



FSM | Forschungsstiftung
Strom und Mobilkommunikation
FSM | Swiss Research Foundation for
Electricity and Mobile Communication



Datum: 31.03.2023

Ort: Bern

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM)
c/o ETH Zürich, Gloriastrasse 35, ETH K89, CH-8092 Zürich
www.emf.ethz.ch

Fields at Work GmbH
Hegibachstrasse 41, CH-8032 Zürich
www.fieldsatwork.ch

Autor/in:

Dr. Jürg Eberhard, FSM, juerg.eberhard@emf.ethz.ch
Dr. Jürg Fröhlich, Fields at Work, juerg.froehlich@fieldsatwork.ch
Dr. Marco Zahner, Fields at Work, marco.zahner@fieldsatwork.ch

BFE-Projektbegleitung:

Dr. Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
Roland Brüniger, roland.brueiniger@brueniger.swiss

BFE-Vertragsnummer: SI/502401-1

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Zur Dekarbonisierung der Mobilität werden immer mehr batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (E-Fahrzeuge) in Betrieb gesetzt. Durch die elektrischen Komponenten des Antriebs, durch das Laden der Batterie, wie auch durch andere in modernen Fahrzeugen eingesetzte, vielfältige, elektronische Systeme entstehen in und um die Fahrzeuge elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (EMF). Prinzipiell lässt sich aus technischer Sicht feststellen, dass unabhängig von der Antriebsart alle Fahrzeuge Immissionen elektromagnetischer Felder erzeugen. Dabei sind nebst den elektrischen Parametern der Komponenten das Design und die verwendeten Materialien wesentlich. Die Expositionssituation in Fahrzeugen weist die Besonderheiten auf, dass die Passagiere unter Umständen für Stunden gleichzeitig einer Vielzahl von Quellen verschiedenster Frequenzen auf engstem Raum ausgesetzt sind. Man befindet sich zudem in einem durch die Karosserie und metallbedampfte Scheiben (teil-)abgeschirmten Volumen.

Ziel dieses Projektes war es, durch Messungen an einer Auswahl von E-Fahrzeugen abzuschätzen, ob die zusätzlichen EMF-Immissionen durch den elektrischen Antrieb und der dazugehörigen Komponenten als Gesundheitsrisiko kritisch zu beurteilen sind und weitere, vertiefte Abklärungen notwendig sind.

Dazu wurde an einer kleinen Auswahl von seriengefertigten Personenfahrzeugen (5 E-Fahrzeuge rein-elektrisch und batteriebetrieben, 1 Fahrzeug mit Dieselmotor zum Vergleich) aus dem normalen Fahrzeugbestand umfangreiche Messungen der auftretenden nieder- und hochfrequenten EMF unter realen Betriebsbedingungen inklusive des Ladevorgangs vorgenommen, um die Immissionen auf Passagiere und sich in der Nähe des Fahrzeugs aufhaltende Personen beurteilen zu können. Da es aktuell keine spezifischen Vorschriften für EMF in E-Fahrzeugen gibt, wurden die Feldstärken der gemessenen EMF gegenüber international etablierten Grenzwertempfehlungen (ICNIRP) eingestuft.

Die so ermittelten Ergebnisse ergaben eher tiefe totale Grenzwertausschöpfungen aus allen Quellen: durchschnittlich im Bereich bis 5% für niederfrequente Magnetfelder und bis ca. 10% für hochfrequente EMF. Vereinzelt wurden höhere Peak-Messwerte von niederfrequenten Magnetfeldern bis ca. 50% der Grenzwerte festgestellt. Generell sind diese hohen Werte – wie bei Magnetfeldern im Allgemeinen üblich – häufig sehr lokalisiert. Durch die dynamische und komplexe Situation im Fahrzeug treten sie zudem oft nur sporadisch auf und stehen, soweit sie identifiziert werden konnten, kaum direkt mit dem elektrischen Antrieb im Zusammenhang. Die Messergebnisse der vorliegenden Studie stehen im Einklang mit anderen bisherigen Untersuchungen. Nicht untersucht wurde in diesem Projekt das kabellose Laden (Wireless Power Transfer).

Soweit die Resultate dieser Studie verallgemeinerbar sind, erscheint der elektrische Antrieb mit Energiebezug aus einer Batterie bezüglich zusätzlicher EMF-Immissionen als unproblematisch.

Ein Augenmerk muss unabhängig von der Antriebsart auf die weitere technologische Entwicklung gelegt werden, insbesondere was den Trend zu zunehmender Vernetzung und Digitalisierung angeht. Ein offener Punkt bleibt die ungenügende EMF-Regulierung für Innenräume von Fahrzeugen.

Résumé

Afin de décarboner la mobilité, de plus en plus de véhicules électriques à batterie (véhicules électriques) sont mis en service. Les composants électriques de l'entraînement, la recharge de la batterie et d'autres systèmes électroniques divers et variés utilisés dans les véhicules modernes génèrent des champs électriques, magnétiques et électromagnétiques (CEM) dans et autour des véhicules. D'un point de vue technique, on constate que tous les véhicules émettent en principe des champs électromagnétiques, quel que soit le type d'entraînement. Les paramètres électriques des composants, mais aussi la conception et les matériaux utilisés jouent un rôle déterminant à cet égard. Les véhicules présentent la particularité d'exposer les passagers à un grand nombre de sources de fréquences différentes dans un



espace restreint, et ce parfois pendant plusieurs heures. De plus, l'espace où se trouvent les passagers est (partiellement) protégé par la carrosserie et les vitres métallisées.

L'objectif de ce projet était, sur la base de mesures réalisées sur une sélection de véhicules électriques, d'estimer si les émissions de CEM supplémentaires générées par l'entraînement électrique et les composants associés constituaient un risque critique pour la santé et si de plus amples vérifications étaient nécessaires.

Pour ce faire, ce projet visait à soumettre une petite sélection de véhicules de tourisme fabriqués en série (5 véhicules exclusivement électriques et avec batterie, 1 véhicule avec moteur diesel pour comparer) du parc automobile classique à des mesures approfondies des CEM à basse et haute fréquence générés dans des conditions de fonctionnement (et de recharge) réelles afin d'évaluer les émissions affectant les passagers et les personnes se trouvant à proximité du véhicule. En l'absence de réglementations spécifiques pour les CEM dans les véhicules électriques, les intensités des CEM mesurés ont été comparées aux recommandations internationales en matière de valeurs limites (ICNIRP).

Toutes sources cumulées, le pourcentage des valeurs limites atteint était plutôt faible, s'établissant en moyenne à 5 % ou moins pour les champs magnétiques à basse fréquence et environ 10 % maximum pour les CEM à haute fréquence. Des pics isolés atteignant jusqu'à 50 % environ des valeurs limites ont été constatés pour les champs magnétiques à basse fréquence. En règle générale, ces valeurs élevées sont très localisées – ce qui est souvent le cas pour les champs magnétiques. En outre, étant donné la situation dynamique et complexe à l'intérieur du véhicule, elles ne se manifestent que de manière sporadique et, lorsqu'elles ont pu être identifiées, il est rare qu'elles soient directement liées à l'entraînement électrique. Les mesures obtenues dans le cadre de la présente étude sont cohérentes avec celles d'autres recherches antérieures. Ce projet ne s'est pas penché sur la recharge sans fil (Wireless Power Transfer).

Pour autant qu'il soit possible de généraliser les résultats de cette étude, l'entraînement électrique alimenté par une batterie apparaît comme non problématique en termes de CEM supplémentaires.

Indépendamment du type d'entraînement, il convient d'accorder une attention particulière aux futures évolutions technologiques, notamment dans le contexte d'une interconnexion et d'une numérisation croissantes. La question de l'insuffisance de la réglementation en matière de CEM pour l'intérieur des véhicules reste en suspens.

Summary

More and more battery-powered electric vehicles (e-vehicles) are being put into operation to facilitate the decarbonisation of mobility. Electric, magnetic and electromagnetic fields (EMF) are generated in and around vehicles by the electrical components of the drive, through battery charging and from other diverse electronic systems used in modern vehicles. In principle, it can be stated from a technical point of view that all vehicles generate immissions of electromagnetic fields, regardless of the type of drive. In addition to the electrical parameters of the components, the design and the materials used are significant. A feature of exposure in vehicles is that passengers may be simultaneously exposed to a large number of sources of various frequencies in a very confined space for hours at a time. One is also in a volume that is (partially) shielded by the car body and window panes coated with vapour-deposited metal.

The aim of this project was to assess, through measurements on a selection of e-vehicles, whether the additional EMF immissions from the electric drive and associated components are to be judged critically as a health risk and whether further, more in-depth clarifications are necessary.

For this purpose, extensive measurements of the occurring low-frequency and high-frequency EMFs extant under real operating conditions, including the charging process, were carried out on a small selection of series-production passenger vehicles (5 e-vehicles purely electric and battery-powered, 1



diesel-motorised vehicle for comparison) from the stock vehicle market in order to be able to assess the immissions on passengers and persons staying in the vicinity of the vehicle. Since there are currently no specific regulations for EMF in e-vehicles, the field strengths of the measured EMF were classified against internationally established limit recommendations (ICNIRP).

The total exhaustions of the limit values thus determined from all sources were rather low, on average in the range of up to 5% for low-frequency magnetic fields and up to approx. 10% for high-frequency EMF. Occasionally, higher peak readings of low-frequency magnetic fields up to approx. 50% of the limit values were found. In general, as is common with magnetic fields in general, these high values are often very localised. Moreover, due to the dynamic and complex situation in vehicles, they often occur only sporadically and, as far as they could be identified, are hardly directly related to the electric drive. The measurement results of the present study are consistent with other previous studies. Wireless power transfer (charging) was not investigated in this project.

As far as the results of this study can be generalised, the electric drive with energy drawn from a battery appears to be unproblematic with regard to additional EMF.

Regardless of the type of drive, attention must be paid to further technological development, especially with regard to the trend toward increasing networking and digitisation. One outstanding issue remains the insufficient EMF regulation for vehicle interiors.

Take-home messages

- Es ist wichtig, die in E-Fahrzeugen auftretenden EMF aus Sicht des Gesundheitsschutzes im Auge zu behalten. Aktuell gibt es keine spezifischen Grenzwertvorgaben für EMF für den Innenraum weder für E-Fahrzeuge noch für Fahrzeuge mit konventionellem Antrieb. Zu klären ist auch, wie die Beiträge der verschiedenen Quellen über das gesamte Frequenzspektrum gesamthaft zu beurteilen sind.
- Die für die Auswertung der durchgeführten Messungen als Vergleich beigezogenen internationalen Grenzwertempfehlungen (ICNIRP) werden im Betrieb von E-Fahrzeugen kaum ausgeschöpft. Kurzzeitig wurden jedoch für niederfrequente Magnetfelder Ausschöpfungen in der Nähe der Grenzwerte festgestellt, welche kaum auf den elektrischen Antrieb, sondern auf andere Quellen zurückzuführen sind.
- Die Komponenten des elektrischen Antriebs erscheinen bezüglich zusätzlicher EMF als unproblematisch. Ein Augenmerk muss auf die weitere technologische Entwicklung gelegt werden, insbesondere was den Trend zu zunehmender Vernetzung und Digitalisierung anbelangt.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Ausgangslage und Hintergrund	8
1.2	Projektziele	8
2	Vorgehen und Methode	10
2.1	Einteilung der Quellen	10
2.2	Scope.....	12
3	Auslegeordnung	13
3.1	Bisherige Studien	13
3.2	Bisherige EU-Projekte zum Thema E-Fahrzeuge	16
3.3	Reports von Expertengremien.....	19
4	Regulierung	23
4.1	Schweiz	23
4.2	EU.....	25
4.3	Andere Länder	25
4.4	Fazit.....	25
5	Messungen	28
5.1	Methodik	28
5.2	Messgeräte	29
5.3	Fahrzeuge und Messfahrten.....	31
5.4	Standardisiertes Messprotokoll	31
5.5	Auswertung.....	45
5.6	Referenzwerte und Grenzwerte.....	45
6	Ergebnisse und Diskussion	47
6.1	ELF-MF: Grenzwertausschöpfung ICNIRP Referenzwerte.....	47
6.2	RF-EMF: Feldstärke und Ausschöpfung IGW (CH-NISV).....	49
6.3	Validierungen der Messungen auf Kurzroute	53
6.4	Einzelmessungen (Magnetfeld) im Detail.....	53
6.5	Aussenmessungen während des Ladestopps.....	57
6.6	Schlussfolgerungen und Fazit	59
7	Literaturverzeichnis	61



Abkürzungsverzeichnis

B-Feld	magnetische Flussdichte [T]
DC	Gleichstrom
E-Fahrzeug	Fahrzeug mit elektrischem Antrieb
E-Feld	elektrisches Feld [V/m]
EIRP	Äquivalente isotrope Strahlungsleistung (equivalent isotropically radiated power)
EMF	elektromagnetische Felder
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
H-Feld	magnetisches Feld [A/m]
HF-EMF	hochfrequente elektromagnetische Felder
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
IGW	Immissionsgrenzwert
Lidar	Light Detection and Ranging
NF-EMF	niederfrequente elektromagnetische Felder
NIS	nicht-ionisierende Strahlung
NISV	Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung
Radar	Radio Detection and Ranging
RF	Radio Frequency (engl. für HF-EMF)
SAR	spezifische Absorptionsrate
V2X	Vehicle-to-X communication
WPM	Weighted Peak Method



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

Zur Dekarbonisierung der Mobilität werden immer mehr batteriebetriebene Elektrofahrzeuge (im folgenden E-Fahrzeuge) in Betrieb gesetzt. Durch die elektrischen Komponenten des Antriebs, durch das Laden der Batterie, wie auch durch andere in modernen Fahrzeugen eingesetzte, vielfältige, elektronischen Systeme entstehen in und um die Fahrzeuge elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (EMF). Der Trend zur weiteren Elektrifizierung und Digitalisierung der Fahrzeuge ist ungebrochen. Hier geht es um den Einsatz von Kommunikations-, Assistenz-/Sicherheits- und Unterhaltungssystemen. Vor diesem Hintergrund muss man davon ausgehen, dass dadurch verstärkt elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder sowohl im Stand wie auch im Betrieb direkt um und in den Fahrzeugen entstehen. Eine Gesamtbeurteilung der Belastung durch diese Felder bezüglich der Einhaltung von Grenzwerten zum Schutz von Menschen liegt nicht vor. Die verstärkte Nutzung von E-Fahrzeugen ist aus Umweltsicht (Dekarbonisierung, Reduktion von Schadstoffemissionen und Lärmemissionen an der Quelle) zu begrüßen und wird von Bund und Kantonen gefördert. Es ist jedoch sicherzustellen, dass der Einsatz dieser Fahrzeuge in Bezug auf Belastung durch nicht-ionisierende Strahlung (NIS) gesetzeskonform erfolgt und übermässige gesundheitliche Risiken ausgeschlossen werden können. Für die Akzeptanz von neuen Technologien ist unter anderem der Nachweis des sicheren Einsatzes von eminenter Bedeutung. Gegenüber anderen Expositionssituation im Alltag (z.B. Aufenthalt im Freien, am Arbeitsplatz, im öffentlichen Verkehr) weist das Fahren in E-Fahrzeugen die Besonderheiten auf, dass man unter Umständen für Stunden möglicherweise gleichzeitig einer Vielzahl von Quellen verschiedenster Frequenzen auf engstem Raum ausgesetzt ist. Man befindet sich zudem in einem durch die Karosserie und metallbedampfte Scheiben (teil-)abgeschirmten Volumen.

Die Fragestellung wurde auch schon im Schweizer Parlament aufgebracht (IP19.4346)¹. Der Bundesrat hat in seiner Antwort auf die Interpellation u.a. folgende Aussagen festgehalten:

«...Gemäss dem heutigen Wissensstand stellen die elektromagnetischen Felder in Automobilen, die mit Elektromotoren, Verbrennungsmotoren oder hybriden Antriebssystemen angetrieben werden, kein gesundheitliches Risiko dar. Studien der letzten Jahre zeigen, dass die elektromagnetischen Felder von Elektroautos bei den meisten untersuchten Fahrzeugmodellen unter einem Zehntel der Grenzwerte liegen. Diese Grenzwerte beruhen auf nachgewiesenen gesundheitlichen Wirkungen. Studien, wie in der Interpellation erwähnt, zum Zusammenhang zwischen lang andauernden Magnetfeldbelastungen unterhalb der Grenzwerte und Kinderleukämie zeigen zwar einen statistischen Zusammenhang, aber es ist bis jetzt nicht klar, ob dies auf die elektromagnetischen Felder oder auf andere Ursachen zurückzuführen ist. Aufgrund dieser Unsicherheiten ist es für den Bundesrat unmöglich, Gesundheitsschäden von Elektroautos vollständig auszuschliessen...»

Auch im Ausland wird dieser Fragestellung Aufmerksamkeit geschenkt. Stellvertretend sei auf die Behandlung der Thematik beim Deutschen Bundesamt für Strahlenschutz (BfS) hingewiesen².

1.2 Projektziele

In diesem Projekt soll eine Gesamtbeurteilung der EMF-Belastung bezüglich der Einhaltung von Grenzwerten zum Schutz von Menschen beim Einsatz von E-Fahrzeugen erstellt werden.

Dazu wurden folgende Teilaspekte erarbeitet:

¹ IP19.4346, Interpellation «Sind elektromagnetische Felder von Elektroautos gesundheitsschädlich?»
<https://www.parlament.ch/de/ratsbetrieb/suche-curia-vista/geschaefte?AffairId=20194346>

² https://www.bfs.de/DE/themen/emf/e-mobilitaet/e-mobilitaet_node.html



- Ausarbeitung einer Auslegeordnung (Kapitel 3)
Was wurde bisher untersucht und was ist bereits bekannt?
- Übersicht Regulierung (Kapitel 4)
Welche Vorgaben zum Schutz der Gesundheit sind im Zusammenhang mit dem Betrieb von Elektrofahrzeugen in der Schweiz einzuhalten? Wie stehen diese im Vergleich zu den Vorgaben im Ausland, insbesondere der EU?
- Messbasierte Abschätzung Gesamtexposition (Kapitel 5 und 6)
Wie hoch sind die gesamthaften EMF-Belastungen für Fahrzeuginsassen (Fahrer, Beifahrer und Personen im hinteren Sitzbereich) sowie für Personen, welche sich um das Auto bewegen oder sich im Nahbereich aufhalten beim Einsatz von seriengefertigten E-Fahrzeugen aus dem normalen Fahrzeugbestand unter realen Betriebsbedingungen?
- Aufschlüsselung EMF-Quellen (Kapitel 6)
Welche Quellen von EMF tragen wie viel zur Gesamtbelastung bei?
- Gesamtbeurteilung (Kapitel 6.6)
Ist die Gesamtbelastung bezüglich Gesundheitsrisiken als kritisch zu beurteilen? Wenn ja, auf welche EMF-Quellen eines Elektrofahrzeuges ist dies hauptsächlich zurückzuführen?



2 Vorgehen und Methode

Das Projekt wurde in verschiedene Teilprojekte aufgeteilt. Die zentralen Vorgehensweisen für jedes Teilprojekt sind hier kurz beschrieben.

- **Teilprojekt 1: Auslegeordnung (Kapitel 3)**
Über Datenbankabfragen (EMF-Portal der RWTH Aachen³, Google Scholar⁴ und IEEE Xplore⁵) wurden Publikationen zum Thema beschafft. Zusätzlich wurde eine Internet-Recherche durchgeführt, um Berichte von Fachgremien insbesondere aus der EU zu identifizieren. Die Literatur wurde nach Relevanz gefiltert, bewertet und zusammengefasst, um eine Darstellung des aktuellen Wissenstandes zu erhalten.
- **Teilprojekt 2: Regulierung (Kapitel 4)**
Alle relevanten Vorschriften bezüglich EMF für den Betrieb von Elektrofahrzeugen in der Schweiz und in der EU wurden nach bestem Wissen und Gewissen zusammengetragen.
- **Teilprojekt 3: Messprotokolle (Kapitel 5)**
Es wurde ein Messprotokoll ausgearbeitet, um die Exposition unter verschiedensten Betriebszuständen (Stillstand, Laden, Einschalten, Stand, Beschleunigen, gleichmässige Fahrt, Bremsen, Rekuperieren) reproduzierbar und nachvollziehbar zu erfassen. Das Messprotokoll soll reale Betriebsbedingungen auf einem definierten Parcours abbilden. Es werden keine Laboruntersuchungen unter isolierten Bedingungen durchgeführt. Ebenso werden keine numerischen Expositionsabschätzungen vorgenommen. Messtechnisch abgedeckt werden NF-Magnetfelder von statisch (DC) bis 100 kHz und HF-EMF von 90 bis 6000 MHz. Niederfrequente elektrische Felder werden nicht gemessen.
- **Teilprojekt 4: Messkampagne (Kapitel 5)**
Die Messungen gemäss Messprotokoll wurden an verschiedenen Fahrzeugen durchgeführt. Es wurde eine Auswahl von verschiedenen Typen von verschiedenen Herstellern aus dem Alltagsbestand (z.B. angemietete Fahrzeuge) getroffen.
- **Gesamtbeurteilung (Kapitel 6 und Kapitel 6.6)**
Trotz des limitierten Umfangs der Messkampagne ist es möglich, eine Abschätzung über die totale EMF-Belastung in typischen E-Fahrzeugen abzugeben. Es wird angestrebt zu beurteilen, ob die EMF-Belastung in allen Fällen (verschiedene Fahrzeuge, verschiedene Betriebszustände, im Durchschnitts- wie auch im schlechtesten Fall) durch Grenzwerte abgedeckt ist und diese Grenzwerte eingehalten werden. Auf dieser Basis können die gesundheitlichen Risiken beurteilt werden. Soweit möglich sollen die Beiträge der einzelnen EMF-Quellen (bzw. der Gruppen von Quellen, vgl. 2.1) in Relation gesetzt werden. Insbesondere soll versucht werden aufzuzeigen, welchen Anteil die Quellen ausmachen, welche auf den elektrischen Antrieb zurückzuführen sind. Wird die totale EMF-Belastung als kritisch eingestuft, wird zur vertieften Abklärung das Vorgehen für ein Folgeprojekt aufgezeigt.

2.1 Einteilung der Quellen

Um die Gesamtbelastung und die verschiedenen Quellen zu beurteilen, unterscheiden wir in diesem Projekt verschiedene Gruppen von Quellen. Die verwendete Unterteilung ist in Tabelle 1 ersichtlich.

³ <https://www.emf-portal.org>

⁴ <https://scholar.google.com/>

⁵ <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/>



Bezeichnung	Einteilung	Quellen	Beispiele
F	Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none">• Reifen• Antriebsstrang• etc.	Reifenmagnetisierung
E	Antrieb	<ul style="list-style-type: none">• Elektromotor⁶• Batterie• Konverter• Leistungs- und Steuerungselektronik (inkl. Hochspannungsverkabelung)	
K	Komfortsysteme	<ul style="list-style-type: none">• Fensterantriebe• Sitzheizung• Gebläse / Lüftungsanlage• Klimaanlage• etc.	
S	Assistenz- und Sicherheitssysteme	<ul style="list-style-type: none">• Elektronik• Sensoren• Navigation• Lidar, Radar• etc.	Reifendruckmessung
U	Unterhaltungssysteme	<ul style="list-style-type: none">• Radio• Multimedia• etc.	
C	Kommunikationssysteme	<ul style="list-style-type: none">• Mobilfunk• etc.	
L	Laden		

Tabelle 1: Die in diesem Projekt verwendete Klassifizierung und Einteilung der verschiedenen EMF-Quellen.

Die Klassen S (Assistenz- und Sicherheitssysteme), U (Unterhaltungssystem) und C (Kommunikationssysteme) können, sofern sie auf einer drahtlosen Technologie basieren, unter dem Sammelbegriff V2X aufgrund der Anwendung noch weiter unterteilt werden, siehe Tabelle 2 und vgl. (Strahlenschutzkommission, 2019; Tognola et al., 2021).

⁶ Es sind verschiedene Motorentypen im Einsatz, Asynchronmotoren wie auch permanent oder fremd-erregte Synchronmotoren.



Abkürzung	Name	Erläuterung
V2V	Vehicle-to-Vehicle	Kommunikation zwischen Fahrzeugen
V2I	Vehicle-to-Infrastructure	Kommunikation zur Infrastruktur
V2P	Vehicle-to-Pedestrian	Kommunikation zu Fussgängern
V2N	Vehicle-to-Network	Kommunikation zu Netzwerken
IV	Intra-Vehicle	Kommunikation zwischen Komponenten innerhalb des Fahrzeuges

Tabelle 2: Unterteilung der verschiedenen Kommunikationskanäle vom Fahrzeug zu anderen Entitäten nach (Strahlenschutzkommission, 2019; Tognola et al., 2021)

2.2 Scope

2.2.1 Fahrzeuge und Anwendungszweck

In diesem Bericht werden ausschliesslich Messungen mit Personenfahrzeugen aus Serienherstellung durchgeführt. Fahrzeuge wie Lieferwagen für die gewerbliche Nutzung sind nicht Teil dieser Untersuchungen. Dementsprechend werden auch Strahlungsgrenzwerte für die allgemeine Bevölkerung angewendet und nicht solche für berufliche Exposition. Ausserdem ist anzumerken, dass nur reine E-Fahrzeuge einbezogen werden und keine Hybrid-Fahrzeuge (auch keine Plug-in Hybride). Es werden E-Fahrzeuge untersucht, welche die Energie aus einer Batterie beziehen, also keine Fahrzeuge, welche die Energie aus einer wasserstoffbetriebenen Brennstoffzelle beziehen. Als Referenz soll aber ein Fahrzeug mit Verbrennungsmotor ebenfalls nach dem definierten Protokoll vermessen werden.

2.2.2 Laden

Der Ladevorgang der Batterie des E-Fahrzeuges ist ein relevanter Betriebszustand, welcher in dieser Untersuchung mitbetrachtet wird.

Das drahtlose Laden, engl. Wireless Power Transfer (WPT), ist nicht Teil dieser Untersuchung. Die zu erwartenden hohen Immissionen bei WPT können unter Umständen gesundheitlich relevant sein (Strahlenschutzkommission, 2019). Es gibt viel Fachliteratur zu diesem Thema. Jedoch hat WPT in der Schweiz für das Laden von Personenfahrzeugen bisher keine Bedeutung. WPT ist in einer IEC Norm geregelt (IEC-61980-1:2020, 2020). Auf weitergehende Ausführungen zu WPT wird auf folgende Literaturliste verwiesen (Ahmad et al., 2018; Cirimele et al., 2018; El-Shahat et al., 2019; Liorni et al., 2020; Machura & Li, 2019; Mahesh et al., 2021; Zhang et al., 2022).

2.2.3 Umweltauswirkungen

Als Umweltauswirkung von EMF werden in dieser Untersuchung einzig die möglichen gesundheitlichen Auswirkungen auf Menschen betrachtet. Spezielle Gefährdungen von spezifischen Menschengruppen (z.B. solche mit Implantaten) werden nicht untersucht. Auswirkungen auf Tiere (z.B. in E-Fahrzeugen mitgeführte Hunde) sind nicht Teil der Untersuchungen. Auch sind weitergehende mögliche Auswirkungen auf Fauna und Flora nicht Gegenstand dieses Projektes.



3 Auslegeordnung

In diesem Kapitel wird den bisherigen Aktivitäten im Zusammenhang mit der Erfassung der Exposition von Fahrzeuglenkern und Passagieren sowie umstehender Personen nachgegangen. Dazu wurden Publikationen in den gängigen Datenbanken sowie bisherige EU-Projekte zum Thema Elektromobilität zusammengetragen. Zudem wurden auch Berichte von Expertengruppen zum Thema gesucht.

Prinzipiell lässt sich aus technischer Sicht feststellen, dass alle Fahrzeuge Immissionen elektromagnetischer Felder erzeugen. Dabei sind nebst den elektrischen Parametern der Komponenten das Design und die verwendeten Materialien wesentlich. Moderne Fahrzeuge enthalten alle, konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren wie auch elektrisch betriebene Fahrzeuge, elektrische Komponenten, die in der einen oder anderen Weise elektromagnetische Felder emittieren.

Gegen aussen spielen E-Felder (statisch und niederfrequent) wegen der meist guten Leitfähigkeit der Karosserie keine Rolle. Im Innenraum besteht wie in anderen Situationen mit geschlossenen Räumen die Frage, inwiefern Reflexionen und die allenfalls daraus resultierenden Stehwellen zu einer Zunahme der elektromagnetischen Felder führen. Nebst den Komponenten der elektronischen Steuerung des Antriebs sind auch weitere Quellen (siehe Tabelle 1) wie Sitzheizung, Lüftung, respektive Klimaanlage sowie die in vielen Fällen vorhandene Reifenmagnetisierung zu erfassen. Bezüglich der Reifenmagnetisierung verschiebt sich die Exposition spektral aufgrund der Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Offene Fragen sind weitere transiente Vorgänge, die nur in bestimmten Betriebszuständen auftreten. Zudem bestehen Vorschriften bezüglich der Summation der spektralen Beiträge der nieder- respektive der hochfrequenten Anteile. Wie das gleichzeitige Auftreten von niederfrequenter und hochfrequenter Exposition bewertet werden soll ist unklar, da entsprechende Vorschriften fehlen.

Für die gesundheitliche Bewertung bei niederfrequenten Feldern sind die zeitlichen Spitzenwerte relevant.

3.1 Bisherige Studien

Die Publikationen wurden aus verschiedenen Datenbanken zusammengesucht (EMF-Portal, Google Scholar, IEEEExplore) und bezüglich Qualität bewertet. Konferenzbeiträge wurden normalerweise nicht einbezogen. Im Folgenden werden Studien zur Exposition des Fahrers und/oder der Fahrgäste zusammengefasst.

In 2011 (Harris et al., 2011) wurde die Exposition der Personen in einem Fahrzeug gegenüber verschiedener Drahtlostechnologien wie UMTS, WiMax und Bluetooth mittels numerischer Berechnungen unter Verwendung von relativ generischen Modellen für die Personen, Erwachsene wie Kinder, untersucht. Die gefundenen Werte waren deutlich unterhalb der geltenden ICNIRP Grenzwerte. Die berechneten SAR-Werte gemittelt über den ganzen Körper waren bei Kindern einen Faktor 1.1 bis 1.3 höher als bei Erwachsenen. Auch die lokal über 10g Körpergewebe gemittelten SAR-Werte waren bei Kindern 2- bis 3-mal höher als bei Erwachsenen. Die Autoren schliessen daraus, dass auch bei gleichzeitigem Betreiben von verschiedenen Drahtlostechnologien im Inneren eines Fahrzeuges die international geltenden Grenzwerte nicht überschritten werden.

Die Resultate im nachfolgend besprochenen EU-Projekt HEMIS wurden 2014 (Ruddle & Low, 2014) und 2015 (Ruddle & Low, 2015) publiziert. Darin wird eine simulationsgestützte Untersuchung von Fragen im Zusammenhang mit der Abschätzung der Insassenexposition gegenüber Magnetfeldern anhand von Magnetfeldmessungen in der Nähe von Antriebsstrangkomponenten vorgestellt und die Auswirkungen auf die Verarbeitung in der Herstellung aufgezeigt.

Die Autoren schlagen vor, die Sensoren, die zur Überwachung des elektrischen Antriebsstranges verwendet werden, auch zur Überwachung der Fahrgastexposition zu verwenden. Diese müssten aber für jeden spezifischen Fahrzeugtyp kalibriert werden, da die Felder von der jeweiligen Konfiguration



und der verwendeten Materialien für die Herstellung abhängen. Zusammenfassend wird verlangt, den Aspekt der Innenraumexposition noch genauer zu untersuchen.

In Tognola et al. (Tognola et al., 2021) wurde ein 'smart mobility communications' Szenario numerisch evaluiert, das bei 5.9 GHz arbeitet. V2V-Antennen wurden modelliert und auf einem realistischen 3D-Modell eines Stadtautos platziert, um die SAR in den Körperregionen und Geweben eines menschlichen Phantoms (erwachsener Mann) im Auto numerisch zu bestimmen. Sowohl die lokale als auch die durchschnittliche Ganzkörperexposition lagen unter den ICNIRP- und IEEE-Grenzwerten für die Allgemeinheit im 100-kHz bis 6-GHz-Band und betragen im schlechtesten Fall 1,58 W/kg (Kopf) bzw. 0,008 W/kg (Ganzkörper). Die höchste SAR wurde in den oberflächlichsten Geweben (der Haut) von Körperregionen in unmittelbarer Nähe der Quellen festgestellt. Die Entfernung der Passagiere von den Antennen spielte eine wichtige Rolle für die resultierenden SAR-Werte.

In einer aktuellen Übersichtsstudie (Tognola et al., 2022), werden die vorhandenen Arbeiten zur Exposition gegenüber verschiedener Kommunikationstechnologien und deren Kombination in vernetzten Fahrzeugen zusammengefasst und analysiert. Diese Technologien decken den Hochfrequenzbereich ab, der von einigen hundert MHz (z. B. bei fahrzeuginternen Sensornetzen) bis zu Hunderten von GHz (z. B. bei Fahrzeugradar zur Erkennung von Fahrzeuginsassen und fortschrittliche Fahrerassistenzsysteme) reicht. Fahrzeuginsassen und Verkehrsteilnehmer in der Nähe des vernetzten Fahrzeugs sind daher täglich einem elektromagnetischen Feld ausgesetzt, welches aus mehreren Quellen und Bändern besteht und von diesen Technologien erzeugt wird. Diese Übersichtsarbeit fasst die Ergebnisse aus der aktuellen Literatur über die Eigenschaften und den Anwendungsbereich der wichtigsten Technologien für das vernetzte Auto zusammen, die von Technologien für die interne Fahrzeug-Konnektivität bis hin zu Technologien für die Fahrzeugsensorik reichen. Die Arbeit beschreibt auch ausführlich die Expositionsszenarien und die EMF-Dosis, die für Insassen von Fahrzeugen, die mit solchen Technologien ausgestattet sind, einschliesslich der generischen Technologien für die persönliche Konnektivität im Fahrzeug (z. B. Smartphones, Tablets, etc.) auftreten. Alle in der aktuellen Übersichtsarbeit analysierten Studien belegen, dass die Exposition und die von den Fahrzeuginsassen absorbierte Dosis in keinem Fall über den Grenzwerten für die Exposition der allgemeinen Bevölkerung zu liegen kommt. Gemäss den Autoren sollte die Forschung zur EMF-Exposition im vernetzten Auto in den kommenden Jahren noch offene Fragen angehen insbesondere die Entwicklung von realistischen Szenarien, die noch nicht untersuchte Aspekte berücksichtigen, wie die gleichzeitige und kombinierte Exposition gegenüber Feldern aus mehreren Quellen mit unterschiedlichen Frequenzen, die Auswirkungen der Variabilität des Expositionsszenarios und die Auswirkungen der neuen 5G- und 6G-Technologien insbesondere der sehr hohen Frequenzen in den mmWellen-Bändern auf die EMF-Exposition im Auto.

Der Aspekt der realistischeren Szenarien wurde anekdotisch von Ruddle (Ruddle, 2022) an einem konkreten Beispiel eines Fahrzeugs mit verschiedener Belegung mit Fahrgästen untersucht. Dabei stellte er vor allem bei höheren Frequenzen (gegen 2.4 GHz) eine mögliche Überschreitung der Basisgrenzwerte fest, ohne dass dabei die Referenzgrenzwerte bei leerem Fahrzeug überschritten werden. Ruddle empfiehlt diesen Umstand bei der Festlegung von Standards für Fahrzeuge noch näher systematisch zu untersuchen.

In Schilling et al. (Schilling et al., 2022) wird eine neue Messprozedur für die Erfassung der elektromagnetischen Felder der V2X Technologien in Fahrzeugen vorgeschlagen. Die Resultate zeigen, dass der Beitrag der neuen V2X Technologien (hier ITS-G5)⁷ dominiert, d.h. höhere Feldwerte im Inneren des Fahrzeuges auftreten, gegenüber zuvor bei Bluetooth und WiFi. Die Autoren empfehlen diese Entwicklung aufmerksam zu verfolgen.

In Harris et al. (Harris et al., 2011) wurde auch die Exposition gegenüber verschiedenen Kommunikationstechnologien in einem Fahrzeug ermittelt. Dazu wurden generische numerische Modelle verwendet. Daher sind die Resultate mit einer gewissen Vorsicht zu bewerten. Die berechneten Daten deuten

⁷ <https://standards.ieee.org/ieee/802.11p/3953/>



darauf hin, dass die Verwendung mehrerer drahtloser Kommunikationsgeräte in einem Auto zu Expositionswerten führt, die um mehrere Grössenordnungen unter den internationalen Expositionsgrenzwerten liegen, selbst bei den Mehrfachexpositionsszenarien mit den Modellen für Erwachsene und Kinder.

Armstrong et al. (Armstrong et al., 2015) kommen zu dem Schluss, dass zusätzliche Anforderungen für die Prüfung der Strahlungsemissionen von Elektrofahrzeugen erforderlich sind und dass niederfrequente Emissionen so hoch sein können, dass sie in der Konstruktionsphase des Fahrzeugs und beim Einbau des Antriebsstrangs berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus werden einige Hinweise zum Einbau von Hochleistungselektronik im Fahrzeug gegeben, um die Auswirkungen der Emissionen auf die elektromagnetische Umgebung zu mindern.

Vassilev et al. (Vassilev et al., 2015) zeigen Ergebnisse für acht verschiedene E-Fahrzeuge. Die Exposition erreichte 20% der ICNIRP 2010-Referenzwerte für die Exposition der Allgemeinheit in der Nähe der Batterie und in der Nähe der Füsse während des Fahrzeugstarts, aber weniger als 2% in Kopfhöhe für die Beifahrerposition. Maximale Expositionen in der Grössenordnung von 10% der ICNIRP-Referenzwerte für 2010 wurden im Vergleich für Fahrzeuge mit konventionellen Antrieben ermittelt.

Tell und Kavet (Tell & Kavet, 2016) analysierten ebenfalls die elektromagnetischen Felder in Fahrzeugen. Die Bandbreite der Felder bei den Elektrofahrzeugen umfasste dieselbe wie auch bei den Benzinfahrzeugen beobachtete. Die mittleren Magnetfelder reichten je nach Messband von nominal 0,6 bis 3,5 μT für Elektro-/Hybridfahrzeuge, verglichen mit nominal 0,4 bis 0,6 μT für Benzinfahrzeuge. Die Mittelwerte der elektrischen Felder lagen je nach Messbereich zwischen 2 und 3 V/m für Elektro-/Hybridfahrzeuge, verglichen mit 0,9 bis 3 V/m für Benzinfahrzeuge. In allen Fällen lagen die Felder weit unter den veröffentlichten Expositionsgrenzwerten für die Allgemeinbevölkerung.

Concha et al. (Concha et al., 2016) empfehlen aufgrund der grossen Vielfalt der verfügbaren E-Fahrzeuge und Batteriestapelkonfigurationen, jedes Fahrzeugmodell einzeln hinsichtlich der MF-Exposition zu bewerten.

Die Ergebnisse von Paniagua et al. (Paniagua et al., 2017) zeigten, dass die Hauptemissionen im Bereich von 5-100 Hz lagen, wo die Frequenzen der Raddrehung und deren Oberwellen zu finden sind. Die Intensität der übrigen Emissionen war im Vergleich dazu vernachlässigbar. Der Expositionsquotient nimmt mit der Geschwindigkeit zu und ist in Fusshöhe etwa doppelt so hoch wie in Kopfhöhe. Die Magnetfeldwerte sind niedriger als die Referenzwerte (der Höchstwert entspricht 3% der ICNIRP-Norm), aber höher als die Werte in Wohnumgebungen und als der Grenzwert, der von der IARC für die Einstufung von ELF-Magnetfeldern in die Gruppe 2B berücksichtigt wurde.

Die Ergebnisse von Lin et al. (Lin et al., 2018) zeigten, dass die gemessenen H-Felder auf den Rücksitzen weit unter den Referenzwerten der ICNIRP lagen. Obwohl kleine Kinder einer höheren H-Feldstärke ausgesetzt sein können, waren die induzierten E-Feldstärken aufgrund ihrer besonderen physischen Abmessungen viel geringer als die von Erwachsenen.

Yang et al. (Yang et al., 2019) haben festgestellt, dass die H-Amplituden und die Spektralkomponenten durch den Austausch von Bauteilen und Naben verändert werden können, während regelmässige Kontrollen oder Wartungen die H-Werte im Fahrzeug nicht beeinflussen. Diese Ergebnisse sollten bei Aktualisierungen der Messnormen berücksichtigt werden. In epidemiologischen Studien sollte berücksichtigt werden, dass sich die H-Werte in Fahrzeugen über die Zeit verändern können, zum Beispiel beim Tausch von Komponenten nach Unfällen.

Paakkonen und Korpinen (Paakkonen & Korpinen, 2019) untersuchten die niederfrequenten Magnetfelder in Fahrzeugen. Die magnetischen Flussdichten waren kleiner als 2,6 μT . Die Grössenordnungen der Magnetfelder von Benzin- und Hybridautos waren ungefähr gleich und bei E-Fahrzeugen etwas geringer. Auf der Grundlage ihrer Messungen lagen die Werte bei weniger als 3% der für die Allgemeinbevölkerung oder Personen mit Herzschrittmachern angegebenen Richtlinien.



Dong et al. (Dong et al., 2022) haben dosimetrische Simulationsberechnungen durchgeführt, um die Immissionen von in E-Fahrzeugen verbauten Wechselrichtern auf die Passagiere zu untersuchen. Die Berechnungen zeigen, dass die Auswirkungen auf den Fahrer und den Beifahrer im Bein- und Fussbereich am stärksten sind mit B-Feld Werten zwischen 0.08 und 0.13 μT . Die Gesamtkörper-Werte sind viel tiefer als die ICNIRP-Grenzwerte. Auch die berechneten E-Feldstärken liegen unter den ICNIRP-Grenzwerten.

In Halgamuge et al. (Halgamuge et al., 2010) wurden Messungen der elektrischen und magnetischen Felder untersucht, die von australischen Strassenbahnen, Zügen und Hybridfahrzeugen ausgehen. Diese Messungen wurden unter verschiedenen Bedingungen und an verschiedenen Orten durchgeführt und wurden in diesem Artikel zusammengefasst. Einige der gemessenen elektrischen und magnetischen Feldstärken waren deutlich niedriger als die in früheren Studien ermittelten Werte. Diese Ergebnisse scheinen mit den Erkenntnissen aus der Literatur übereinzustimmen und sie liegen weit unter den internationalen Grenzwerten, wie sie in den Richtlinien zum Schutz vor ionisierender Strahlung von der Internationalen Kommission für Nicht-Laboruntersuchungen über biologische Auswirkungen festgelegt wurden.

Als Fazit aus den bisherigen Studien kann man folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- In der Literatur wurden bislang keine kritischen Expositionsszenarien bezüglich der geltenden Grenzwerte festgestellt.
- Im Bereich der niederfrequenten Magnetfelder liegen die gemessenen Werte deutlich unter den Grenzwerten.
- Bezüglich der zunehmend vernetzten Fahrzeugen bleibt es abzuklären, ab welcher Anzahl die Verwendung von verschiedenen Mobilkommunikationsgeräten kritische Werte erreichen. In den bisherigen Veröffentlichungen wurden dazu verschiedene Szenarien mittels numerischer Simulationen oder Messungen betrachtet. Die berechneten und gemessenen Werte bewegen sich dabei auch unterhalb der jeweilig gültigen Grenzwerte, sind aber bezüglich der Ausschöpfung höher als im Niederfrequenzbereich.

3.2 Bisherige EU-Projekte zum Thema E-Fahrzeuge

3.2.1 EU-Projekt 'HEMIS': Electrical Powertrain Health Monitoring for Increased Safety of FEVs⁸

Einige der zusammengetragenen Publikationen sind Resultate aus dem europäischen Projekt "HEMIS", das sich vertieft mit verschiedenen elektromagnetischen Aspekten der Elektromobilität befasste.

Das Ziel des Projekts wurde wie folgt beschrieben:

«Um die Ziele der Senkung des Energieverbrauchs und der CO₂-Emissionen zu erreichen, müssen vollelektrische Fahrzeuge (FEV) erhebliche Marktanteile erreichen. Die Einführung von FEVs in der Massenproduktion stellt die Automobilhersteller jedoch vor neue Herausforderungen, da die neuen Bausteine noch nicht ausgereift sind und die Sicherheit und Zuverlässigkeit von FEVs beeinträchtigen können. Dazu gehören der elektrische Antriebsstrang, d. h. die elektrischen Fahrmotoren und die leistungselektronischen Steuerungen, sowie die elektromagnetischen Störungen, die durch die Schaltungstechnik der Leistungselektronik verursacht werden. Darüber hinaus werden durch die Leistungselektronik und die Zirkulation hoher Ströme von der Batterie zum Motor zusätzliche elektromagnetische Felder (EMF) emittiert, einschließlich Niederfrequenz-Emissionen, die von den aktuellen EMV-Normen für Kraftfahrzeuge nicht abgedeckt werden. Das HEMIS-Projekt verfolgt zwei Hauptziele. Das erste Ziel ist die Entwicklung eines prognostischen Gesundheitsüberwachungssystems (PHMS), das die wichtigsten physikalischen Eigenschaften in Bezug auf den Zustand des Antriebsstrangs und die emittierten EMF erfassen soll. Auf der Grundlage dieser Informationen wird das PHMS in der Lage sein,

⁸ <https://cordis.europa.eu/project/id/314609/de>



einen ausfallsicheren Zustand zu liefern und so das Vertrauen der Öffentlichkeit in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von FEVs zu stärken. Das PHMS wird auch die verbleibende Nutzungsdauer der Geräte vorhersagen und damit eine bessere Wartung und Kostenreduzierung aufgrund der erworbenen Kenntnisse über Ausfallmechanismen ermöglichen. Das zweite Ziel besteht darin, den Herstellern von FEVs Konstruktionsrichtlinien in Bezug auf EMV und die Auswirkungen von EMF (einschliesslich NF-Emissionen) auf die menschliche Gesundheit an die Hand zu geben. Die Forschungsarbeiten werden auch zu EMV/EMF-Prüfrichtlinien für FEV-Hersteller führen, die voraussichtlich in die Emissionsnormen einfließen werden. So wird HEMIS dazu beitragen, die Ängste einiger Bevölkerungsgruppen hinsichtlich der EMF-Belastung durch FEVs zu zerstreuen. Mit dem vorgeschlagenen Ansatz geht HEMIS direkt auf das Ziel GC-ICT-2011.6.8 IKT für vollelektrische Fahrzeuge g) ein.»

Im Rahmen des Projektes wurde auch auf die Exposition der Fahrzeuginsassen eingegangen (Armstrong et al., 2015).

3.2.2 EU-Projekt 'EM-SAFETY': EM safety and Hazards Mitigation by proper EV design⁹

Im Rahmen dieses europäischen Projektes wurden Konstruktionsrichtlinien und eine Überwachungsplattform zur Messung der Magnetfeldstärke im Fahrzeug erarbeitet.

Die Ziele und Resultate wurden wie folgt zusammengefasst:

«Das Projekt zielt darauf ab, das Vertrauen der Öffentlichkeit in die Sicherheit elektromagnetischer Felder (EMF) in vollelektrischen Fahrzeugen (FEV) zu stärken. Die Erwartungen der Öffentlichkeit, den Strassenverkehr zu elektrifizieren, werden durch eine Vielzahl von Faktoren und Bedenken angetrieben, darunter: Klimawandel, Abhängigkeit von Primärenergie und öffentliche Gesundheit sowie Kosten und Rohstoffknappheit. Der Strassenverkehr ist nach wie vor die Hauptquelle vieler lokaler Schadstoffemissionen wie Benzol, 1,3-Butadien, Kohlenmonoxid, Stickoxide und Feinstaub. In städtischen Gebieten sind die durch den Strassenverkehr verursachten Schadstoffemissionen besonders hoch. Es gibt immer mehr Belege dafür, dass Schadstoffe aus dem Strassenverkehr schwere gesundheitliche Folgen wie Atemwegs- und Herz-Lungen-Erkrankungen sowie Lungenkrebs verursachen.

Andererseits gibt es in der Öffentlichkeit weit verbreitete Besorgnis über die möglichen schädlichen Auswirkungen elektromagnetischer Felder (EMF). Daher muss vermieden werden, dass sich Panik oder ungerechtfertigte Ängste ausbreiten, die die enormen und entscheidenden wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile verzögern würden, die das FEV bieten kann, wenn es in großem Massstab eingesetzt wird.»

Die allgemeinen Ziele des Projekts waren die Umsetzung von:

- umsichtigen Vermeidungspraktiken auf der Grundlage von Konstruktionsrichtlinien zur Feldabschwächung
- eine flexible Überwachungsplattform zur Messung der Magnetfeldstärke an kritischen Stellen des Elektrofahrzeugs.

Zu den Hauptarbeitsbereichen des Projekts gehörten Magnetfeldmessungen an 9 Elektrofahrzeugen, die mit den Messungen an 3 Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor verglichen wurden. Für diese Messungen wurde eine Messplattform für Messungen an verschiedenen Stellen (z.B. Kopf, Brust, Fuss) und ein Protokoll mit verschiedenen Fahrbedingungen entwickelt. Die Feldexposition des Menschen wurde anhand der von ICNIRP vorgeschlagenen Kriterien berechnet. Es wurden auch bewährte Verfahren für diese Berechnung vorgeschlagen. Der Messaufbau, das Protokoll und die Expositionsbeurteilung wurden auch dem Normungsausschuss vorgelegt, der sich mit der neuen Norm IEC 62764-1 (Verfahren zur Messung der von elektronischen und elektrischen Geräten in der Kraftfahrzeugumgebung erzeugten Feldstärken im Hinblick auf die Exposition des Menschen - Teil 1: Niederfrequentes Magnetfeld) befasst (IEC-TS-62764-1, 2019).

⁹ <https://cordis.europa.eu/project/id/265772/de>



Die bei den Messungen ermittelte maximale Exposition lag deutlich unter den ICNIRP-Kriterien für 2010, etwa 20% für Elektrofahrzeuge an den Positionen mit den höchsten Messwerten und etwa 10% für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor.

Gleichzeitig wurden emissionsarme Kabel, Steckverbinder sowie Konstruktionskonzepte und Richtlinien zur Minimierung der Magnetfeldexposition im Inneren des Elektrofahrzeugs entwickelt, wobei sowohl die Messergebnisse als auch die Modellierung und Simulation der elektrischen Komponenten und der Topologie genutzt wurden. Diese Designkonzepte wurden in einem Demonstrationsfahrzeug (zusammen mit dem WIDE-MOB-Projekt) implementiert und die Wirksamkeit wurde durch Messungen und Expositionsrechnungen validiert, die in bestimmten kritischen Positionen deutlich niedriger waren als im Referenzfahrzeug - einem ersten Prototyp des Fahrzeugs (aus dem P-MOB-Projekt¹⁰).

Ein weiterer wichtiger Arbeitsbereich war die Bewertung der magnetischen Exposition auf biologische Stoffe. Ausgehend von einem Überblick über den Stand der Technik, Empfehlungen internationaler Organisationen (z.B. ICNIRP) und Grenzwerte verschiedener internationaler und nationaler Behörden wurde diese Arbeit mit Experimenten an verschiedenen Säugetierzelllinien (einschliesslich verschiedener Krebszelllinien) fortgesetzt. Diese Zellen wurden unter kontrollierten Bedingungen niederfrequenten Magnetfeldern ausgesetzt und ihr Verhalten wurde beobachtet. Es konnten weder Hinweise auf eine karzinogene Wirkung solcher Magnetfelder gefunden werden noch wurden Krebszellen durch die Magnetfelder zum Wachstum angeregt.

3.2.3 EU-Projekt 'WIDE-MOB'¹¹

Während die architektonischen, mechanischen und thermischen Anforderungen an einen elektrischen Antriebsstrang im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor viel geringer sind, erfordern die Kostenreduzierung und Erhöhung der Reichweite leichte Strukturen, fortschrittliche aerodynamische Lösungen und eine Optimierung des gesamten Antriebsstrangs.

WIDE-MOB befasste sich mit dem Design und der Entwicklung der grundlegenden Bausteine von E-Fahrzeugen, darunter:

- Optimierte aerodynamische Karosserien mit eingebetteten synthetischen Mikrodüsen, die den Luftwiderstand bei jeder Geschwindigkeit radikal reduzieren.
- Leichte und kostengünstige Karosserien, die sowohl bei Frontal- als auch bei Seitenaufprall hohe Sicherheit bieten.
- Optimierung des Gesamtsystems auf der Grundlage eines verteilten Antriebs, einschliesslich: i) ausfallsicherer verteilter Antrieb; ii) E-Motor und Drehmomentsteuerung des Rads; iii) integriertes Energiemanagement und verteilte Batterie-Superkondensator-Pakete (hohe Wirkungsgrade über einen breiten Drehmoment-/Geschwindigkeitsbereich, wie er für reale Fahrzyklen erforderlich ist).
- Anwendung von EMV und Niederfrequenzkonzepten für elektromagnetische Felder (EMF) auf der Grundlage von "umsichtigen Vermeidungspraktiken" zur Abschwächung der Felder auf die Insassen. Die hohen Ströme und Spannungen, die in elektrischen Antriebssträngen erzeugt werden, werfen neue Probleme in Bezug auf EMF auf, die zu einem Gesundheitsrisiko für die Insassen werden können.
- Modulares und rekonfigurierbares Design, das den Anforderungen von WIDE mit ergonomischem Platz an Bord gerecht wird.
- Solarpaneele, die sowohl auf horizontalen als auch auf vertikalen Flächen verteilt sind, mit adaptiver Elektronik für einen grösseren Betriebsbereich und minimalen Bedarf an Infrastrukturen.

¹⁰ <https://www.2zeroemission.eu/research-project/p-mob/>

¹¹ <https://cordis.europa.eu/project/id/266129>



Das 3-jährige WIDE-MOB-Projekt sollte Folgendes liefern:

- Ein Prototyp und ein Vorführfahrzeug für die urbane Mobilität, die die vorgeschlagenen innovativen Konzepte integrieren.
- Leitlinien für die Anwendung der entwickelten Konzepte auf die meisten E-Fahrzeuge und hybride Architekturen, wodurch Patente und Wissen/Erfahrung generiert werden, auf denen eine weltweit führende Position der EU aufgebaut werden kann, um die globale Verbreitung der Elektromobilität zu verfolgen und zu nutzen.

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Prototyp eines Kleinfahrzeugs realisiert und auch bezüglich Unfallszenarien getestet. In Zusammenarbeit mit den anderen EU-Projekten wurden auch die elektrischen Komponenten entsprechend ausgewählt. Bezüglich Exposition des Fahrers und der Fahrgäste wurden keine zusätzlichen Untersuchungen gemacht, sondern auf das EM-Safety Projekt verwiesen. Der Fokus lag auf der Auswahl von leichten Baugruppen und deren Stabilität insbesondere in Bezug auf verschiedene «Crash»-Szenarien.

3.3 Reports von Expertengremien

3.3.1 Empfehlung der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK)

In 2019 hat die deutsche Strahlenschutzkommission (Strahlenschutzkommission, 2019) eine Empfehlung zu 'Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren' verabschiedet. Darin wird empfohlen:

- Verbindliche Strahlenschutzvorgaben und technische Normen hinsichtlich der Feldimmission im Automobil zu entwickeln und zu etablieren, die als Grundlage für die Berücksichtigung dieses Themas im Rahmen der Typgenehmigung dienen können.
- Damit die neuen Technologien konform mit den Strahlenschutzzielen, nämlich dem Schutz des Menschen vor schädlichen Wirkungen nichtionisierender Strahlen, betrieben werden können, soll der Strahlenschutz schon beim Entwurf der Technik berücksichtigt werden.
- Da belastbare Daten zu den mit den neuen Technologien verbundenen Immissionen oftmals fehlen, soll die Einführung der genannten neuen Technologien unbedingt strahlenschutztechnisch und strahlenbiologisch durch Forschungsprojekte begleitet und mit wissenschaftlich hochwertigen Expositionsuntersuchungen unter standardisierten und reproduzierbaren Bedingungen begleitet werden.
- Die hohen zu erwartenden Immissionen der induktiven Ladetechnologien sollen in der 26. BImSchV¹² explizite Berücksichtigung finden. Die Feldexposition durch induktive Ladesysteme ist diejenige, die bzgl. möglicher Überschreitungen von Basisgrenzwerten bei der zukünftigen Automobilnutzung am kritischsten ausfällt und deshalb sehr aufmerksam zu begleiten sein wird.
- Die u. a. im Zusammenhang mit dem vernetzten Fahren geplanten Kleinzellen-Basisstationsstandorte sollen erfasst und die Strahlenschutzaspekte aufgrund der potenziellen Immissionskumulation, der Nähe zu Personen und ihrer grossen Verbreitung geregelt werden.

3.3.2 Report des Joint Research Centers der EU (JRC)

Im Bericht «Assessment of low frequency magnetic fields in electrified vehicles» (Trentadue et al., 2020) wird eine Sondierungsstudie über niederfrequente (bis 400 kHz) Magnetfelder vorgestellt, die von Hybrid- und Elektrofahrzeugen beim Fahren und Laden erzeugt werden.

¹² http://www.gesetze-im-internet.de/bimsv_26/



Die Studie umfasst einen Literaturüberblick und experimentelle Arbeiten zu folgenden Themen: Messprotokolle, Auswahl von Messgeräten und Datenverarbeitung mit dem Ziel, einen Beitrag zur Entwicklung von Normen zu leisten. Die Autoren weisen darauf hin, dass zum Zeitpunkt der Planung der experimentellen Aktivitäten keine veröffentlichten Messverfahren, die speziell auf den Automobilssektor zugeschnitten waren existierten; daher wurden verschiedene Methoden und Instrumentenaufbauten erforscht. Der Fokus dieses Berichts liegt klar auf den niederfrequenten Feldern bis 400kHz. Der HF-EMF Bereich ist nicht eingeschlossen.

Diese Studie wurde mit den folgenden Zielen durchgeführt:

- Vermittlung eines klaren Bildes des aktuellen Wissensstandes auf diesem Gebiet durch eine umfassende Literaturübersicht.
- Sammlung experimenteller Daten über niederfrequente Magnetfelder, die von elektrifizierten Fahrzeugen der neuesten Generation erzeugt werden, durch Ad-hoc-Versuchskampagnen, die im VELA-Labor¹³ des JRC durchgeführt wurden.
- Unterstützung der Entwicklung eines Standardprüfverfahrens im Vorgriff auf künftige Vorschriften für die Typgenehmigung von Elektrofahrzeugen.

Die Schlussfolgerungen des Berichts werden als Zitate in Übersetzung wiedergegeben:

«Insgesamt wurden neun verschiedene elektrifizierte Personenkraftwagen, darunter sowohl reine Elektrofahrzeuge als auch Hybridfahrzeuge, in den VELA-Einrichtungen des JRC getestet. Das Hauptaugenmerk lag auf der Bewertung der magnetischen Flussdichte (B-Feld), sowohl im Zeit- als auch im Frequenzbereich, im Inneren des Fahrzeugs unter verschiedenen Betriebsbedingungen.

Das während der gesamten Kampagne verwendete Messgerät entspricht den Richtlinien der Norm IEC 61786-1:2013 "Messung magnetischer Gleich-, Wechsel- und elektrischer Wechselfelder von 1 Hz bis 100 kHz im Hinblick auf die Exposition von Personen - Teil 1: Anforderungen an Messgeräte", wie in IEC TS 62764 ed.1 vorgeschlagen.

Die Ergebnisse der in diesem Bericht beschriebenen Versuchskampagnen zeigen, dass die in PHEVs und EVs gemessenen B-Feld-Werte im Allgemeinen weit unter den für die Exposition der Allgemeinheit angegebenen Grenzwerten liegen. Höhere B-Feld-Werte im Frequenzbereich von 25 Hz - 2 kHz wurden an Stellen aufgezeichnet, die den Fusspositionen entsprechen, sowie bei starken Beschleunigungen und Bremsvorgängen.

Die höchsten Stromspitzen in den Kabeln wurden während starker Beschleunigungen und harter Bremsungen und nicht während Phasen mit konstanter Geschwindigkeit gemessen. Diese Stromspitzen sollten für die höchsten gemessenen B-Feld-Werte verantwortlich sein. Leider war es zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts nicht möglich, die gemessenen B-Feld-Werte genau mit den Strömen und der Geschwindigkeit zu korrelieren, da kein vollständiges und robustes Datenerfassungssystem zur Verfügung stand.

In einer Reihe von Fällen ergaben die auf der gewichteten Spitzenwertmethode (WPM) basierenden Messungen über 100%, also über dem empfohlenen Referenzwert. Sie wurden bei PHEVs und nur bei einem EV gefunden, letzteres mit einer speziellen Einstellung zur Maximierung der Energierückgewinnung beim Ausrollen. Diese Spitzenwerte über 100 % sollten eingehender untersucht werden, um die folgenden offenen Fragen zu beantworten: Sind diese Überschreitungen real oder ein Artefakt der Messmethode oder der Messgeräte? Folgt ihr Auftreten einem bestimmten Trend oder stehen sie in Zusammenhang mit bestimmten Vorgängen? Um diese Aspekte zu klären, sollten die B-Feld-Werte im Zeitbereich mit einer geeigneten Erfassungsfrequenz erfasst und dann mit der Geschwindigkeit und den Strömen im Zeitverlauf korreliert und synchronisiert werden.

¹³ https://joint-research-centre.ec.europa.eu/laboratories-and-facilities/vehicle-emissions-laboratories_en



Diese Sondierungsuntersuchung zeigte die Grenzen der Instrumentierung bei der Charakterisierung der Magnetfeldumgebung auf. Tatsächlich hatte das Instrument eine Auflösung von 5 Hz im Bereich von 25 - 2 kHz und von fast 1 kHz im Bereich von 4,8 - 400 kHz. Es stellte sich heraus, dass diese Auflösung möglicherweise nicht ausreicht, um das B-Feld richtig zu charakterisieren, da möglicherweise keine hohen Momentanwerte aufgezeichnet werden. Infolgedessen ist es sehr wahrscheinlich, dass die gemessenen Werte den tatsächlichen Wert des Magnetfelds aufgrund der geringen Frequenzauflösung des EHP50G unterschätzen.

Die kürzlich veröffentlichte Norm IEC TS 62764 - 1:2019, in der beschrieben wird, wie Magnetfelder im Inneren eines Fahrzeugs zu messen sind, enthält keine Anforderungen an die Frequenzauflösung, während das chinesische Verfahren GB/T 37130-2018 die Verwendung eines Geräts mit einer Auflösung von 1 Hz bis 2 kHz, 5 Hz im Bereich 5 kHz - 50 kHz und 50 Hz zwischen 50 kHz - 400 kHz vorschreibt.

Darüber hinaus liefert das EHP50G im Zeitbereich (WPM) Ausgabewerte nur als Prozentsatz des Verhältnisses zwischen dem gemessenen Feld und dem RL des Feldes. Rohwerte für das B-Feld sind nicht verfügbar, was bestätigt, dass die verwendete Sonde nicht die beste Wahl für diese Messungen ist.

Die Herausforderungen in Bezug auf die Messungen wurden im Rahmen der Zusammenarbeit mit der Agentur ENEA angegangen. Gemeinsame Testkampagnen mit dem e-Golf und dem Jaguar iPace umfassten einen Vergleich zwischen Messungen mit zwei identischen kalibrierten Sonden EHP50G, um die Reproduzierbarkeit zu prüfen. Die Testkampagne am Jaguar iPace wurde auch mit dem Ziel organisiert, B-Feld-Werte im Zeitbereich mit der ELT-400-Sonde der ENEA-Agentur zu erfassen und eine mögliche Unterschätzung der mit dem zuvor verwendeten Instrument aufgezeichneten Werte aufzuzeigen. Die Ergebnisse dieser Zusammenarbeit werden später veröffentlicht.»

Der Bericht schliesst mit einigen Empfehlungen bezüglich Normen und Standards:

«Angesichts einer zukünftigen massiven Produktion elektrifizierter Fahrzeuge und in Ermangelung spezifischer Vorschriften ist ein Standardverfahren zur Bewertung niederfrequenter magnetischer Felder im Inneren von Fahrzeugen erforderlich, das für Regulierungszwecke verwendet werden kann.»

Dazu empfehlen die Autoren folgende Schritte:

- *«Einen klaren Rechtsrahmen zu schaffen, der den Marktteilnehmern, die in die Entwicklung elektrifizierter Fahrzeuge investieren, Sicherheit gibt.»*
- *«Das Risiko von Fahrzeugen mit niedrigen Sicherheitsstandards zu verringern, bei denen die Nutzer potenziellen Gefahren ausgesetzt sind (z. B. kostengünstige Modelle, die durch eine geringere Abschirmung der EMF-erzeugenden Komponenten erreicht werden).»*

Die Studie hat auch eine Reihe von Problemen bei der Datenerfassung und der Instrumentierung aufgezeigt, die einen Beitrag zur Verbesserung künftiger Normen leisten können:

- *«Für die Erfassung und Synchronisation aller Parameter, die für die Korrelation der gemessenen B-Feld-Werte mit den Betriebsbedingungen des Fahrzeugs (Fahrzeuggeschwindigkeit, Leistung, Ströme, ...) erforderlich sind, gibt es derzeit keine kommerziellen Lösungen, die ohne weiteres verfügbar sind. Eines der Probleme ist, dass die vom elektronischen Steuergerät verfügbaren Werte verschlüsselt und nicht leicht lesbar sind.»*
- *«Für die Auswertung im Frequenzbereich werden für jede Messung Hunderte von Spektren erfasst. Dies stellt eine Herausforderung für die Datenanalyse und -interpretation dar. Die Festlegung einer Standardmethodik zur Erfassung und Verarbeitung der Daten würde die Entwicklung von Ad-hoc-Software für die Verarbeitung der Daten für die jeweilige Anwendung fördern.»*
- *«Die verwendeten Instrumente verfügten über eine begrenzte Frequenzauflösung, die für eine genaue Messung im Frequenzbereich möglicherweise nicht ausreichte, und lieferten auch*



keine B-Feld-Rohwerte im Zeitbereich, was die Möglichkeiten der Nachbearbeitung einschränkte. Es sind Ad-hoc-Anforderungen für Instrumente erforderlich, die für diese spezielle Anwendung verwendet werden sollen.»



4 Regulierung

4.1 Schweiz

4.1.1 Zulassung von E-Fahrzeugen

Um E-Fahrzeuge in Verkehr zu setzen sind wie für alle anderen Fahrzeugklassen Nachweise erforderlich. Von spezieller Bedeutung für E-Fahrzeuge sind die Bestimmungen bezüglich elektrischer Sicherheit und elektromagnetischer Verträglichkeit von Strassenfahrzeugen. Zu den folgenden Ausführungen wird auf die «Erläuterungen zum Nachweis der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischen Verträglichkeit von Strassenfahrzeugen und deren Komponenten» verwiesen, Version vom 1. Februar 2021 (ASTRA, 2020). Dieses Dokument gibt die einheitlichen Meinungen der Bundesämter ASTRA, BAKOM, BFE und ESTI wieder. Die Erläuterungen gelten für serienmässig wie auch zum privaten Eigengebrauch direkt importierte Neufahrzeuge sowie für Neufahrzeuge, die für den Eigengebrauch hergestellt wurden als auch für Umbauten an bestehenden Fahrzeugen.

Grundsätzlich gilt auch für E-Fahrzeuge die «Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge» VTS (SR741.41-VTS, 1995), insbesondere die Art. 51 Abs. 4 und Art. 80 Abs. 1-3 sowie Anhang 12. Vorbehalten bleiben Bestimmungen der «Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse» NEV (SR734.26-NEV, 2015) sowie der «Verordnung über Fernmeldeanlagen» FAV (SR784.101.2-FAV, 2015). Letztere gilt für Fahrzeugeinrichtungen, die Funkanwendungen nutzen.

4.1.2 Elektrische Sicherheit

Für Fahrzeuge, das heisst, für die einzelnen elektrischen Komponenten, sowie für den Zusammenbau von diesen Komponenten zu einem fertigen Produkt, muss die elektrische Sicherheit nachgewiesen werden. Auf E-Fahrzeuge bezogen bedeutet dies, dass die elektrische Sicherheit für einzelne Komponenten wie Elektromotor, Batterieeinsatz oder Ladegerät nachzuweisen ist. Dies gilt auch für den Zusammenbau und die elektrischen Verbindungen dieser Komponenten zu einem Gesamterzeugnis, das seinerseits in ein Fahrzeug eingebaut werden kann. Das Fahrzeug untersteht in seiner Gesamtheit den Bestimmungen über die Zulassung zum Strassenverkehr.

Die VTS (Art. 51) enthält spezifische Vorschriften für den elektrischen Antrieb. Zudem verweist die VTS (Art. 51 Abs. 4) direkt auf die Anwendbarkeit der NEV (SR734.26-NEV, 2015). Auch sind die Bestimmungen der VTS (Art. 80 Abs. 1 und 2) für den elektrischen Antrieb wie auch für die weiteren Komponenten anwendbar. Die NEV regelt die Bereitstellung auf dem Markt von elektrischen Niederspannungserzeugnissen und deren Kontrolle. Sie ist mit dem entsprechenden EU-Recht und den entsprechenden EU-Erlassen harmonisiert. Daraus folgt, dass davon ausgegangen werden kann, dass Erzeugnisse die schweizerischen Anforderungen erfüllen, wenn sie mit dem europäischen Recht konform sind. Die Regelungen sind auch auf E-Fahrzeuge anwendbar. Obwohl in der VTS nicht explizit gefordert ist das relevanteste Reglement die «Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb» (UNECE-100, 2015).

Nachträglich im Fahrzeug eingebaute und vom eigentlichen Fahrzeugbetrieb unabhängige, elektrische Anlagen (z.B. Photovoltaik-Anlagen, Wohn- oder Laboreinrichtungen) und die damit verbundenen elektrischen Installationen sind nicht Bestandteil der Prüfung nach NEV (Art. 51 Abs. 4 VTS) für die Zulassungsprüfung eines Fahrzeuges.

4.1.3 Elektromagnetische Verträglichkeit

Für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) gibt es für alle Arten von Fahrzeugen Vorschriften. Wie schon erwähnt ist die VTS (Art. 80 Abs. 3) relevant und auch für den elektrischen Antrieb anwendbar. Die VTS (Anhang 12 Abs. 3) verweist auf die international relevanten Erlasse, insbesondere



auf die «Regelung Nr. 10 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit» (UNECE-10, 2012). Subsidiär kann für spezifische Fahrzeugklassen und Ausrüstungen (speziell für nachträglich montierte) auch die «Verordnung über die elektromagnetische Verträglichkeit» VEMV (SR734.5-VEMV, 2015) zur Anwendung kommen.

4.1.4 Funk

Funk-Anwendungen (z.B. On-Board Units welche direkt oder über eine im Fahrzeug verbaute Aussenantenne kommunizieren) in allen Arten von Fahrzeugen sind ebenfalls reguliert. Die VTS (Art. 80 Abs. 4) verweist direkt auf die Anwendbarkeit der FAV (SR784.101.2-FAV, 2015).

4.1.5 Prüfungen

Die Prüfung der elektrischen Sicherheit basiert normalerweise auf der UNECE-100. Grundlage für die Prüfung der EMV von Fahrzeugen (auch E-Fahrzeugen) ist die UNECE-10. Grundsätzlich wird das Gesamtfahrzeug von aussen geprüft. Die Prüfung umfasst strahlungsgebundene Emissionen im Bereich 30 MHz - 1 GHz und leitungsgeführte Emissionen im Bereich 150 kHz - 30 MHz. Funk-Emissionen > 1 GHz sind nicht im Umfang der UNECE-10 enthalten. Die Regelung fordert auch Emissions- und Immunitäts-Tests für sogenannte «elektronische Unterbaugruppen» (EUB). Explizit genannt werden Kabelbaum, Steuerung, Umrichter, DC/AC Wandler. Die zu prüfenden Betriebszustände umfassen Stillstand, abfahrbereit im Leerlauf (mit eingeschaltetem Scheibenwischer, Fahrt bei 40 km/h (ohne spezielle Last), Laden mit einem Kabel (Versorgung durch Netznachbildung d.h. unabhängig von einer Ladesäule). Zu beachten sind auch Störungen ins Versorgungsnetz beim Ladebetrieb (Oberschwingungen Netzstrom). Es ist anzumerken, dass im Rahmen der Prüfungen für EMV und elektrische Sicherheit keine Magnetfelder gemessen werden.

Die Anforderungen der FAV werden normalerweise bereits durch die Hersteller geprüft. Dies geschieht im Allgemeinen auch im eingebauten Zustand (Beispiel Haifischflossen-Antenne).

Für allfällige Vorschriften betreffend NIS gibt es keine Prüfvorgaben für Fahrzeuge.

Für die vorliegende Arbeit ist zu berücksichtigen, dass es seit 2019 eine internationale Norm zur Messung von Magnetfeldern in Fahrzeugen im Bereich 1 Hz bis 400 kHz gibt "Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical equipment in the automotive environment with respect to human exposure – Part 1: Low frequency magnetic fields» (IEC-TS-62764-1, 2019).

4.1.6 Fahrzeuge im Betrieb

Für den Betrieb von E-Fahrzeugen gelten keine spezifischen EMF-Vorgaben.

4.1.7 Laden

Die «Verordnung über den Schutz vor nicht-ionisierender Strahlung» NISV (SR814.710-NISV, 1999) ist nicht auf E-Fahrzeuge im Betrieb anwendbar. Jedoch sind Ladestationen im Sinne der NISV ortsfeste Anlagen. Dementsprechend sind die Immissionsgrenzwerte für den Gesundheitsschutz einzuhalten. Das gilt für Personen welche sich in der Nähe der Ladeinrichtung, des Ladekabels oder des im Lade-Modus befindlichen E-Fahrzeuges befinden. Es gelten die Immissionsgrenzwerte auch für den Fall in welchem sich Personen während des Ladevorgangs im Fahrzeug aufhalten, da das Fahrzeug nicht als OMEN (Ort mit empfindlicher Nutzung) im Sinne der NISV betrachtet wird. Allerdings müsste bei dieser Betrachtung eigentlich unterschieden werden, welche Immissionen von der ortsfesten Ladeanlage ausgehen und welche von den beim Laden benutzten elektrischen Komponenten des Fahrzeugs selbst stammen und daher nicht unter die NISV fallen.



4.2 EU

Die Vorschriften in der EU bezüglich elektrischer Sicherheit und EMV wurden bereits erwähnt. Für Funkanwendungen basieren die länderspezifischen Vorgaben auf der europäischen Richtlinie über die Bereitstellung von Funkanlagen auf dem Markt¹⁴. In Deutschland beispielsweise wurde dies im Funkanlagen-gesetz¹⁵ umgesetzt (Strahlenschutzkommission, 2019). Analog basieren die länderspezifischen Richtlinien betreffend NIS auf der «Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz)» (EG/1999/519, 1999).

4.3 Andere Länder

Es sind nur spärliche Informationen verfügbar bezüglich spezifischer Vorschriften für den Gesundheitsschutz. Bereits 2004 wurde in den USA eine Vorschrift entwickelt für die Messung und Beurteilung von Magnetfeldern und elektromagnetischer Strahlung in Hybridfahrzeugen (ETA-HTP09, 2004). China hat eine spezifische Vorschrift erlassen für die Messung von Magnetfeldern in Fahrzeugen, welche explizit Bezug nimmt auf den Schutz von Menschen (GB/T37130-2018, 2018). Für eine kurze Übersicht und einen Vergleich mit IEC TS-62764 (IEC-TS-62764-1, 2019) siehe (Trentadue et al., 2020).

4.4 Fazit

Aktuell gibt es in der Schweiz, siehe Kapitel 3, in (BAG, 2016), wie auch in Deutschland, siehe Empfehlungen in (Strahlenschutzkommission, 2019) und der EU (Trentadue et al., 2020) keine spezifischen Vorschriften für die Begrenzung von EMF in E-Fahrzeugen zum Schutz der Menschen. Für einzelne Komponenten oder Anwendungen wie Mobilfunk oder Radar können, wie in den vorangehenden Kapiteln dargelegt, Vorschriften gelten. Als Behelf für die Beurteilung der Gesamtexposition sollen die ICNIRP Methoden und Empfehlungen (ICNIRP, 2009, 2010, 2020) herangezogen werden (BAG, 2016; Schmid et al., 2009; Strahlenschutzkommission, 2019). Zu erwähnen ist ausserdem, dass die EMV-Vorschriften wie auch die Vorschriften für Funkanlagen für Einrichtungen und Komponenten im Normalfall leistungsbegrenzend wirken und damit indirekt auch eine Wirkung bezüglich des Gesundheitsschutzes erzielen. EMV-Vorgaben können in der Regel als so streng betrachtet werden, dass davon ausgegangen werden kann, dass auch der Gesundheitsschutz gegenüber EMF eingehalten wird. So heisst es zum Anwendungsbereich der UNECE-10 (Kapitel 1.3 Abs. a): *«Anforderungen bezüglich der Störfestigkeit gegen gestrahlte und leitungsgeführte Störungen bei Funktionen im Zusammenhang mit der unmittelbaren Kontrolle über das Fahrzeug, mit dem Schutz des Fahrers, der Fahrgäste und anderer Verkehrsteilnehmer und mit Störungen, die den Fahrer oder andere Verkehrsteilnehmer verwirren könnten, ...»*

Ein Spezialfall stellt das Laden dar. Die Ladestation gilt als ortsfeste Anlage gemäss der NISV. Damit haben die Ladestationen die Immissionsgrenzwerte einzuhalten zum Schutz der Personen, welche sich in der Umgebung befinden. Das stehende Fahrzeug gilt im Sinne der NISV nicht als OMEN (Ort mit empfindlicher Nutzung). Dementsprechend sind für die Exposition für Personen, welche sich während des Ladevorgangs im E-Fahrzeug aufhalten, nicht die Anlagengrenzwerte massgebend.

Eine regulatorische Gesamtbeurteilung der EMF-Immissionen im Gesamtsystem E-Fahrzeug ist kaum möglich, da verschiedenste Regularien je nach externen und internen Quellen und Nutzungsart zu berücksichtigen wären. Dies wird in der Abbildung 1 illustriert. Das Zusammenwirken dieser Regularien ist unklar und es fehlen Vorgaben wie die einzelnen EMF Immissionen unterschiedlicher Frequenz,

¹⁴ <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0053&from=PT>

¹⁵ <https://www.gesetze-im-internet.de/fuag/>



Zeitverläufen und Signalcharakteristiken gesamthhaft zu summieren wären. Insbesondere fehlt generell eine Anleitung zur Beurteilung der Ko-Exposition von NF- und HF-EMF.

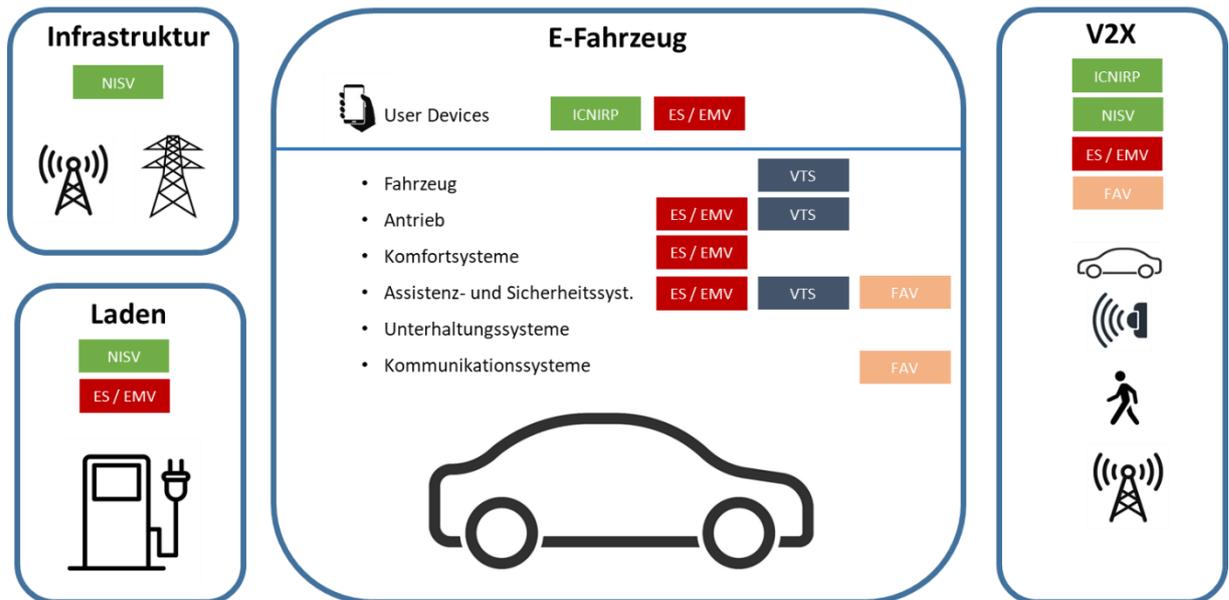


Abbildung 1: Illustration zu den Regularien, welche für die Gesamtbeurteilung der EMF-Exposition in E-Fahrzeugen relevant sind.

Legende zu Abbildung 1:

Domäne	Beschreibung
E-Fahrzeug	<ul style="list-style-type: none"> alle fest mit dem E-Fahrzeug verbundenen elektrischen Komponenten, vgl. Tabelle 1 Räder von den Passagieren im Fahrzeug benutzte, nicht mit dem E-Fahrzeug verbundene, elektronische Geräte (z.B. Mobiltelefon)
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> Stromversorgung Telekommunikationsversorgung (Radio/TV, Mobilfunk)
Laden	<ul style="list-style-type: none"> Ladesäulen und Wallboxen Ladekabel (Regulatorisch weiter zu unterscheiden ist, ob das Ladekabel fest mit der Ladesäule bzw. Wallbox verbunden ist oder nicht.)
V2X	Kommunikation vom E-Fahrzeug zu diversen externen Kommunikationspartnern, vgl. Tabelle 2: <ul style="list-style-type: none"> V2V V2I V2P V2N



Farbcode	Regulierungsaspekt	Regularien
grün	EMF-Immissionen	<ul style="list-style-type: none">• NISV• ICNIRP
rot	Elektrische Sicherheit (ES) und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	<ul style="list-style-type: none">• NEV, VEMV• ECE-10, ECE-100• weitere
grau	Fahrzeugtechnische Anforderungen	<ul style="list-style-type: none">• VTS
lachs	Funkanwendungen	<ul style="list-style-type: none">• FAV



5 Messungen

5.1 Methodik

Im Rahmen von Pilotmessungen wurden alle relevanten Quellen innerhalb der ausgewählten Fahrzeuge analysiert und ein entsprechendes standardisiertes Messprotokoll entwickelt. Die Auswahl der Fahrzeuge ist nicht systematisch aber versucht, die Diversität durch die verschiedenen Fahrzeugklassen abzudecken. Es besteht kein Anspruch auf Vollständigkeit und Repräsentativität. Dazu wären eine systematische Klassifizierung und Bewertung notwendig, die den Rahmen dieses Projektes übersteigt. Dies hängt aber auch von der aus diesem Projekt resultierenden Variabilität zwischen den Fahrzeugen ab. Sollten sich grosse Unterschiede bezüglich ELF-EMF und/oder HF-EMF ergeben, müssten weitere Messreihen durchgeführt werden.

Es wurden zwei Routen unterschiedlicher Länge festgelegt. Route 1 («Normal») wurde für Langzeitmessungen ausgelegt, die kürzere Route 2 («Kurzroute») für Validierungen. Das Hauptaugenmerk war auf der Variabilität der Leistungsparameter des Fahrzeugs gelegt, i.e. Steigungen über die Strecke verteilt. Ein weiterer Aspekt bestand in der Aufteilung zwischen Landstrasse, Strasse innerorts und Autobahn. Die Route soll auch verschiedene Siedlungstypen beinhalten, um verschiedene Empfangs- und Sendekonfigurationen zu erfassen. In Abbildung 2 ist die gewählte Route rund um den Zürichsee dargestellt.

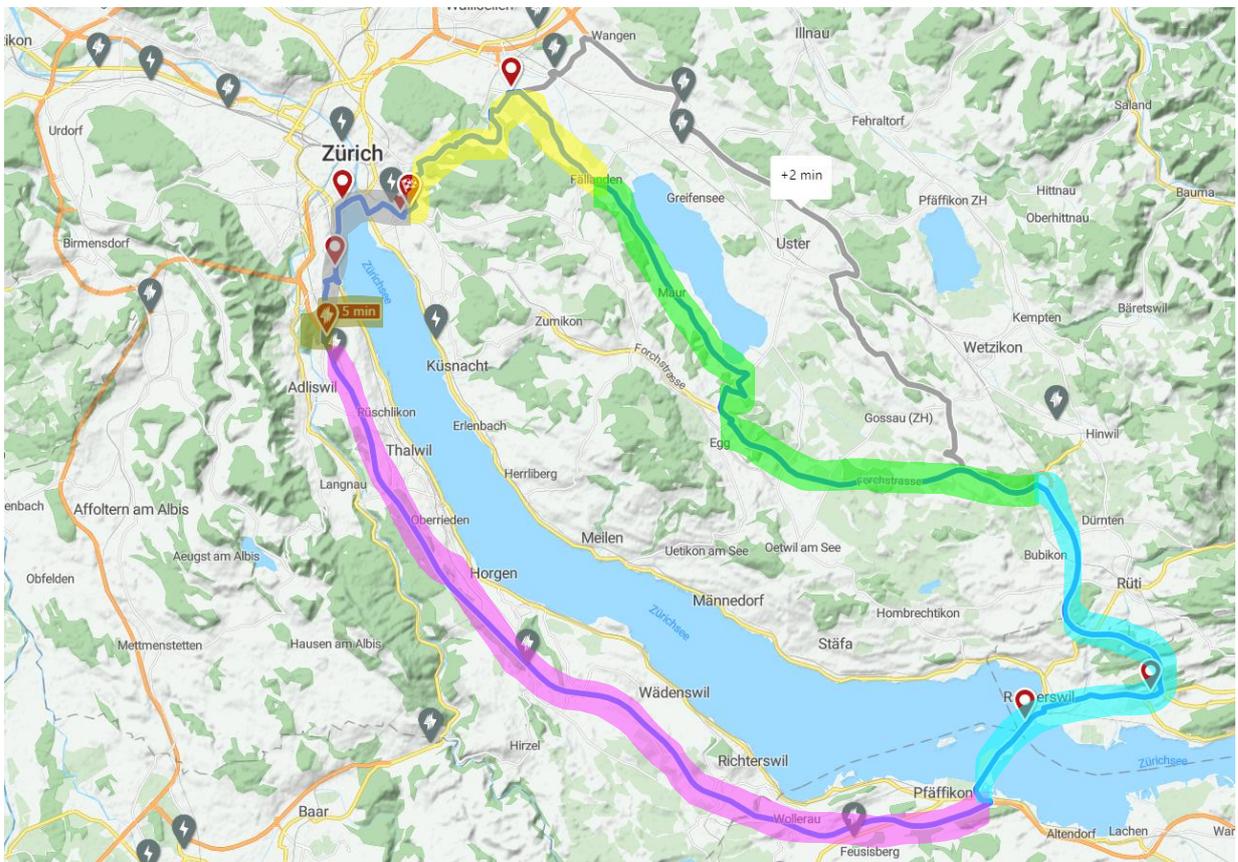


Abbildung 2: Messroute um den Zürichsee. Die Farben beziehen sich auf den Messphasen gemäss Tabelle 3.



Im Weiteren wurden verschiedene Messphasen definiert in denen verschiedene Aktivitäten bezüglich Konnektivität unternommen, respektive forciert wurden.

Mess-phase	Zeit	Beschreibung
1	Start:	Bluetooth Spotify streaming
	Stop:	
2	Start:	Daten-DL Rural (10 GB Test-Datei)
	Stop:	
3	Start:	Telefonieren (Fahrer – Beifahrer)
	Stop:	
4	Start:	Smartphones im Flugmodus
	Stop:	
5	Start:	Ladestopp (Messung mit ELF6)
	Stop:	Griff Ladekabel – Markerbutton – Innenraum bei Buchse
6	Start:	Daten-DL Urban (10 GB Test-Datei)
	Stop:	

Tabelle 3: Messphasen

5.2 Messgeräte

Für die Messungen wurden tragbare ExpoM-RF¹⁶ und ExpoM-ELF¹⁷ verwendet. Um die wesentlichen Anteile zu erfassen, wurde im Rahmen der Pilotmessungen die nötige Anzahl Messgeräte bestimmt. Wenn vorhanden wurden die Fahrzeugparameter via 'CAN (Controller Area Network) Bus (OBD II port, on-board)' erfasst. Diese Daten können mit einem entsprechenden Dongle ausgelesen und via Smartphone App geloggt werden.

5.2.1 Erfasste Frequenzbänder Magnetfeld ELF-MF

Die Magnetfeld-Messungen wurden über den gesamten vom ExpoM-ELF erfasst Frequenzbereich von statisch (DC) - 100 kHz durchgeführt.

5.2.2 Erfasste Frequenzbänder HF-EMF

Das ExpoM-RF wurde mit einer Liste von 35 Frequenzbändern gemäss Tabelle 4 konfiguriert, die alle wichtigen Telekommunikation- und Rundfunkdienste in der Schweiz berücksichtigt. Es handelt sich dabei um die gleiche Konfiguration, die auch für die Messungen im Rahmen des vom BAFU in Auftrag gegebenen Monitoring der nichtionisierenden Strahlung verwendet wird (BAFU, 2022).

¹⁶ <https://fieldsatwork.ch/products/expom-rf/expom-rf4/>

¹⁷ <https://fieldsatwork.ch/products/expom-elf/>



Bezeichnung	Mittenfrequenz (MHz)	Bandbreite (MHz)	Typ
FM Radio	97.75	35	Rundfunk
DAB/DAB+	202	75	Rundfunk
Polycom / TETRAPOL	385	35	Infrastruktur
TETRAPOL, amateur, ISM 433	422.5	35	ISM, Betriebsfunk
PMR/PAMR (Betriebsfunk)	452.5	35	Infrastruktur
Broadcasting CH (1)	507.5	75	Rundfunk
Broadcasting CH (2)	583.5	75	Rundfunk
Broadcasting CH (3)	659.5	75	Rundfunk
Mobile 700 UL (CH)	718	35	Mobilfunk (uplink)
Mobile 700 TDD (CH, Sunrise)	748	35	Mobilfunk (TDD)
Mobile 700 DL (CH)	770.5	35	Mobilfunk (downlink)
Mobile 800 downlink	808.5	35	Mobilfunk (downlink)
Mobile 800 uplink	847	35	Mobilfunk (uplink)
Mobile 900 uplink	897.5	35	Mobilfunk (uplink)
Mobile 900 downlink	942.5	35	Mobilfunk (downlink)
Mobile 1400 SDL (CH)	1479.5	75	Mobilfunk (downlink)
Mobile 1800 uplink	1747.5	75	Mobilfunk (uplink)
Mobile 1800 downlink	1842.5	75	Mobilfunk (uplink)
DECT	1897.5	35	Cordless Telefonie
Mobile 2100 uplink	1957	75	Mobilfunk (uplink)
Mobile 2100 downlink	2145	75	Mobilfunk (downlink)
ISM 2.4 GHz	2438	100	ISM-Band, WiFi, Bluetooth
Mobile 2600 uplink	2535	75	Mobilfunk (uplink)
Mobile 2600 TDD (Swisscom)	2592.5	35	Mobilfunk (TDD)
Mobile 2600 downlink	2657	75	Mobilfunk (downlink)
Mobile 3500 (1)	3475	100	Mobilfunk (TDD)
Mobile 3500 (2)	3605	100	Mobilfunk (TDD)
Mobile 3500 (3)	3735	100	Mobilfunk (TDD)
WiFi 5 GHz (1)	5200	100	WiFi
WiFi 5 GHz (2)	5325	100	WiFi
WiFi 5 GHz (3)	5450	100	WiFi
WiFi 5 GHz (4)	5575	100	WiFi
WiFi 5 GHz (5)	5700	100	WiFi
WiFi / SRD 5.8 GHz (1)	5825	100	WiFi
WiFi / SRD 5.8 GHz (2)	5950	100	WiFi

Tabelle 4: Für die Messungen berücksichtigte HF-EMF-Messbänder.



5.3 Fahrzeuge und Messfahrten

Die folgende Tabelle 5 zeigt eine Übersicht der Messfahrten und den dabei zum Einsatz gekommenen Fahrzeuge.

Bezeichnung	Datum	Fahrzeug (anonymisiert)	Route
Messfahrt 1.1	15. Aug 2022	Kleinwagen 1, 61 kW, E-Motor	Normal
Messfahrt 1.2	16. Aug 2022	Kleinwagen 2, 61 kW, E-Motor	Kurzroute
Messfahrt 2.1	17. Aug 2022	Mittelklasse-Limousine 1, 366 kW dual E-Motor	Normal
Messfahrt 2.2	17. Aug 2022	Mittelklasse-Limousine 1, 366 kW dual E-Motor	Normal
Messfahrt 3.1	18. Aug 2022	Kleinwagen 3, 125 kW E-Motor	Normal
Messfahrt 3.2	18. Aug 2022	Kleinwagen 3, 125 kW E-Motor	Kurzroute
Messfahrt 4.1	23. Aug 2022	Allrad-SUV, 110 kW Dieselmotor	Normal
Messfahrt 4.2	23. Aug 2022	Allrad-SUV, 110 kW Dieselmotor	Kurzroute
Messfahrt 5.1	24. Aug 2022	Mittelklasse-Limousine 2, 300 kW dual E-Motor	Normal
Messfahrt 5.2	24. Aug 2022	Mittelklasse-Limousine 2, 300 kW dual E-Motor	Kurzroute

Tabelle 5: Übersicht Messfahrten und Fahrzeuge

5.4 Standardisiertes Messprotokoll

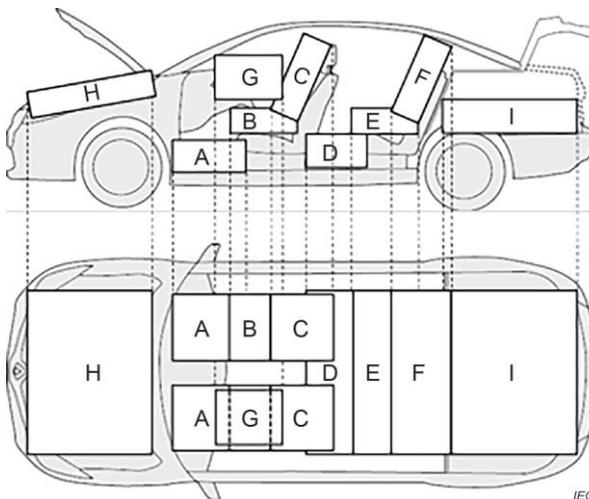


Abbildung 3: Testvolumen (gemäss (IEC-TS-62764-1, 2019)

5.4.1 Definition Testvolumen

Bezeichnungen gemäss Abbildung 4:

Messbereich vorne beinhaltet Bereiche A, B, C, G

Messbereich hinten beinhaltet Bereiche D, E, F



	<p>Bezeichnung Positionen</p> <p>1: Fussraum vorne links 2: Fussraum vorne rechts 3: Fussraum hinten rechts 4: Rückbank Mitte 5: Fussraum hinten links 6: unter Frontscheibe links 7: unter Frontscheibe rechts</p>
	<p>Zuweisung der Messgeräte</p> <p>ELF1 - ELF5: ExpoM-ELF Geräte RF1, RF2: ExpoM-RF Geräte</p> <p>ELF6 (nicht sichtbar): für Messungen während des Ladestopps verwendet</p>

Abbildung 4: Messprotokoll: Messpositionen und Messgeräte

5.4.2 Ablauf Messung

Vorbereitung der Messgeräte

- Die Messgeräte erhielten einen gut sichtbaren Kurzcode (ELF1, ELF2, ELF3, ELF4, ELF5, ELF6 sowie RF1 und RF2).
- Alle Messgeräte wurden jeweils in der Nacht vor einer Messfahrt aufgeladen. Vor Beginn der ersten Messfahrt wurden die Uhrzeiten beider ExpoM-RF4-Geräte via Software-Utility mit der aktuellen Clock des PC abgeglichen.



Erfassung der Messdaten während dem Fahren

- Fahrzeugkonfiguration/Vorbereitung
- Fahrer: Smartphone (5G fähig) verbunden mit Android Auto / Spotify ready
- Beifahrer Smartphone (5G fähig) ready zum Telefonieren / Datendownload

Erfassung der Kenndaten und Zustand des Fahrzeugs

- Erfassung des Fahrzeugstatus und aller Daten, welche für die Interpretation der Ergebnisse Relevant sein könnten.

Kenndaten	Status / Zustand
Hersteller, Modell, Baujahr, Gewicht...	Zählerstand
Motor-Kenndaten: Anzahl, Typ, Leistung, synchron/asynchron, Hubraum	Ladezustand Batterie
-> <i>Fahrzeugausweis kopieren & ablegen</i>	Wetter / Temperatur
Batterie-Kenndaten (Kapazität, Spannung)	Reifendruck (evtl. anpassen falls nicht i.O.)
Platzierung der Motoren, Batterie, Verkabelung	

Tabelle 6: Messprotokoll: Erfassung Kenndaten und Zustand der Messfahrzeuge

Messung im Stillstand

- Ziel: Systematische Erfassung von Magnetfeldern. Erfassung limitiert auf Quellen, die nicht direkt dem Antrieb im Zusammenhang stehen, dafür sind durch den statischen Aufbau Schwenkmessungen bzw. Maximum-Suche möglich.
- Schwenkmessung im Bereich der Sitze zu zweit; eine Person ist für den vorderen Bereich verantwortlich (Vordersitze), die andere für den hinteren Bereich (Rückbank).

Vorbereitung Fahrzeug

- Vollgeladen und abfahrbereit, jegliche Elektronik und Systeme, die eingeschaltet werden können, werden eingeschaltet.
- Klima-Anlage und/oder Heizung
- Radio & Bluetooth
- Scheibenwischer an, diese können weggeklappt werden, um Schäden an Scheibe und Wischer zu vermeiden.



Standorte Messgeräte

Gerät	Nr.	Ort	Bemerkungen
ExpoM-ELF	ELF1	Pos1: Fussraum vorne links	
ExpoM-ELF	ELF2	Schwenkmessung vorne	Messtechniker 1
ExpoM-ELF	ELF3	Schwenkmessung hinten	Messtechniker 2
ExpoM-ELF	ELF4	Pos5: Fussraum hinten links	
ExpoM-ELF	ELF5	Pos6: Unter Frontscheibe links	
ExpoM-RF	RF1	Pos4: Rückbank Mitte	
ExpoM-RF	RF2	Pos7: Unter Frontscheibe rechts	

Tabelle 7: Messprotokoll: Standorte Messgeräte im Fahrzeug

- Die Geräte vorne rechts und hinten rechts werden jeweils für die Schwenkmessungen vorne und hinten verwendet. Für diese Messungen werden 2 Personen benötigt.
- Am Messtag wurden die Geräte ELF1, ELF4 und ELF5 sowie RF1 und RF2 eingeschaltet und rutschfest platziert.
- ELF 1 wurde im Fussraum vorne links, ELF 4 in Fussraum hinten links positioniert.
- RF1 wurde in der Mitte der Rückbank zwischen Sitz und Rücklehne eingeklemmt.
- ELF6 wurde im Kofferraum deponiert und noch nicht eingeschaltet. Darauf wurden die relevanten Fahrzeugdaten aufgenommen: Fahrzeugausweis oder entsprechende Dokumente, Kilometerstand, Ladestand (bei E-Fahrzeugen). Zusammen mit Fahrer- und Beifahrernamen, Datum, Messfahrt-Nr., Fahrzeugtyp wurden diese Daten im entsprechenden Protokoll (Normal- oder Kurzroute) vermerkt.

5.4.3 Schwenkmessungen

Vorgehen

Sodann wurden die Geräte ELF2 und ELF3 eingeschaltet. Das Zuschalten gewisser Verbraucher im Fahrzeug wie z.B. Sitzheizung, Scheibenwischer/wascher und Klimaanlage, Streaming ab Smartphone via Entertainment-System wurde im Protokoll mit Uhrzeit festgehalten.

Der genaue Zeitpunkt der jeweils gemeinsam begonnenen Schwenkmessungen wurde via Marker-Funktion an den Geräten und im Protokoll festgehalten.

Messpositionen

Die Schwenkmessungen wurden unmittelbar darauf wie in Tabelle 8 angegeben durchgeführt, wobei pro Messposition jeweils genau 1 Datenpunkt gemessen wurde (das Ende der jeweiligen Messung wurde durch die entsprechende LED-Anzeige bestätigt).



Abbildung 5: Platzierung von ELF5 und RF2 unter der Frontscheibe

ELF2	ELF3
1. Fussboden vorne links	1. Fussboden hinten links ¹⁸
2. Vordersitz links	2. Rücksitz links
3. Vorderlehne links	3. Rücklehne links
4. Fussboden vorne rechts	4. Fussboden hinten rechts
5. Vordersitz rechts	5. Rücksitz rechts
6. Vorderlehne rechts	6. Rücklehne rechts

Tabelle 8: Messprotokoll: Messpositionen für Schwenkmessungen

Pro Fläche wurden jeweils 9 Gitterpositionen auf 3 verschiedenen Niveaus ausgemessen, siehe Abbildung 8 bis Abbildung 22:

- Niveau 1: Gerät direkt auf dem Fussboden, auf dem Sitz bzw. auf der Rücklehne.
- Niveau 2: Wie bei Niveau 1, jedoch das Gerät zusätzlich mit Distanzhalter (Markierung 2) positioniert.
- Niveau 3: Wie bei Niveau 1, jedoch das Gerät zusätzlich mit Distanzhalter (Markierung 3) positioniert.

Der Abschluss dieser Schwenkmessungen wurde durch ein erneutes Betätigen der Marker-Funktion gekennzeichnet.

¹⁸ Da der Vordersitz jeweils Platz beanspruchte, kamen die Gitterpositionen bei den Niveaus 2 und 3 näher beisammen zu liegen.



5.4.4 Bilderstrecke für das Ausmessen eines jeweiligen zentralen Gitterpunktes (Beispiele)



Abbildung 8: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Fussboden vorne rechts (Niveau 1)



Abbildung 9: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Fussboden vorne rechts (Niveau 2)



Abbildung 10: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Fussboden vorne rechts (Niveau 3)

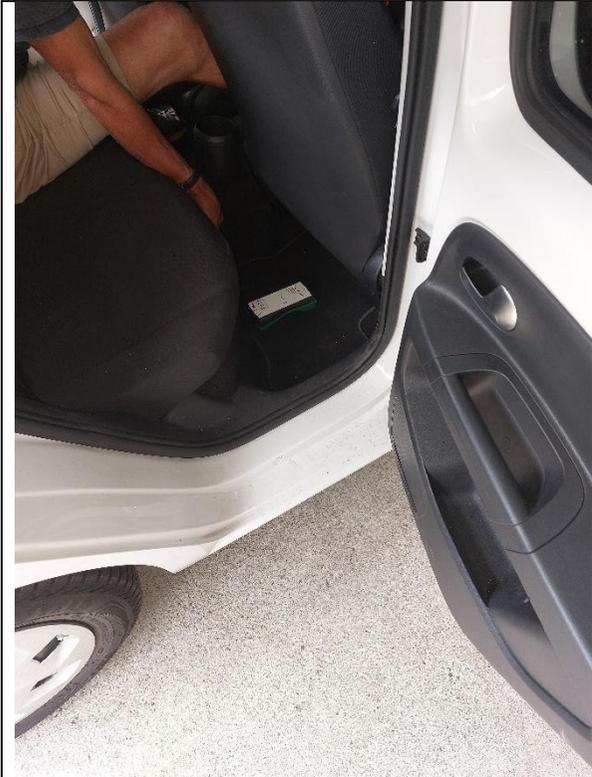


Abbildung 11: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Fussboden hinten rechts (Niveau 1)



Abbildung 12: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Fussboden hinten rechts (Niveau 2)



Abbildung 13: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Fussboden hinten rechts (Niveau 3)



Abbildung 14: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücklehne vorne rechts (Niveau 1)



Abbildung 15: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücklehne vorne rechts (Niveau 2)



Abbildung 16: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücklehne vorne rechts (Niveau 3)



Abbildung 17: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücksitz hinten rechts (Niveau 1)



Abbildung 18: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücksitz hinten rechts (Niveau 2)

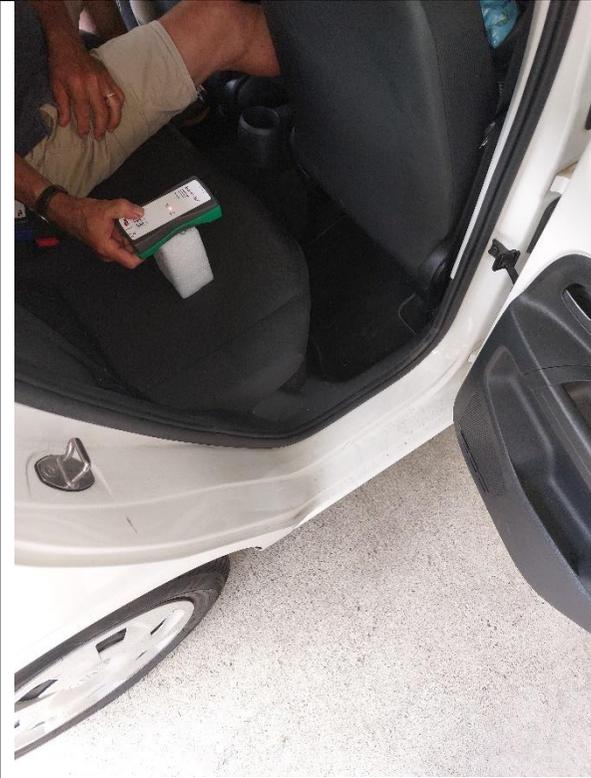


Abbildung 19: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücksitz hinten rechts (Niveau 3)



Abbildung 20: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücklehne hinten rechts (Niveau 1)



Abbildung 21: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücklehne hinten rechts (Niveau 2)



Abbildung 22: Messfahrt 1.1 - Schwenkmessung Rücklehne hinten rechts (Niveau 3)



5.4.5 Ladestopp-Messungen

Bei den Ladestopps wurden jeweils aussen Messungen am Kabel und über der Ladebuchse am Auto, sowie innen auf der Höhe der Ladebuchse vorgenommen, siehe Abbildung 23 bis Abbildung 30. Der Ladestopp wurde für alle Fahrzeuge an derselben Ladestation durchgeführt. Bei der Ladestation handelt es sich um eine Schnellladestation der Firma GOFAST, die bis zu 300 kW bereitstellen kann.

5.4.6 Messfahrt (Normalroute; Distanz 86 km)

Messphase 1

Bluetooth Spotify streaming

Messphase 2

Daten-DL Rural (10 Gb)

Messphase 3

Telefonieren (Fahrer – Beifahrer)

Messphase 4

Smartphones im Flugmodus

Messphase 5

Ladestopp (Messung mit ELF6)

Messphase 6

Daten-DL Urban (10 Gb)

5.4.7 Messfahrt (Kurzroute; Distanz 34 km)

Messphase 1

Bluetooth Spotify streaming

Messphase 2

Daten-DL Rural (10 Gb)

Messphase 3

Telefonieren (Fahrer – Beifahrer)

Messphase 4

Daten-DL Urban (10 Gb)

5.4.8 Nachbereitung der Messgeräte

ExpoM-ELF: Die Messdaten wurden sowohl als mmm-Datei als auch als xlsx-Datei exportiert. Danach wurden die Daten auf den Geräten gelöscht.

ExpoM-RF4: Die Messdaten wurden als csv-Datei exportiert. Die Daten auf den Geräten wurden nicht gelöscht.



5.4.9 Bilderstrecke Messpunkte Messphase 5 Ladestopp



Abbildung 23: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (ausser 1)



Abbildung 24: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (ausser 2)



Abbildung 25: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (ausser 3)



Abbildung 26: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (aussen 4)



Abbildung 27: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (aussen 5)



Abbildung 28: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (innen 1)



Abbildung 29: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (innen 2)



Abbildung 30: Messfahrt 1.1 Ladestopp-Messungen (innen 3)



5.5 Auswertung

Die Magnetfeld-Messungen im Fahrzeug wurden bezüglich Ihrer Grenzwertausschöpfung relativ zu den ICNIRP «General Public» Referenzwerten (siehe 5.6.1) im Frequenzbereich ausgewertet (spektrale Gewichtungsmethode).

In E-Fahrzeugen sind nicht sinusförmige Signale sowie periodische Signale mit starr gekoppelten Phasenlagen der Oberwellen häufig anzutreffen. Für die Auswertung solcher Feldstärkeverläufe schlägt die ICNIRP eine Auswertung nach der «weighted peak» Methode (WPM) vor. Dies ist primär dadurch begründet, dass die klassische spektrale Gewichtungsmethode in solchen Fällen zu übermässig konservativen Ergebnissen führen kann (ICNIRP, 2010) (Keller, 2017).

Im Rahmen dieses Berichts wurde aus mehreren Gründen bewusst auf eine Auswertung nach der WPM verzichtet. Grundsätzlich ist die spektrale Gewichtungsmethode im Sinne einer «Worst-case» Abschätzung in jedem Fall zulässig. Andererseits bringt eine Auswertung nach der WPM spezifische Herausforderungen und Nachteile mit sich (Neigung zu Artefakten, reduzierte Empfindlichkeit bei breitbandigen Messungen, Wahl der Beobachtungszeiten etc.), die nicht im Verhältnis zum Mehrwert im Rahmen dieses Berichts stehen (Soyka, 2020a, 2020b).

In den Auswertungen in Kapitel 6 wurden für jede Messfahrt die im Protokoll beschriebenen Messphasen einzeln angeschaut. Auffällige Abschnitte und Einzelmessungen wurden zudem im Zeitbereich betrachtet, um die möglichen Quellen eingrenzen zu können.

5.6 Referenzwerte und Grenzwerte

Dieser Abschnitt liefert eine Übersicht über die Referenzwerte und Grenzwerte, die den Auswertungen der Messergebnisse in diesem Bericht zugrunde liegen.

5.6.1 ICNIRP Referenzwerte

Die Abbildung 31 stellt die frequenzabhängigen ICNIRP Referenzwerte für niederfrequente Magnetfelder über den Frequenzbereich von 1 Hz bis 100 kHz dar (ICNIRP, 2010). Die ICNIRP unterscheidet zwischen der Exposition der allgemeinen Bevölkerung («general public») und berufsbedingter Exposition («occupational»).

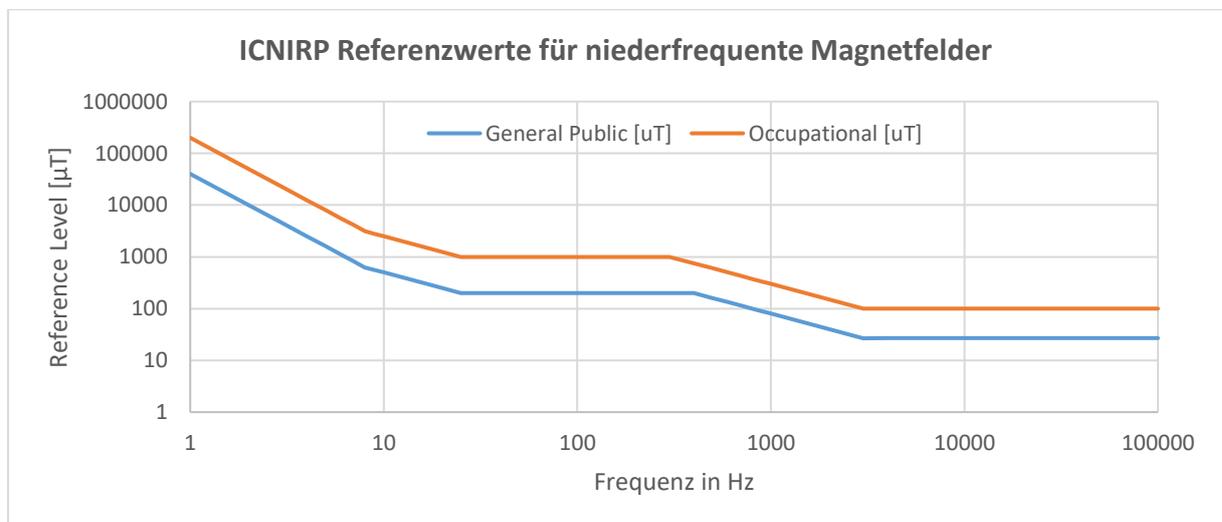


Abbildung 31: ICNIRP Referenzwerte für niederfrequente Magnetfelder (magnetische Flussdichte)



5.6.2 Grenzwerte gemäss NISV (Schweiz)

Die folgenden zwei Kurven in Abbildung 32 und Abbildung 33 stellen die in der NISV (SR814.710-NISV, 1999) festgelegten frequenzabhängigen Immissionsgrenzwerte für die jeweiligen Feldgrössen dar. In Abbildung 32 sind die IGW für niederfrequente Magnetfelder bis 100 kHz dargestellt, die Abbildung 33 zeigt die entsprechende Kurve für elektrische bzw. elektromagnetische Felder. Ab der Frequenz von 10 MHz bezieht sich der Grenzwert effektiv auf die Leistungsdichte des elektromagnetischen Feldes, welche bei Angabe einer der beiden Feldkomponenten (magnetisch oder elektrisch) bereits eindeutig definiert ist.

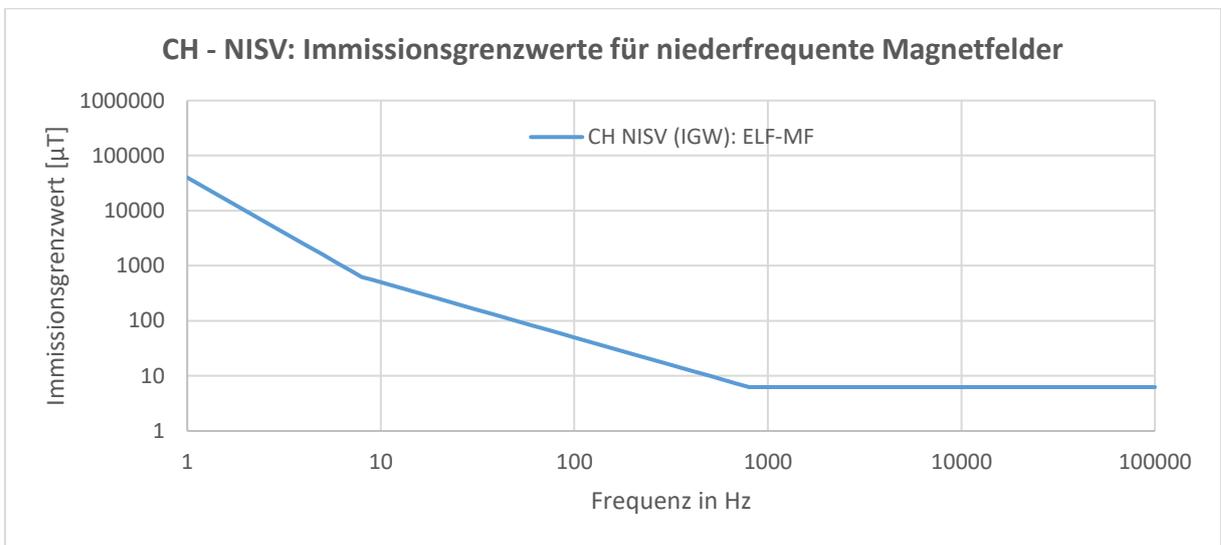


Abbildung 32: Immissionsgrenzwerte in der Schweiz gemäss NISV für niederfrequente Magnetfelder (magnetische Flussdichte)

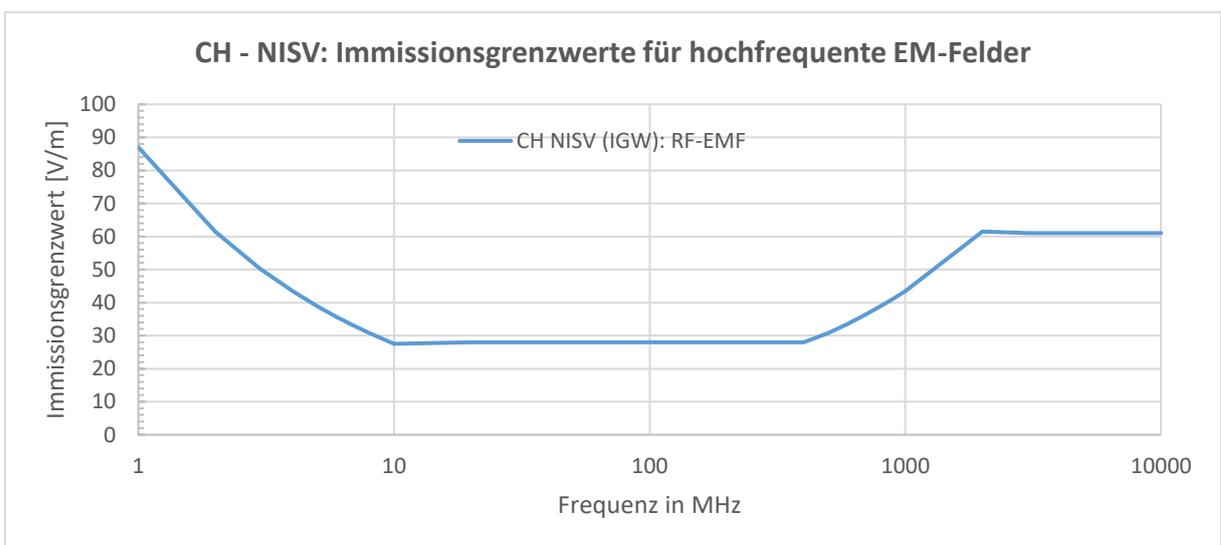


Abbildung 33: Immissionsgrenzwerte in der Schweiz gemäss NISV für hochfrequente elektrische bzw. elektromagnetische Felder



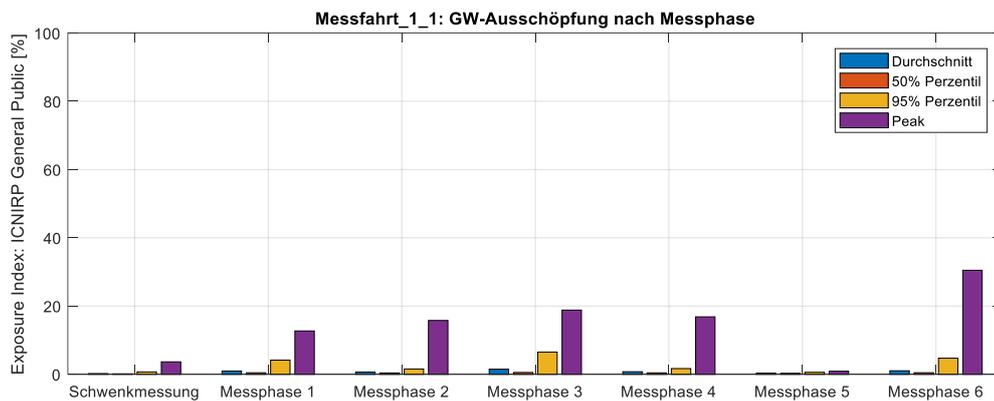
6 Ergebnisse und Diskussion

6.1 ELF-MF: Grenzwertausschöpfung ICNIRP Referenzwerte

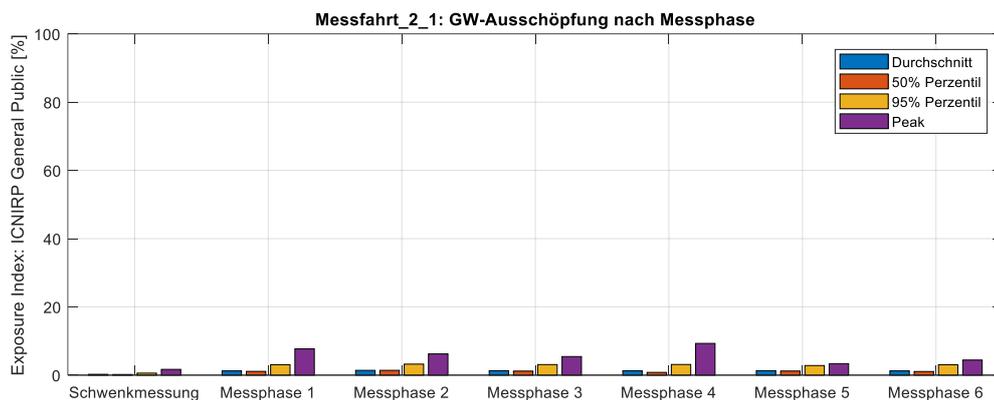
Für die Messphasen 1-6 berücksichtigt die folgende Auswertung alle Messpositionen. Für den Punkt «Schwenkmessung» wurden hingegen nur die zwei Geräte berücksichtigt, welche an der Schwenkmessung beteiligt waren.

Die Statistik zeigt, dass die allermeisten Messungen eine niedrige bis sehr niedrige Grenzwertauschöpfung aufweisen (siehe 50% und 90% Perzentile). Die maximalen kurzzeitigen Ausschöpfungen («Peak») wurden zwar nur sporadisch in einzelnen Messungen beobachtet, erreichen allerdings bei mehreren Fahrzeugen Ausschöpfungen im zweistelligen Prozentbereich. Da gemäss ICNIRP Richtlinien keine zeitliche Mittelung der Werte vorgesehen ist, sind diese Ausschläge trotz ihrer kurzen Dauer ausschlaggebend für die Evaluation der Grenzwertauschöpfung.

6.1.1 Messfahrt 1.1

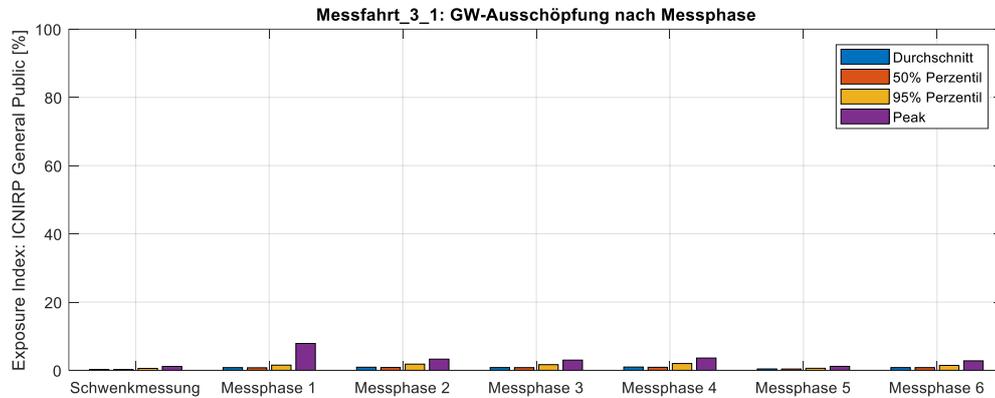


6.1.2 Messfahrt 2.1

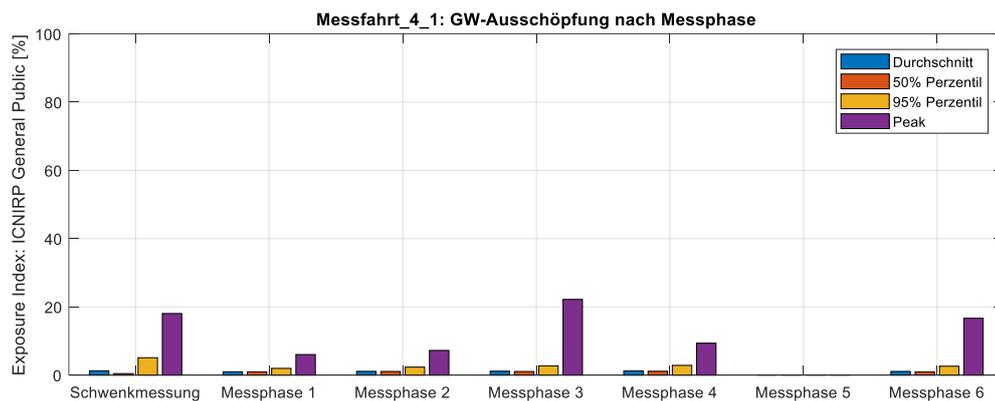




6.1.3 Messfahrt 3.1

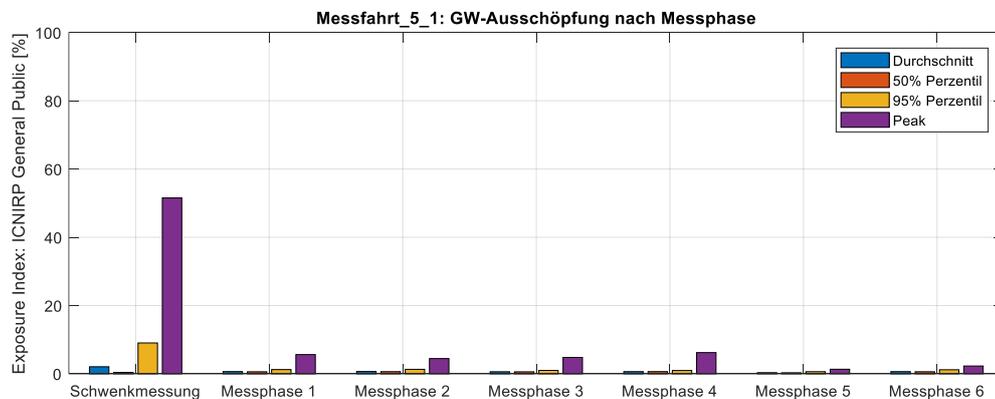


6.1.4 Messfahrt 4.1



Bemerkung: es handelt sich hier um das Fahrzeug mit Verbrennungsmotor, wodurch Phase 5 (Ladestopp) entfällt.

6.1.5 Messfahrt 5.1



Ausreisser Schwenkmessung: Ursache ist die Sitzheizung, welche starke geschaltete Magnetfelder (schnelle Transienten) erzeugt. Die Feldstärke fällt mit zunehmendem Abstand schnell ab.

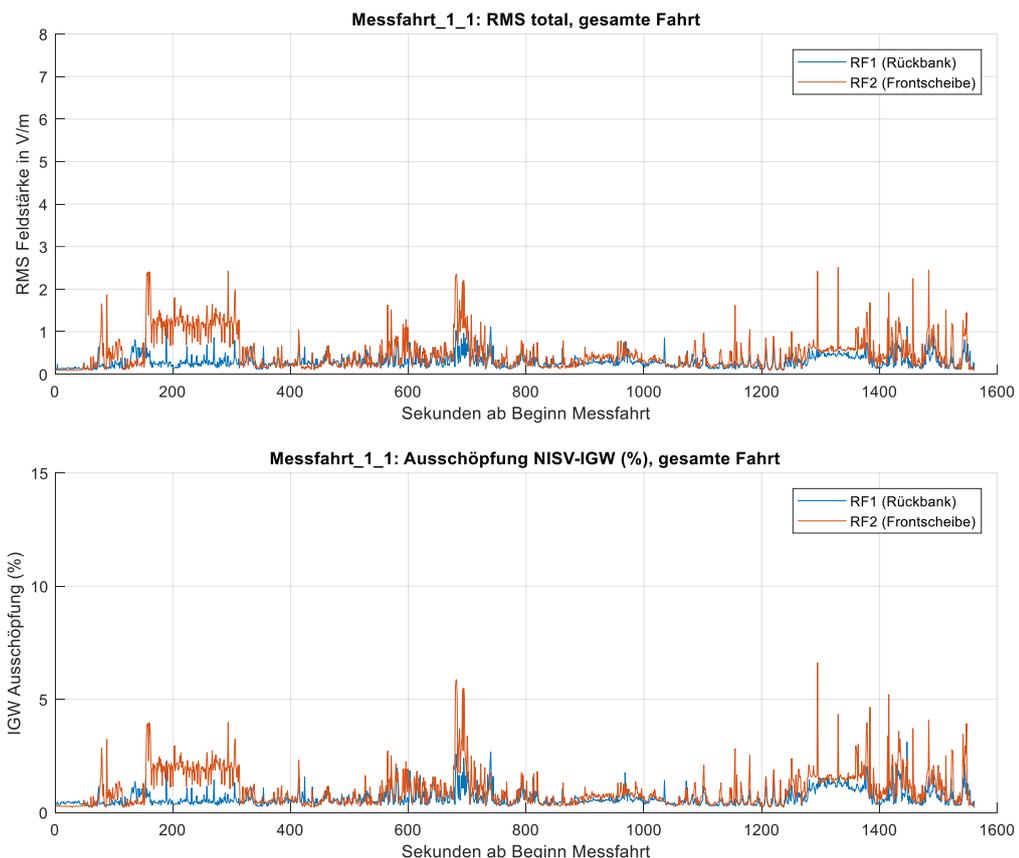


6.2 RF-EMF: Feldstärke und Ausschöpfung IGW (CH-NISV)

In den folgenden Grafiken sind die Ergebnisse der HF-EMF Messungen als Verlauf der aggregierten Messwerte über die Dauer der Messfahrt dargestellt. Es wurden pro Messfahrt jeweils zwei Aggregationen vorgenommen:

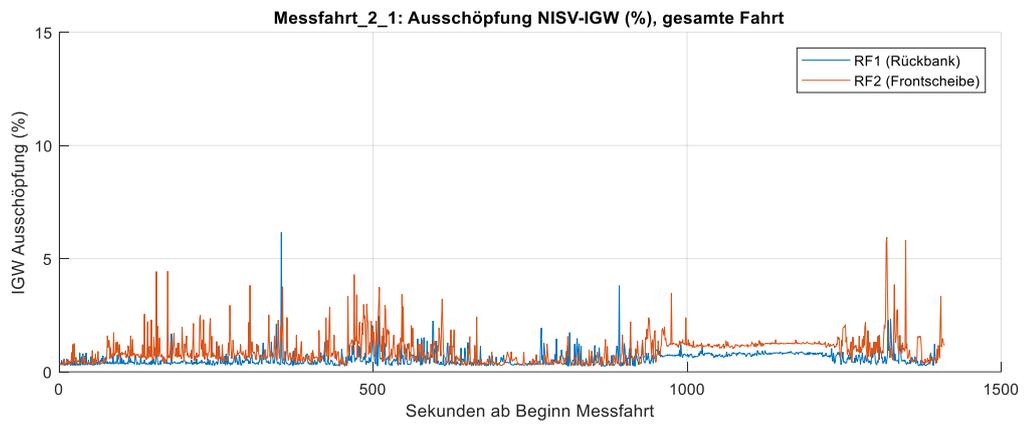
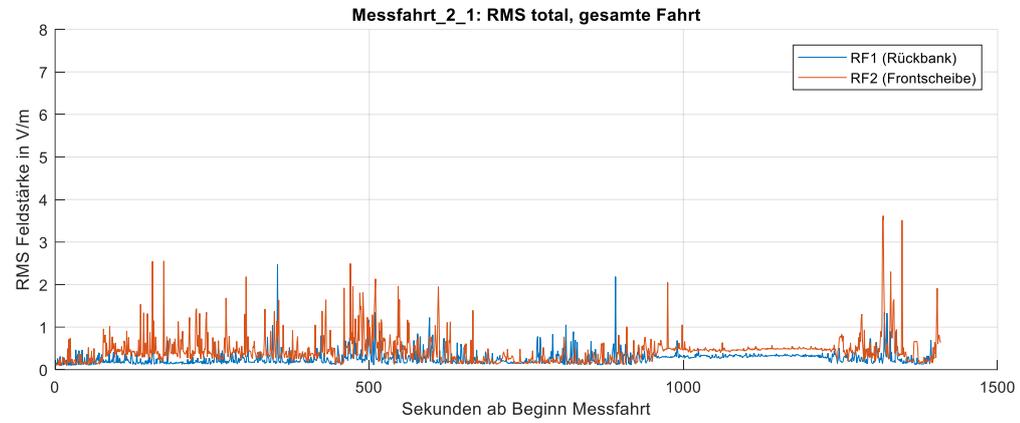
- Die totale RMS-Feldstärke ist eine physikalische Grösse, die sich aus der quadratischen Summe aller gemessenen Frequenzbänder zusammenstellt.
- Die Grenzwertausschöpfung berücksichtigt die frequenzabhängige Gewichtung der einzelnen Frequenzbänder und die zugehörigen Summierungsformeln gemäss den in der NISV definierten Immissionsgrenzwerten (siehe 5.6.2). Es sei darauf hingewiesen, dass die stärksten Beiträge in diesen Messungen meist nicht von ortsfesten Anlagen, sondern von mobilen Endgeräten stammen (Mobiltelefon, WiFi) welche eigentlich nicht unter die NISV fallen. Diese Auswertung dient deshalb primär zur Orientierung und Einordnung der auftretenden Feldstärken mangels spezifischer Vorschriften für den Innenraum des Fahrzeugs.

6.2.1 Messfahrt 1.1



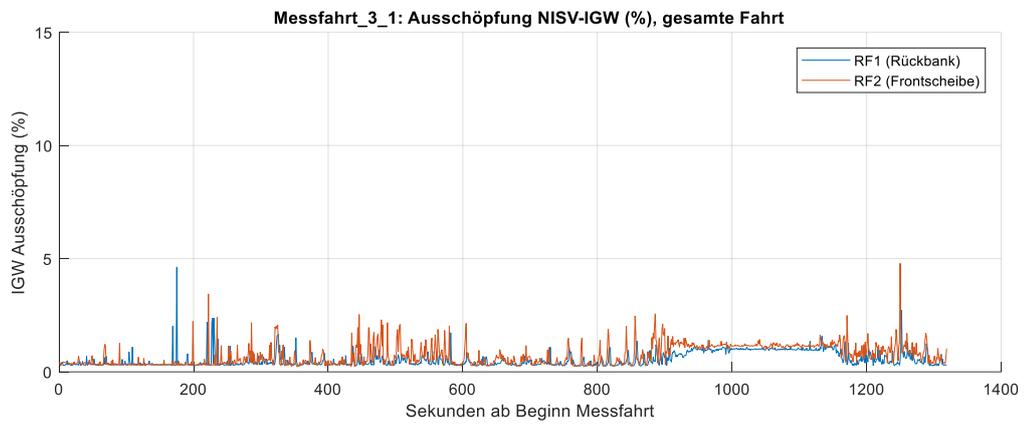
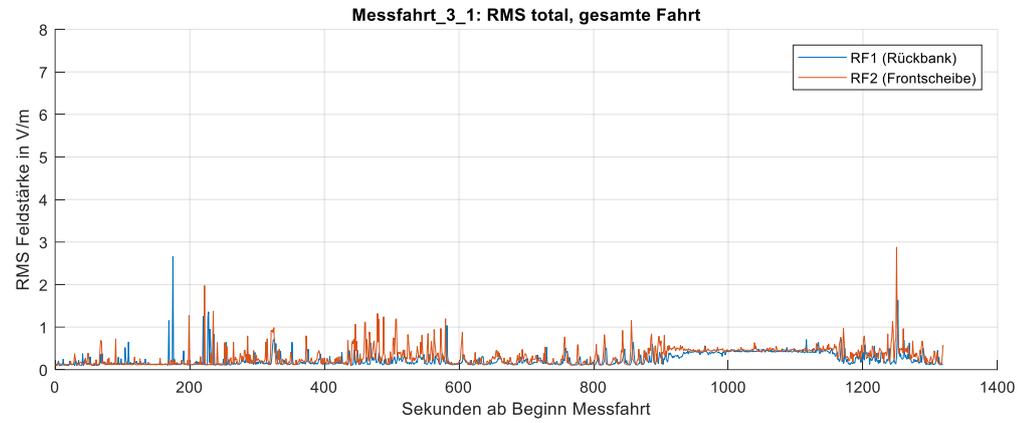


6.2.2 Messfahrt 2.1

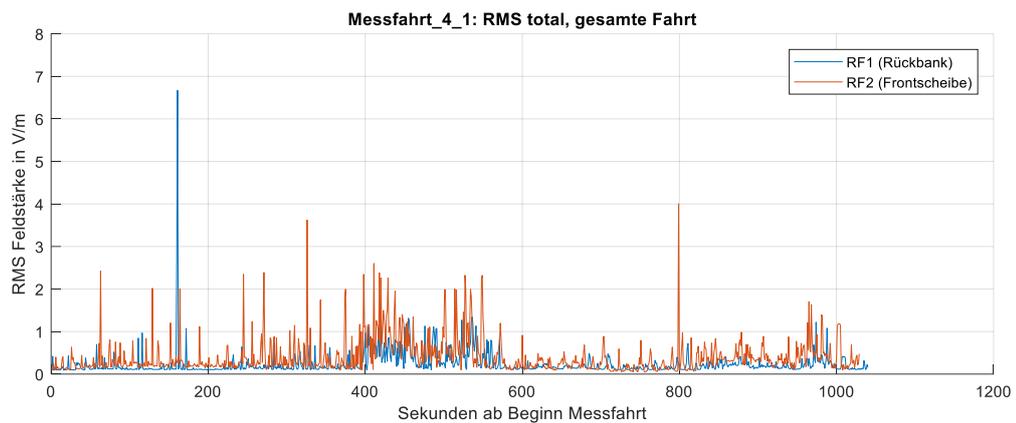


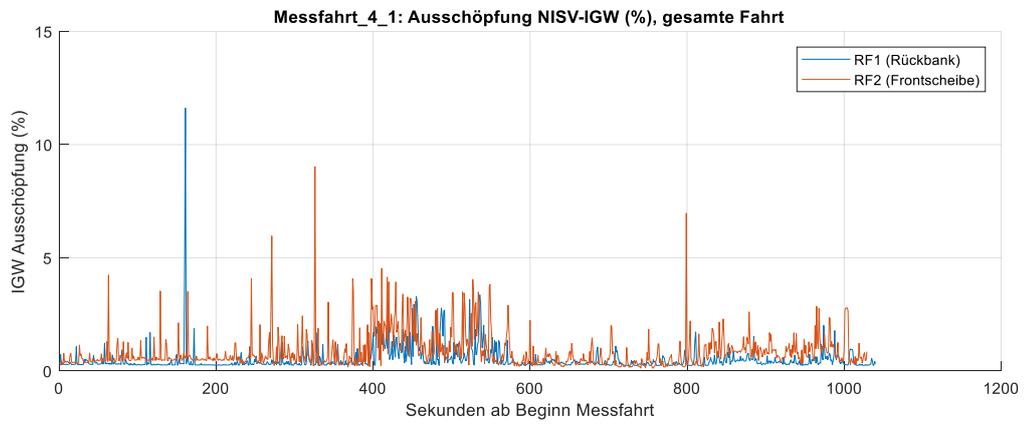


6.2.3 Messfahrt 3.1

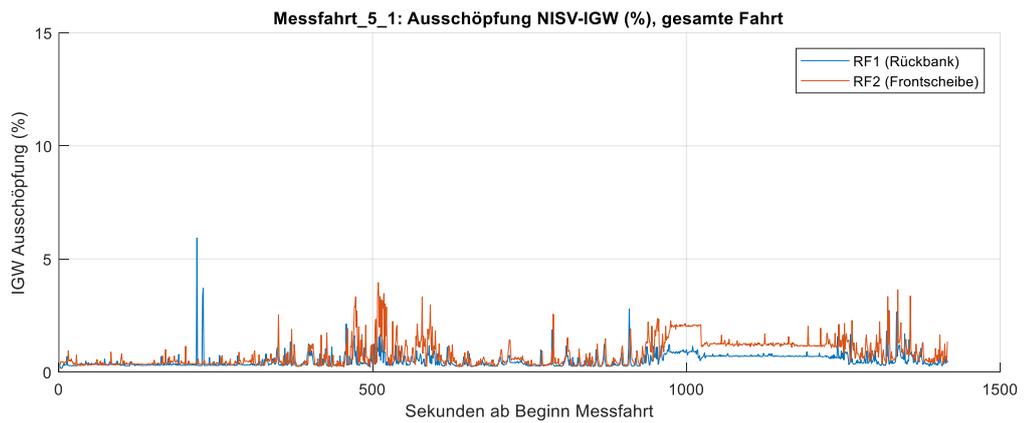
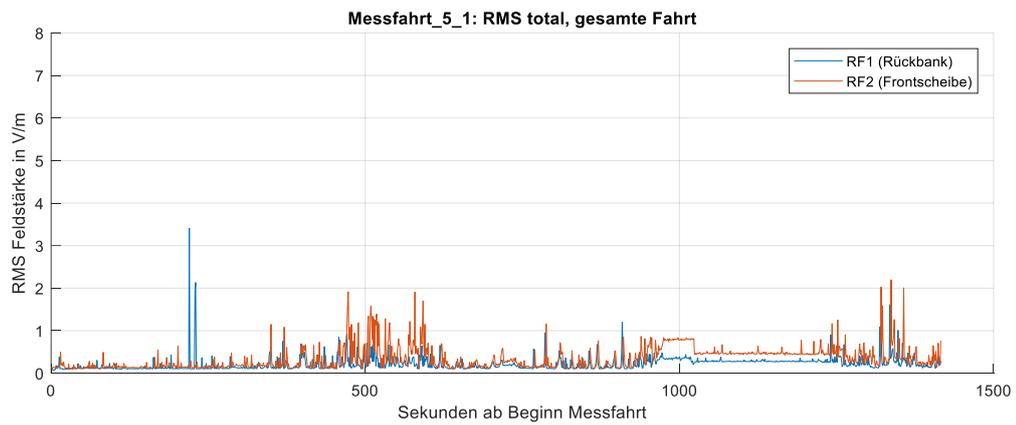


6.2.4 Messfahrt 4.1





6.2.5 Messfahrt 5.1





6.3 Validierungen der Messungen auf Kurzroute

Die Messfahrten wurden zwecks Validierung entweder vollständig oder auf der Kurzroute wiederholt (siehe Tabelle 5). Ein qualitativer Vergleich der Ergebnisse hat ergeben, dass die gemessenen magnetischen Feldstärken wie auch die typischen fahrzeugspezifischen Magnetfeldverläufe und Spektren im Allgemeinen gut reproduzierbar sind, insbesondere im Rahmen der unvermeidbaren Variabilität einer Messung unter realistischen Bedingungen (Umgebungsbedingungen, Verkehrssituation, Ampeln usw.).

Bei den Hochfrequenz-Messungen ist die Variabilität zum Teil etwas höher. Insbesondere die Aktivität in den Mobilfunk Uplink-Bändern (Emissionen der Endgeräte) zeigt kurzzeitig deutliche Unterschiede zwischen den Messungen. Dies ist allerdings nicht sehr überraschend, da die Funk-Aktivität eines Mobiltelefons von sehr vielen Parametern abhängt, die grösstenteils nicht durch den Endbenutzer beeinflusst werden können (Datentransfers im Hintergrund, Hand-overs zwischen Basisstationen usw.).

Dabei hängt die elektromagnetische Feldstärke grösstenteils vom momentanen Ort und Aufenthaltsdauer des Fahrzeugs ab (Handy-Empfangsbedingungen) und nicht vom Betriebszustand des Autos. Dadurch wirkt sich die Variabilität in der Reisegeschwindigkeit und Verkehrsbedingungen während der Messfahrt generell etwas stärker aus als bei den Niederfrequenz-Messungen. Wenn der Mittelwert innerhalb der jeweiligen Messphasen betrachtet wird resultieren aber vergleichbare Feldstärke-Werte.

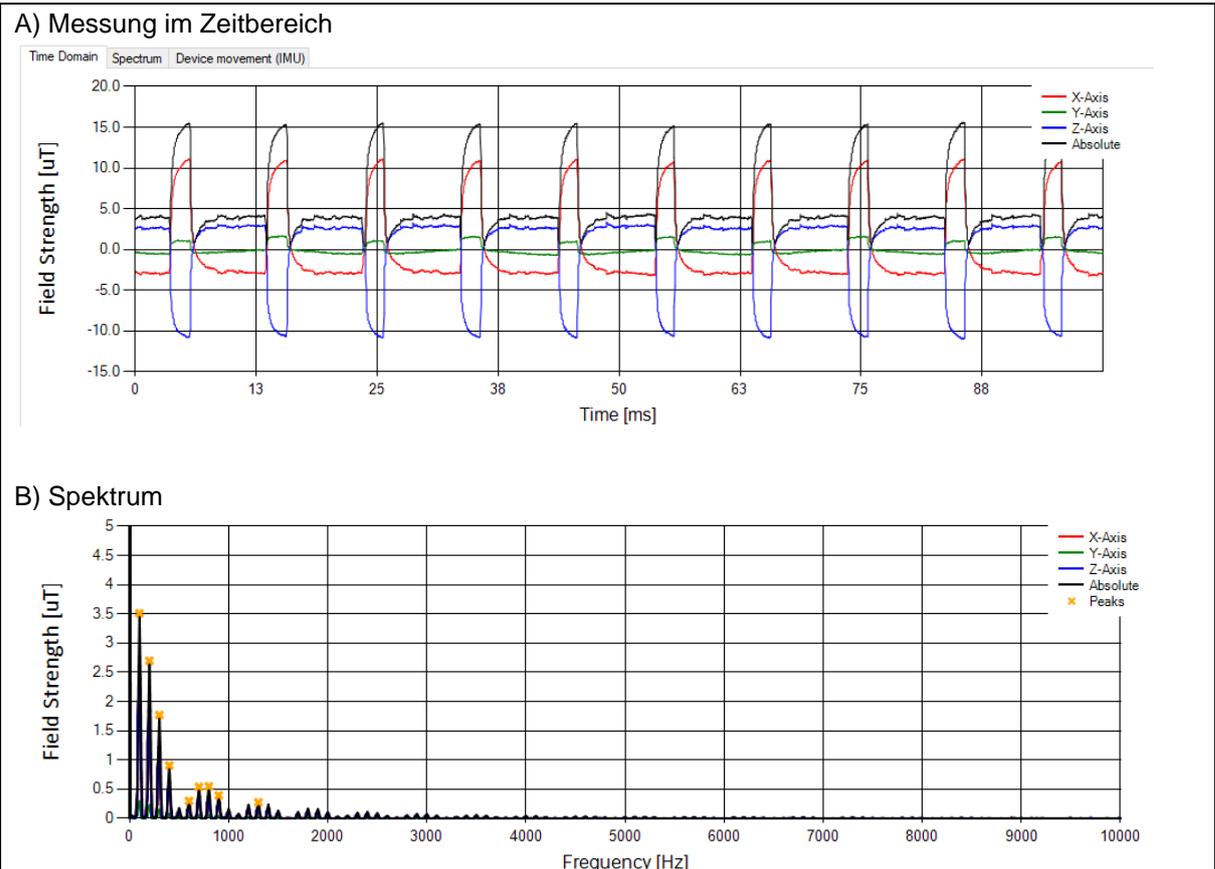
6.4 Einzelmessungen (Magnetfeld) im Detail

In diesem Kapitel werden ein paar auffällige und/oder charakteristische Beispiele von Einzelmessungen gezeigt. Die Messdaten werden im Zeitbereich sowie dem daraus resultierenden Magnetfeld-Spektrum dargestellt.



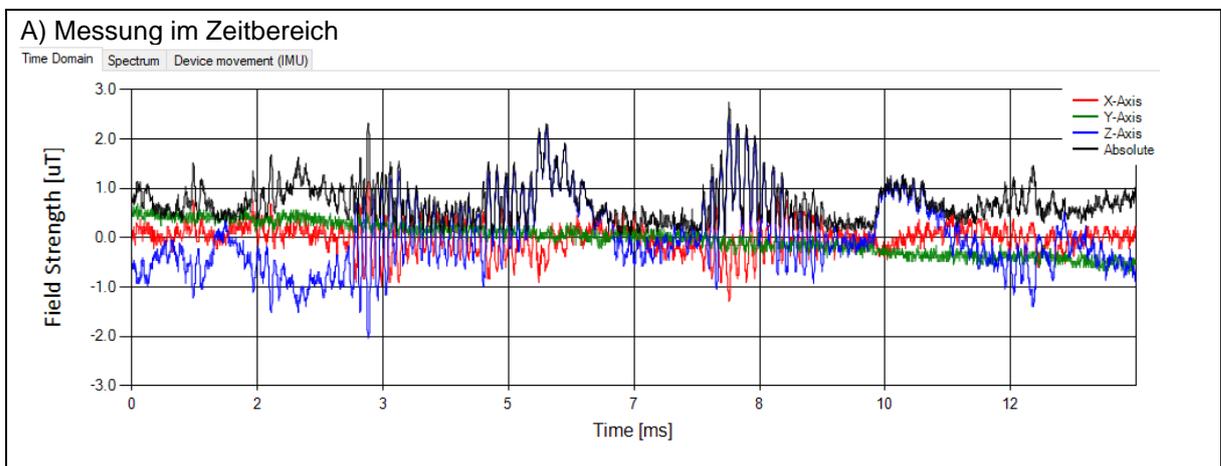
6.4.1 Messfahrt 1.1

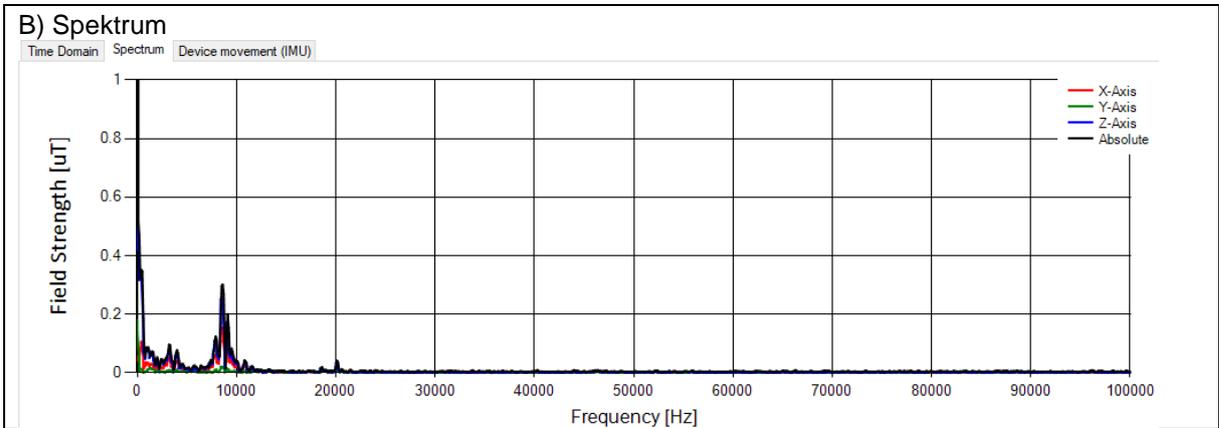
Unregelmässig wiederkehrendes periodisches Rechtecksignal mit Grundfrequenz um 100 Hz und starken Oberwellen. Das Signal ist in allen Messungen dieses Fahrzeugs zu sehen, am deutlichsten aber an der Messposition hinten rechts (ELF4). Ursprung unklar, vermutlich Bord-Elektronik.



6.4.2 Messfahrt 2.1

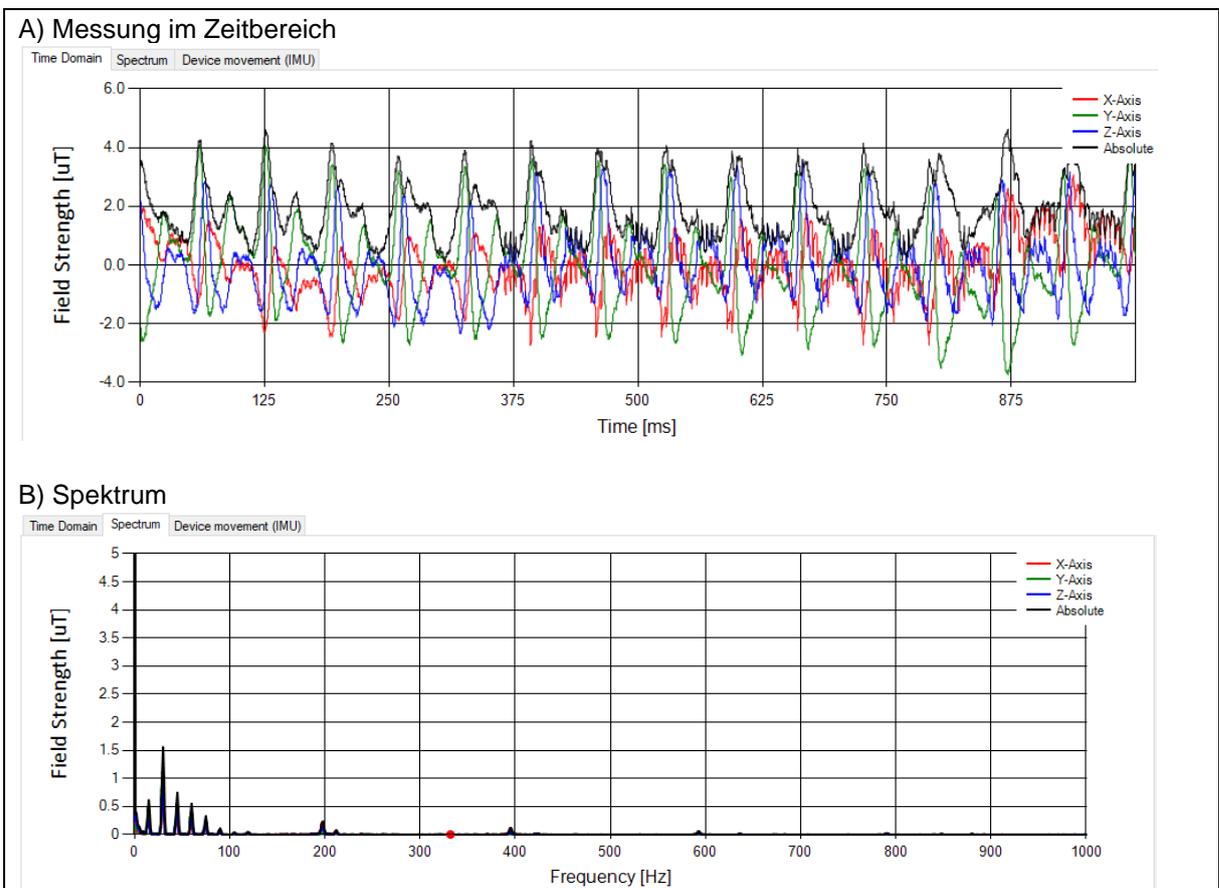
Deutliche hochfrequente Anteile um 8.5 kHz, Frequenz leicht instabil und/oder mit Modulation überlagert. Vermutete Ursache: Leistungselektronik / Antrieb.





6.4.3 Messfahrt 3.1

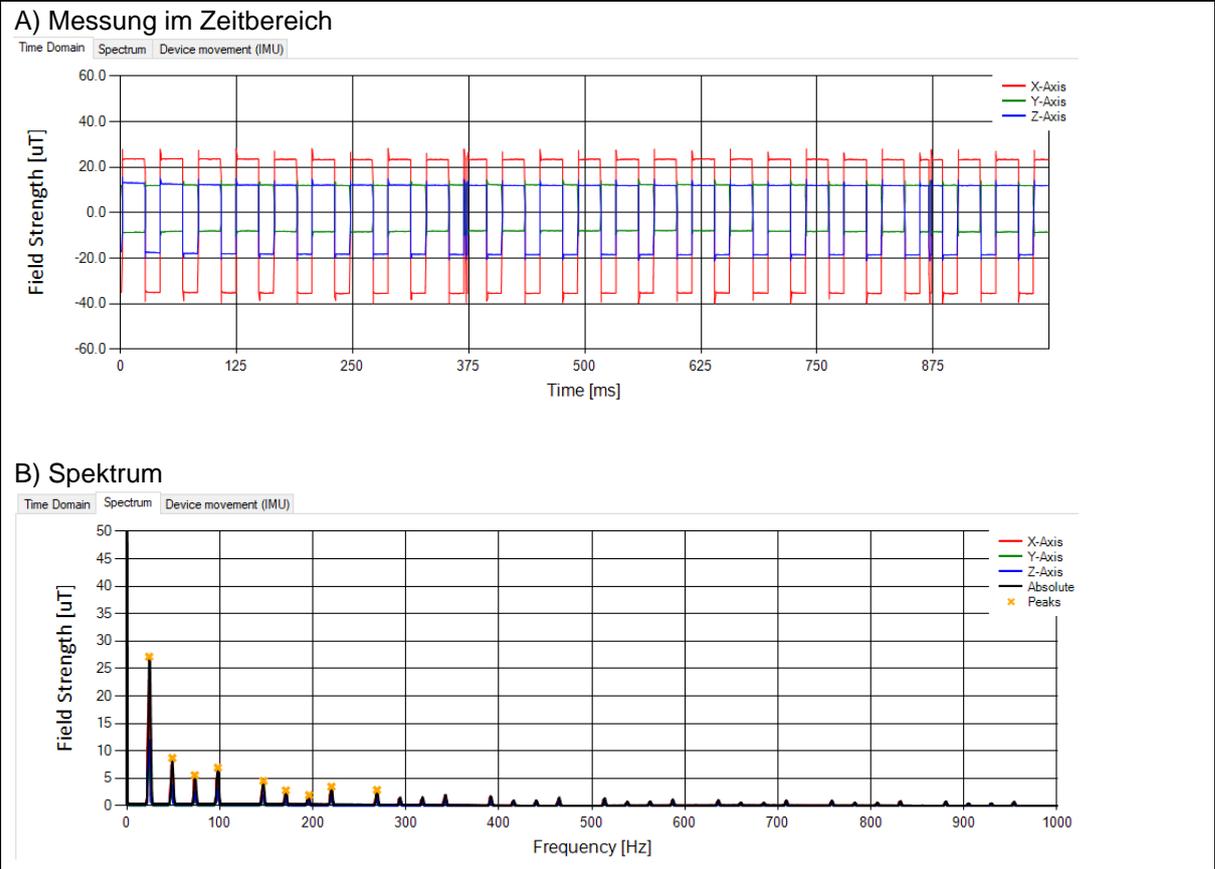
Typisches Bild eines Magnetfeldverlaufs, das höchstwahrscheinlich durch die Bewegung magnetisierter Reifen bzw. anderen an den Rädern beweglichen Teilen dominiert ist. Sichtbar ist ein niederfrequentes periodisches Muster, welches sich mit einer Rate wiederholt, die mit der Fahrzeuggeschwindigkeit korreliert.





6.4.4 Messfahrt 5.1

Hohe Ausschläge während der Schwenkmessung vorne, periodisches Muster mit niedriger Frequenz (ca. 25 Hz). Vermutete Ursache: Sitzheizung.





6.5 Aussenmessungen während des Ladestopps

Die folgenden Grafiken in Abbildung 34 und Abbildung 35 zeigen die statistische Auswertung der gemessenen Werte der magnetischen Flussdichte während der jeweiligen Ladestopps (siehe 5.4.5). Da jede Ladestation grundsätzlich am Stromnetz angeschlossen ist, ist ein relevanter 50 Hz Anteil zu erwarten. Bei dieser Frequenz kann davon ausgegangen werden, dass mindestens ein Teil des gemessenen Magnetfelds von in der Nähe vorhandenen ortsfesten Anlagen (Trafos, Hochspannungsleitungen etc.) stammen. Allerdings kann nicht ohne weiteres unterschieden werden, ob die Magnetfelder vom Auto, Ladekabel oder anderen Quellen stammen.

Falls das Laden mit Wechselstrom stattfindet, dürfte der Beitrag des Ladekabels aufgrund der sehr kleinen Distanz zum Messgerät dominieren. Wenn hingegen eine Schnellladung mit Gleichstrom stattfindet, ist trotz der hohen elektrischen Leistung ein vergleichsweise niedriger 50 Hz Anteil in der Nähe von Kabel und Auto zu erwarten. In dem Fall ist vor allem eine relativ starke DC-Komponente zu erwarten. Die Messungen in diesem Bericht beziehen sich auf eine Schnellladestation des Herstellers GOFAST mit bis zu 300 kW Leistung. Bei allen untersuchten Fahrzeugen blieb die maximale beobachtete Leistungsaufnahme unterhalb von 150 kW.

Die im Rahmen unserer Tests gemessenen Werte des 50 Hz Anteils bewegen sich in den meisten Fällen unter 1 μT . Damit sind sie weit unter dem in der Schweiz gültigen Immissionsgrenzwert, welcher bei dieser Frequenz 100 μT beträgt. Der höchste gemessene DC-Anteil erreicht mit gemessenen 100 - 800 μT ebenfalls nur einen Bruchteil des entsprechenden IGWs von 40'000 μT .

Einschränkend ist zu berücksichtigen, dass im Rahmen dieser Studie kein Vergleich verschiedener Ladestationen angestrebt wurde.

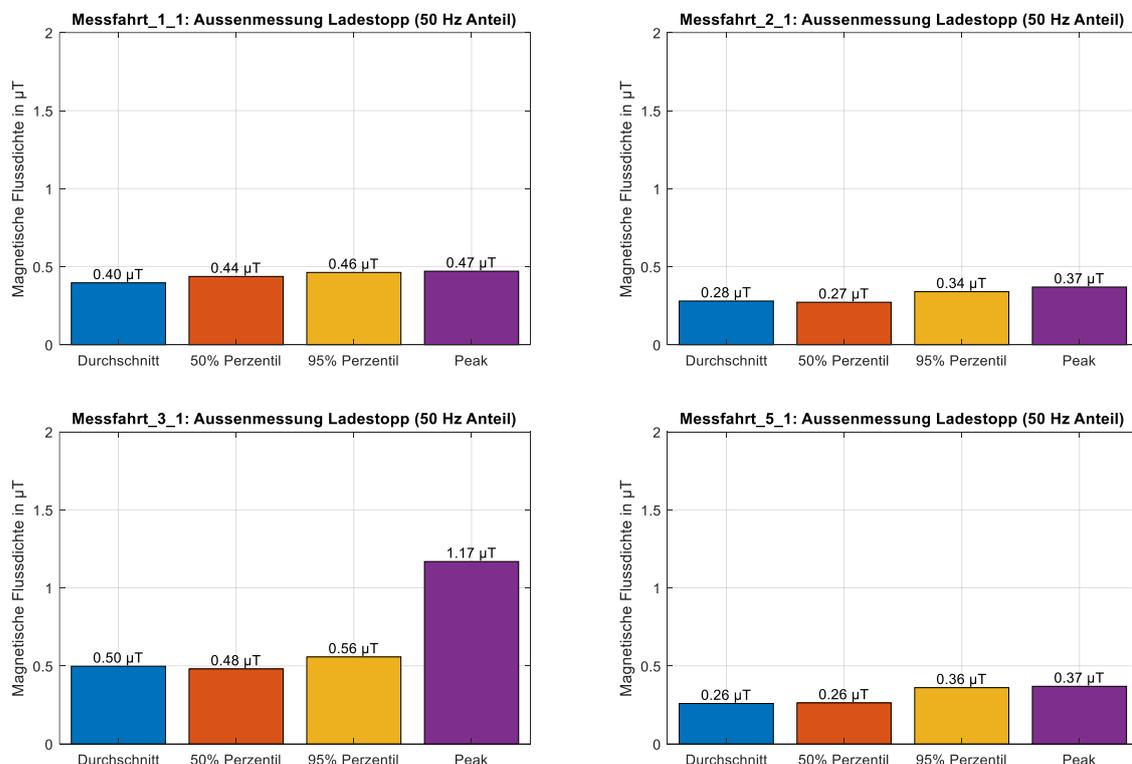


Abbildung 34: Statistische Auswertung der Messwerte der Ladestopp-Aussenmessungen: 50 Hz Anteil

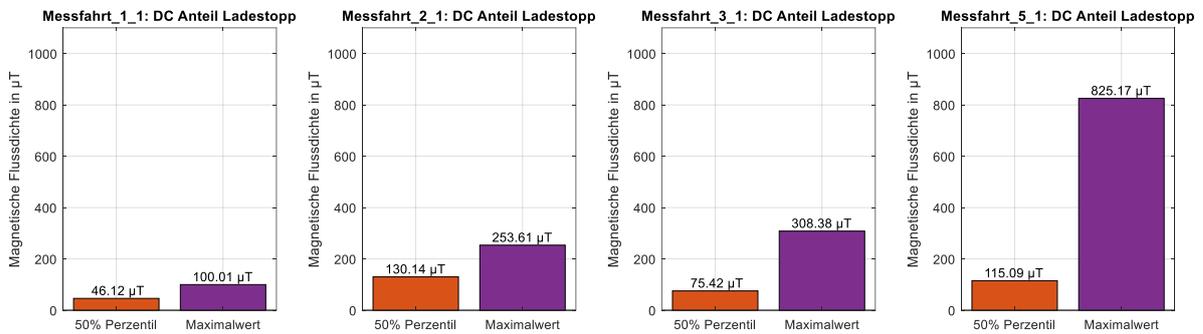


Abbildung 35: Statistische Auswertung der Messwerte der Ladestopp-Aussenmessungen: DC-Anteil (statisches Feld)

In den Ladestopp-Messungen wurden neben dem statischen Anteil (DC) und der 50 Hz Komponente je nach Fahrzeug auch zahlreiche weitere Frequenzanteile beobachtet. Deshalb sind in der folgenden Abbildung 36 dieselben Messungen nach ICNIRP-Grenzwertausschöpfung ausgewertet, welche sämtliche vorhandenen Frequenzanteile gewichtet.

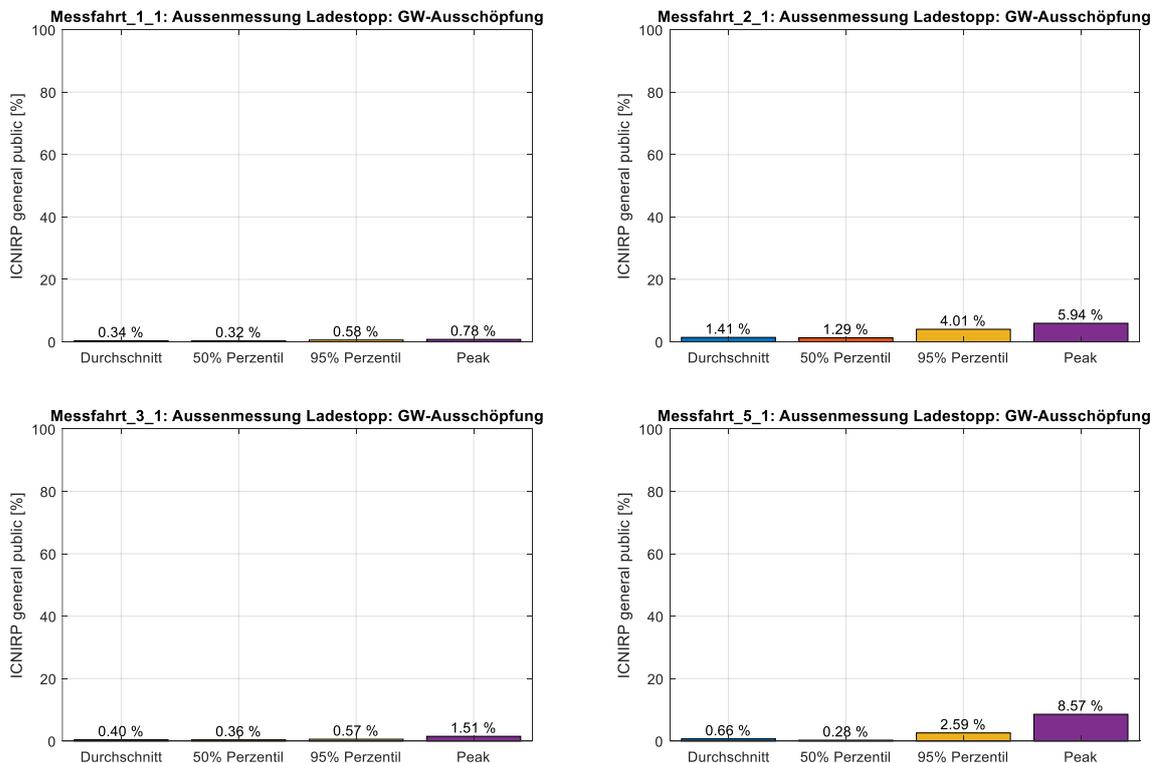


Abbildung 36: Statistische Auswertung der Ladestopp-Aussenmessungen: Grenzwert-Ausschöpfung relativ zu den ICNIRP «general public» Referenzwerten.



6.6 Schlussfolgerungen und Fazit

Zusammenfassung NF-EMF:

Die gemessenen Durchschnittswerte liegen gegenüber den ICNIRP-Grenzwertempfehlungen tief, bei ca. 5% Grenzwertausschöpfung. Vereinzelt wurden höhere Peak-Messwerte von niederfrequenten Magnetfeldern bis ca. 50% der ICNIRP-Grenzwerte festgestellt. Generell sind diese hohen Werte – wie bei Magnetfeldern im Allgemeinen üblich – häufig sehr lokalisiert. Durch die dynamische und komplexe Situation im Fahrzeug treten sie zudem oft nur sporadisch auf. Aufgrund des breiten/diversen Messprotokolls konnten einige solche hohen Werte erfasst und zum Teil identifiziert werden. Allerdings ist es wegen der mit dem Protokoll verbundenen zeitlichen und räumlichen Lücken wahrscheinlich, dass im Rahmen dieser Pilotstudie nicht 100% dieser kurzzeitig auftretenden hohen Werte entdeckt bzw. die maximal aufgetretenen Feldstärken erfasst wurden. Für eine strikte «Worst-Case»-Abschätzung sind gezieltere Messungen mit höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung nötig. Die höchsten dieser Peak-Werte wurden bei Messfahrt 1.1 (Kleinwagen, E-Motor), Messfahrt 4.1 (Allrad-SUV, Dieselmotor) sowie Messfahrt 5.1 (Mittelklasse Limousine, E-Motor) festgestellt. Bei Messfahrt 5.1. wurde der hohe Wert nur bei der Schwenkmessung festgestellt und konnte auf die Sitzheizung zurückgeführt werden. Insgesamt lässt sich schliessen, dass die hohen Peak-Werte kaum auf einen direkten und ausschliesslichen Zusammenhang mit dem E-Antrieb deuten. Möglich bleibt, dass transiente Vorgänge z.B. beim Beschleunigen der E-Fahrzeuge mit der eingesetzten Messmethodik nicht erfasst werden konnten.

Zusammenfassung HF-EMF:

Die gemessenen totalen E-Feldstärken (RMS-Werte) bewegen sich typischerweise bis 3 V/m mit einzelnen Werten bis max. 7 V/m. Die als Annäherung durchgeführte Grenzwertausschöpfung auf der Basis der NISV bewegt sich im Bereich bis maximal 12%. Der Verlauf der Messwerte ist bei allen Messfahrten ähnlich. Die Höhe der Messwerte variiert leicht zwischen den verschiedenen Fahrzeugen.

Zusammenfassung Einzelmessungen (Magnetfeld) im Detail:

Einzelne ausgewählte Beispiele von auffälligen und/oder charakteristischen Einzelmessungen von NF-EMF wurden detaillierter untersucht. Ohne vertiefte Kenntnisse über die verbaute Technik ist die Zuweisung zu einzelnen Quellen schwierig. Als Ursache hinter einzelnen dieser analysierten Fälle werden vom E-Antrieb unabhängige Faktoren wie die Magnetisierung von Reifen und Sitzheizungen vermutet.

Zusammenfassung Laden:

Die während des Ladevorgangs im Innern der E-Fahrzeuge gemessenen Werte des B-Feldes waren tief, ohne auffällige Peak-Werte und mit Grenzwertausschöpfungen durchwegs unter 5%. Die Grenzwertausschöpfung basiert auf den ICNIRP-Grenzwertempfehlungen, obwohl in diesem Fall für die Anteile der Exposition von ortsfesten Quellen (Ladestation) die Immissionsgrenzwerte der NISV zur Anwendung kämen. Die Unterschiede sind nur gering und an der grundsätzlichen Aussage der sehr geringen Grenzwertausschöpfung ändert sich nichts. Die ausserhalb des Fahrzeuges gemessenen Werte lagen mit der Ausnahme eines Peak-Wertes unter 1 μT , was weit unterhalb des Immissionsgrenzwertes der NISV liegt. Die Grenzwertausschöpfung nach ICNIRP lag in allen Fällen unter 10%.

Zusammenfassung gesamt:

Die durchgeführten Messungen an einer Auswahl von Fahrzeugen implizieren, dass es im Innenraum kaum zu Grenzwertüberschreitungen von EMF kommt. Die zusätzlichen Beiträge durch den E-Antrieb und die dazugehörigen Komponenten verändern die Immissionslage nicht wesentlich und stellen kein zusätzliches Gesundheitsrisiko dar. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit anderen entsprechenden Untersuchungen. Ein Folgeprojekt mit einer grösseren Auswahl an E-Fahrzeugen drängt sich daher nicht auf.



Die technologische Entwicklung vor allem hinsichtlich zunehmender Vernetzung und Digitalisierung muss aber im Auge behalten werden. Ein offener Punkt bleibt die ungenügende Regulierung bezüglich EMF in Innenräumen von Fahrzeugen unabhängig von der Antriebsart.



7 Literaturverzeichnis

- Ahmad, A., Alam, M. S., & Chabaan, R. (2018). A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(1), 38-63. <https://doi.org/10.1109/tte.2017.2771619>
- Armstrong, R., Dawson, L., Rowell, A. J., Marshman, C. A., & Ruddle, A. R. (2015). The Effect of Fully Electric Vehicles on the Low Frequency Electromagnetic Environment. *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Emc)*, 662-667. WOS:000370282300118
- ASTRA. (2020). *Erläuterungen zum Nachweis der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischen Verträglichkeit von Strassenfahrzeugen und deren Komponenten*. Bundesamt für Strassen (ASTRA)
- BAFU. (2022). *Expositionsmessungen nichtionisierende Strahlung: Jahresbericht 2021 - Projektkonsortium SwissNIS*. BAFU. <https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/71990.pdf>
- BAG. (2016). *Faktenblatt Auto Hybridauto*.: Bundesamt für Gesundheit (BAG)
- Cirimele, V., Diana, M., Freschi, F., & Mitolo, M. (2018). Inductive Power Transfer for Automotive Applications: State-of-the-Art and Future Trends. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54(5), 4069-4079. <https://doi.org/10.1109/tia.2018.2836098>
- Concha, P. M. T., Velez, P., Lafoz, M., & Arribas, J. R. (2016). Passenger Exposure to Magnetic Fields due to the Batteries of an Electric Vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 65(6), 4564-4571. <https://doi.org/10.1109/Tvt.2015.2490105>
- Dong, X., Sun, W., & Lu, M. (2022). Evaluation of electromagnetic fields in human body exposed to inverter of pure electric vehicle. *Radiat Prot Dosimetry*. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncac269>
- EG/1999/519. (1999). *Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz — 300 GHz)*.
- El-Shahat, A., Ayisire, E., Wu, Y., Rahman, M., & Nelms, D. (2019). Electric Vehicles Wireless Power Transfer State-of-the-Art. *Energy Procedia*, 162, 24-37. <https://doi.org/DOI:10.1016/j.egypro.2019.04.004>
- ETA-HTP09. (2004). *Measurement and Evaluation of Magnetic Fields (EMF) and Electromagnetic Radiation (EMI) Generated by Hybrid Electric Vehicles*. Electric Transportation Applications Retrieved from <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/04/f21/http009ra.pdf>
- GB/T37130-2018. (2018). *Measurement Methods for Electromagnetic Fields of Vehicle with Regard to Human Exposure*. National Standard of the People's Republic of China Retrieved from <https://www.chinesestandard.net/PDF.aspx/GBT37130-2018>
- Halgamuge, M. N., Abeyrathne, C. D., & Mendis, P. (2010). Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars. *Radiation Protection Dosimetry*, 141(3), 255-268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
- Harris, L. R., Zhadobov, M., Chahat, N., & Sauleau, R. (2011). Electromagnetic dosimetry for adult and child models within a car: multi-exposure scenarios. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 3(6), 707-715. <https://doi.org/10.1017/S1759078711001000>
- ICNIRP. (2009). Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. *Health Physics*, 94(4), 504-514. <https://doi.org/https://doi.org/10.1097/01.HP.0000343164.27920.4a>
- ICNIRP. (2010). Guidelines for Limiting Exposure to Time-varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz TO 100 kHz). *Health Physics*, 99(6), 818-836. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>
- ICNIRP. (2020). Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz). *Health Physics*, 118(5), 483-524. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000001210>
- IEC-61980-1:2020. (2020). *Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements*. International Electrotechnical Commission
- IEC-TS-62764-1. (2019). *Measurement procedures of magnetic field levels generated by electronic and electrical equipment in the automotive environment with respect to human exposure – Part 1: Low frequency magnetic fields*. International Electrotechnical Commission



- Keller, H. (2017). The Weighted Peak Method in the Time Domain Compared With Alternative Methods for Assessing LF Electric and Magnetic Fields. *Health Phys*, 113(1), 54-65. <https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000667>
- Lin, J., Lu, M., Wu, T., Yang, L., & Wu, T. N. (2018). Evaluating Extremely Low Frequency Magnetic Fields in the Rear Seats of the Electric Vehicles. *Radiation Protection Dosimetry*, 182(2), 190-199. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncy048>
- Liorni, I., Bottauscio, O., Guilizzoni, R., Ankarson, P., Bruna, J., Fallahi, A., Harmon, S., & Zucca, M. (2020). Assessment of Exposure to Electric Vehicle Inductive Power Transfer Systems: Experimental Measurements and Numerical Dosimetry. *Sustainability*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114573>
- Machura, P., & Li, Q. (2019). A critical review on wireless charging for electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 104, 209-234. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.01.027>
- Mahesh, A., Chokkalingam, B., & Mihet-Popa, L. (2021). Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review. *IEEE Access*, 9, 137667-137713. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3116678>
- Paakkonen, R., & Korpinen, L. (2019). Low Frequency Magnetic Fields inside Cars. *Radiation Protection Dosimetry*, 187(2), 268-271. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz248>
- Paniagua, J. M., Rufo, M., Jimenez, A., Antolin, A., & Barbera, J. (2017). Spectral analysis to assess exposure to extremely low frequency magnetic fields in cars. *Science of the Total Environment*, 584, 875-881. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.134>
- Ruddle, A. R. (2022). Effectiveness of Radiofrequency Field Exposure Assessment for Vehicle Occupants Based on Empty Vehicle Field Data and Field Reference Levels. 2022 *International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, 311-316. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope51680.2022.9901294>
- Ruddle, A. R., & Low, L. (2014). Exposures Representative of Traction Current Magnetic Fields in Hybrid and Electric Vehicles - II: Safety Factors Provided by Field Reference Levels. 2014 *International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Emc Europe)*, 354-359. WOS:000364988600066
- Ruddle, A. R., & Low, L. (2015). Feasibility of estimating in-service vehicle occupant exposure to electrical powertrain magnetic fields using non-local magnetic field measurements. 2015 *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (Emc)*, 702-707. WOS:000370282300125
- Schilling, L.-M., Bornkessel, C., & Hein, M. A. (2022). Human RF Electromagnetic Exposure to V2X-Communication. *Advances in Radio Science*, 19, 233-239. <https://doi.org/10.5194/ars-19-233-2022>
- Schmid, G., Überbacher, R., Cecil, S., Petric, B., & Göth, P. (2009). *Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte - Vorhaben 3608S04574* (BfS-RESFOR-21/09).
- Soyka, F. (2020a). Bewertungsverfahren für gepulste magnetische Felder im Vergleich (Teil 1 von 2). *Fachzeitschrift für Sicherheitstechnik, Gesundheitsschutz und menschengerechte Arbeitsgestaltung*(2/2020). <https://doi.org/10.37307/j.2199-7349.2020.02.06>
- Soyka, F. (2020b). Bewertungsverfahren für gepulste magnetische Felder im Vergleich (Teil 2 von 2). *Fachzeitschrift für Sicherheitstechnik, Gesundheitsschutz und menschengerechte Arbeitsgestaltung*(3/2020), 134-138. <https://doi.org/10.37307/j.2199-7349.2020.03.06>
- SR734.5-VEMV. (2015). *Verordnung über die elektromagnetische Verträglichkeit (VEMV)*.
- SR734.26-NEV. (2015). *Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse (NEV)*.
- SR741.41-VTS. (1995). *Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS)*.
- SR784.101.2-FAV. (2015). *Verordnung vom 25. November 2015 über Fernmeldeanlagen (FAV)*.
- SR814.710-NISV. (1999). *Verordnung über den Schutz vor nichtionisierender Strahlung (NISV)*.
- Strahlenschutzkommission. (2019). *Elektromagnetische Felder im Automobil durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren*. <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:101:1-2020030521444889192486>



- Tell, R. A., & Kavet, R. (2016). Electric and Magnetic Fields < 100 Khz in Electric and Gasoline-Powered Vehicles. *Radiation Protection Dosimetry*, 172(4), 541-546.
<https://doi.org/10.1093/rpd/ncv533>
- Tognola, G., Bonato, M., Benini, M., Aerts, S., Gallucci, S., Chiaramello, E., Fiocchi, S., Parazzini, M., Masini, B. M., Joseph, W., Wiart, J., & Ravazzani, P. (2022). Survey of Exposure to RF Electromagnetic Fields in the Connected Car. *IEEE Access*, 10, 47764-47781.
<https://doi.org/10.1109/access.2022.3170035>
- Tognola, G., Masini, B., Gallucci, S., Bonato, M., Fiocchi, S., Chiaramello, E., Parazzini, M., & Ravazzani, P. (2021). Numerical Assessment of RF Human Exposure in Smart Mobility Communications. *Ieee Journal of Electromagnetics Rf and Microwaves in Medicine and Biology*, 5(2), 100-107. <https://doi.org/10.1109/Jerm.2020.3009856>
- Trentadue, G., Zanni, M., & Martini, G. (2020). *JRC Science for Policy Report - Assessment of low frequency magnetic fields in electrified vehicles*. E. C.-J. R. Centre.
- UNECE-10. (2012). *Regelung Nr. 10 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit*.
- UNECE-100. (2015). *Regelung Nr. 100 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb*.
- Vassilev, A., Ferber, A., Wehrmann, C., Pinaud, O., Schilling, M., & Ruddle, A. R. (2015). Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles. *Ieee Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 57(1), 35-43. <https://doi.org/10.1109/Temc.2014.2359687>
- Yang, L., Lu, M., Lin, J., Li, C., Zhang, C., Lai, Z., & Wu, T. (2019). Long-Term Monitoring of Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Electric Vehicles. *Int J Environ Res Public Health*, 16(19).
<https://doi.org/10.3390/ijerph16193765>
- Zhang, X., Zhu, C., & Song, H. (2022). *Wireless Power Transfer Technologies for Electric Vehicles*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-8348-0>