5 Band	ja, Definition bis 18 GHz	nein, Definition Messbereich bis 5850 MHz, aber Prüfantennen inzwischen verfügbar, derzeit erfolgt Überarbeitung des Standards
Anzahl Messungen	8 Messungen nach Norm (oder abweichende Anzahl nach Prüfplan) 1 Messpunkt (DUT) 2 Polarisationen (H, V) 2 Modulationen (PM, CW) 2 Funktionszustände	abhängig von Abmessungen DUT bzw. Vorgabe im Prüfplan
Anwendung	verbreitet	verbreitet
Aufwand	Messaufbau vorhanden, Anzahl Messungen vertretbar	Messaufbau vorhanden, Anzahl Messungen deutlich höher als Hornantenne

Ein weiteres Verfahren, das im Frequenzbereich von ITS-G5 definiert ist, ist die Messung in der Modenverwirbelungskammer nach ISO 11452-11 / IEC 61000-4-21[DIN11]. Diese Methode hat jedoch eine geringe Verbreitung für Komponentenmessungen. Durch die zusätzliche Messkammer mit reflektierenden Wänden und dem Modenrührer ist ein erhöhter Aufwand beim Messaufbau vorhanden. Für die Messungen muss der Messaufbau in der Kammer aufgebaut und in Betrieb genommen werden. Dieser Aufwand ist zusätzlich zum Aufbau in der Absorberkammer durchzuführen, wenn die Modenverwirbelungskammer, bedingt durch ihre Konstruktion, nicht den gesamten Prüffrequenzbereich abdecken kann. Die untere Grenzfrequenz der Modenverwirbelungskammer hängt von ihrem Volumen ab. Je größer die Kammer umso kleiner ist die nutzbare untere Betriebsfrequenz. Mit der Größe der Kammer steigt der ökonomische Aufwand für Anschaffung und Betrieb des Messplatzes. Für die in der ISO 11452-2 festgeschriebene untere Testfrequenz von 80 MHz ergibt sich nach [HIL07] eine Kammergröße von 6,3 m in jede Raumachse. Für elektronische Baugruppen (*electronic sub assembly* – ESA) nach ECE 10 R5 [ECE14] ist die Prüfung gegenüber eingestrahltten Störungen bereits ab 20 MHz mit einer Reihe möglicher Testverfahren vorgeschrieben. Damit sind auch bei Verwendung der Modeverwirbelungskammer noch weitere Messungen für den Prüfbereich bis zur unteren Betriebsfrequenz in Absorberkammern notwendig.

Die Antennenmessverfahren wirken auf den Prüfling gerichtet von einer Seite mit einer festen Polarisation. Wenn die Prüflingsabmessungen kleiner als die Abdeckung durch die Antennenstrahlungskeule sind, erfolgt für die Messungen mit der Methode nach ISO 11452-2 eine vollständige Abdeckung mit einem Messpunkt.

Bei der Messung mit der Modenverwirbelungskammer lassen sich zum zeitlichen Verhalten des Prüffeldes nur statische Aussagen treffen. Damit ergibt sich eine andere Einwirkung der Prüfgröße auf den Prüfling und damit unter Umständen ein anderes Verhalten. Eine Bewertung im Fehlerfall ist dann schwierig.

#### 4.1.2 Frequenzabhängigkeit der Prüflingsabdeckung

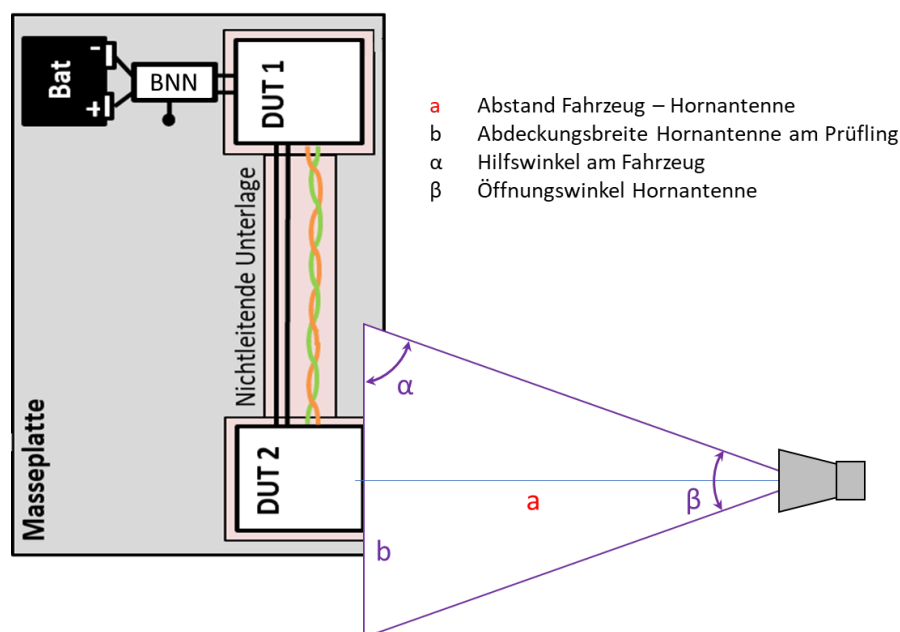


Abbildung 4.1 Winkel und Maßangaben zur Berechnung der Abdeckungsbreite am Prüfling als Resultat von Öffnungswinkel und Messentfernung

Bei Bestrahlung mit einer Hornantenne nach ISO 11451-2 ergibt sich eine Frequenzabhängigkeit der Prüflingsabdeckung. Bei einer Hornantenne engt sich mit zunehmender Testfrequenz die Strahlungskeule ein, der Öffnungswinkel ( $\beta$  in Abbildung 4.1) wird kleiner. Die Messabdeckung am Prüfling ( $b$  in Abbildung 4.1) sinkt mit zunehmender Frequenz. Weiterhin ist die Prüflingsabdeckung von der Entfernung der Antenne zum Prüfling ( $a$  in Abbildung 4.1) abhängig.

Über den nutzbaren Frequenzbereich von 800 MHz bis 6 GHz verringert sich der 3 dB Öffnungswinkel der Antenne von  $48^\circ$  auf  $11^\circ$ . Für den Komponentenaufbau ergibt sich mit der Hornantenne Schwarzbeck BBHA 9120J für das V2X-Frequenzband von 5850...5925 MHz und 1 m Abstand folgende Prüflingsabdeckung:

$$\beta = 11,4^\circ$$

$$a = 1 \text{ m}$$

$$\alpha = 90^\circ - \frac{\beta}{2} = 90^\circ - \frac{11,4^\circ}{2} = 84,3^\circ = 1,47 \text{ (rad)} \quad (3.1)$$

$$b = 2 \cdot \frac{1 \text{ m}}{\tan 1,47} = 0,2 \text{ m} \quad (3.2)$$

Damit ist mit dem in der Norm festgeschriebenen Prüfaufbau für Frequenzen  $> 1$  GHz eine Abdeckung mit einer für die Feldkalibrierung geforderten Abweichung von  $< 3$  dB im 5,9 GHz Band nur für Prüflinge mit einer Kantenlänge maximal 20 cm möglich (s. Abbildung 4.2).

#### Schwarzbeck BBHA 9120 J

Öffnungswinkel in Abhängigkeit der Messentfernung

Entfernung Antenne - Referenzpunkt: **d = 1 m**

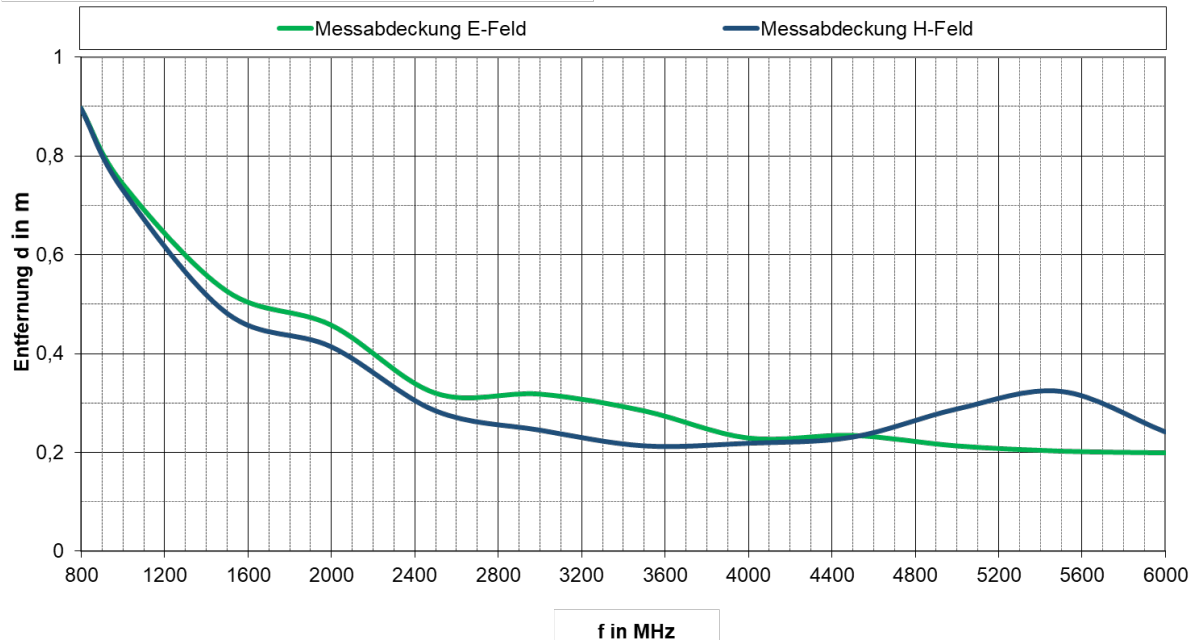


Abbildung 4.2 Prüflingsabdeckung mit Hornantenne Schwarzbeck BBHA 9120J in 1 m Messentfernung für Komponententest nach ISO 11452-2

### 4.1.3 Fazit Messökonomie auf Komponentenebene

Dass mit alternativen Messmethoden, z.B. Modenverwirbelungskammern, im Bereich der Komponentennmessungen eine signifikante Reduzierung der Messzeit erreicht werden kann, ist nicht zu erwarten. Das ergibt sich aus der Tatsache, dass zur Abdeckung des Prüfumfanges im unteren Frequenzbereich zusätzliche Messungen in einer Absorberkammer notwendig sind. Weiterhin sind mit der Antennenmessung im ITS-G5 Frequenzbereich nur wenige Messungen mit Ausrichtung des Phasenzentrums der Antenne auf den Prüfling notwendig, um den Prüfumfang für das Verfahren abzudecken.

## 4.2 Messökonomie auf Fahrzeugebene

Für die nachfolgend dargestellten Untersuchungen wird die Messmethode für Fahrzeugmessungen im ITS-G5 Frequenzbereich mit der Hornantenne nach ISO 11451-2 mit der Prüfmethode in der Modenverwirbelungskammer (VIRC) messtechnisch untersucht. Beide Verfahren bilden eine von außen wirkende Störquelle auf das Fahrzeug nach und wurden anhand folgender Kenngrößen verglichen:

- Zeitaufwand für die Messungen,
- notwendige Prüfleistung für das Erreichen einer Feldstärke von 100 V/m (Referenzmessung),
- Feldhomogenität (räumlich und zeitlich) sowie
- erreichte Feldstärke an Prüfpunkten im Fahrzeug

Dazu wurden im Fahrzeug sechs Positionen für die Feldsonde definiert und die gemessene Feldstärken an diesen Position 1 bis 6 für beide Messverfahren verglichen (s. Abbildung 4.3). Detailansichten zu den einzelnen Messpositionen der Feldsonden im Fahrzeug befinden sich zusammen mit den Messergebnissen in Abschnitt 4.2.2. Die Prüffeldstärke für die Messungen wurde basierend auf folgenden Überlegungen und Vorarbeiten auf 100 V/m festgelegt.

- Ergebnisse der Messungen mit realen Sendern im Fahrzeug, sowie
- ausreichender Messdynamik.

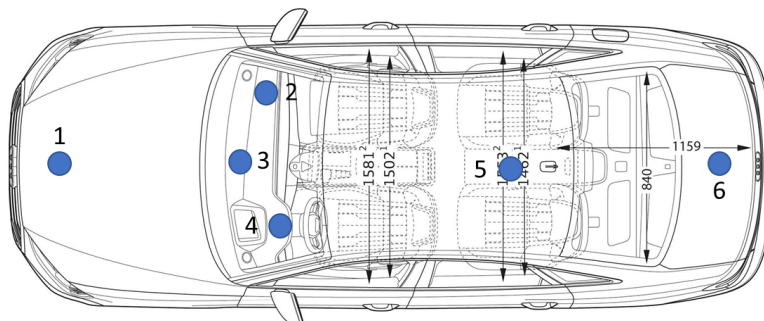


Abbildung 4.3 Positionen 1 bis 6 der Feldsonden im Testfahrzeug (Audi A8)

#### 4.2.1 Prüfspezifikationen auf Fahrzeugebene

Normativ festgelegt sind derzeit zwei Messvorschriften für Fahrzeugmessungen, die ISO 11451-3 sowie die ISO 11451-2, die sich in den Lastenheften vieler OEMs wiederfinden. Für letztere wird eine Hornantenne für die Störfestigkeitsprüfungen im ITS-G5 Band genutzt. Die zulassungsrelevante Verordnung ECE 10 R5 verweist für die Fahrzeugmessungen auf die ISO 11451-2, spezifiziert den zu prüfenden Frequenzbereich nur bis 2 GHz, für die Betrachtung der Messökonomie ist allerdings die Anzahl der hier festgelegten Messpunkte interessant. Im Gegensatz zur ISO 11451-2, die eine vollständige Prüflingsabdeckung fordert, ist bei ECE 10 R5 nur eine Messposition vorgesehen, wenn die Fahrzeugabmessungen kleiner als 12 m in der Länge, 2,6 m in der Breite und 4 m in der Höhe sind. Für größere Fahrzeuge wird auf das Stromeinspeiseverfahren nach ISO 11451-4 zurückgegriffen. Es ist davon auszugehen, dass mit einer Zunahme der Nutzung der Funkbänder für die V2X-Kommunikation der Prüfumfang entsprechend erweitert wird.

Für die ISO 11451-2 steigt die notwendige Anzahl der Prüfungen mit der Fahrzeuggröße und der Frequenz.

Für das Verfahren nach ISO 11451-3 sind, wenn keine Positionen im Prüfplan festgelegt wurden, 8 Messpunkte für Frequenzen größer 30 MHz am Fahrzeug (PKW) vorgesehen. Für Mobile Transmitter im Fahrzeug werden Positionen im Prüfplan festgelegt oder nach Norm verschiedene Platzierungen empfohlen deren Anzahl mit den Sitzplätzen variiert. Für die Betrachtung fest verbauter Antennen für V2X macht eine Platzierung auf einem Sitz oder in Ablagefächern keinen Sinn. Die Verbauorte werden sich so im Fahrzeug befinden, dass eine möglichst gute Abdeckung des Außenbereiches mit mehreren Antennen erreicht wird.

Allen Messungen, außer der Prüfung mit der Antenne nach ECE 10 R5 [ECE14] für PKW, ist gemeinsam, dass sie mehrere Messungen erfordern, bis die Prüflingsbewertung abgeschlossen ist.

Für die Messungen mit der Hornantenne gelten die gleichen Randbedingungen wie bei den Komponentenmessungen im vorherigen Abschnitt. Mit zunehmender Testfrequenz engt sich die Strahlungskeule ein und die Messabdeckung am Prüfling sinkt. Für die Fahrzeugmessungen ist der Messabstand größer als bei den Komponentenmessungen, was diesen Effekt abschwächt, allerdings sind die Prüflingsabmessungen größer. Weiterhin ist der Abstand zum Prüfling durch die Abmessungen der Halle als auch der verfügbaren Prüfleistung beschränkt. Bei einem üblichen Abstand von 3 m liegt die Prüflingsabdeckung mit einer Breitbandhornantenne bei ca. 60 cm. Insbesondere bei großen Fahrzeugen, z.B. im Nutzfahrzeugbereich, sind damit viele Messungen notwendig. Abhängig von den Maßen des Fahrzeuges können auch mehrere Antennenhöhen notwendig sein. Damit erhöht sich die Anzahl der Messungen signifikant. Die folgenden Darstellungen Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5 zeigen die Prüflingsabdeckung über der Frequenz und die Strahlungskeule der verwendeten Hornantenne bei 6 GHz. Die dargestellte Prüflingsabdeckung wurde im vorherigen Abschnitt hergeleitet. Ein zusammenfassender Vergleich der Messverfahren auf Fahrzeugebene ist in der nachfolgenden Tabelle 4.2 zu finden.



**Schwarzbeck BBHA 9120 J**

Öffnungswinkel in Abhängigkeit der Messentfernung

Entfernung Antenne - Referenzpunkt: **d = variabel**

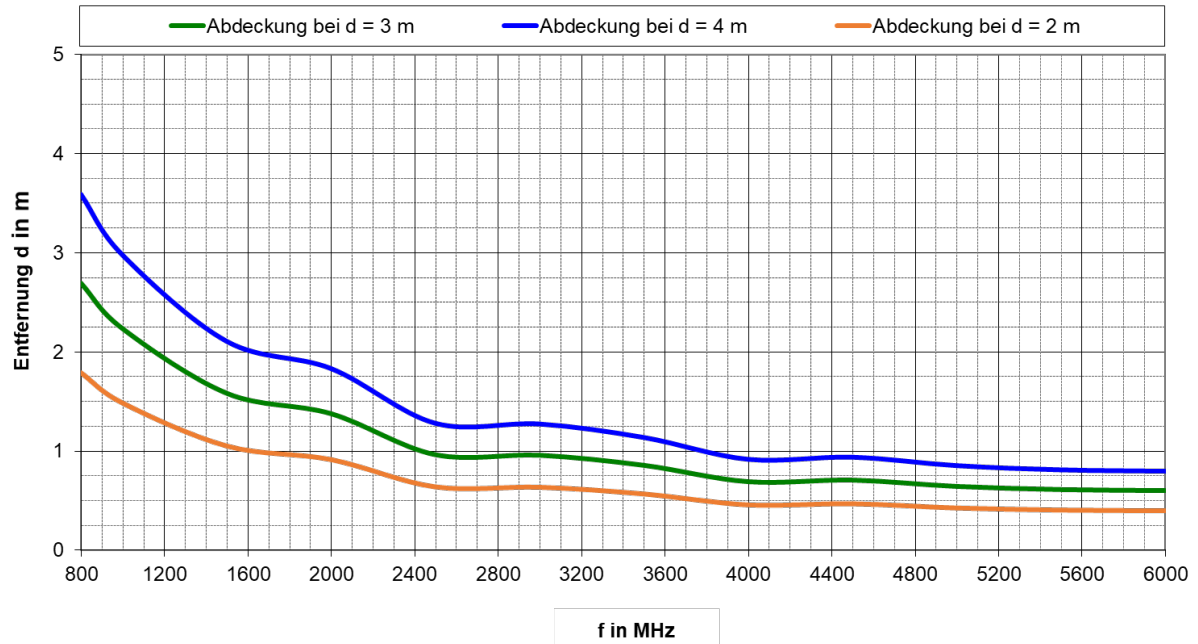


Abbildung 4.4 Prüflingsabdeckung E-Feld mit Hornantenne BBHA 9120J in verschiedenen Messentfernungen

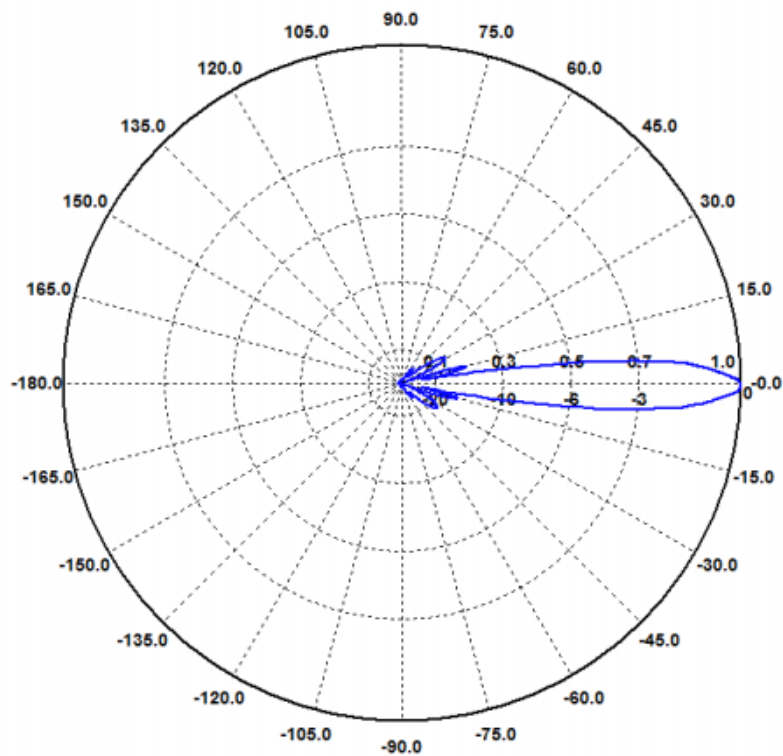


Abbildung 4.5 Richtdiagramm des Gewinns in der E-Ebene für Hornantenne BBHA 9120J bei 6 GHz [SCH-3]



Tabelle 4.2 Vergleich Messverfahren Fahrzeugebene

Parameter	ISO 11451-2 / ISO 11451-1	ISO 11451-3 / ISO 11451-1	ISO/WD 11451-5 #1:2019 / ISO 11451-1
Verfahren	ALSE / Hornantenne	ALSE / Mobiler Transmitter	ALSE / Mobiler Transmitter
Vorgaben im ITS-G5 Band	ja, Definition bis 18 GHz	ja, Definition bis 18 GHz	ja, Definition bis 18 GHz
Anzahl Messungen	Abhängig von Fahrzeugabmessungen	abhängig von Abmessungen DUT bzw. Vorgabe im Prüfplan	1 im Betriebsfrequenzbereich der Modenverwirbelungskammer
Anwendung	verbreitet	verbreitet	nicht verbreitet
Aufwand	Messaufbau vorhanden, Anzahl Messungen hoch	Messaufbau vorhanden, Anzahl Messungen ohne Definition im Prüfplan hoch	Messaufbau in spezieller Halle; Anzahl Messungen gering

#### 4.2.2 Feldstärkeermittlung in Anlehnung an ISO 11451-2

Für die Messungen nach ISO 11451-2 erfolgte die Ermittlung der Feldstärke an verschiedenen Punkten im Fahrzeug, an denen üblicherweise elektronische Komponenten verbaut sind. Feldsonden ersetzen die Prüfsysteme. Diese Messungen erfolgen, da die gewählten Kommunikationssysteme bei den gewählten Prüffeldstärken in den vorangegangenen Untersuchungen auf Komponentenebene nahezu keine Beeinflussungen zeigten. Somit soll ein Vergleich der Prüfbedingungen auf Basis der gemessenen Feldstärkewerte erfolgen.

Tabelle 4.3 Positionen der Feldsonden im Fahrzeug

Nummer der Position	Bezeichnung der Position
1	Motorraum
2	Handschuhfach
3	hinten Windschutzscheibe, Dashboard
4	Kombiinstrument
5	Mitte hinter Sitzreihe, unter Sitzplatz
6	Mulde Kofferraum

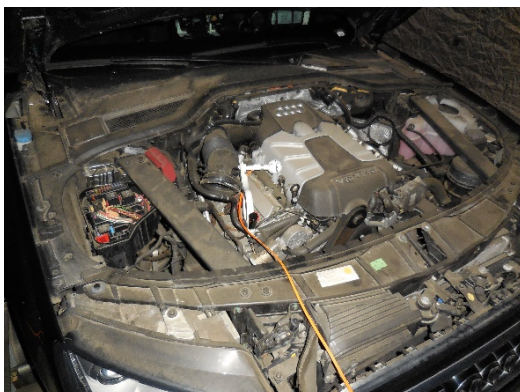


Abbildung 4.6 Position 1 Motorraum



Abbildung 4.7  
Position 2 Handschuhfach

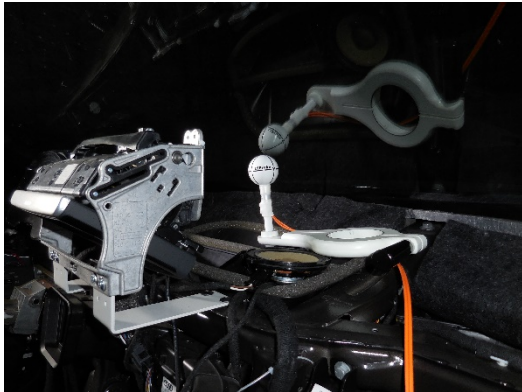


Abbildung 4.8  
Position 3 Dashboard



Abbildung 4.9  
Position 4 Kombiinstrument



Abbildung 4.10  
Position 5 Mitte Rücksitz



Abbildung 4.11

Position 6 Kofferraummulde

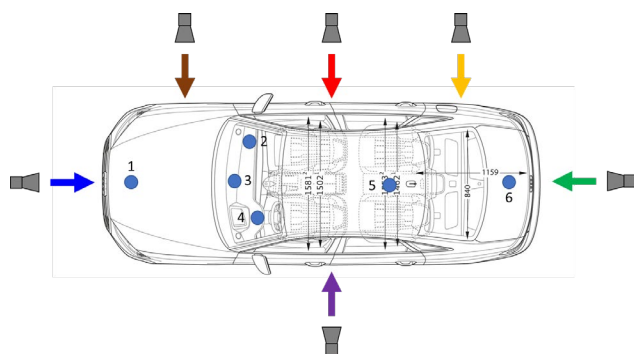


Abbildung 4.12

Schematische Darstellung der Antennenpositionen zur Störbeaufschlagung



Abbildung 4.13

Prüfaufbau in der Fahrzeughalle des FTZ mit Fahrzeug und Hornantenne

### 4.2.3 Ergebnisse der Feldstärkemessungen Fahrzeugebene nach ISO 11451-2

Die nachfolgenden Diagramme zeigen die resultierenden Feldstärken an den jeweiligen Positionen der Feldsonde für die verschiedenen, farbig gekennzeichneten Antennenpositionen. In den Diagrammen wird jeweils eine Polarisation der Antenne dargestellt. Alle Messungen erfolgten für den Vergleich ohne Modulation (CW).

### Feldsonde an Position 1

#### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 1 im Fahrzeug; Polarisation: vertikal

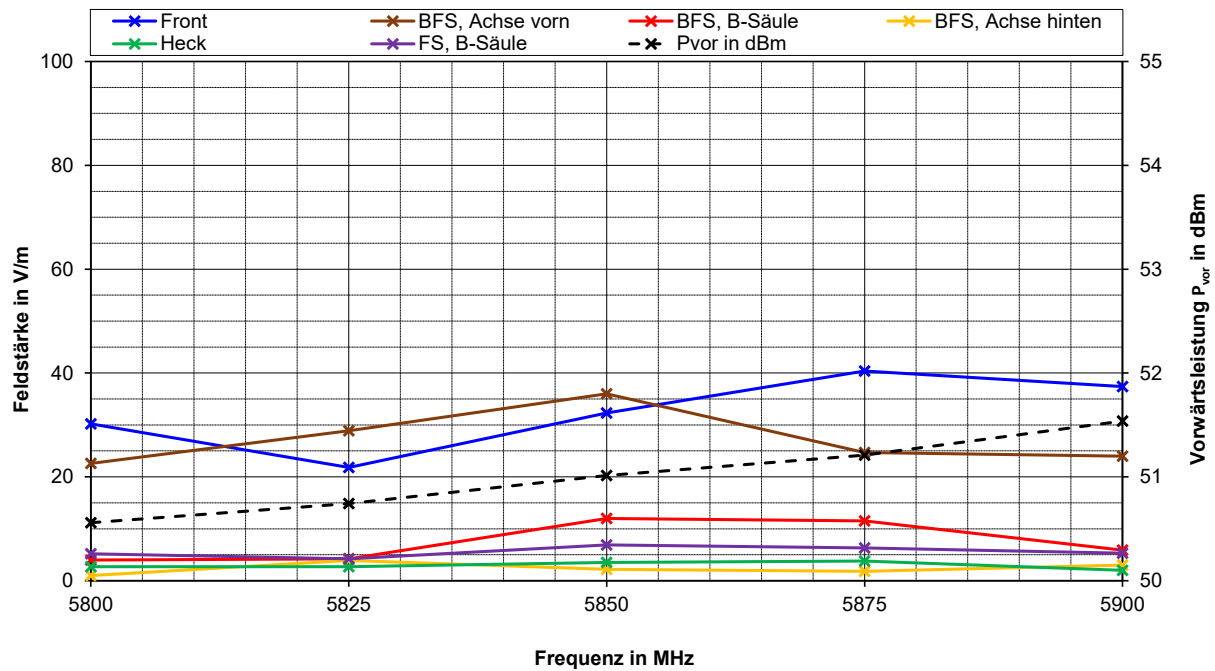


Abbildung 4.14 Feldstärken im Fahrzeug bei Antennenmessung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 1, vertikale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

#### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 1 im Fahrzeug; Polarisation: horizontal

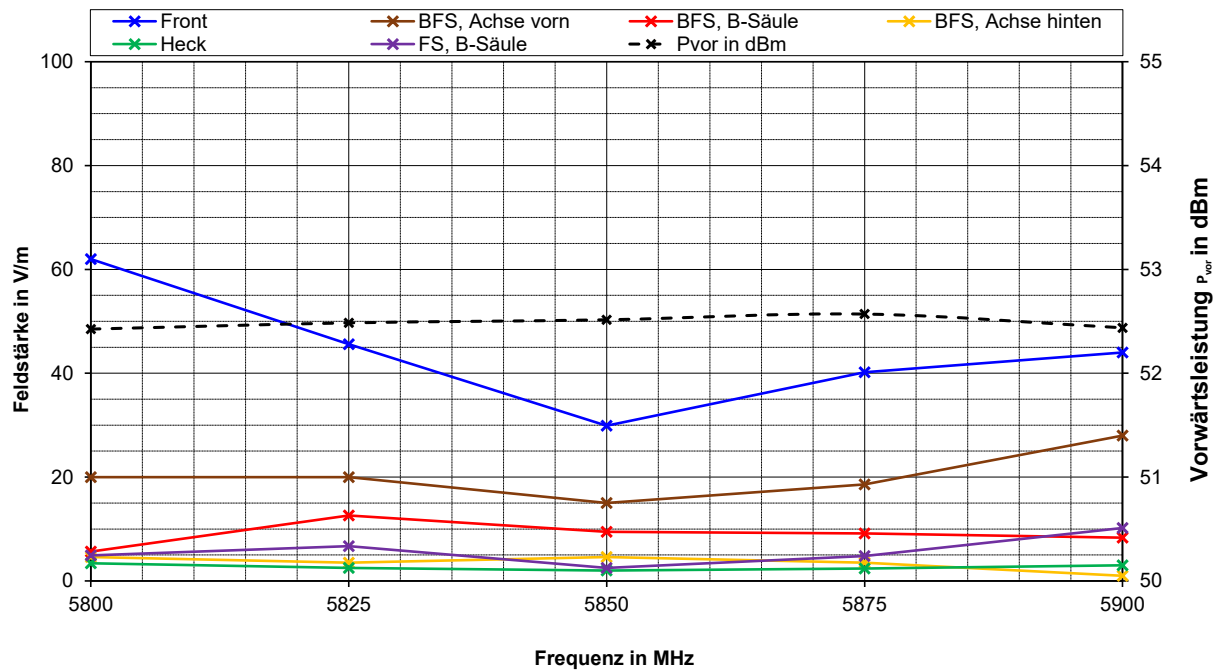


Abbildung 4.15 Feldstärken im Fahrzeug bei Antennenmessung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 1, horizontale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

## Feldsonde an Position 2

### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 2 im Fahrzeug; Polarisation: vertikal

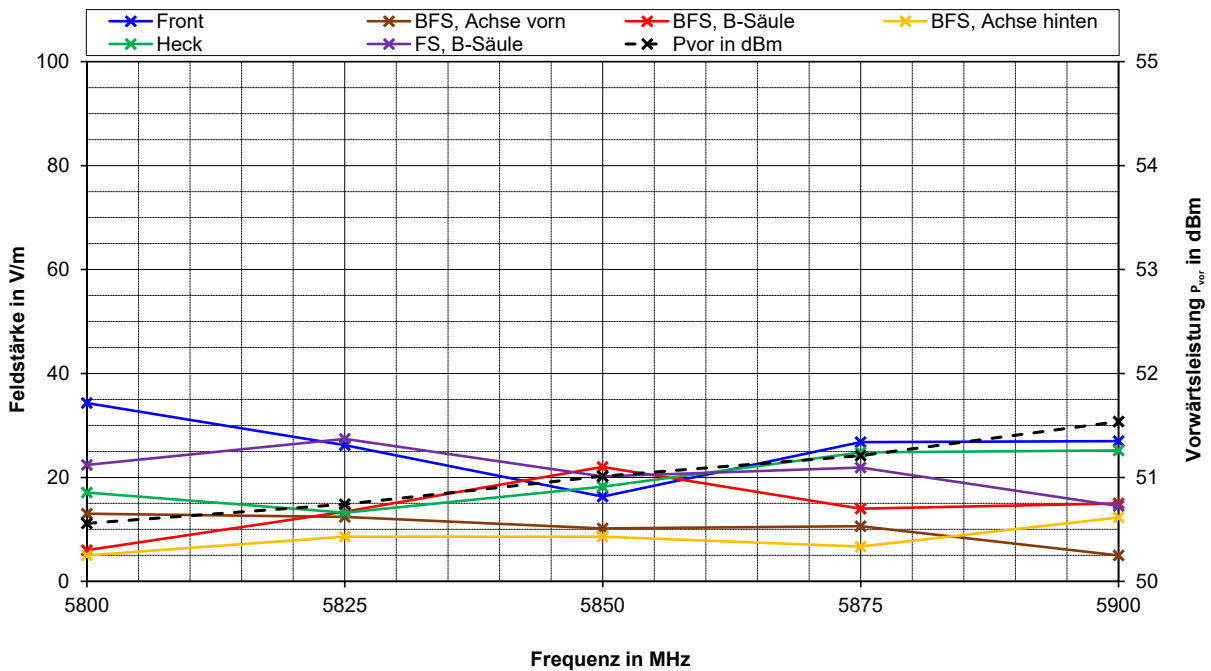


Abbildung 4.16 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 2, vertikale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 2 im Fahrzeug; Polarisation: horizontal

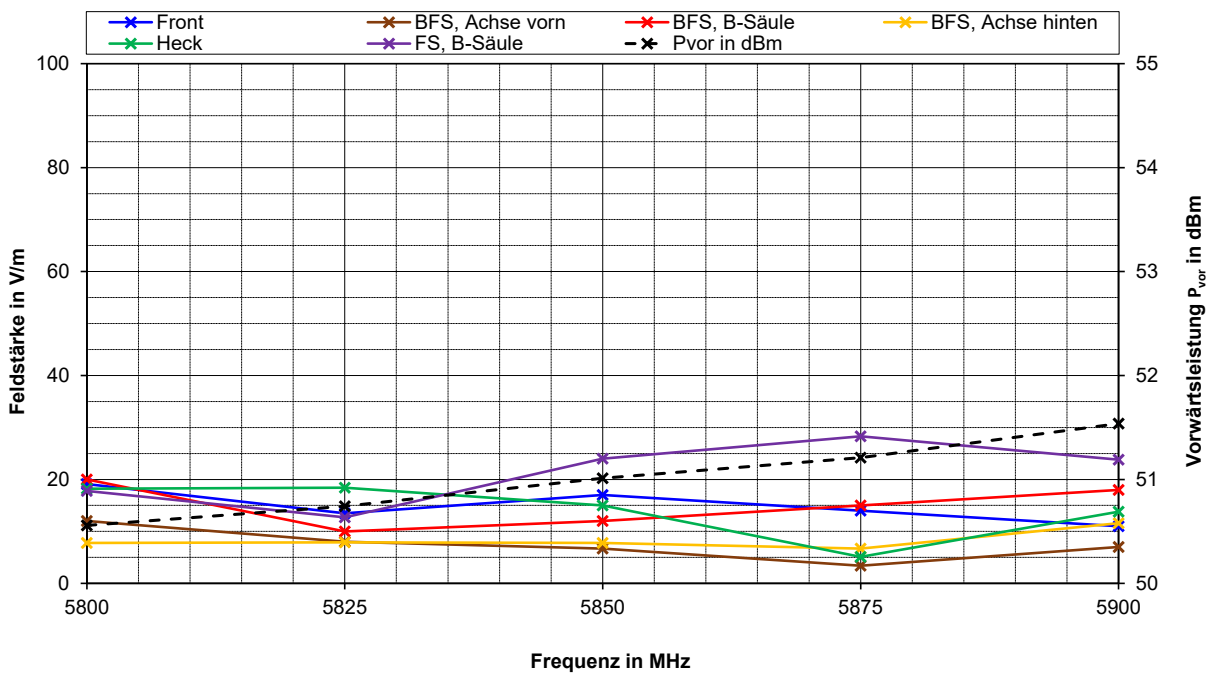


Abbildung 4.17 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Pos. 2, horizontale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte



### Feldsonde an Position 3

#### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 3 im Fahrzeug; Polarisation: vertikal

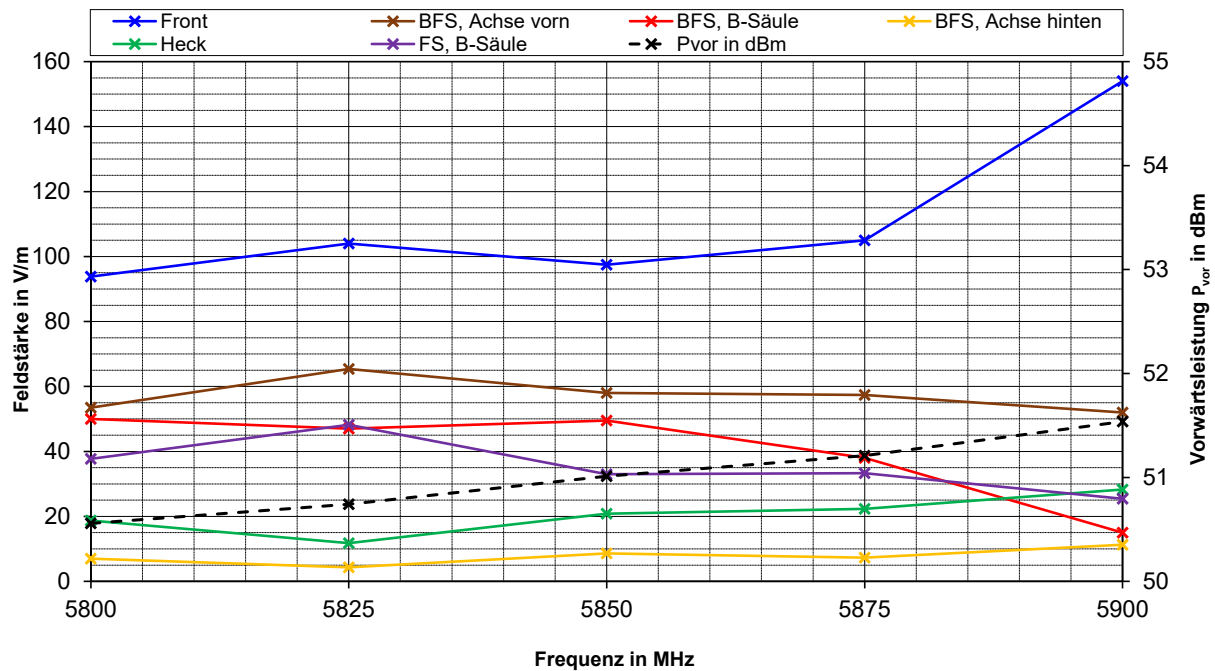


Abbildung 4.18 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 3, vertikale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

#### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 3 im Fahrzeug; Polarisation: horizontal

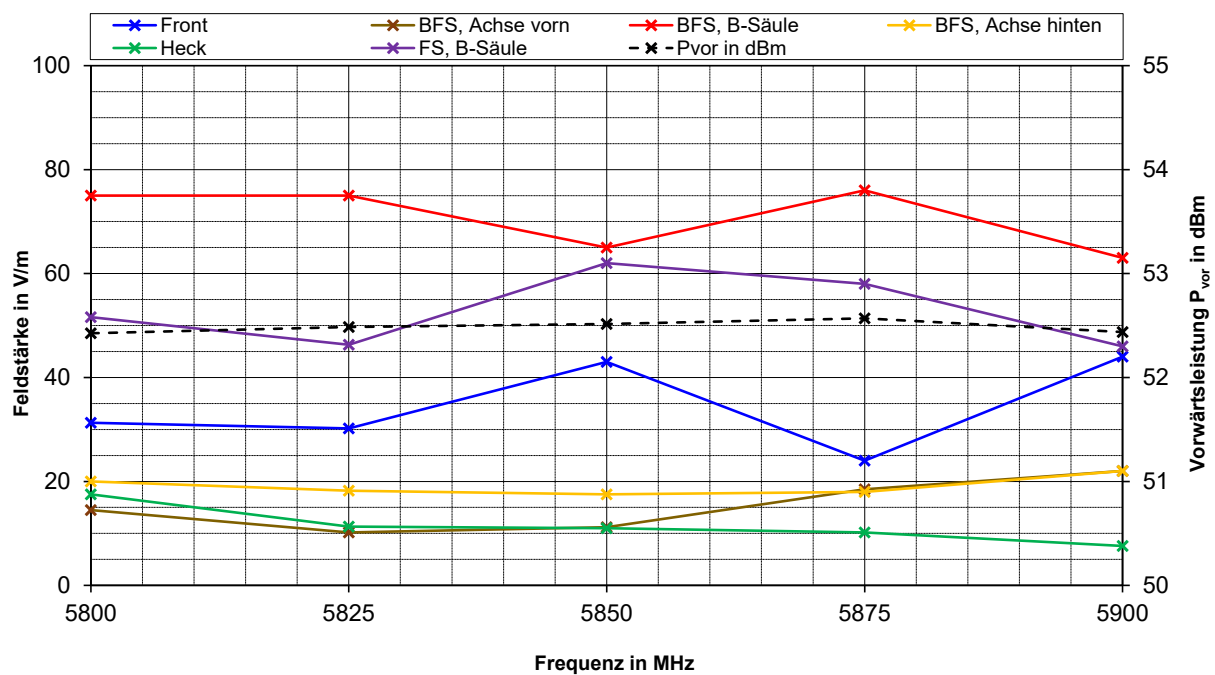


Abbildung 4.19 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 3, horizontale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

## Feldsonde an Position 4

### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 4 im Fahrzeug; Polarisation: vertikal

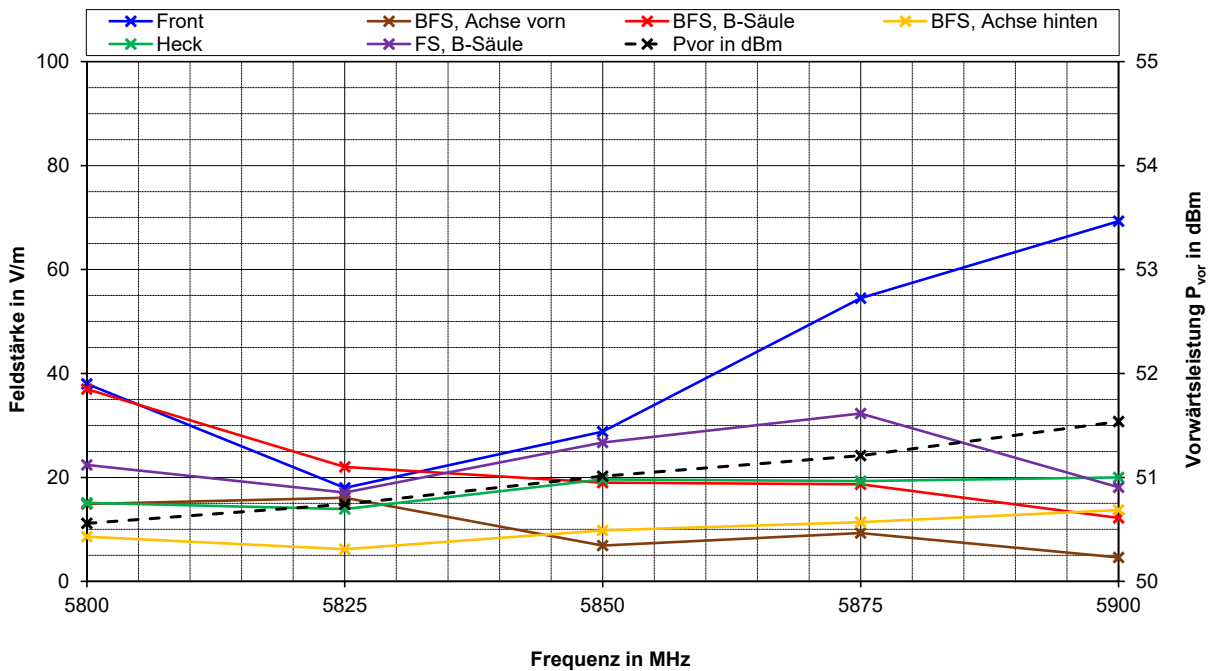


Abbildung 4.20 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 4, vertikale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 4 im Fahrzeug; Polarisation: horizontal

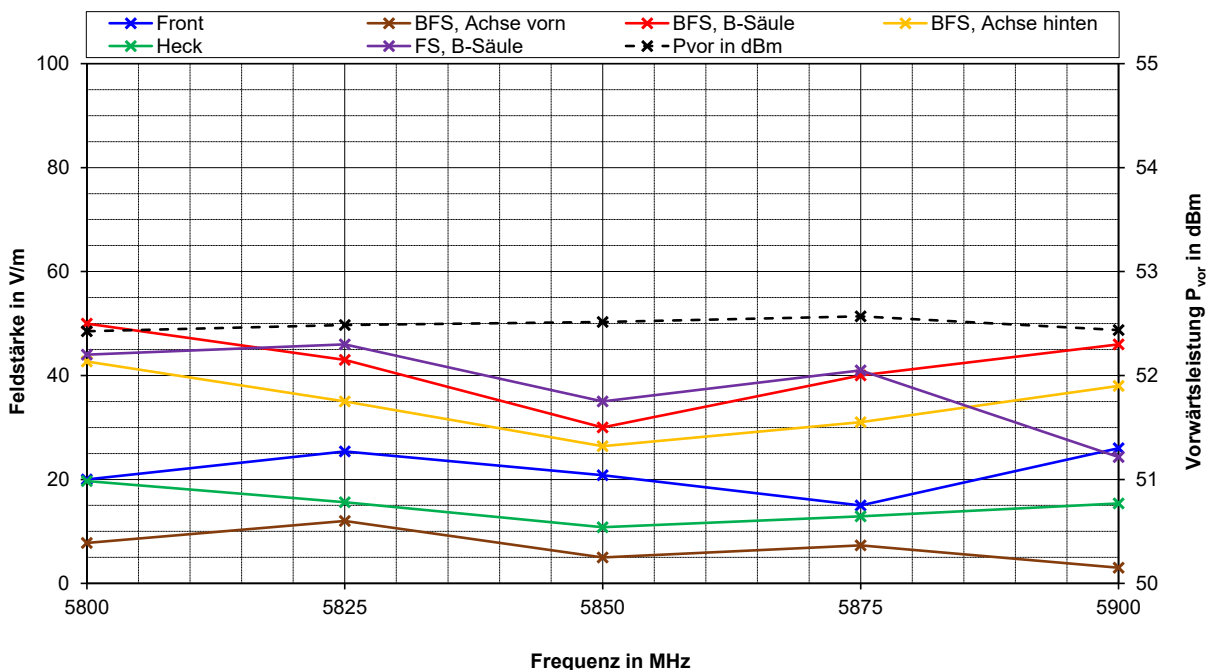


Abbildung 4.21 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 4, horizontale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

### Feldsonde an Position 5

#### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 5 im Fahrzeug; Polarisation: vertikal

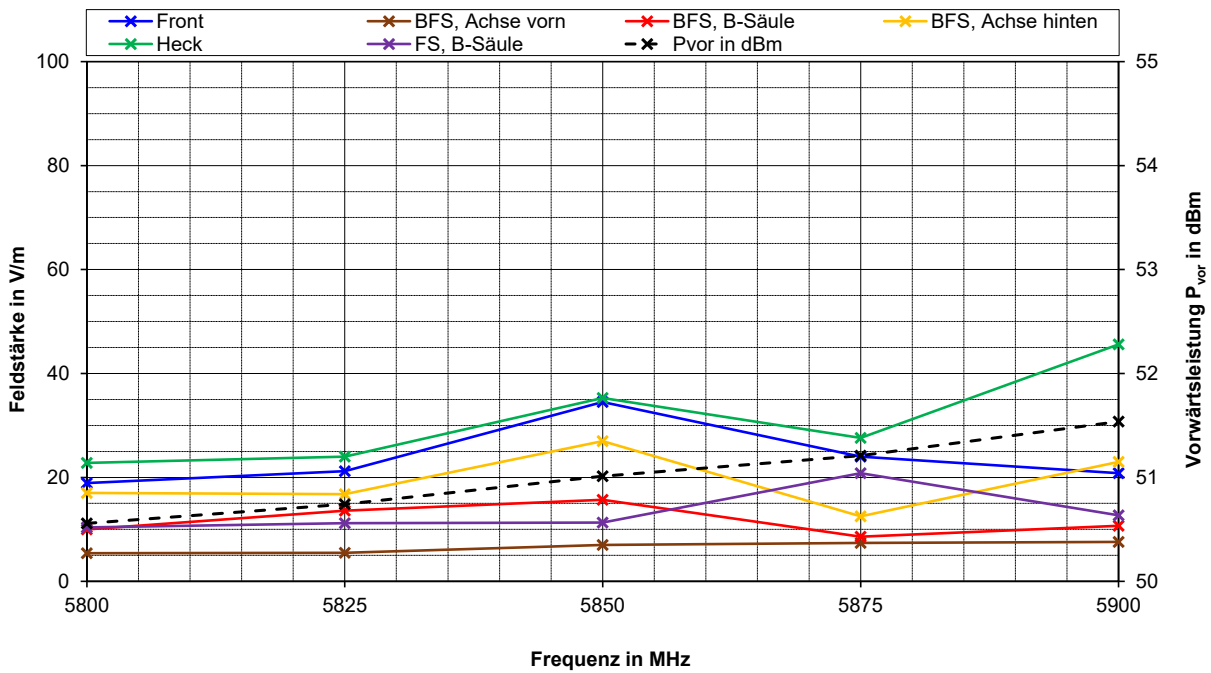


Abbildung 4.22 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 5, vertikale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

#### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 5 im Fahrzeug; Polarisation: horizontal

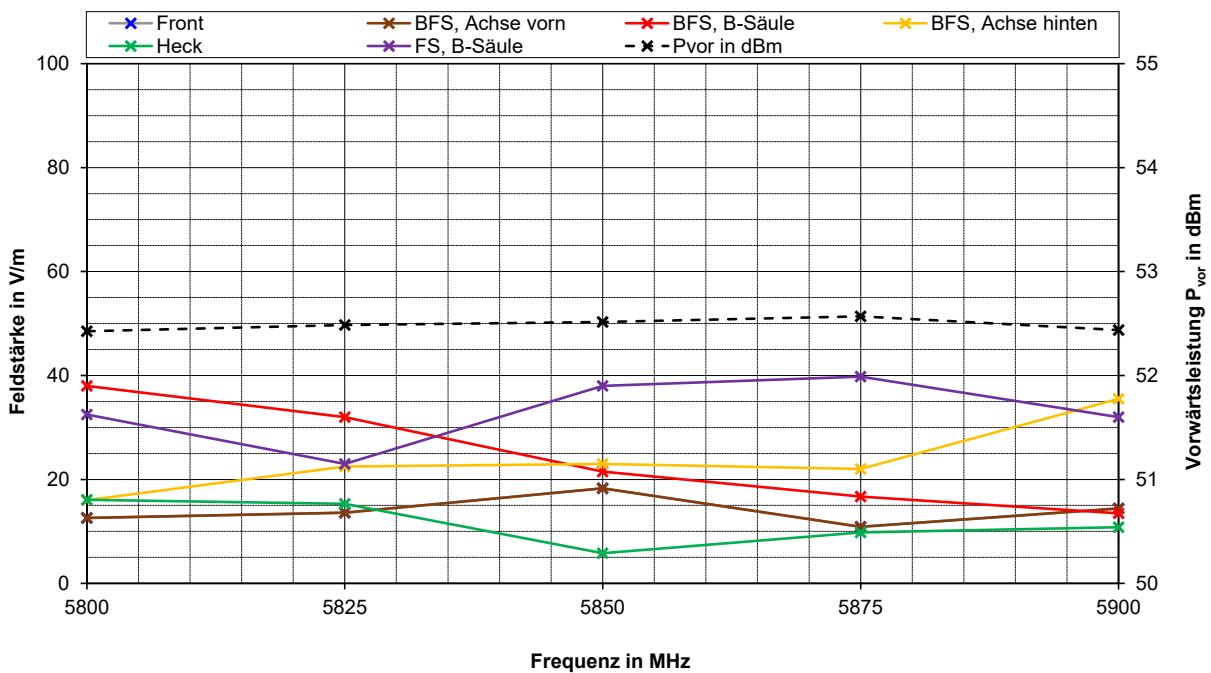


Abbildung 4.23 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 5, horizontale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte



## Feldsonde an Position 6

### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 6 im Fahrzeug; Polarisation: vertikal

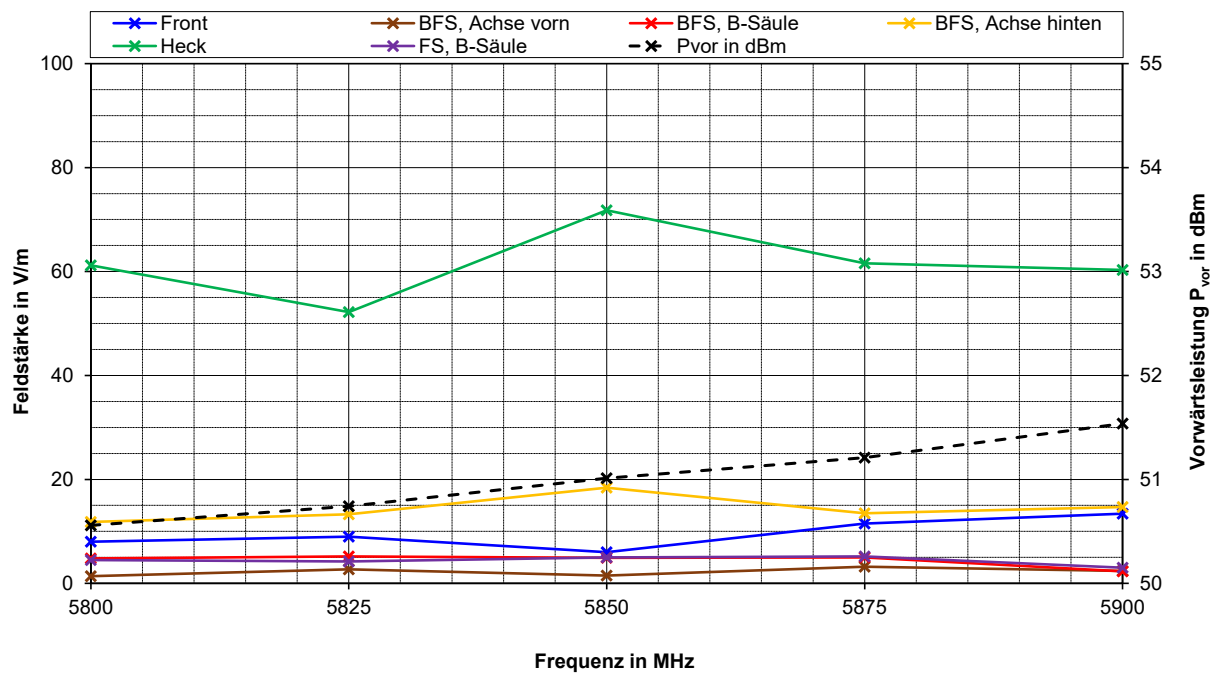


Abbildung 4.24 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 6, vertikale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

### Antennenmessung

Feldstärke an Sondenposition 6 im Fahrzeug; Polarisation: horizontal

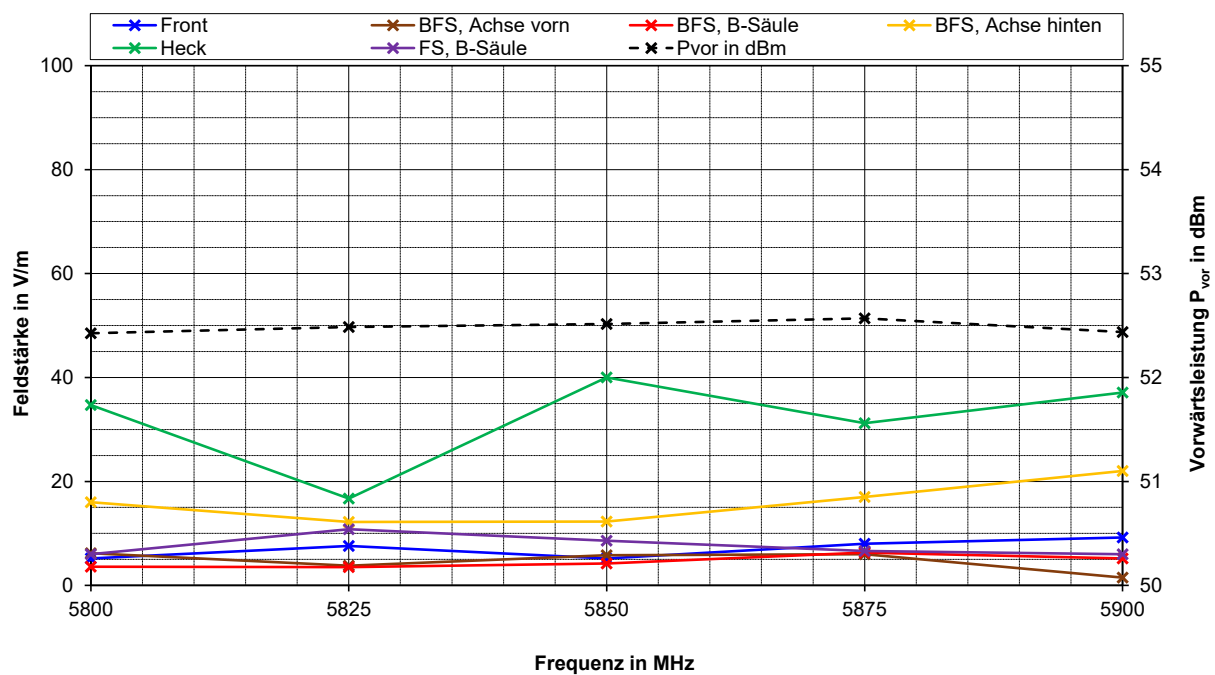


Abbildung 4.25 Feldstärken im Fahrzeug bei ISO-Messung; Prüffeldstärke 100 V/m; Sonde an Pos. 6, horizontale Ausrichtung Antenne für alle Aufstellorte

Tabelle 4.4 Maximal gemessene Feldstärkewerte über alle Messungen je Sondenposition VIRC mit  $|E_{\max}|$  mit zugehöriger Frequenz und dem arithmetischen Mittelwert aus allen Messungen im Band an der jeweiligen Position in der relevanten Polarisation für  $|E_{\max}|$

Position Feldsonde im Fahrzeug	Messung nach ISO 11451-2 $ E_{\max} $ in V/m bei f in MHz	$ E_{\text{Mittelwert}} $ ISO 11451-2 in V/m
1	62 bei 5800	44
2	34 bei 5800	26
3	154 bei 5900	110
4	69 bei 5900	41
5	46 bei 5900	31
6	72 bei 5850	61

Die Werte in der Tabelle 4.4 zeigen die im ITS-G5 Band gemessenen Feldstärkemaxima für die Messverfahren nach ISO 11451-2 für eine kalibrierte Prüffeldstärke von 100 V/m ohne Modulation (CW). Die  $|E_{\max}|$  Werte für die ISO-Messungen sind die Maxima aus allen Antennenpositionen.

Die Messergebnisse zeigen in Übereinstimmung mit der ermittelten Prüflingsabdeckung, dass die eingekoppelten Feldstärken sehr deutlich in Abhängigkeit von der Antennenposition an den jeweiligen Messpunkten variieren.

Die Messungen zeigen ebenfalls deutlich, dass eine Mindestzahl von Messungen notwendig ist, um alle relevanten Bereiche im Fahrzeug abzudecken.

#### 4.2.4 Alternative Messverfahren auf Fahrzeugebene

Aktuell werden Vorschläge für Messverfahren zur Reduzierung der Anzahl notwendigen Messungen insbesondere bei großen Fahrzeugen diskutiert. Eine Methode ist die VIRC: *Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber* nach dem Normentwurf ISOWD 11451-5 #1:2019. Dieses Verfahren ist im Abschnitt 3.8 beschrieben.



Abbildung 4.26  
Aufbau VIRC in der EMV-Messhalle an der Westsächsischen Hochschule Zwickau



Abbildung 4.27  
Fahrzeug und Antenne in der VIRC des FTZ e.V.

#### 4.2.5 Messergebnisse in der VIRC

Der schematische Aufbau der VIRC ist bereits in Abbildung 3.39 dargestellt. Für die Untersuchungen erfolgt ein Vergleich der an Position 1 – 6 gemessenen Feldstärken für die Messverfahren. Die Bilder zu den einzelnen Messpositionen der Feldsonden befinden sich im Abschnitt 4.2.2. Die gewählte Prüffeldstärke für die Messungen wurde auf 100 V/m festgelegt. Die Einkopplung in die verschiedenen Positionen hängt von der Exposition der jeweiligen Sonde zum Feld in der Karosse ab. An der Position 3 auf dem Armaturenbrett erfolgt die höchste Einkopplung, im Motorraum, geschützt durch die Motorhaube und die umgebenden Metallteile des Antriebsaggregates, die niedrigste. Die Feldstärke ist an den definierten Messpositionen zu den Ergebnissen nach ISO 11451-2 vergleichbar.

VIRC  
Feldstärkemessungen an den Sondenpositionen 1 - 6 im Fahrzeug

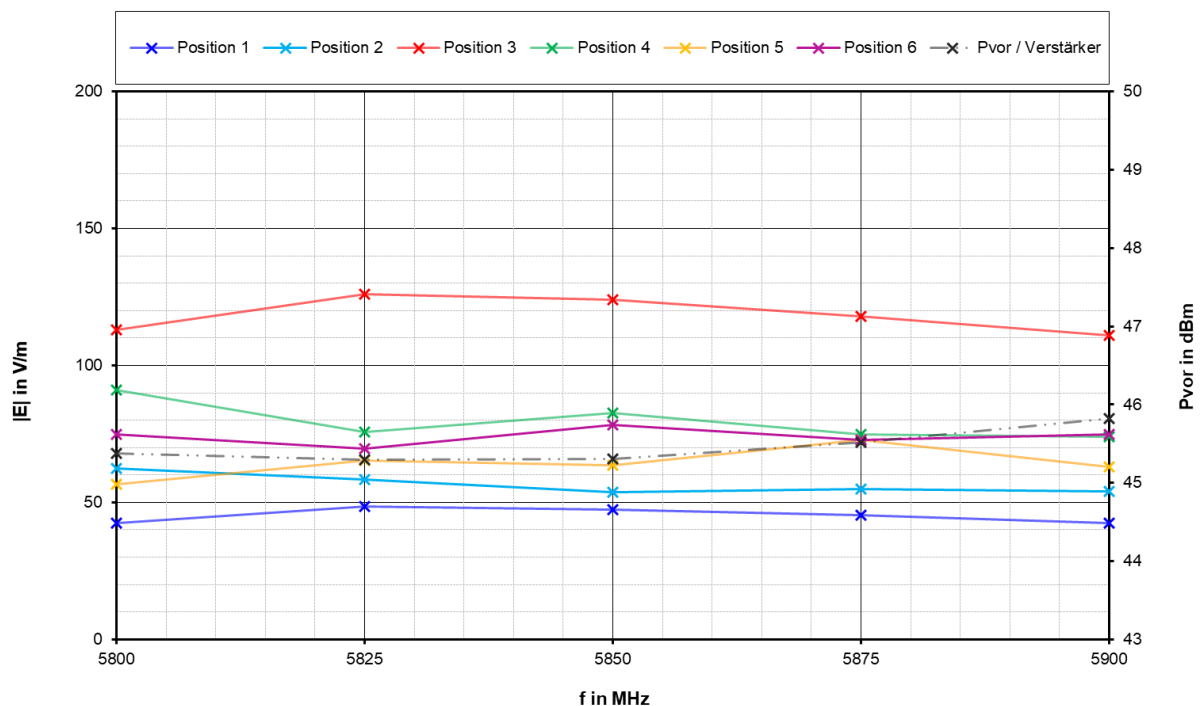


Abbildung 4.28 Feldstärkemessung in der VIRC

#### 4.2.6 Vergleich der Messverfahren

Es wurden sechs Antennenpositionen an vier Fahrzeugseiten für die Bestimmung der erreichbaren Einkopplung an den Sondenpositionen im Fahrzeug gewählt. Damit lässt sich die eingekoppelte Feldstärke an den Sondenpositionen 1 – 6 für beide Messverfahren vergleichen. Diese Messungen decken nicht den gesamten Messumfang ab, der nach der Norm notwendig wäre, geben aber einen guten Überblick von der Abhängigkeit der erreichbaren Feldstärke an den Messpunkten von den verschiedenen Antennenpositionen. Die Messung erfolgt nur mit CW in beiden Polarisationen für den Vergleich. Der gewählte Abstand Antenne zu Fahrzeug beträgt 3 m. Damit wird eine resultierende Messabdeckung am Prüfling von 60 cm erreicht.

Für eine vollständige Prüflingsabdeckung sind nach Vorgabe mehr Antennenstandorte notwendig:

- Länge Fahrzeug: 5,2 m: → 9 Antennenpositionen
- Breite Fahrzeug: 2 m: → 4 Antennenpositionen

Damit ergeben sich – theoretisch – bei 4 Seiten und 2 Antennenausrichtungen 52 Messungen für die komplette Messabdeckung.

Tabelle 4.5 Vergleich Anzahl notwendiger Messungen

	ISO 11451-2	VIRC
Messungen Vergleich	12	1
Messungen vollständige Prüflingsabdeckung	52	1

Mit der im Vergleich verwendeten VIRC lässt sich gegenüber der klassischen Antennenmessung signifikant Messzeit einsparen, wenn die Messungen die theoretischen Betrachtungen bestätigen. Die genaue Zeitersparnis hängt von der Prüfzeit pro Frequenzschritt in der VIRC ab. Der eingesparten Messzeit steht der zeitliche und personelle Aufwand für den Auf- und Abbau der Zeltkonstruktion der VIRC in der EMV-Halle entgegen.

Tabelle 4.6 Vergleich der notwendigen Prüfleistungen

Notwendige Prüfleistung für 100 V/m kalibrierte Feldstärke	ISO 11451-2 (ohne Fahrzeug)	VIRC (ohne Fahrzeug)
[dBm]	52,5	46
[W]	180	40

### Feldkalibrierung ISO 11451-2

Modulation: ohne (CW)

Feldstärke: 100 V/m, horizontale Pol.

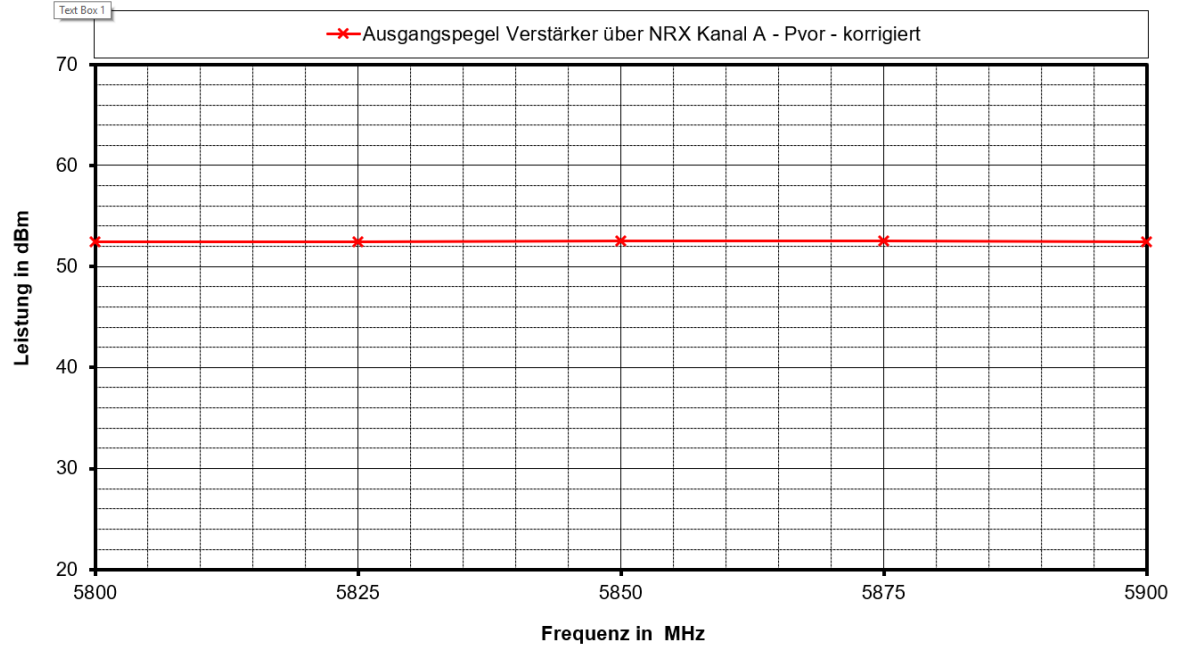


Abbildung 4.29 Notwendige Leistung HF-Verstärker für E-Feldstärke 100 V/m mit Hornantenne BBHA 9120J am Referenzpunkt, 3-Meter-Messtrecke in der leeren Absorberkammer

### Feldkalibrierung VIRC mit Fahrzeug

Modulation: ohne (CW)

Feldstärke: 100 V/m

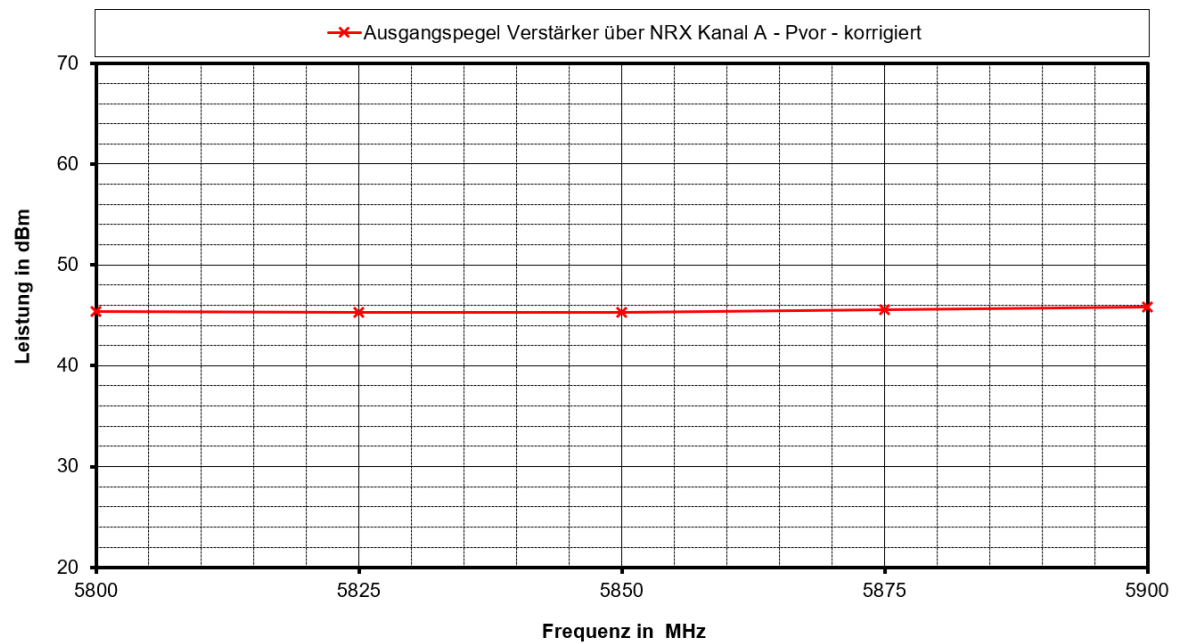


Abbildung 4.30 Notwendige Leistung HF-Verstärker für E-Feldstärke 100 V/m in der VIRC am FTZ mit Fahrzeug im Prüfraum

Die Feldstärke für die ISO-Messung wurde in 3 m Entfernung zur Antenne am Referenzpunkt ermittelt (s. Abbildung 4.29).

Die Feldstärke in der VIRC ergibt sich aus der normativen Ermittlung aus den Feldsondenmessungen an den Positionen F1 bis F8. Die in Abbildung 4.30 dargestellte Kurve wurde mit dem Fahrzeug im Prüfvolumen ermittelt. Die notwendige Leistung  $\overline{P_{\text{vor}}}$  ergibt sich aus der durchschnittlichen Leistung, um an allen Positionen F1...F8 (s. Abbildung 4.31) für alle Achsen X, Y und Z, die entlang der Raumachsen in der VIRC ausgerichtet sind, die Feldstärke von 100 V/m zu erzeugen. Damit wird an allen 8 Positionen die Vorwärtsleistung  $\overline{P_{\text{vor,p}}}$  so eingeregelt, dass für alle Feldachsen die angestrebte Feldstärke erreicht wird. Anschließend wird daraus ein Mittelwert  $\overline{P_{\text{vor}}}$  gebildet:

$$\overline{P_{\text{vor}}} = \frac{1}{8} \sum_{p=1}^8 \overline{P_{\text{vor,p}}} \quad (5.3)$$

Die Mittel- und Maximalwerte für die Feldstärke sind innerhalb des Arbeitsvolumens nicht überall exakt gleich. Der Prüfpegel wird als Erwartungswert des Maximalwertes einer elektrischen Feldkomponente innerhalb des Arbeitsvolumens definiert. Daher muss zusätzlich die Feldhomogenität im Prüfvolumen eine Standardabweichung von  $\sigma < 3$  dB aufweisen.

Die in Tabelle 4.6 aufgeführten Werte für den Vergleich der notwendigen Leistungen gelten für die am FTZ genutzten Prüfplätze. Die notwendige Leistung der VIRC hängt neben den Abmessungen auch von ihren Eigenschaften ab, wie bereits in der Theorie erläutert wurde.

Das in Abbildung 4.31 dargestellte Prüfvolumen entspricht dem innerhalb der VIRC des FTZ. Es umfasst das für Prüfungen genutzte Fahrzeug. Die notwendigen Abstände zu den Wänden der VIRC wurden eingehalten.

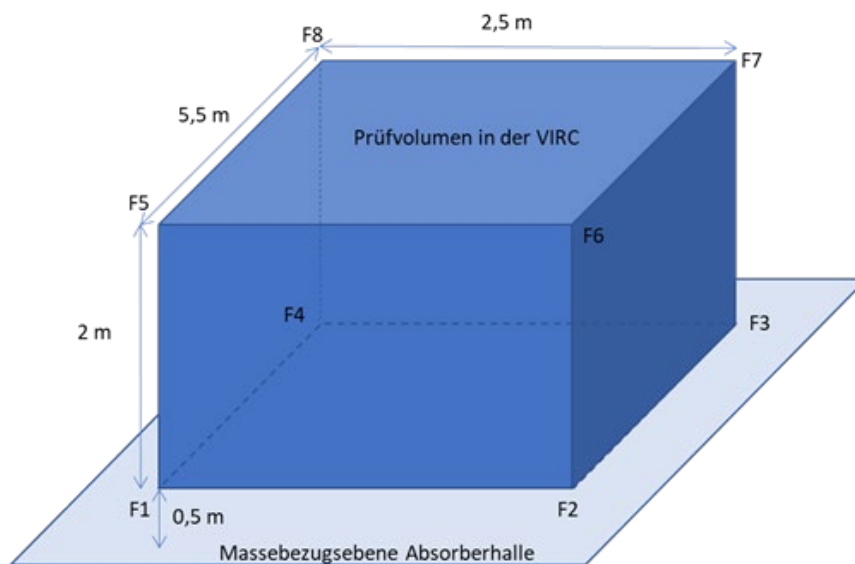


Abbildung 4.31 Übersicht der Messpunkte für die Bestimmung der Feldstärke im der VIRC (Prüfvolumen kleiner als VIRC-Abmessungen) für den Prüfaufbau an der WHZ

Die Werte in der Tabelle 4.7 zeigen den Vergleich der im ITS-G5 Band gemessenen Feldstärkemaxima für die Messverfahren nach ISO 11451-2 und die VIRC für eine Prüffeldstärke von 100 V/m ohne Modulation (CW). Die  $|E_{\text{max}}|$ -Werte für die ISO-Messungen sind je die Maximalwerte aus allen sechs geprüften Antennenpositionen pro Sondenmesspunkt.

Die Messungen zeigen keine eindeutige Tendenz für eine höhere Feldstärke durch die VIRC oder die Antennenmessung an den gewählten Sondenpositionen für die gleiche kalibrierte Prüffeldstärke.

Tabelle 4.7 Vergleich der gemessenen Feldstärken (Isotropie-Wert) an den Sondenpositionen für die Antennenmessung und die Messungen in der VIRC mit  $|E_{\max}|$  mit zugehöriger Frequenz und dem Mittelwert aus allen Messungen im Band an der Position, für ISO 11451-2 nur in der relevanten Polarisation für  $|E_{\max}|$ ; fett hervorgehobene Werte zeigen den Maximalwert pro Position

Position Feldsonde im Fahrzeug	ISO 11451-2 $ E_{\max} $ [V/m] bei f [MHz]	ISO 11451-2 $ E_{\text{Mittelwert}} $ [V/m]	VIRC $ E_{\max} $ [V/m] bei f [MHz]	VIRC $ E_{\text{Mittelwert}} $ [V/m]
1	<b>62 bei 5800</b>	44	49 bei 5825	45
2	34 bei 5800	26	<b>63 bei 5800</b>	57
3	<b>154 bei 5900</b>	110	126 bei 5825	118
4	69 bei 5900	41	<b>91 bei 5800</b>	80
5	46 bei 5900	31	<b>73 bei 5875</b>	64
6	72 bei 5850	61	<b>78 bei 5850</b>	74

Tabelle 4.8 Vergleich der Feldhomogenitäten

Eigenschaft des erzeugten Feldes	ISO 11451-2	VIRC
räumliche Homogenität	nein	$\sigma < 2$ dB (Messung) $\sigma < 3$ dB (Norm)
zeitliche Homogenität	ja	nein

Mit der VIRC lassen sich mit einer Messung vergleichbare Feldstärkewerte im Fahrzeug erzeugen wie mit der ISO 11451-2 mit einer Vielzahl von Messpositionen.

Die Polarisation in der VIRC ist zufällig. Die statistische Auswertung einer beispielhaften Messung (ein Frequenzschritt an einer Feldsonde) in Abbildung 4.33 zeigt, dass für alle Feldachsen (X, Y, Z) ein vergleichbarer Feldstärkewert erreicht wird. Das Feld in der VIRC ist isotrop. Im zeitlichen Verlauf schwankt die Feldstärke um einen Mittelwert, wobei das Maximum im Messzeitraum mehrmals erreicht wird. Da die Feldstärke im Prüfvolumen im Betrachtungszeitraum nicht konstant über der Zeit ist, ergibt sich eine statische Verteilung der Werte. Die zeitliche Abweichung im Messzeitraum führt zu der Gauß'schen Verteilung der Werte im Betrachtungszeitraum (s Abbildung 4.33). Die zeitlichen Schwankungen sind, neben dem Prinzip der Felderzeugung, auch von den Eigenschaften der Kammer abhängig. Das Erreichen der kalibrierten Feldstärke kann im Aufbau für jeden Frequenzschritt nachgewiesen werden.



Für die Antennenmessung würden sich für ein Prüfsignal ohne Modulation die gleichen Feldstärkewerte pro Achse und alle Messungen im Betrachtungszeitraum pro Feldsondenmesszeitpunkt einstellen. Weiterhin ist eine deutliche Unterscheidung der Einkopplung für die verschiedenen Feldachsen der Sonde zu erwarten, da das Feld gerichtet ausgesendet wird.

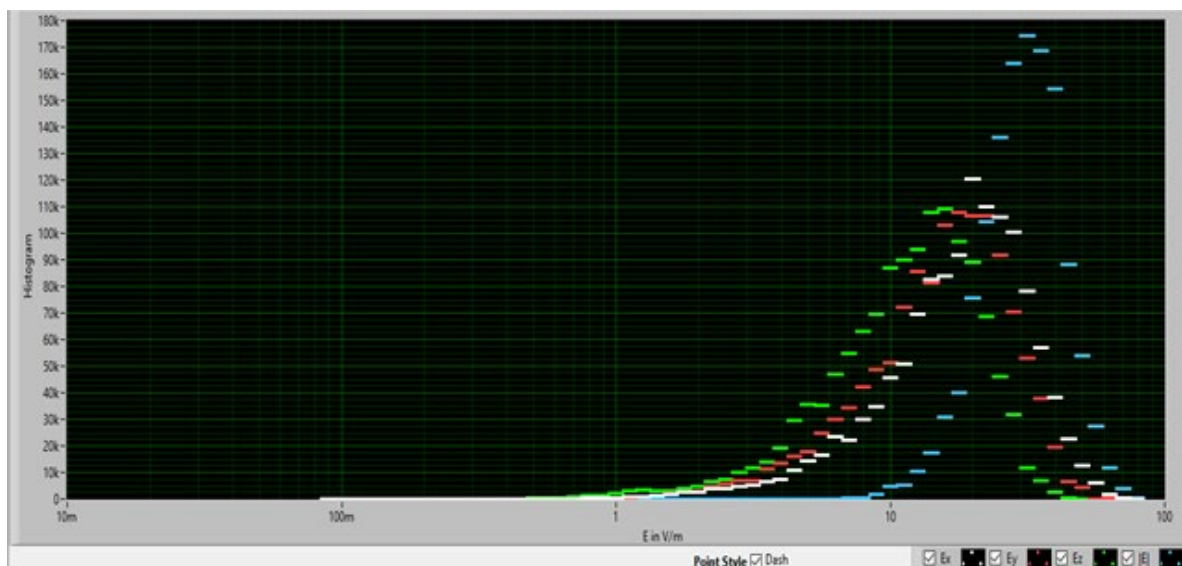


Abbildung 4.32 Feldisotropie am Ort der Sonde im Fahrzeug als Histogramm der gemessenen elektrischen Feldstärken über eine große Anzahl wiederholter Einzelmessungen. Die orthogonalen Messachsen verzeichnen im Mittel gleiche Feldstärken.  $E_x$  – weiß;  $E_y$  – rot;  $E_z$  – grün;  $|E|$  – blau

#### 4.2.7 Fazit Messökonomie auf Fahrzeugebene

Mit der Messmethode in der VIRC nach ISOWD 11451-5 #1:2019 wird mit einer Antennen- und Prüflingsposition auch für große Prüflinge eine komplette Abdeckung erreicht. Die ermittelten Feldstärkewerten an den Messpunkten im Fahrzeug entsprechen denen, die mit einer klassischen Antennenmessung und gleicher kalibrierter Feldstärke am Referenzpunkt erreicht werden. Deutlich unterschiedlich bei beiden Prüfverfahren sind jedoch

- die Feldhomogenität,
- die Polarisierung,
- der zeitliche Feldstärkeverlauf.

Prüflinge können auf diese geänderten Eigenschaften zwar der Theorie nach unterschiedlich reagieren und es könnte zu einem veränderten Verhalten durch sekundär strahlende Strukturen im Fahrzeug kommen. Inwieweit ein vergleichbares Störfestigkeitsverhalten bei gleicher Feldstärke am Verbauort des Prüflings im Fahrzeug jedoch auftritt, ist durch weitere Untersuchungen zu verifizieren.

Im Fall von unterschiedlichem Prüflingsverhalten für die Messverfahren ist eine Bewertung mit dem Antennenmessverfahren derzeit noch vorzuziehen, jedoch nicht aus physikalisch-technischen Gründen, sondern lediglich da dieses in den im Moment noch gültigen abnahmerelevanten Regelungen Vorschrift ist. Da man mit dem Verfahren in VIRC deutliche Zeitersparnisse erzielen kann, ist davon auszugehen, dass es zukünftig nicht nur im Bereich der entwicklungsbegleitenden Messungen, sondern auch für abnahmerelevante Messungen Anwendung finden wird.

## 5 Anhang

### 5.1 Tabellarische Ergebnisse AP1

Folgend sind die wichtigsten Ergebnisse der Recherche aus AP1 zur elektromagnetischen Umwelt von Fahrzeugen als Zusatz tabellarisch zusammengefasst. Für eine ausführliche Beschreibung der Ergebnisse wird auf Kapitel 2 des vorliegenden Abschlussberichts verwiesen.

RUNDFUNK							
Name	Frequenzbereich	Bandbreite	Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	Modulation	Sendeleistung	Polarisation	Maximale Empfangsfeldstärke
AM	148,5 ... 283,5 kHz (Langwelle) 526,5 ... 1606,5 kHz (Mittelwelle) 3,95 ... 26,1 MHz (Kurzwelle)	9 kHz (Lang-/Mittelwelle) 10 kHz (Kurzwelle)	-	Amplituden- modulation	bis zu 2000 kW (Langwelle) bis zu 1000 kW (Mittelwelle) bis zu 500 kW (Kurzwelle)	primär vertikal	100 V/m (Peak)
UKW	87,5 ... 108 MHz	300 kHz (Kanal) 200 kHz (Signal)	-	Frequenz- modulation	bis zu 100 kW	primär horizontal	17,8 mV/m (RMS = Peak)
DAB	174 ... 230 MHz	1,536 MHz	COFDM	DQPSK	bis zu 10 kW	primär vertikal	5,6 mV/m (RMS) 28,2 mV/m (Peak)
DVB-T	174 ... 223 MHz 470 ... 790 MHz	7/8 MHz (Kanal) 6,6/7,6 MHz(Signal)	COFDM	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	bis zu mehre- ren 100 kW	vertikal, horizontal	1,6 V/m (RMS) 7,9 V/m (Peak)

<b>ALLGEMEINZUTEILUNGEN</b>			
<b>Name</b>	<b>Frequenzbereich</b>	<b>Strahlungsleistung</b>	<b>Bemerkung</b>
Baustellenwarnsystem (SRD)	27,285 MHz	10 mW (ERP)	Kanalbandbreite: 10 kHz ISM-Band
Kurzzeitpeilfunk/Sprachkommunikation	149,01875 ... 149,11875 MHz	500 mW (ERP)	Kanalbandbreite: 12,5 kHz
Tracking, Tracing, Data Acquisition, SRD	169,4 ... 169,475 MHz	500 mW (ERP)	Kanalbandbreite: 50 kHz
Drahtlose Mikrofone / Hörhilfen	174 ... 230 MHz	50 mW (ERP)	Frequenznutzung wie DAB
SRD	433,05 ... 433,79 MHz	10 mW (EIRP)	ISM-Band
Sprachkommunikation	446 ... 446,2 MHz	500 mW (ERP)	Kanalbandbreite: 12,5 kHz
Drahtlose Mikrofone (SRD)	863 ... 865 MHz	10 mW (ERP)	-
RFID	865 ... 868 MHz	0,1...2 W (ERP)	-
SRD	869,3 ... 869,4 MHz	10 mW (EIRP)	Kanalbandbreite: 25 kHz
SRD	869,4 ... 870 MHz	5...500 mW (EIRP)	-
RFID	2,446 ... 2,454 GHz	500 mW (EIRP außerhalb von Gebäuden)	ISM

<b>ISM-BÄNDER</b>	
<b>Frequenzbereich</b>	<b>Maximal zugelassene Feldstärke bzw. Strahlungsleistung</b>
9 ... 10 kHz	Max. magnetische Feldstärke in 10 m Entfernung: 0,13 mA/m
6,765 ... 6,795 MHz	
13,553 ... 13,567 MHz	
24,00 ... 24,25 MHz	
26,957 ... 27,283 MHz	
40,66 ... 40,70 MHz	Max. ERP: 50 nW ... 500 mW
150 MHz	
433,05 ... 434,79 MHz	
2400 ... 2500 MHz	Max. EIRP: 0,01 ... 10 W
5725 ... 5875 MHz	
61 ... 61,5 GHz	
122 ... 123 GHz	
244 ... 246 GHz	

MOBILFUNK							
Name	Frequenzbereich		Bandbreite	Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	Modulation	Sendeleistung	Maximale Empfangsfeldstärke
	Downlink	Uplink					
GSM	918 ... 925 MHz 925 ... 960 MHz 1805 ... 1880 MHz	873 ... 876 MHz 880 ... 915 MHz 1710 ... 1785 MHz	200 kHz	TDMA (gepulst)	GMSK, 8-PSK	10-15 W pro Kanal (DL)  Max. 1-2 W (UL)	5,4 V/m (RMS) 7,6 V/m (Peak)
UMTS/ HSPA(+)	1920 ... 1980 MHz	2110 ... 2170 MHz	5 MHz (Kanal) 4,6 MHz (Signal)	W-CDMA	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	20 ... 40 W pro Kanal (DL)  Max. 250 mW (UL)	5,1 V/m (RMS) 16,1 V/m (Peak)
LTE(+)	703 ... 733 MHz 791 ... 821 MHz 925 ... 960 MHz 1452 ... 1492 MHz 1805 ... 1880 MHz 2110 ... 2170 MHz 2620 ... 2690 MHz 2570 ... 2620 MHz 3510 ... 3590 MHz	758 ... 788 MHz 832 ... 862 MHz 880 ... 915 MHz 1710 ... 1785 MHz 1900 ... 1980 MHz 2010 ... 2025 MHz 2500 ... 2570 MHz 2570 ... 2620 MHz 3410 ... 3490 MHz	1,08 ... 18 MHz (Signal) 1,4 ... 20 MHz (Kanal)	OFDMA mit 15 kHz Trägerabstand (DL)  SC-FDMA mit 15 kHz Trägerabstand (UL)	QPSK, 16-QAM, 64-QAM	20 ... 50 W pro Kanal (DL)  Max. 200 mW (UL)	3,7 V/m (RMS) 11,6 V/m (Peak)

SATELLITENNAVIGATION							
Name	Frequenzbereich	Bandbreite	Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	Modulation	Sendeleistung	Polarisation	Maximale Empfangsfeldstärke
Galileo	E5a/b: 1164 ... 1215 MHz	24 MHz (E5)	CDMA	BPSK, BOC, AltBOC	50 W (Nennwert Satellit)	RHCP	irrelevant
	E6: 1260 ... 1300 MHz	32 MHz (E1)					
	E1: 1559 ... 1591 MHz	40 MHz (E6)					
GPS	L5: 1164 ... 1188 MHz	24 MHz	CDMA	BPSK, BOC	50 W (Nennwert Satellit)	RHCP	irrelevant
	L2: 1215 ... 1239 MHz						
	L1: 1563 ... 1587 MHz						

INFOTAINMENT							
Name	Frequenzbereich	Bandbreite	Übertragungs-/ Zugriffsverfahren	Modulation	Sendeleistung	Interferenz	Maximale Empfangsfeldstärke
WLAN	2400 ... 2483,5 MHz	20 MHz, 40 MHz 80 MHz, 160 MHz	DSSS, OFDM	DBPSK, DQPSK, BPSK, QPSK, 16/64/256-QAM	Max. 0,1 W EIRP (2,4 GHz) Max. 1 W EIRP (5 GHz)	Bluetooth	4,0 V/m (RMS) 160,3 V/m (Peak, Nahfeldmessung AP2)
	5150 ... 5350 MHz						
	5470 ... 5725 MHz						
Bluetooth	2400 ... 2484,5 MHz	1 ... 2 MHz	FHSS	GFSK, DQPSK, 8PSK	1 ... 100 mW	WLAN	1,3 V/m (RMS) 24,5 V/m (Peak, Nahfeldmessung AP2)

VERKEHR				
Name	Frequenzbereich	Leistungs- dichte	EIRP	Interferenz
Fahrzeugradar	21,65 ... 26,65 GHz 24 ... 24,25 GHz 76 ... 77 GHz 77 ... 81 GHz	24 GHz: 0,07 $\mu$ W/MHz 77 GHz: 126 $\mu$ W/MHz	24GHz: 20 dBm (0,1 W) 77 GHz: 55 dBm (316 W)	-
ITS (Deutschland)	5855 ... 5925 MHz Kanalbreite: 10 MHz	0,2 W/MHz	33 dBm (2 W) (Sendeleistung: 28,8 dBm (0,76 W)) (Peak-Werte AP2: Kontaktmessung 562 V/m, 5 cm-Abstand 79,4 V/m, 25 cm-Abstand 57,2 V/m)	Mauterhebung, BFWA, SRD, WIA, Betriebsfunk, Demonstrationsfunk, DA2GC, MBR, Militär, Satelliten-Auf- wärtsverbindung (nicht in sicherheitskritischen ITS- Bereichen)
ITS (USA)	5850 ... 5925 MHz Kanalbreite: 5, 10, 20 MHz	-	44,8 dBm (30 W) (Sendeleistung: 28,8 dBm (0,76 W))	Satelliten-Aufwärtsverbindung, Mili- tär, Amateurfunk, ISM-Band (nicht in sicherheitskritischen ITS- Bereichen)



## 6 Literaturverzeichnis

- [3G19] 3GPP: *TS 36.300 E-UTRA and E-UTRAN; Overall description; Stage 2 (v14.11.0, Release 14)*, Tech. Spec., September 2019
- [BFS19] Bundesamt für Strahlenschutz: *LTE – Long Term Evolution*, Webseite: [http://www.bfs.de/DE/themen/emf/mobilfunk/basiswissen/lte/lte\\_node.html](http://www.bfs.de/DE/themen/emf/mobilfunk/basiswissen/lte/lte_node.html) letzter Zugriff: 19.02.2019
- [BFS19-1] Bundesamt für Strahlenschutz: *Übersicht über das Vorkommen hochfrequenter Felder*, Webseite: <http://www.bfs.de/DE/themen/emf/hff/quellen/vorkommen/uebersicht.html>, letzter Zugriff: 19.02.2019
- [BNA15] Bundesnetzagentur: *Funkanwendungen auf den ISM-Bändern*, Stand: April 2015
- [BNA18] Bundesnetzagentur: *Frequenzplan*, Stand: März 2018
- [BNA18-1] Bundesnetzagentur: *Bundesnetzagentur stärkt Deutschland als Leitmarkt für 5G*, Begleitpapier für die 123. Sitzung des Beirats am 26.11.2018
- [BNA19] Bundesnetzagentur: *Ton- und Fernseh-Rundfunksender*, <https://emf.bundesnetzagentur.de/pdf/Ton-undFernsehrundfunk-Bnetza.pdf>, letzter Zugriff: 05.02.2019
- [BNA19-1] Bundesnetzagentur: *LTE und Digitale Dividende*, <https://emf.bundesnetzagentur.de/pdf/LTE-Bnetza.pdf>, letzter Zugriff: 19.02.2019
- [BNA19-2] Bundesnetzagentur: *UMTS – der Multimedia-Mobilfunk*, <https://emf.bundesnetzagentur.de/pdf/Mobilfunk-Bnetza.pdf>, letzter Zugriff: 19.02.2019
- [BNA19-3] Bundesnetzagentur: *Allgemeinzuteilungen*, [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/allgemeinzuteilungen-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/allgemeinzuteilungen-node.html), letzter Zugriff: 20.02.2019
- [Bor15] Bornkessel, C.: *Systematische Erfassung der HF-Gesamtmission in typischen Alltagssituationen*, Projekt für IZMF, September 2015
- [BSW13] Bornkessel, C. ; Schubert, M. ; Wuschek, M.: *Bestimmung der Exposition der allgemeinen Bevölkerung durch neue Mobilfunktechniken*, Abschlussbericht für das Bundesamt für Strahlenschutz, 9. Januar 2013
- [BSWS07] Bornkessel, C. ; Schubert, M. ; Wuschek, M. ; Schmidt, P.: *Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von GSM und UMTS Basisstationen*, Beitrag in *Advances in Radio Science* 5, 2007
- [CFR97] Code of Federal Regulations: *47 CFR § 97.303 – Frequency sharing requirements*, Bundesrecht der Vereinigten Staaten
- [Coh17] Cohda Wireless: *MK5 OBU Specification*, Datenblatt, Oktober 2017
- [Coh17-1] Cohda Wireless: *MK5 RSU Specification*, Datenblatt, Oktober 2017
- [DMD12] Dafinescu, V. ; Mariut, F. ; David, V.: *Monitoring Electric Field Emissions Due to Mobile Communications*, Rumänien, 2012
- [EAKS07] Eissfeller, B. ; Ameres, G. ; Kropp, V. ; Sanroma, D.: *Performance of GPS, GLONASS and Galileo*, Wichmann Verlag, Heidelberg, 2007

- [ECC17] Electronic Communications Committee: *Sharing and compatibility studies between Maritime Broadband Radio (MBR) in the 5850-5900 MHz frequency band and other systems*, ECC Report 259, Januar 2017
- [ECC18] Electronic Communications Committee: *THE EUROPEAN TABLE OF FREQUENCY ALLOCATIONS AND APPLICATIONS IN THE FREQUENCY RANGE 8.3 kHz to 3000 GHz (ECA TABLE)*, Oktober 2018
- [ECE14] Agreement Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions, Addendum 9: Regulation No. 10, Revision 5 (ECE 10 R5)
- [EMVU20] Bornkessel, C.: *Wirkung elektromagnetischer Felder auf den Menschen*, Vorlesung, Technische Universität Ilmenau, Sommersemester 2020
- [ESA19] ESA Navipedia: *Galileo Signal Plan*, [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo\\_Signal\\_Plan](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Signal_Plan), letzter Zugriff: 21.02.2019
- [ESA19-1] ESA Navipedia: *GPS Signal Plan*, [https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_Signal\\_Plan](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_Signal_Plan), letzter Zugriff: 21.02.2019
- [ETSI09-1] ETSI TR 102 654 (V1.1.1): *Co-location and Co-existence Considerations regarding Dedicated Short Range Communication (DSRC) transmission equipment and Intelligent Transport Systems (ITS) operating in the 5 GHz frequency range and other potential sources of interference*, Technischer Report, Januar 2009
- [ETSI16] ETSI EN 302 571 (V2.0.0): *Intelligent Transport Systems (ITS); Radiocommunications equipment operating in the 5855 MHz to 5925 MHz frequency band*, Europäischer Standard, März 2016
- [ETSI17] ETSI EN 300 401 (V2.1.1): *Radio Broadcasting Systems; Digital Audio Broadcasting (DAB) to mobile portable and fixed receivers*, Europäische Norm, Januar 2017
- [FAT93] FAT Schriftenreihe Nr. 101: *Die elektromagnetische Umwelt des Kraftfahrzeugs*, Herausgeber K.-H. Gonschorek und H. Neu, ISSN 0933-050X
- [FCC02] Federal Communications Commission: *Notice of Proposed Rulemaking and Order – FCC 02-302*, November 2002
- [FCC20] Federal Communications Commission: *FCC Online Table of Frequency Allocations – 47 CFR §2.106*, März 2020
- [FCC19-1] Federal Communications Commission: *Notice of Proposed Rulemaking and Order – FCC 19-129*, Dezember 2019
- [FTZ-1] Datenblatt UWB2-6 (Ultra-Wide-Band Antenna 2 – 6 GHz), FTZ e.V.
- [GBM10] Goppelt, M. ; Blöcher, H.-L. ; Menzel, W.: *Automotive radar – investigation of mutual interference mechanisms*, Artikel, 2010
- [HIL07] Hillgärtner, M.: *Hohlraumresonanzgüte in Modenverwirbelungskammern*, Dissertation, 2007
- [Hof17] Hofmann, W.: *Untersuchungen zur hochfrequenten elektromagnetischen Exposition von Personen in alltagstypischen Szenarien*, Masterarbeit, Ilmenau, 2017
- [IEEE10] IEEE Computer Society: *Std 802.11p-2010, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Amendment 6: Wireless Access in Vehicular Environments*, IEEE Standard, Juli 2010

- [IEEE99] IEEE 802.11a-1999 – IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems – LAN/MAN Specific Requirements – Part 11: Wireless Medium Access Control (MAC) and physical layer (PHY) specifications: High Speed Physical Layer in the 5 GHz band
- [ISO-4] ISO 11452-3:2016; Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 3: On-board transmitter simulation
- [ISO02] ISO 11451-2: 2002: Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances by narrowband radiated electromagnetic energy – Part 2: Off-vehicle radiation source
- [ISO07] ISO 11451-3:2007; Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 3: On board transmitter simulation
- [ISO10] ISO 11452-11:2010; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 11: Reverberation chamber
- [ISO12] ISO 11452-9:2012; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 9: Portable transmitters
- [ISO15] ISO 11452-1:2015; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 1: General principles and terminology
- [ISO16] ISO 11452-3:2016; Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 3: On-board transmitter simulation
- [ISO19] ISO/CD 11452-9.2:2019; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 9: Portable transmitters
- [ISO19-1] ISO 11452-2:2019; Road vehicles — Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 2: Absorber-lined shielded enclosure
- [ISO19-2] ISO/WD 11451-5:2019, Road vehicles — Vehicle test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy — Part 5: Reverberation chamber
- [IZZ19] Izzo, D.: An introduction to the reverberating test environment from the signal point of view, 2019
- [ITU98] ITU-R BS.412-9: *Planning standards for terrestrial FM sound broadcasting at VHF*, Recommendation, Dezember 1998
- [JM13] Juricev-Sudac, L. ; Malaric, K.: *Exposure to Electromagnetic Field from DVB-T Transmitter*, September 2013
- [LDS14] Lunca, E. ; Damian, C. ; Salceanu, A.: *EMF Exposure Measurements on 4G/LTE Mobile Communication Networks*, Rumänien, 2014
- [LSUA16] Lunca, E. ; Salceanu, A. ; Ursache, S. ; Anghel, M.: *Evaluation of EMF Exposure from Digital Terrestrial Television Transmitters*, Ungarn, September 2016
- [LUM18] User's Manual Lumiloop, LSProbe 1.2; 10 Hz – 8.2 GHz 3D E-FIELD PROBE, 2018

- [Man10] Mansfeld, W.: *Satellitenortung und Navigation*, Verlag Vieweg+Teubner, 3. Auflage, 2010
- [MM19] Mobile Mark: *MGW-303 Series Antennas – Patterns*, Datenblatt, 2019
- [MM19-1] Mobile Mark: *ECO6-5500 Series Antennas – Patterns*, Datenblatt, 2019
- [NAV19] NavtechGPS-Webseite: [https://www.navtechgps.com/gnss\\_facts/](https://www.navtechgps.com/gnss_facts/), letzter Zugriff: 14.04.2019
- [NMN18] Shaffer, B. ; Kirchbeck, B.: *Kfz-Radarsysteme: Die Gründe für den Wechsel von 24 GHz auf 77 GHz*, Artikel veröffentlicht in next-mobility.news, 23.03.2018
- [ROM19] Rommel, A., Izzo, D.: *On the Use of a Hybrid Semi-Anechoic Reverberation Chamber (H-SARC) for Large Vehicles EMC-Testing*, 2019
- [Sau18] Sauter, M.: *Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme*, Verlag Springer Vieweg, 7. Auflage, 2018
- [SBWS06] Schubert, M. ; Bornkessel, C. ; Wuschek, M. ; Schmidt, P.: *Bestimmung der Exposition der Bevölkerung in der Umgebung von digitalen Rundfunk- und Fernsehsendern*, Studie im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz, 18. Juli 2006
- [SBWS07] Schubert, M. ; Bornkessel, C. ; Wuschek, M. ; Schmidt, P.: *Exposure of the general public to digital broadcast transmitters compared to analogue ones*, 6. Juli 2007
- [SCH-1] Schwarzbeck 422 NJ, Datasheet Rev. A, SCHWARZBECK MESS – ELEKTRONIK OHG
- [SCH-2] Berechnungen für Antennenmessungen, Application Note, Schwarzbeck Elektronik
- [SCH-3] Schwarzbeck B Breitband Hochgewinn Horn Antenne BBHA 9120 J, Datenblatt Rev. A, SCHWARZBECK MESS – ELEKTRONIK OHG
- [Sch19] Schilling, L.-M.: *Erfassung der elektromagnetischen Umwelt beim KFZ im Hinblick auf automatisiertes und vernetztes Fahren*, Masterarbeit, Ilmenau, 2019
- [Sch20] Schwarzbeck Mess-Elektronik: *Flachelemente für SBA9119*, Datenblatt 422 NJ, 2020
- [SSH17] Singh, J.; Stephan, R.; Hein, M. A.: *Strahlungselement*, Deutsches Patent- und Markenamt, Appl. 10 2017 011 225.8, 30.11.2017
- [SSH19] Singh, J.; Stephan, R.; Hein, M. A.: *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
- [Vfg4] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 4/2018: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Frequenzbereichen 865 – 868 MHz und 2446 – 2454 MHz für Funkanwendungen für Identifizierungszwecke; („Radio Frequency Identification Applications“, RFID)*, 2018
- [Vfg5] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 5/2018: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen zur Nutzung durch Funkanwendungen mit geringer Reichweite für nicht näher spezifizierte Anwendungen; Non-specific Short Range Devices (SRD)*, 2018
- [Vfg10] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 10/2013: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung in lokalen Netzwerken; Wireless Local Area Networks (WLAN-Funkanwendungen)*, 2013
- [Vfg42] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 42/2016: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen im Frequenzbereich 446,0 MHz – 446,2 MHz für Funkanwendungen für die Sprachkommunikation mit Handsprechfunkgeräten*, 2016
- [Vfg48] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 48/2009: *Allgemeinzuteilung der Frequenz 27,285 MHz für Funkanwendungen geringer Reichweite (SRD) für Baustellenwarnsysteme*, 2009

- [Vfg52] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 52/2015: *Allgemeinzuteilung der Frequenz 149,0250 MHz für Funkanwendungen zum Aufspüren entwendeter Fahrzeuge, sowie zur Peilung von Such-, Spür- und Jagdhunden; Kurz-zeitpeilfunk*, 2016
- [Vfg54] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 54/2016: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen im Frequenzbereich 149,01875 MHz – 149,11875 MHz für Funkanwendungen für die Sprachkommunikation mit Handsprechfunkgeräten über kurze Entfernungen*, 2016
- [Vfg59] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 59/2015: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für drahtlose Mikrofone*, 2015
- [Vfg65] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 65/2009: *Allgemeinzuteilung des Frequenzbereiches 456,9 – 457,1 kHz zum Auffinden von Lawinenverschütteten sowie des Frequenzbereichs 169,400 – 169,475 MHz zur Femmessung und Datenerfassung sowie zur Erkennung, Aufspürung und Ortung von Objekten (Tracking, Tracing and Data Acquisition)*, 2009
- [Vfg69] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 69/2009: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Funkanwendungen für intelligente Verkehrssysteme („Intelligent Transport Systems“, ITS)*, 2009
- [Vfg73] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 73/2018: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die Nutzung durch Ultrabreitband-Anwendungen (UWB)*, 2018
- [Vfg91] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 91/2018: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für die drahtlose Anbindung von Hörhilfen*, 2018
- [Vfg107] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 107/2018: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für drahtlose Mikrofone*, 2018
- [Vfg125] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 125/2017: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen für Verkehrstelematiksysteme*, 2017
- [Vfg151] Bundesnetzagentur, Vfg. Nr. 151/2018: *Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Bereichen 5150 MHz – 5350 MHz und 5470 MHz – 5725 MHz für Funkanwendungen zur breitbandigen Datenübertragung*, 2018
- [Wu19] Wuschek, M.: *Measuring RF Electromagnetic Fields at Mobile Communications Base Station and Broadcast Transmitter Sites*, Narda Safety Test Solutions, 1. Auflage, 2019

## 7 Abkürzungsverzeichnis

3GPP	<b>3rd Generation Partnership Project</b>
AltBOC	<b>Alternative BOC</b>
AM	<b>Amplitudenmodulation</b>
BFWA	<b>Broadband Fixed Wireless Access</b>
BLE	<b>Bluetooth Low Energy</b>
BNN	<b>Bordnetznachbildung</b>
BOC	<b>binary offset carrier</b>
BPSK	<b>binary phase-shift keying</b>
CDMA	<b>code division multiple access</b>
COFDM	<b>coded orthogonal frequency-division multiplexing</b>
C-V2X	<b>cellular-V2X</b>
DA2GC	<b>Direct Air-to-Ground Communication</b>
DAB	<b>Digital Audio Broadcasting</b>
DBPSK	<b>differential binary phase-shift keying</b>
DL	<b>Downlink</b>
DQPSK	<b>differential quadrature phase-shift keying</b>
DSSS	<b>direct sequence spread spectrum</b>
DUT	<b>Device Under Test</b>
DVB-T	<b>Digital Video Broadcasting – Terrestrial</b>
EDGE	<b>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</b>
EIRP	<b>equivalent isotropically radiated power</b>
ERP	<b>effective radiated power</b>
EMVU	<b>elektromagnetische Umweltverträglichkeit</b>
ESA	<b>electronic sub assembly</b>
ETSI	<b>European Telecommunications Standards Institute</b>
FAT	<b>Forschungsvereinigung Automobiltechnik</b>
FHSS	<b>frequency hopping spread spectrum</b>
FTZ	<b>Forschungs- und Transferzentrum</b>
GFSK	<b>gaussian frequency shift keying</b>
GMSK	<b>gaussian minimum shift keying</b>
GPRS	<b>General Packet Radio Service</b>
GPS	<b>Global Positioning System</b>
GSM	<b>Global System for Mobile Communications</b>
HSPA	<b>High Speed Packet Access</b>
IEEE	<b>Institute of Electrical and Electronics Engineers</b>
ISI	<b>Inter-Symbol-Interferenz</b>
ISM	<b>Industrial, Scientific and Medical</b>
ITS	<b>Intelligente Transportsysteme</b>
Kfz	<b>Kraftfahrzeug</b>

LTE	<b>L</b> ong <b>T</b> erm <b>E</b> volution
LTE+	<b>L</b> TE <b>A</b> dvanced
MBR	<b>M</b> aritime <b>B</b> roadband <b>R</b> adio
OBU	<b>O</b> n- <b>B</b> oard- <b>U</b> nit
OFDM	orthogonal frequency-division multiplexing
OFDMA	orthogonal frequency-division multiplexing access
PHY	<b>P</b> hysical (Physical Layer)
PM	<b>P</b> ulsmodulation
PSK	phase-shift keying
QAM	<b>Q</b> uadraturamplitudenmodulation
QPSK	quadrature phase-shift keying
RFID	<b>R</b> adio <b>F</b> requency <b>I</b> dentification
RHCP	<b>R</b> ight <b>H</b> and <b>C</b> ircular <b>P</b> olarisation
RMS	root-mean-square
RSU	<b>R</b> oad- <b>S</b> ide- <b>U</b> nit
SAR	<b>S</b> pezifische <b>A</b> bsorptionsrate
SC-FDMA	single carrier frequency division multiple access
SRD	<b>S</b> hort <b>R</b> ange <b>D</b> evelopments
TDMA	time division multiple access
ThIMo	<b>T</b> hüringer <b>I</b> nnovationszentrum <b>M</b> obilität
UKW	<b>U</b> ltrakurzwelle
UL	<b>U</b> plink
UMTS	<b>U</b> niversal <b>M</b> obile <b>T</b> elecommunications <b>S</b> ystem
UWB	<b>U</b> ltra- <b>W</b> ideband
V2I	vehicle-to-infrastructure
V2N	vehicle-to-network
V2P	vehicle-to-pedestrian
V2V	vehicle-to-vehicle
V2X	vehicle-to-everything
VDA	<b>V</b> erband <b>d</b> er <b>A</b> utomobilindustrie
VIRC	<b>V</b> ibrating <b>I</b> ntrinsic <b>R</b> everbation <b>C</b> hamber
W-CDMA	wideband code division multiple access
WAVE	<b>W</b> ireless <b>A</b> ccess in <b>V</b> ehicular <b>E</b> nvironments
WLAN	<b>W</b> ireless <b>L</b> ocal <b>A</b> rea <b>N</b> etwork
WIA	<b>W</b> ireless <b>I</b> ndustrial <b>A</b> pplication



## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2014)

Nr.	Titel
263	Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
264	Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
265	Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
266	Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
267	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
268	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
269	Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
270	Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
271	Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
272	Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
273	UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
274	Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
275	Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
276	Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
277	Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
278	Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
279	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
280	PCM from iGLAD database, 2015
281	Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
282	Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016

- 286  $\chi$ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilsspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen, 2018

- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashesimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
- 331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashesimulation, 2020
- 332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashesimulation, 2020
- 333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashesimulation, 2020
- 334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
- 335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2020

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
Twitter @VDA\_online

**VDA** | Verband der  
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de/fat](http://www.vda.de/fat)

**FAT** | Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik