



Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität

Vorhaben 3620S82473

Ergebnisbericht – Teil 2: Elektromagnetische Felder beim
Laden

Seibersdorf Labor GmbH

femu – Forschungszentrum für Elektro-Magnetische
Umweltverträglichkeit

ADAC e.V.

Gernot Schmid
Rene Hirtl
Pia Schneeweiß
Johannes Kainz
Michael Kubocz
Sarah Drießen
Matthias Vogt
Luis Kalb
Dino Silvestro

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz,
Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN) und im Auftrag des Bundesamtes für
Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUKN (Ressortforschungsplan) in Auftrag gegebenen Untersuchungsvorhabens. Verantwortlich für den Inhalt sind allein die Autoren. Das BfS übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Der Auftraggeber behält sich alle Rechte vor. Insbesondere darf dieser Bericht nur mit seiner Zustimmung ganz oder teilweise vervielfältigt werden.

Der Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der des BfS übereinstimmen.

Impressum

Bundesamt für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49
38201 Salzgitter

Tel.: +49 30 18333-0
Fax: +49 30 18333-1885
E-Mail: ePost@bfs.de
De-Mail: epost@bfs.de-mail.de

www.bfs.de

BfS-RESFOR-252/25

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
[urn:nbn:de:0221-2025112157059](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0221-2025112157059)

Salzgitter, November 2025

REPORT

Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität

Ergebnisbericht – Teil 2:

Elektromagnetische Felder beim Laden

Gernot Schmid, Rene Hirtl, Pia Schneeweiß, Johannes Kainz, Michael Kubocz, Sarah Drießen, Matthias Vogt, Luis Kalb, Dino Silvestro

17.09.2025

V1.0

Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität

Ergebnisbericht – Teil 2: Elektromagnetische Felder beim Laden

Auftraggeberin

Bundesrepublik Deutschland
vertreten durch das
Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
Postfach 12 06 29, D-53048 Bonn
vertreten durch die Präsidentin des
Bundesamtes für Strahlenschutz
Postfach 10 01 49, D-38201 Salzgitter

Auftragsnummer: 3620S82473

Gernot Schmid¹, Rene Hirtl¹, Pia Schneeweiß¹, Johannes Kainz^{1,2}, Michael Kubocz², Sarah Drießen², Matthias Vogt³, Luis Kalb³, Dino Silvestro³

¹Seibersdorf Labor GmbH
Geschäftsfeld EMC & Optics
Fachbereich Elektromagnetische Verträglichkeit
A-2444 Seibersdorf

²*femu* – Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit
Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin
Uniklinik RWTH Aachen
D-52074 Aachen

³ADAC e.V.
Technik Zentrum
D-86899 Landsberg am Lech

Dieser Bericht gibt die Auffassung und Meinung des Auftragnehmers wieder und muss nicht mit der Meinung der Auftraggeberin übereinstimmen.

Inhalt

Kurzfassung	7
Abstract	9
1 Einleitung	11
2 Aktuelle Regelungen, Messvorschriften und Empfehlungen mit Relevanz für die Expositionsbeurteilung im Bereich Elektromobilität	12
2.1 Allgemeines	12
2.2 Einordnung der durch Elektromobilität verursachten Magnetfelder im Hinblick auf die 26. BImSchV	12
2.3 Messvorschriften zur Erfassung und Bewertung der Exposition von Personen beim konduktiven Laden	13
2.3.1 Internationales / Europäisches Dokument IEC 62764-1:2022	13
2.3.2 Deutsche VDA-Empfehlung 460-100	16
2.3.3 Chinesischer Standard GB/T 37130-2018	18
2.3.4 Situation in den USA	20
2.3.5 Zusammenfassende Gegenüberstellung	21
2.4 Messvorschriften zur Erfassung und Bewertung der Exposition von Personen beim induktiven Laden	23
2.4.1 Dokumente von IEC	23
2.4.2 US-amerikanisches Dokument SAE J2954	26
3 Prinzipien und relevante Spezifikationen von Messsystemen	28
3.1 Allgemeines	28
3.2 Messprinzipien für niederfrequente Magnetfelder	28
3.3 Erforderliche Eigenschaften für die konkrete Aufgabenstellung	29
3.3.1 Messfrequenzbereich	30
3.3.2 Sensitivität und Aussteuergrenze, Messdynamik	30
3.3.3 Messaufnehmergröße	31
3.3.4 Abtasteigenschaften	32
3.3.5 Erfassung / Bewertung des Zeitsignals	32
3.3.6 Simultane Messung an mehreren Positionen	33
3.4 Vergleichende Diskussion unterschiedlicher Messsysteme	33
3.4.1 Systeme bzw. Geräte mit nur einem isotropen Messkanal	33
3.4.2 Personendosimeter (Exposimeter)	36
3.4.3 Mehrkanal-Messsysteme	37
3.4.4 Gradientenfeldsonde MAGPy (SPEAG)	42
4 Literaturübersicht betreffend Exposition während des Ladens von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen	43
4.1 Methoden für die Literaturrecherche	43
4.2 Arbeiten über Messungen an BEV und/oder PHEV während konduktiver Ladevorgänge	43
4.2.1 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten	43
4.2.2 Zusammenfassung der recherchierten Ergebnisse zum konduktiven Laden	48

4.3	Arbeiten über Messungen an BEV und/oder PHEV an induktiven Ladepunkten	48
5	Markt- und Technik-Übersicht von Ladesystemen	55
5.1	Ladetechnologie von Elektroautos	55
5.1.1	Wechselstrom (AC-) Laden	55
5.1.2	Gleichstrom (DC-) Laden	55
5.2	Kabelgebundene Ladesysteme (konduktives Laden)	56
5.2.1	Ladebetriebsarten	56
5.2.2	Ladeleistungen beim AC-Laden	57
5.2.3	Ladeleistungen beim DC-Laden	58
5.2.4	Normen in Zusammenhang mit dem konduktiven Laden	59
5.2.5	Varianten von Ladesäulen bzw. Ladestationen	60
5.2.6	Gegenwärtige Verbreitung der Ladestationen	62
5.3	Kabellose Ladesysteme (induktives Laden)	63
6	Testmessungen bei konduktiven Ladepunkten	65
7	Systematisch untersuchte Ladepunkte und Fahrzeuge	68
7.1	Konduktive Ladepunkte	68
7.2	Induktive Ladepunkte	69
8	Messmethode	71
8.1	Verwendete Messgeräte	71
8.2	Ablauf der detaillierten Messungen und betrachtete Messpositionen	72
8.2.1	Messungen während des konduktiven Ladens	72
8.2.2	Messungen während des induktiven Ladens	76
8.3	Unsicherheitsbetrachtungen	78
8.3.1	Eingeschränkte Kontrolle über Hintergrundimmissionen verursacht durch die Fahrzeuge und die Umgebung (u_1)	78
8.3.2	Reproduzierbarkeit von B_{PEAK} zufolge Initialzustand des On-Board Ladegerätes (u_2)	80
8.3.3	Positionierungsunsicherheit der Messsonden (u_3)	80
8.3.4	Kalibrierung und Isotropie der Messsonden (u_4)	80
8.3.5	Resultierende Gesamtunsicherheit	81
8.3.6	Repräsentativität der untersuchten Messpositionen	86
9	Ergebnisse für das konduktive Laden	87
9.1	Ergebnisse der Vormessungen zur Ermittlung der Zeitverläufe der Ladestromstärke	87
9.2	Ergebnisse der Detailmessungen	89
9.2.1	Messungen im Lademodus 2 (230 V AC mit In-Line Steuergerät, 2 kW)	89
9.2.2	Messungen im Lademodus 3 (400 V AC, 11 kW Wallbox und 22 kW Ladesäule)	93
9.2.3	Messungen im Lademodus 4 (DC 350 kW und 300 kW Ladesäulen)	104
9.3	Zusammenfassende Diskussion der Messergebnisse	111
9.4	Numerische Berechnungen mit anatomischen Körpermodellen	112
9.4.1	Unsicherheiten der numerischen Berechnungen	115
9.4.2	Ergebnisse der Berechnungen am Fahrersitz des Porsche Taycan	116
9.4.3	Ergebnisse der Berechnungen nahe der Ladebuchse des Audi e-tron	118
9.4.4	Ergebnisse der Berechnungen für das Umfassen des Ladesteckers und des Kabels	120

10 Ergebnisse für das induktive Laden	122
10.1 Messergebnisse	122
10.2 Numerische Berechnungen mit anatomischen Körpermodellen	128
10.2.1 Unsicherheiten der numerischen Berechnungen	130
10.2.2 Ergebnisse der Berechnungen im Fahrzeug	131
10.2.3 Ergebnisse der Berechnungen für Personen außerhalb des Fahrzeugs stehend	133
11 Zusammenfassung und Gesamtdiskussion der Ergebnisse	136
12 Literatur	137

Kurzfassung

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse umfangreicher systematischer Messungen und numerischer Berechnungen im Hinblick auf die Exposition von Personen durch Magnetfelder während des Ladens von Personenfahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen zusammen. Betrachtet wurden dabei sowohl Aufenthaltsbereiche im Inneren von Fahrzeugen sowie außerhalb, in unmittelbarer Nähe der Fahrzeuge bzw. der Ladeinfrastruktur.

Nach einer umfassenden Literaturrecherche und der Optimierung bzw. Entwicklung geeigneter Messmethoden erfolgten systematische Messungen an einer Auswahl von Ladepunkten und rein elektrisch betriebenen Personenfahrzeugen (BEV). Die Auswahl der Fahrzeuge und der Ladepunkte erfolgte im Hinblick auf eine möglichst repräsentative Erfassung der gegenwärtigen Technologien bzw. Ladevorgänge. Bezüglich des konduktiven (kabelgebundenen) Ladens wurden alle gängigen Lademodi untersucht, d. h. AC-Laden an 230 V (Modus 2), AC-Laden an 400 V (Modus 3 an 11 kW Wallbox und 22 kW Ladesäule) sowie DC-Laden an zwei unterschiedlichen Schnellladestationen (Modus 4 an einer 300 kW und einer 350 kW Ladesäule). Bei der Fahrzeugauswahl wurde bewusst auf eine große Streubreite der möglichen Ladeleistungen moderner BEV geachtet. Induktives (kabelloses) Laden konnte mangels bisher nicht erfolgter Verbreitung nur an einer Pilotanlage für das Laden von Taxifahrzeugen untersucht werden.

Die Messungen während des konduktiven Ladens erfolgten für unterschiedliche Fahrzeug-Ladepunkt-Kombinationen und es wurden sowohl beim konduktiven als auch beim induktiven Laden unterschiedliche Batterieladezustände ($< 10\%$ und $> 95\%$) betrachtet. Für ausgewählte Situationen, in denen die Messergebnisse auf die höchsten Immissionswerte oberhalb der von ICNIRP 1998 und 2010 empfohlenen Referenzwerte führten, wurden ergänzende numerische Berechnungen mit anatomischen Körpermodellen durchgeführt und die Ergebnisse mit den jeweiligen Basisgrenzwerten verglichen.

Die Mess- und Berechnungsergebnisse zeigen, dass für die untersuchten Ladetechnologien in üblichen Verhaltensweisen entsprechenden Expositionsszenarien keine Überschreitungen von Basisgrenzwerten für die Allgemeinbevölkerung gemäß den Empfehlungen der ICNIRP 1998 (identisch zu jenen in der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG) und 2010 zu erwarten sind. Dieser Befund deckt sich auch mit der bisher vorliegenden Literatur.

Kleinräumige Überschreitungen der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung sind jedoch sowohl beim konduktiven als auch beim induktiven Laden in üblichen Aufenthaltsbereichen möglich. Im Fall von konduktiven Ladevorgängen wurden diese lokalen Referenzwertüberschreitungen in üblichen Aufenthaltsbereichen (im Fußbereich des Fahrersitzes eines Fahrzeuges) durch transiente Vorgänge mit vergleichsweise hohen Spitzenwerten der magnetischen Flussdichte in der Initiierungsphase der Ladevorgänge verursacht. Direkt am Stecker bzw. am Ladekabel traten bei fast allen untersuchten AC-Ladevorgängen transiente und kleinräumige Referenzwertüberschreitungen ebenfalls in der Initiierungsphase der Ladevorgänge auf. Während der stationären Phase konduktiver Ladevorgänge wurden in üblichen Aufenthaltsbereichen keine Referenzwertüberschreitungen festgestellt. Die Ausschöpfung der Referenzwerte liegt typischerweise im unteren einstelligen Prozentbereich und darunter. Insbesondere beim DC-Laden bleibt die Ausschöpfung der Referenzwerte für Wechselfelder deutlich unter 1% . Lediglich unmittelbar am Ladekabel bzw. am Ladestecker wurden beim AC-Laden in einigen Fällen magnetische Flussdichten geringfügig oberhalb der Referenzwerte auch während der stationären Phase des Ladevorganges beobachtet, nicht jedoch beim DC-Laden. Die beim DC-Laden emittierten

Gleichfelder lagen in allen untersuchten Messpositionen und Phasen der Ladevorgänge deutlich unterhalb ($< 0.2 \%$) des von ICNIRP für die Allgemeinbevölkerung empfohlenen Referenzwertes.

Bei Zugrundelegung des gegenwärtigen Bewertungsparadigmas der ICNIRP stellte sich DC-Laden insgesamt als strahlenschutztechnisch weniger relevant heraus (geringere Expositionsindizes) als AC-Laden, obwohl die Ladeleistungen bei den untersuchten DC-Ladevorgängen höher als bei den untersuchten AC-Ladevorgängen waren.

Im Fall des untersuchten induktiven Ladesystems wurden die maximalen Magnetfeldimmissionen innerhalb und in unmittelbarer Nähe außerhalb des Fahrzeuges durch die stationäre Phase des Ladevorganges bestimmt, es gab keine relevanten Transiente beim Ein- und Ausschalten der 85 kHz Energieübertragung. Einzig am Fahrerplatz des untersuchten Fahrzeuges konnten in der Initialphase Transiente gemessen werden, die, bewertet gemäß den ICNIRP Empfehlungen, im Fußbereich zu etwas größeren Expositionsindizes führten als die Immissionen während des stationären Ladens. In typischen Aufenthaltsbereichen innerhalb des untersuchten Fahrzeuges erreichten die gemessenen Magnetfeldimmissionen lokal den mittleren zweistelligen Prozentbereich des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Außerhalb des Fahrzeuges wurden auf dem Straßenniveau entlang des Fahrzeugumfangs lokal 5- bis 6-fache Überschreitungen des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 festgestellt, die jedoch mit zunehmender Höhe über der Straße schnell abnehmen, sodass es zu keinen Überschreitungen mehr ab ca. 50 cm über dem Straßenniveau kommt. Ergänzende numerische Berechnungen mit anatomischen Körpermodellen zeigten für typische Aufenthaltsbereiche von Personen jedoch keine Überschreitungen von Basisgrenzwerten für die Allgemeinbevölkerung gemäß den Empfehlungen der ICNIRP 1998 und 2010. Dies gilt möglicherweise jedoch nicht für den Raumbereich unterhalb des Fahrzeugbodens, insbesondere in der Nähe der Spulen.

Will man konduktive und induktive Ladesysteme aus strahlenschutztechnischer Sicht vergleichen, so deuten die durchgeführten Messungen und Berechnungen darauf hin, dass konduktives AC-Laden im Hinblick auf kurzzeitig auftretende Expositions-Spitzenwerte und induktives Laden im Hinblick auf die langfristige mittlere Exposition strahlenschutztechnisch relevanter ist. Konduktives DC-Laden erscheint in diesem Vergleich als strahlenschutztechnisch am wenigsten relevant, wenn man die Situation des direkten Umfassens des Ladekabels bzw. des Ladesteckers ausklammert.

Betreffend die Exposition von Personen mit elektronischen Implantaten lassen sich aus den durchgeführten Messungen für die untersuchten Ladesysteme ebenfalls keine Anhaltspunkte für eine Gefährdung aufgrund elektromagnetischer Störbeeinflussung der Implantate ableiten.

Abstract

This report summarizes the results of extensive systematic measurements and numerical calculations with respect to the exposure of persons to magnetic fields during the charging of passenger vehicles with electric drive systems. Both areas inside and outside the vehicles, in the immediate vicinity of the vehicles and of the charging infrastructure were considered.

After a comprehensive literature review and the optimization and development of suitable measurement methods, systematic measurements were carried out at a selection of charging points and purely electrically powered passenger vehicles (BEV). The selection of vehicles and charging points was made in such a way that the current technologies and charging processes are recorded as representatively as possible. Regarding conductive (cable-based) charging, all common charging modes were tested, i.e. AC charging at 230 V (mode 2), AC charging at 400 V (mode 3 at 11 kW wallbox and 22 kW charging station), as well as DC charging at two different fast-charging stations (mode 4 at 300 kW and 350 kW stations). When selecting the vehicle, care was taken to ensure that the range of possible charging capacities of modern BEV was as wide as possible. Due to its lack of widespread use, inductive (wireless) charging could only be examined at a pilot installation for charging taxi vehicles.

Measurements during conductive charging were carried out for different vehicle-to-charging-point combinations and different battery charge states ($< 10\%$ and $> 95\%$) were considered for both, conductive and inductive charging. For situations in which the measurement results led to exposure values above the reference values recommended by ICNIRP in 1998 and 2010, additional numerical calculations with anatomical body models were carried out and the results were compared with the respective basic restrictions.

The measurement and calculation results showed that for the investigated charging technologies in typical exposure scenarios corresponding to common behavior, no exceedances of basic restrictions for the general public according to the ICNIRP 1998 and 2010 recommendations are to be expected. This finding is also consistent with the literature available to date.

However, local exceedances of reference values for the general public are possible with both, conductive and inductive charging in normally accessible areas. In the case of conductive charging, these local exceedances of reference values were caused by transient processes with comparatively high peak values of magnetic flux density in the initiation phase of the charging process. During the stationary conductive charging process, no exceedances of the reference values were detected in the usual occupied area. The utilization of the reference values is typically in the lower single-digit percentage range and below. Particularly with DC charging, the utilization of the reference values typically remains well below 1 %. Only directly at the charging cable or at the charging plug, magnetic flux densities during AC charging were observed that were slightly above the reference values, even during stationary charging, but not during DC charging.

Based on the current ICNIRP evaluation paradigm, DC charging turned out to be less relevant in terms of radiation protection (lower exposure indices) than AC charging.

In the case of the inductive charging system investigated, the maximum magnetic field immissions inside and in the immediate vicinity outside the vehicle are determined by the stationary charging process, no relevant transients when switching the 85 kHz energy transmission on and off could be observed. Only at the driver's seat of the examined vehicle transients in the initial phase were observed, which, evaluated according to the ICNIRP recommendations, led to somewhat larger exposure indices in the foot area than the

immissions during stationary charging. In the typically occupied area inside the examined vehicle, the measured magnetic field immissions locally reached the mid-double-digit percentage range of the reference level for the general public according to ICNIRP 1998. Outside the vehicle, along the vehicle perimeter at street level, local exceedances of 5 to 6 times the reference level for the general public according to ICNIRP 1998 occurred but quickly decreased with increasing height above street level, thus no exceedances from approx. 50 cm above street level could be observed.

When comparing conductive and inductive charging systems from a radiation protection point of view, the measurements and calculations carried out indicate that conductive AC charging is more relevant from a radiation protection point of view with regard to short-term exposure peaks and inductive charging with regard to long-term average exposure.

With regard to the exposure of persons with electronic implants, the measurements carried out for the charging systems examined also do not provide any indications of electromagnetic interference with the implants.

1 Einleitung

Die zunehmende Verbreitung von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen für den Individualverkehr führt zu neuartigen Magnetfeld-Expositionsverhältnissen von Personen, die sich innerhalb bzw. in unmittelbarer Nähe solcher Fahrzeuge befinden. Dabei sind als Magnetfeldquellen nicht nur die Antriebssysteme, Stromspeicher, Hochvoltleitungen und Stromwandler im Fahrzeug selbst, sondern auch die zugehörige Lade-Infrastruktur anzusehen. Um einen aktuellen und repräsentativen Überblick über die Magnetfeldexposition der Allgemeinbevölkerung in Deutschland durch Fahrzeuge für den Individualverkehr mit elektrischen Antriebssystemen sowie durch die zugehörige Ladeinfrastruktur zu erlangen, wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens zunächst der aktuelle Kenntnisstand aufgearbeitet und zusammengefasst, gefolgt von umfangreichen systematischen Messkampagnen an einer repräsentativen und marktrelevanten Stichprobe von Fahrzeugen und Ladepunkten. Immissionsbeiträge anderer (auch in konventionell, ausschließlich mit einem Verbrennungsmotor angetriebenen Fahrzeugen vorkommender) Quellen wurden dabei separat erfasst. Den gewonnenen Messergebnissen wurden Daten aus einschlägigen früheren Arbeiten und in elektrisch angetriebenen, öffentlichen Verkehrsmitteln gemessenen Werten gegenübergestellt. Darauf aufbauend wurden Empfehlungen für die Standardisierung der Expositionsbeurteilung in Zusammenhang mit Magnetfeldern der Elektromobilität gegeben.

Der Ergebnisbericht zu diesem Forschungsvorhaben besteht aus zwei Teilen. Der vorliegende Teil 2 des Ergebnisberichts knüpft direkt an Teil 1 (Exposition beim Fahren) an (Schmid et al., 2025) und fasst die Ergebnisse bezüglich der Exposition während des Ladens von Fahrzeugen bei Fahrzeugstillstand zusammen.

Im Hinblick auf die Unterscheidung verschiedener Fahrzeuge mit elektrischen Antriebssystemen gelten in diesem Bericht die folgenden Begriffsdefinitionen:

„**BEV**“: zweispurige batteriebetriebene Personenkraftfahrzeuge mit ausschließlich elektrischem Antriebssystem für den Straßenverkehr

„**PHEV**“ oder „**Plug-In Hybride**“: zweispurige Personenkraftfahrzeuge für den Straßenverkehr mit kombiniertem Antriebssystem aus Verbrennungs- und Elektromotor(en) und externer Lademöglichkeit der Hochvoltbatterie

„**HEV**“: zweispurige Personenkraftfahrzeuge für den Straßenverkehr mit kombiniertem Antriebssystem aus Verbrennungs- und Elektromotor(en), ohne externer Lademöglichkeit der Hochvoltbatterie für den elektrischen Antriebsstrang. HEV beinhalten sowohl Vollhybrid- als auch Mildhybrid-Fahrzeuge¹.

„**Elektroautos**“: Oberbegriff für BEV, PHEV und HEV

¹ Mildhybrid-Fahrzeuge haben im Vergleich zu Vollhybrid-Fahrzeugen nur einen kleinen elektrischen Antriebsmotor (in den meisten Fällen in Form eines kombinierten Startermotor/-generators ausgeführt), der beim Beschleunigen den Verbrennungsmotor unterstützt bzw. beim Bremsen Energie in die (ebenfalls vergleichsweise kleine) Batterie rückspeist. Ein rein elektrisches Fahren ist, im Gegensatz zum Vollhybrid, beim Mildhybrid nicht möglich.

2 Aktuelle Regelungen, Messvorschriften und Empfehlungen mit Relevanz für die Expositionsbeurteilung im Bereich Elektromobilität

2.1 Allgemeines

Entsprechend des relativ jungen Alters von elektrisch betriebenen Fahrzeugen für den Individualverkehr existieren zurzeit nur sehr wenige Dokumente, die sich konkret mit der Erfassung und Begrenzung von elektromagnetischen Feldern, verursacht durch solche Fahrzeuge (BEV, HEV und PHEV) bzw. durch die dafür erforderliche Ladeinfrastruktur befassen. In diesem Abschnitt wird versucht, die relevanten Inhalte der wenigen vorliegenden Dokumente mit Bezugnahme zu Expositionen beim Laden zusammenzufassen und, soweit möglich, systematisch zu vergleichen.

2.2 Einordnung der durch Elektromobilität verursachten Magnetfelder im Hinblick auf die 26. BImSchV

Die 26. BImSchV (Bundesimmissionsschutzverordnung) (BMU, 2013) legt in Deutschland gesetzliche Grenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder, verursacht durch ortsfeste Hochfrequenzanlagen (9 kHz – 300 GHz, EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) ≥ 10 W), ortsfeste Niederfrequenzanlagen zur Umspannung und Fortleitung von Elektrizität (1 Hz – 9 kHz, Nennspannung ≥ 1000 V) und Gleichstromanlagen zur Fortleitung, Umspannung und Umrichtung von Gleichstrom (Nennspannung ≥ 2000 V) fest.

Schon wegen des offensichtlichen Fehlens des Merkmals der Ortsfestigkeit ist offenkundig, dass die von elektrisch betriebenen Fahrzeugen verursachten magnetischen Felder nicht in den Anwendungsbereich der 26. BImSchV fallen. Wie bereits in einer einschlägigen Empfehlung der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK, 2019) ausgeführt, ist nicht eindeutig geklärt, ob BEV bzw. PHEV, die zum Zweck der Batterieaufladung an das öffentliche Energieversorgungsnetz angeschlossen werden können, in den Anwendungsbereich der EU-Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU (EU, 2014) fallen und damit in Deutschland die entsprechende Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz anwendbar ist. Gemäß der genannten Empfehlung der SSK ist davon auszugehen, dass die sich aus 2014/35/EU und der entsprechenden Verordnung ergebenden EMF-Anforderungen in diesem Zusammenhang gegenwärtig in der Praxis keine Anwendung finden (SSK, 2019).

Wie Elektroautos liegen auch Ladepunkte (Ladesäulen) für das kabelgebundene Laden nicht im Anwendungsbereich der 26. BImSchV, da letztere zwar ortsfest sind, aber typischerweise aus dem Niederspannungsnetz (≤ 1000 V) gespeist werden. Allerdings fallen Ladesäulen in den Anwendungsbereich der EU-Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU, in deren zugehöriger Liste harmonisierter Normen grundlegende, EMF-relevante Dokumente (z. B. EN 62311:2008²) enthalten sind. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass für am deutschen Markt angebotene Ladesäulen eine EMF-Bewertung durchgeführt wurde. Da

² Die Norm EN 62311:2008 legt nur sehr allgemeine, geräteunabhängige Vorgaben im Hinblick auf Mess- und Expositionsbewertungsverfahren fest. Im Hinblick auf die Bewertung der Exposition durch konkrete Geräte bzw. Einrichtungen wird lediglich darauf verwiesen, dass ein Bewertungsfahren verwendet werden muss, das zur Bewertung der zu bewertenden Expositionsgröße geeignet ist. Konkrete Mess- und Bewertungungsverfahren für Immissionen, die während des Ladens von Elektroautos auftreten, werden in Kapitel 2.3 und 2.4 diskutiert.

jedoch keine einschlägige Produktnorm existiert, die verbindlich die Einhaltung konkreter Limits vorgibt (in Europa fordern andere EMF-relevante Produktnormen gegenwärtig die Einhaltung der Referenz- bzw. Basisgrenzwerte gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG (Europäische Gemeinschaft, 1999), die im Wesentlichen jenen in ICNIRP 1998 (ICNIRP, 1998) entsprechen), bleibt die Frage offen, welche Limits bei der Bewertung dieser bereits installierten Ladesäulen zugrunde gelegt wurden (EN 62311:2008³ fordert keine konkreten Limits, sondern verweist lediglich auf ICNIRP 1998 und die EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG).

Im Hinblick auf induktive (kontaktlose) Ladesysteme (Übertragungsfrequenz typischerweise 85 kHz) erscheint die Situation gegenwärtig ähnlich ungeklärt. Obwohl derartige Ladestationen als ortsfeste Anlagen anzusehen sind, gelten weder die Grenzwerte der 26. BImSchV für Niederfrequenzanlagen (Nennspannung bislang bekannter Konzepte induktiver Ladestationen ist niedriger als die im Anwendungsbereich der Verordnung festgelegte minimale Nennspannung von 1000 V), noch jene für Hochfrequenzanlagen, da diese nur in den Anwendungsbereich der 26. BImSchV fallen, wenn die EIRP ≥ 10 W beträgt. Ganz offensichtlich wurde bei der Festlegung des EIRP-Kriteriums in der 26. BImSchV der Fokus ausschließlich auf Systeme/Anlagen zur Funkkommunikation mittels elektromagnetischer Wellenausbreitung gelegt. Dieses Kriterium ist auf induktive Ladesysteme nicht sinnvoll anwendbar und die tatsächlich von induktiven Ladesystemen erzeugte EIRP ist vernachlässigbar (siehe auch (SSK, 2019)).

Allerdings sind auch induktive Ladesysteme im Anwendungsbereich der EU-Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU anzusiedeln und es gilt diesbezüglich daher auch das oben für kabelgebundene Ladesysteme Gesagte.

2.3 Messvorschriften zur Erfassung und Bewertung der Exposition von Personen beim induktiven Laden

2.3.1 Internationales / Europäisches Dokument IEC 62764-1:2022

Die Norm IEC 62764-1:2022 *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 62764-1, 2022) beschreibt Messmethoden zur Erfassung der niederfrequenten (1 Hz – 400 kHz) magnetischen Felder im Inneren von Kraftfahrzeugen der Kategorien M1 (Fahrzeuge zur Personenbeförderung mit bis zu 9 Sitzplätzen inkl. Fahrersitz) und N1 (Fahrzeuge zur Güterbeförderung mit einer zulässigen Gesamtmasse bis zu 3.5 Tonnen). Der Anwendungsbereich beschränkt sich also nicht auf BEV, HEV und PHEV, sondern umfasst Fahrzeuge unabhängig von deren Antriebstechnik. Es werden Messverfahren zur Bestimmung der Felder im Stillstand, beim Fahren und beim kabelgebundenen Laden beschrieben. Der Ursprung dieses Dokuments ist offensichtlich die erstmals im Jahr 2019 publizierte IEC Technical Specification IEC TS 62764 (IEC TS 62764-1, 2019)⁴. Dieses Dokument wurde inhaltlich nahezu identisch im August 2021 auf CENELEC-Ebene als Normentwurf prEN IEC 62764-1:2021 zur Abstimmung vorgelegt und mit 9 zu 3 Stimmen (bei 22 Stimmenthaltungen, darunter auch Deutschland)

³ Die aktuelle Version der Norm (EN IEC 62311:2020) verweist zusätzlich auch auf die Empfehlungen der ICNIRP aus 2010 (ICNIRP, 2010), ist jedoch gegenwärtig nicht im Amtsblatt der EU in der Liste der harmonisierten Normen gelistet.

⁴ Der Inhalt von IEC TS 62764-1 sollte ursprünglich als Norm erscheinen, der entsprechende Entwurf wurde jedoch im Jahr 2015 mehrheitlich abgelehnt.

angenommen und 2022 schließlich als gültige Norm publiziert. Das genannte Abstimmungsergebnis erscheint teilweise überraschend, da angesichts der Aktualität des Themas Elektromobilität eine geringere Anzahl von Stimmenthaltungen erwartet werden konnte. Zusätzlich weisen die von den ablehnenden nationalen Gremien (und auch eines nationalen Gremiums, das sich der Stimme enthalten hat) abgegebenen Kommentare auf eindeutige technische Probleme des Dokuments im Hinblick auf eine umfassende und zuverlässige Expositionsbewertung hin.

In IEC 62764-1:2022 wird 1 Hz – 400 kHz als abzudeckender Frequenzbereich festgelegt. Beachtenswert dabei ist jedoch die explizite Aussparung der Bewertung von transienten Vorgängen mit einer Dauer von weniger als 200 ms. Legt man das im Rahmen der europäischen EMF-Bewertung übliche Bewertungsparadigma von ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 im Hinblick auf nicht-thermische, über Nerven- oder Muskelzellreizungen vermittelte Effekte im Niederfrequenzbereich zugrunde, bei dem keine Zeitmittelwertbildung vor der Bewertung vorgesehen ist, muss daher allein schon aus diesem Grunde IEC 62764-1:2022 als untauglich für eine umfassende und zuverlässige Expositionsbewertung angesehen werden, zumal Messdaten aus früheren Untersuchungen klar darauf hindeuten, dass die maximalen magnetischen Flussdichten in Kraftfahrzeugen oftmals durch transiente Vorgänge verursacht werden (Schmid et al., 2009).

Die zu untersuchenden Raumbereiche werden in IEC 62764-1:2022 in Abbildung 2.1 beschrieben, wobei die Abbildung definitionsgemäß nur als Beispiel dienen soll. Die Entscheidung, welche Raumbereiche schließlich in die Bewertung einfließen, obliegt dem Hersteller basierend auf den konkreten Gegebenheiten. Die Volumina A, B und C repräsentieren die für die Körper des/der Fahrenden und des/der Beifahrenden zugänglichen Bereiche (zusätzlich Volumen G für die Arme), D, E und F jene für die Körper von Personen auf der Rückbank. Schließlich werden zusätzlich die Volumina H und I für den „Motorraum“ vorne bzw. den Kofferraum festgelegt. Alle höhenverstellbaren Sitze sollen grundsätzlich auf die tiefstmögliche Position und die Rückenlehne mit ca. 15° Neigung eingestellt sein. Die Horizontalposition der Sitze aller vorderen Sitzreihen soll sich in Mittelstellung, die der hintersten Sitzreihe möglichst weit hinten befinden. Die Position der Kopfstütze wird mit „fully back“ festgelegt.

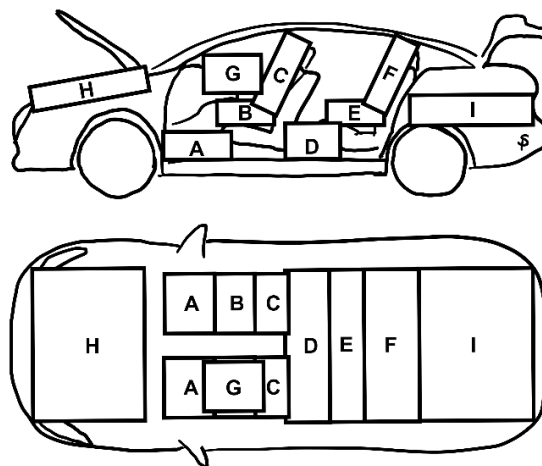


Abbildung 2.1: Beispiele für messtechnisch zu untersuchenden Volumina im Inneren von Fahrzeugen gemäß den Festlegungen in IEC 62764-1:2022.

Zusätzlich sollen Messungen außerhalb des Fahrzeuges im Stillstand „... *around the outside of the vehicle in all areas accessible to parts of the human body* ...“ durchgeführt werden.

Für Immissionsmessungen während des Fahrens soll gemäß IEC 62764-1:2022 eine konstante Geschwindigkeit von 40 ± 8 km/h gewählt werden. Messungen während des Beschleunigens und Bremsens sind gemäß IEC 62764-1:2022 nur in jenen Punkten durchzuführen, in denen die Messungen während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit die maximale Exposition zeigten. Als Betriebsbedingungen werden dafür das Beschleunigen von 0 bis 90 km/h bzw. das Bremsen von 90 bis 0 km/h mit einer Beschleunigung von 2.5 m/s^2 bzw. -2.5 m/s^2 festgelegt.

Bezüglich der zu verwendenden Messtechnik wird allgemein auf IEC 61786-1 (IEC 61786-1, 2013) verwiesen und konkret ein isotroper Messaufnehmer mit 100 cm^2 Querschnitt spezifiziert, wobei ein Mindestabstand von 20 cm (vom Zentrum des Messaufnehmers) zu allen Oberflächen des Fahrzeugs bei allen Messungen einzuhalten ist. Ausgenommen sind die Oberflächen der Sitze, bei denen ein Messabstand von 6.5 cm (vom Zentrum des Messaufnehmers) verwendet werden soll, was dem Aufliegen einer typischen Messsonde mit kreisförmigen 100 cm^2 Messaufnehmern auf der Sitzoberfläche entspricht. Begründet wird die Festlegung eines Mindestabstandes von 20 cm mit der zunehmenden Messunsicherheit, wenn man sich mit dem 100 cm^2 Messaufnehmer einer lokalen Magnetfeldquelle nähert⁵. Zusätzlich wird im Anhang E von IEC 62764-1:2022 der Versuch unternommen, die oben genannten Messabstände auf Basis von numerischen Berechnungen zu rechtfertigen. Betrachtet wird dabei die Situation einer Person am Fahrerplatz eines Fahrzeugs, wobei im Fahrzeugboden ein gestreckter stromführender Leiter (etwa mittig zwischen linkem und rechtem Fuß) und im Bereich oberhalb der Füße eine lokale Magnetfeldquelle (kleiner Elektromotor) angenommen wird. Berechnet werden die magnetischen Feldstärken H_m 20 cm über dem Fahrzeugboden bzw. in 20 cm Distanz zum Elektromotor und die in einem anatomischen Körpermodell zufolge der genannten Quellen induzierten Stromdichten J_m und elektrischen Feldstärken E_m (jeweils 99. Perzentil). Die Berechnungsergebnisse für H_m , J_m und E_m werden schließlich ins Verhältnis zu den jeweiligen Referenzwerten H_L bzw. Basisgrenzwerten J_b und E_b gesetzt. Aus der Tatsache, dass die Verhältnisse J_m/J_b bzw. E_m/E_b jeweils kleiner sind als H_m/H_L wird geschlossen, dass eine Messung der magnetischen Feldstärke in 20 cm Distanz zur Oberfläche des Fahrzeugs einer konservativen Expositionserfassung gleichkommt. Dieser Vorgehensweise bzw. Schlussfolgerung sind aufgrund der getroffenen Modellannahmen allerdings einige Argumente entgegenzuhalten:

- Die Verwendung des 99. Perzentils bei der Bewertung der körperinternen dosimetrischen Größen führt im Fall von stark lokalisierten Expositionen zu systematischen Unterbewertungen (Chen et al., 2013; Diao et al., 2023; Gomez-Tames et al., 2018; Laakso und Hirata, 2012; Schmid und Hirtl, 2016).
- Es wird nur eine einzige Körperhaltung des anatomischen Körpermodells betrachtet, bei dem die Füße nicht flach am Fahrzeugboden und auch nicht direkt über dem

⁵ Grundsätzlich ist es korrekt, dass die Messunsicherheit zunimmt, wenn man sich mit Messaufnehmern endlicher Größe an lokale Magnetfeldquellen annähert. Die naheliegendste und typischerweise praktizierte Gegenmaßnahme zur Verringerung dieses Messunsicherheitsbeitrages ist die Verwendung von entsprechend kleineren Messaufnehmern. Wird dies nicht gemacht, sollte die entsprechende Messunsicherheit quantifiziert und bei der Expositionsbewertung berücksichtigt werden. Die in IEC 62764 1:2022 festgelegte Vorgehensweise, nämlich an Positionen, an denen hohe Immissionswerte zu erwarten und die für Körperteile von Personen zugänglich sind (z. B. unmittelbar über dem Fahrzeugboden im Fußbereich) einfach keine Messungen durchzuführen, ist aus strahlenschutztechnischer Sicht fragwürdig, sofern nicht stichhaltig gezeigt werden kann, dass Expositionen oberhalb der Basisgrenzwerte in dort befindlichen Körperteilen ausgeschlossen werden können.

stromführenden Leiter positioniert sind, was keinesfalls die Situation maximaler Einkopplung in die Füße repräsentiert.

- Die in der betrachteten Situation vorherrschenden Expositionsverhältnisse können nicht als repräsentativ angesehen werden. Ergebnisse aus Arbeiten mit systematischeren Modellansätzen zeigen, dass Messungen in 20 cm Distanz zu lokalen Magnetfeldquellen und der Vergleich mit den Referenzwerten nicht zwingend konservativ im Hinblick auf die Einhaltung der Basisgrenzwerte sind (Hirtl et al., 2019; Schmid, 2018).

In IEC 62764-1:2022 werden auch Messungen während des kabelgebundenen Ladens beschrieben, bei denen der Ladezustand der Batterie zu Beginn der Ladung weniger als 20 % betragen soll. Neben Messungen im Inneren des Fahrzeuges (siehe oben) sollen dabei auch Messungen nahe der Ladebuchse und entlang des Ladekabels innerhalb der ersten 50 cm (gemessen von der Ladebuchse am Fahrzeug aus) durchgeführt werden.

Hinsichtlich der Expositionsbewertung wird in IEC 62764-1:2022 angeführt, dass im Fall einer Überschreitung der Referenzwerte weitere Untersuchungen im Hinblick auf die Basisgrenzwerte erforderlich sein können.

Bezüglich einer Bewertungsgrundlage (Dokument mit Referenz- und/oder Basisgrenzwerten) trifft IEC 62764-1:2022 keine konkrete Festlegung, sondern verweist in Anmerkungen auf einen Abschnitt im Literaturverzeichnis, in dem die EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG, die Arbeitnehmerschutzrichtlinie 2013/35/EU, aktuelle ICNIRP-Empfehlungen und der Standard IEEE C95.1-2019 aufgelistet sind.

Zusammenfassend erscheint als Ziel von IEC 62764-1:2022 weniger eine umfassende und zuverlässige Expositionsbewertung, sondern vielmehr die Festlegung einer standardisierten Messmethode, die zu vergleichbaren Ergebnissen führt, wobei vor allem einfach herzustellenden Prüfbedingungen und weniger der Erfassung der maximal auftretenden magnetischen Flussdichte bei den Festlegungen Priorität eingeräumt wurde.

Aus strahlenschutztechnischer Sicht ist dieses Dokument im Hinblick auf eine repräsentative und zuverlässige Bewertung der magnetischen Felder daher als unzureichend einzustufen.

2.3.2 Deutsche VDA-Empfehlung 460-100

Dieses im März 2021 vom Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) veröffentlichte Dokument (VDA, 2021) formuliert eine *Bewertungsempfehlung für den Personenschutz gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern im Kraftfahrzeug*. Das Dokument verweist auf IEC TS 62764:2019, trifft aber teilweise etwas davon abweichende Festlegungen. Beispielsweise wird der relevante Frequenzbereich mit 1 Hz – 100 kHz festgelegt und als zu untersuchende Betriebszustände werden ausschließlich das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei 40 (± 8) km/h und das kabelgebundene Laden festgelegt. In Einklang mit IEC 62764-1:2022 wird der Anwendungsbereich auf die Fahrzeugkategorien M1 und N1 (siehe oben) eingeschränkt und es sind, wie auch bei IEC 62764-1:2022, Bewertungen von transienten Vorgängen, von Hochfrequenzimmissionen zufolge aktiver Funksysteme, von Immissionen durch induktive Ladesysteme (sowohl für BEV als auch für Mobiltelefone) sowie eine Bewertung im Hinblick auf aktive medizinische Implantate nicht vom Anwendungsbereich der Empfehlung abgedeckt. Ebenso wird, identisch zu IEC 62764-1:2022, ein Mindestabstand von 20 cm (vom Zentrum des 100 cm² Messaufnehmers) zu allen Oberflächen des Fahrzeugs spezifiziert. Allerdings wird in der VDA-Empfehlung pauschal die Verwendung eines

Abstandhalters festgelegt, der einen Mindestabstand von 20 cm zum Messsondenmittelpunkt sicherstellt. Mangels anderslautender Informationen in der VDA-Empfehlung ist daher davon auszugehen, dass dieser Abstandhalter, im Unterschied zu IEC 62764-1:2022, auch bei den Messungen entlang der Sitzoberfläche zu verwenden ist.

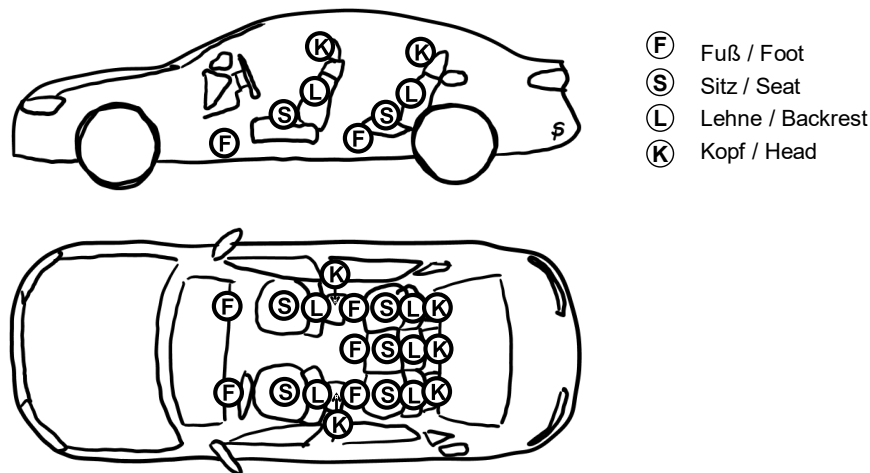


Abbildung 2.2: Zu untersuchende Messpositionen im Fahrzeuginnenraum gemäß den Festlegungen in der VDA-Empfehlung 460-100.

Bezüglich der zu untersuchenden Messpositionen werden in der VDA-Empfehlung 460-100 pro Sitzplatz konkret drei Punkte im Bereich der Sitze (Sitzfläche, Rückenlehne, Kopf) und ein Punkt im Fußbereich, jeweils in Projektion der Sitz-Mittelachse festgelegt (Abbildung 2.2). Die beim Laden zu betrachtenden Messpositionen und Batterieladezustände sind in der VDA-Empfehlung etwas detaillierter spezifiziert als in IEC 62764-1:2022 (Abbildung 2.3). Beispielsweise wird in der VDA-Empfehlung konkret auch die Lage der beim AC-Laden (in Ladebetriebsart 2, siehe Kapitel 5.2.1) vorhandenen Kabelkontrollbox (ICCPD) während der Messungen definiert. Zusätzlich wird auch festgelegt, dass sich der Ladezustand der Batterie während der Messungen im Bereich zwischen 20 % (maximal 21 %) und 80 % befinden soll und der Ladestrom während der Messungen im Bereich zwischen 80 % und 100 % des maximal möglichen Ladestroms liegen muss.

Im Gegensatz zu IEC 62764-1:2022 legt die VDA-Empfehlung 460-100 eine konkret anzuwendende Bewertungsmethode für die magnetischen Felder fest, nämlich die „Weighted Peak Methode“ (WPM, siehe entsprechende Literatur (ICNIRP, 2003; Keller, 2017; Schmid et al., 2019a)) basierend auf den Referenzwerten für die Allgemeinbevölkerung aus den ICNIRP 2010 Empfehlungen.

Hinsichtlich der abschließenden Expositionsbewertung wird in VDE angeführt, dass im Fall einer Überschreitung der Referenzwerte weitere Untersuchungen im Hinblick auf die Basisgrenzwerte gemäß den ICNIRP 2010 Empfehlungen erforderlich sind und dass das geprüfte Fahrzeug als konform gilt, wenn entweder die Bewertung auf Grundlage der Referenzwerte oder die Bewertung auf Grundlage der Basisgrenzwerte einen Ausschöpfungsgrad (Expositionsindex) von kleiner als 100 % liefert.

Aus ähnlichen Gründen wie am Ende des voranstehenden Kapitels angeführt, kann auch die VDA-Empfehlung 460-100 nicht als zielführend für eine repräsentative und zuverlässige strahlenschutztechnische Bewertung der magnetischen Felder angesehen werden, obwohl

dies der Titel des Dokuments suggeriert. Anders als in IEC 62764-1:2022 wird kein Zeitkriterium für transiente Vorgänge spezifiziert, die nicht bewertet werden müssen, allerdings kommt bei der VDA-Empfehlung erschwerend hinzu, dass Messungen während des Beschleunigens und Bremsens überhaupt nicht vorgesehen sind.

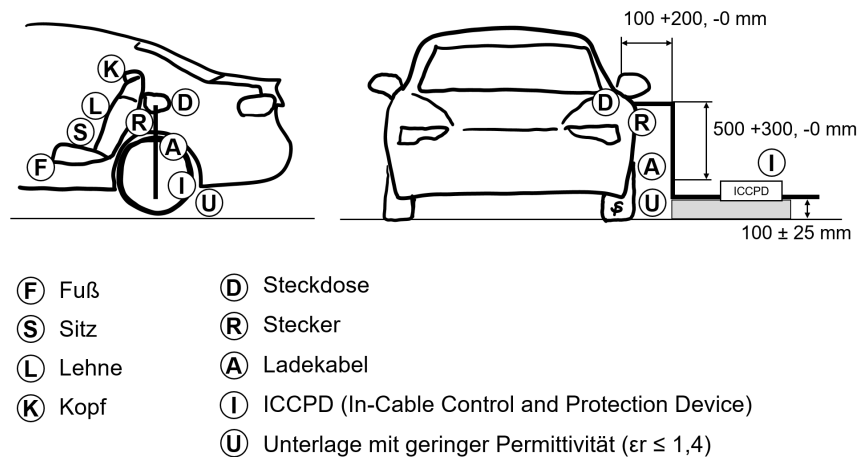


Abbildung 2.3: Zu untersuchende Messpositionen beim Laden gemäß den Festlegungen in der VDA-Empfehlung 460-100.

2.3.3 Chinesischer Standard GB/T 37130-2018

Der chinesische Standard GB/T 37130-2018 (GB/T, 2018) beschreibt ebenfalls Messmethoden zur Erfassung elektromagnetischer Felder von Fahrzeugen im Hinblick auf die Exposition von Personen. Im Gegensatz zu IEC 62764-1:2022 und zur VDA-Empfehlung 460-100 ist die Gruppe der vom Anwendungsbereich eingeschlossenen Fahrzeugkategorien mit L (leichte zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge), M (zur Personenbeförderung ausgelegte und gebaute Kraftfahrzeuge mit mindestens vier Rädern) und N (Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung mit mindestens vier Rädern und Kraftfahrzeuge zur Güterbeförderung mit drei Rädern und einer zulässigen Gesamtmasse über 1 Tonne) deutlich weiter gefasst. Der zu betrachtende Frequenzbereich wird mit 10 Hz – 400 kHz festgelegt. Als Anforderung an die Größe des Messaufnehmers wird ein maximaler Außendurchmesser von 13 cm spezifiziert. In ähnlicher Weise wie in IEC 62764-1:2022 und in der VDA-Empfehlung 460-100 werden sich nicht wiederholende transiente Vorgänge von der Erfassung bzw. Bewertung explizit ausgeschlossen, wobei in GB/T 37130-2018 keine konkreten Zeitkriterien angeführt werden, sondern es allgemein heißt: „*The measurement in this standard is applicable to long-term disturbance sources (such as front wiper motor and warm air motor). It is not applicable to short-term disturbance sources (electric rearview mirror, electric window, electric horn and hazard warning lamp).*“ Weiters wird in GB/T 37130-2018 konkret festgelegt, dass nur solche Magnetfeldquellen berücksichtigt werden müssen, die für mehr als 60 s kontinuierlich in Betrieb genommen werden können. Die zu untersuchenden Messpositionen werden konkret für den jeweiligen Sitz- (Sitzfläche, Rückenlehne, Kopfstütze, jeweils in der Mittelachse des Sitzes) und Fußbereich (vier Messpositionen pro Sitz) festgelegt (Abbildung 2.4). Die geforderte Einstellung der Sitze (Horizontal- und Vertikalposition sowie Neigungswinkel der Rückenlehne) ist identisch mit den Vorgaben in IEC 62764-1:2022.

In Fahrzeugen der Kategorie M1 (Personenkraftwagen mit bis zu maximal 9 Sitzplätzen, inkl. Fahrerplatz) sind gemäß GB/T 37130-2018 Messungen an allen Sitzplätzen sowie im Bereich zwischen Fahrer- und Beifahrersitz durchzuführen, wobei für diesen Bereich keine konkreten Messpositionen festgelegt sind. Für Fahrzeuge der Kategorien M2 (Kleinbusse), M3 (Omnibusse) und N (Fahrzeuge zur Güterbeförderung) werden zusätzlich zu Festlegungen für den Fahrerplatz weitere Messpositionen spezifiziert, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

Eine Vorgabe bezüglich eines einzuhaltenden Mindestabstandes des Messaufnehmers zu allen Oberflächen des Fahrzeugs findet sich in GB/T 37130-2018 nicht.

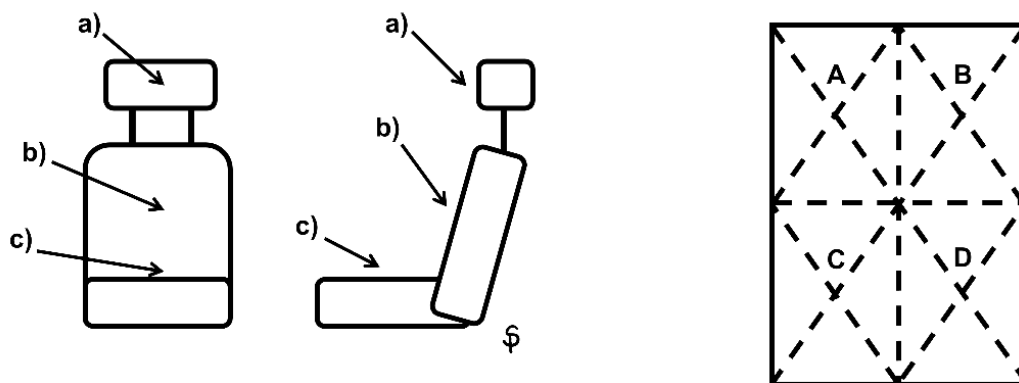


Abbildung 2.4: Definition der Messpositionen a) – c) entlang der Fahrzeugsitze (links) und der Messpositionen A - D im Fußraum (rechts) gemäß den Festlegungen in GB/T 37130-2018.

Bezüglich der Bewertung der Messergebnisse werden in GB/T 37130-2018 konkret drei Alternativen für die anzuwendenden Feldstärke- bzw. Flussdichte-Referenzwerte angeführt:

- Chinesischer Standard GB 8702-2014 (GB, 2014)
- ICNIRP Empfehlungen 1998 (Allgemeinbevölkerung) (ICNIRP, 1998)
- ICNIRP Empfehlungen 2010 (Allgemeinbevölkerung) (ICNIRP, 2010)

Die während des induktiven Ladens zu betrachtenden Messpositionen im Inneren des Fahrzeugs entsprechen jenen, die auch während des Fahrens zu untersuchen sind (siehe oben). Bezüglich der Messpositionen außerhalb des Fahrzeugs, die während des induktiven Ladens untersucht werden müssen, sind die Festlegungen identisch mit jenen in IEC 62764-1:2022.

Abbildung 2.5 zeigt einen grafischen Vergleich der Referenzwerte, die in GB/T 37130-2018 als alternative Bewertungsgrundlagen angeführt sind. Zur Information wurden in der Grafik zusätzlich auch die entsprechenden Referenzwerte (exposure reference levels for unrestricted environment) gemäß IEEE C95.1:2019 (IEEE C95.1-2019, 2019) dargestellt. Demnach sind die Referenzwerte für die magnetische Flussdichte gemäß dem chinesischen Standard GB 8702-2014 im Frequenzbereich oberhalb von 800 Hz deutlich restriktiver als die der anderen Dokumente.

Bei Verwendung von GB 8702-2014 als Bewertungsgrundlage fordert GB/T 37130-2018 die Bewertung im Frequenzbereich (Multifrequenzregel MFR, identisch zu ICNIRP in GB 8702-2014 definiert), bei Verwendung von ICNIRP 1998 oder ICNIRP 2010 wird die Bewertung auf Basis der Weighted Peak Methode im Zeitbereich (WPM-TD, siehe entsprechende Literatur (ICNIRP, 2003; Keller, 2017; Schmid et al., 2019a)) gefordert. Die

Forderung, bei Anwendung von GB 8702-2014 auf die MFR anstatt auf die WPM-TD zurückzugreifen, hat dabei wohl messgerätetechnische Gründe, da die sehr niedrigen Referenzwerte oberhalb von ca. 10 kHz bei einer WPM-TD-Bewertung zu einem verhältnismäßig hohen Rauschanteil im bewerteten Messergebnis (in % vom Referenzwert) führen würden⁶.

Die während der Immissionsmessungen zu betrachtenden Fahrzeugzustände (Geschwindigkeiten, Beschleunigungswerte, Batterieladezustände) entsprechen den Festlegungen in IEC 62764-1:2022.

Für die Zulassung eines Fahrzeugs in China ist die Übereinstimmung mit den Referenzwerten gemäß GB 8702-2014 erforderlich, die vom nationalen *Automotive Engineering Research Institute* (<https://www.chinaaeri.com/>) überprüft wird.

2.3.4 Situation in den USA

Seitens der US-amerikanischen Society of Automotive Engineers (SAE) existieren zwar einige wenige technische Publikationen zum Thema Magnetfelder in Elektrofahrzeugen, es konnte aber kein Dokument mit konkreten Messvorschriften für die Erfassung der Exposition von Personen während des Fahrens oder während des kabelgebundenen Ladens gefunden werden, wohl aber zum Thema der Exposition beim induktiven Laden (Kapitel 2.4). Auch ergab die durchgeführte Recherche keine Hinweise für allgemeine gesetzliche Regelungen betreffend die Exposition von Personen in niederfrequenten magnetischen Feldern, ausgenommen einiger Limits, speziell für Hochspannungsleitungen in einigen wenigen Bundesstaaten. Ebenso konnten keine diesbezüglichen gesetzlichen Anforderungen speziell für Fahrzeuge mit Elektroantrieb gefunden werden. Die in IEEE C95.1:2019 festgelegten Dosimetric Reference Levels (DRLs) und Exposure Reference Levels (ERLs) werden als Stand der Technik angesehen. Die im Vergleich zu den ICNIRP Empfehlungen und dem chinesischen Standard GB 8702-2014 deutlich höheren Referenzwerte im relevanten Frequenzbereich in IEEE C95.1:2019 (Abbildung 2.5) und die damit zusammenhängende Erkenntnis, dass die bisher publizierten Werte der magnetische Flussdichten beim Fahren in den Fahrzeugen und während des kabelgebundenen Ladens dadurch nur weit unterhalb von 1 % der ERLs zu erwarten sind, sind möglicherweise eine Erklärung, warum diesen Themen in den USA seitens Standardisierungsinstitutionen bisher vergleichsweise wenig Beachtung geschenkt wurde.

⁶ Selbst mit guten, rauscharmen Operationsverstärkern liegen die in den Signalpfaden von mobilen/portablen Messgeräten erzielbaren Rauschniveaus bei 400 kHz Bandbreite typischerweise nicht unter 10 – 20 μ V (RMS). Die Referenzwertkurve von GB 8702-2014 deckt im Frequenzbereich von 5 Hz – 400 kHz mehr als vier Zehnerpotenzen ab. Ein WPM-Filter gemäß der Referenzwertkurve von GB 8702-2014 würde den Spektralanteil ab 100 kHz daher um mehr als vier Zehnerpotenzen und damit den zugehörigen Rauschanteil auf ein Niveau von mehreren hundert mV anheben, was jedenfalls bereits im einstelligen Prozentbereich der typischen Aussteuergrenzen der Signalpfade (< 10 V) liegt.

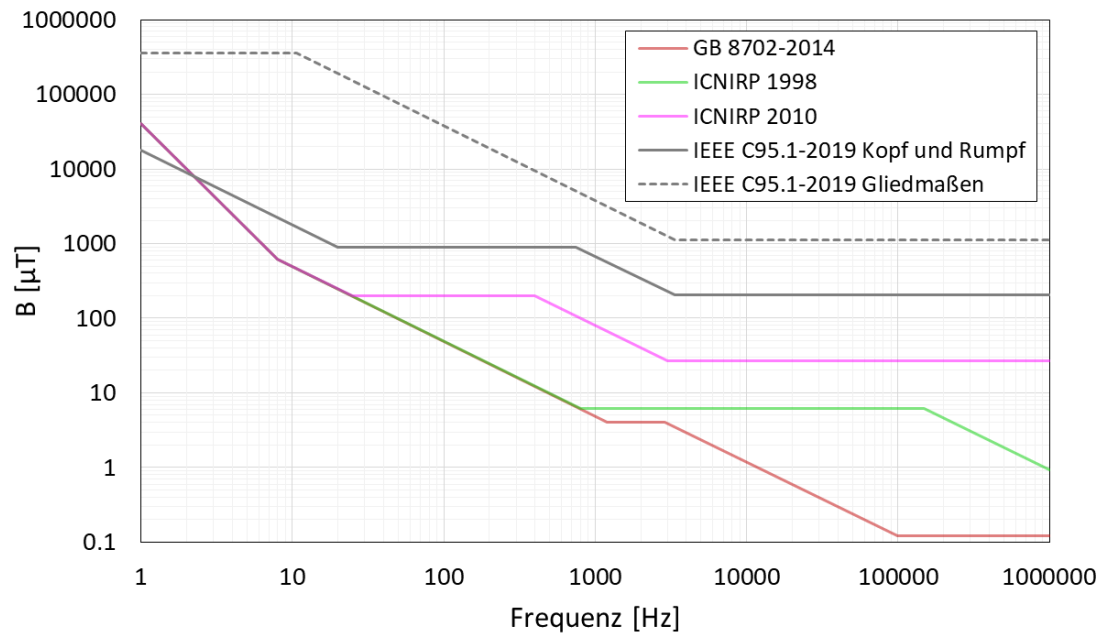


Abbildung 2.5: Vergleich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung für die magnetische Flussdichte gemäß GB 8702-2014, ICNIRP 1998 (entsprechen jenen in 1999/519/EG), ICNIRP 2010 und IEEE C95.1:2019.

2.3.5 Zusammenfassende Gegenüberstellung

Tabelle 2.1 zeigt abschließend eine zusammenfassende Gegenüberstellung der wichtigsten Festlegungen in IEC 62764-1:2022, VDA-Empfehlung 460-100 und GB/T 37130-2018 für das Messen und Bewerten von Magnetfeldern, die beim konduktiven Laden entstehen, und Abbildung 2.5 zeigt einen grafischen Vergleich der Referenzwerte bzw. ERLs.

Tabelle 2.1: Zusammenfassende Gegenüberstellung der wichtigsten Festlegungen für Magnetfeldmessungen beim konduktiven Laden in IEC 62764-1:2022, VDA-Empfehlung 460-100 und GB/T 37130-2018.

	IEC 62764-1:2022	VDA-Empfehlung 460-100	GB/T 37130-2018
Frequenzbereich	1 Hz – 400 kHz	1 Hz – 100 kHz	10 Hz – 400 kHz
Querschnitt Messaufnehmer	100 cm ²	100 cm ²	außen $\varnothing \leq 13$ cm
Zu untersuchende Messpositionen beim kabelgebundenen Laden; Batterieladezustand und Ladestrom während Messung	Sitzplätze wie beim Fahren, siehe oben. Zusätzlich im Nahbereich (innerhalb 50 cm entlang des Kabels, gemessen vom Ladestecker am Fahrzeug); Batterieladezustand zwischen 20 % und 80 %, Ladestrom ≥ 80 % des Maximums	4 Punkte (Fußraum, Sitzfläche, Rückenlehne, Kopf) am zum Ladestecker nächstgelegenen Sitzplatz. Zusätzlich 4 Punkte im Nahbereich (innerhalb 50 cm entlang des Kabels, gemessen vom Ladestecker am Fahrzeug). Beim AC-Laden (Ladebetriebsart 2) zusätzlich beim ICCPD; Batterieladezustand zwischen 20 % und 80 %, Ladestrom ≥ 80 % des Maximums	Sitzplätze wie beim Fahren, 7 Punkte (4 x Fußraum, Sitzfläche, Rückenlehne, Kopf) pro Sitzplatz. Zusätzlich im Nahbereich (innerhalb 50 cm entlang des Kabels, gemessen vom Ladestecker am Fahrzeug); Batterieladezustand zwischen 20 % und 80 %, Ladestrom ≥ 80 % des Maximums

Mindestabstand des Messaufnehmers zu Oberflächen des Fahrzeugs	20 cm (zur Messaufnehmermitte)	20 cm (zur Messaufnehmermitte)	nicht festgelegt
Bewertungsgrundlagen (Dokument mit Referenzwerten)	nicht konkret angegeben, nur Verweis auf mehrere Möglichkeiten	ICNIRP 2010	Alternativ GB 8702-2014, ICNIRP 1998, ICNIRP 2010
Bewertung/Auswertung der Messgröße	nicht angegeben	Weighted Peak Methode (WPM)	Frequenzbereichsbewertung (MFR) bei GB 8702-2014 Weighted Peak Methode (WPM) bei ICNIRP

2.4 Messvorschriften zur Erfassung und Bewertung der Exposition von Personen beim induktiven Laden

2.4.1 Dokumente von IEC

Betreffend eine standardisierte und aussagekräftige Erfassung und Bewertung der Exposition beim induktiven Laden erschien IEC TR 62905:2018 (IEC TR 62905, 2018). Darin werden jedoch nicht nur induktive Ladesysteme für die Elektromobilität behandelt, sondern generell auch für andere Anwendungen. Teile der darin speziell für induktive Ladesysteme zum Laden von BEV und PHEV enthaltenen Verfahren wurden einem informativen Anhang der Norm IEC 61980-1:2015 (IEC 61980-1, 2015) entnommen. Die aktuelle Version dieser Norm, IEC 61980-1:2020 (IEC 61980-1, 2020) enthält bezüglich der Expositionsbestimmung nur mehr sehr allgemeine Anforderungen, wie z. B., dass die Ladesysteme Personen nicht oberhalb der in einschlägigen Dokumenten angegebenen Basisgrenzwerte, wie z. B. die ICNIRP-Empfehlungen und IEEE-Standards, exponieren sollen und auch zu keinen Störbeeinflussungen von aktiven kardialen Implantaten von Personen in typischen Aufenthaltsbereichen führen sollen. Für detailliertere Spezifikationen wird auf weitere Teile der Normenserie IEC 61980-x verwiesen, von denen aber bis dato offensichtlich nicht alle existieren. Einer der beiden bereits existierenden Teile, IEC 61980-2:2023 befasst sich mit der Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und dem Ladesystem und enthält keinerlei Anforderungen bezüglich der Exposition von Personen (IEC 61980-2, 2023). Der andere Teil IEC 61980-3:2022 bleibt ebenfalls sehr allgemein und erwähnt im Kapitel 7.109.3.10.3, dass Expositionen unterhalb der ICNIRP-Limits sichergestellt werden müssen (IEC 61980-3, 2022). In einem Anhang des Dokuments wird in Zusammenhang mit einem Beispiel eines induktiven Ladesystems der Wert von 27 μT genannt (ICNIRP 2010 Referenzwert im Frequenzbereich 3 kHz – 10 MHz). Bezüglich einer Messmethode wird lediglich auf den bereits oben erwähnten informativen Anhang der nicht mehr aktuellen Version IEC 61980-1:2015 verwiesen.

Offensichtlich basierend auf den in IEC TR 62905:2018 zusammengefassten Erkenntnissen und darüber hinaus gehenden weiteren Ergebnissen wurde der internationale Standard IEC/IEEE 63184 entwickelt, dessen erste Auflage als finaler Entwurf (FDIS) im Herbst 2024 zur Abstimmung aufgelegt (in weiterer Folge als IEC/IEEE 63184:2024 bezeichnet) und mit großer Mehrheit angenommen wurde (IEC 63184, 2024). Die Publikation wurde für März 2025 angekündigt. In diesem Standard werden ebenfalls nicht nur induktive Ladesysteme für die Elektromobilität behandelt, sondern generell auch für andere Anwendungen mit induktiver Energieübertragung im Frequenzbereich 3 kHz – 30 MHz. Hinsichtlich der grundlegenden einsetzbaren Methoden für die Expositionserfassung und -bewertung werden in IEC/IEEE 63184 vier Ebenen definiert, wobei von Ebene 1 bis 4 die Komplexität der Methoden zu und die Konservativität (= potenzielle Überschätzung der tatsächlichen Exposition) abnimmt.

1. Vereinfachte analytische Bestimmung des maximal zulässigen Spulenstroms und Vergleich mit dem gemessenen Spulenstrom des Ladesystems
2. Messung oder Berechnung der magnetischen Flussdichte B und Vergleich mit den anzuwendenden Referenzwerten für B
3. Expositionsbewertung im Hinblick auf die Basisgrenzwerte mittels Koppelfaktoren für (messtechnisch oder rechnerisch charakterisierte) Gradientenfelder
4. Bestimmung der körperinternen Feldgrößen mittels (numerischen) Berechnungen mit einem Modell der konkreten Feldquelle und (anatomischen) Körpermodellen und Vergleich mit den Basisgrenzwerten

Speziell Ebene 3 enthält dabei ein neues Verfahren, basierend auf einem generischen Gradientenquellen-Modell („generic gradient source model“). Ziel dieses Verfahrens ist die Vermeidung der üblicherweise großen Überschätzung der Exposition, wenn die in unmittelbarer Nähe zu starken Magnetfeldquellen gemessenen Feldstärkewerte direkt mit Referenzwerten verglichen werden. Grund für die Überbewertung der Exposition ist die Tatsache, dass die Referenzwerte für homogene Ganzkörperbefeldung abgeleitet wurden, in unmittelbarer Nähe zu induktiven Magnetfeldquellen aber große Feldgradienten auftreten. Im Frequenzbereich oberhalb von 100 kHz kommt bei der Bewertung nach ICNIRP 1998 bzw. 1999/519/EG zusätzlich das Problem hinzu, dass die Referenzwerte zur Vermeidung thermischer Effekte unter der Annahme von Fernfeldbedingungen festgelegt wurden, was für die Exposition im reaktiven Nahfeld eines induktiven Ladesystems eine überkonservative Annahme ist (die Feldeinkopplung in den Körper ist unter Fernfeldbedingungen wesentlich effizienter als unter Nahfeldbedingungen)⁷. Das Verfahren beruht auf der Messung der magnetischen Feldstärke bzw. Flussdichte an einem (für einen Körperteil zugänglichen) Messpunkt nahe der Quelle und dem dort herrschenden Magnetfeldgradienten⁸. Mit diesen Messdaten können auf Basis von Transformationskoeffizienten direkt Abschätzungen der Ausschöpfung der Basisgrenzwerte erfolgen. Die Transformationskoeffizienten wurden auf Basis von Reihensimulationen mit generischen Gradientenmodellen und anatomischen Körpermodellen ermittelt (Arduino et al., 2020; Liorni et al., 2020) und sind für den relevanten Frequenzbereich und übliche Gradientenwerte in einem informativen Anhang von IEC TR 62905:2018 tabellarisch zusammengestellt.

Konkrete Prüfbedingungen für unterschiedliche Anwendungen werden in informativen Anhängen von IEC/IEEE 63184:2024 spezifiziert, konkret in Annex I.1 für die Expositionserfassung während des induktiven Ladens von Personenfahrzeugen. Im Folgenden werden die wichtigsten Festlegungen daraus zusammengefasst:

Es werden grundsätzlich drei unterschiedliche Raumbereiche unterschieden (Abbildung 2.6), nämlich der Bereich 1 zwischen Fahrzeugboden und Standfläche des Fahrzeugs („Betriebsbereich“), der Bereich 2 außerhalb des Fahrzeugs („Umgebungsbereich“), der nicht zum Betriebsbereich gehört, und das Fahrzeuginnere (Bereich 3). Zur Expositionsbewertung auf Grundlage der Referenzwerte in Bereich 2 wird festgelegt, die maximal messbare Feldstärke in einer Distanz von 20 cm zur Fahrzeugaußenhaut zu ermitteln und mit den Referenzwerten zu vergleichen (Abbildung 2.7), wobei zur Bewertung einer aufrecht neben dem Fahrzeug stehenden Person auch eine Mittelung von drei Messwerten entlang einer Vertikalen in den Höhen 0.5, 1.0 und 1.5 m über dem Boden vor dem Vergleich mit den Referenzwerten als zulässig angegeben wird. Die Messungen sollten gemäß IEC/IEEE 63184:2024 zumindest mit dem maximalen Versatz zwischen Primär- und Sekundärspule durchgeführt werden, für die noch eine Energieübertragungseffizienz von mehr als 80 % erreicht wird.

Innerhalb des Fahrzeuges (Bereich 3) sind Feldstärkemessungen während des Ladevorganges am Fahrersitz und an dem der Primärspule nächstgelegenen Sitzplatz an den in Abbildung 2.9 gezeigten Messpunkten (A-D) vorgesehen (jeweils in der Mitte der vier Teilflächen, in 6.5 cm Distanz zwischen dem Mittelpunkt einer 100 cm² Sonde und der jeweiligen Oberfläche), wobei auch hier gemäß IEC/IEEE 63184:2024 eine Mittelung der Messwerte über die vier Messpunkte A-D vor dem Vergleich mit den Referenzwerten zulässig

⁷ Für die im Rahmen dieses Vorhabens behandelten induktiven Ladesysteme mit Arbeitsfrequenzen bei ca. 85 kHz sind thermische Betrachtungen allerdings nicht relevant.

⁸ Für die Messung des Gradienten existieren kommerziell angebotene Messgeräte (siehe Kapitel 3.4.4).

ist. Hinsichtlich der Sitzstellung wird sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung die Mitte des möglichen Variationsbereiches festgelegt, obwohl gerade bei der Exposition durch induktive Ladesysteme die maximalen magnetischen Flussdichten bei tiefst möglicher Sitzstellung zu erwarten sind. Diese Tatsache zusammen mit der Möglichkeit, die gemessenen Werte vor dem Vergleich mit den Referenzwerten zu mitteln, lassen die Mess- bzw. Bewertungsmethode der Ebene 2 aus strahlenschutztechnischer Sicht fragwürdig erscheinen. Für den Raumbereich 1 werden in IEC/IEEE 63184:2024 keine speziellen Messvorschriften genannt.

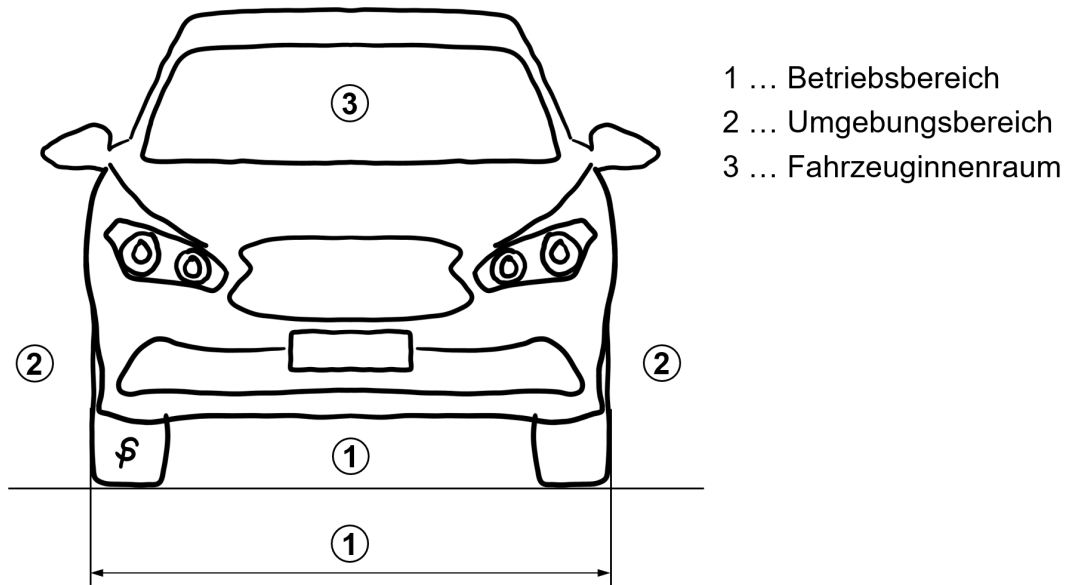


Abbildung 2.6: Zu betrachtende Raumbereiche für die Expositionsbewertung bei induktiven Ladesystemen gemäß den Festlegungen im informativen Anhang von IEC/IEEE 63184:2024.

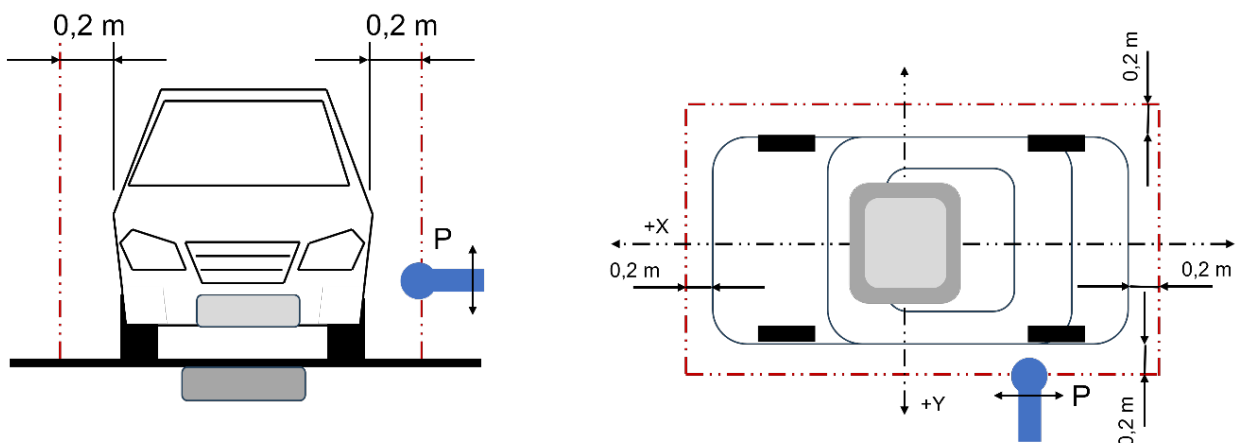


Abbildung 2.7: Zu betrachtende Messpositionen im Raumbereich 2 (außerhalb des Fahrzeugs) bei der Expositionsbewertung gemäß den Festlegungen im informativen Anhang von IEC/IEEE 63184:2024.

2.4.2 US-amerikanisches Dokument SAE J2954

Anders als im Fall der Magnetfelder beim Fahren und beim kabelgebundenen Laden existiert neben den oben diskutierten IEC-Dokumenten ein im Oktober 2024 aktualisierter US-amerikanischer Standard SAE J2954 (SAE, 2024), der konkret Anforderungen an induktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge spezifiziert.

Bezüglich der Begrenzung der Exposition von Personen in den von den induktiven Ladesystemen verursachten elektromagnetischen Feldern wird in SAE J2954 interessanterweise auf die ICNIRP-Empfehlungen (1998, 2010, 2020), jedoch nicht auf IEEE C95.1-2019 verwiesen. Zusätzlich wird das Thema möglicher Störbeeinflussungen von aktiven kardialen Implantaten explizit angesprochen.

Betreffend der für die Expositionsbewertung zu betrachtenden Bereiche werden in Kapitel 10 von SAE J2954 drei unterschiedliche Regionen festgelegt, die den Definitionen in IEC/IEEE 63184:2024 entsprechen (Abbildung 2.8).

Als grundlegende Sicherheitsanforderung wird in SAE J2954 festgesetzt, dass die von ICNIRP empfohlenen Basisgrenzwerte in allen zugänglichen Bereichen innerhalb der Raumbereiche 2 und 3 einzuhalten sind. Der unmittelbare Umgebungsbereich der Induktionsspulen unterhalb des Fahrzeugs (Raumbereich 1), in dem angenommen werden muss, dass die Feldstärken deutlich oberhalb der von ICNIRP empfohlenen Referenzwerte liegen, wird zwar grundsätzlich als nicht zugänglich unter normalen Betriebsbedingungen angesehen, es wird jedoch als Anforderung festgelegt, dass die Systeme automatisch abschalten müssen, wenn sich ein Körperteil Bereichen annähert, in denen Basisgrenzwerte überschritten werden. Dies soll durch entsprechende Sicherheitssysteme erfolgen („Living Object Detection“).

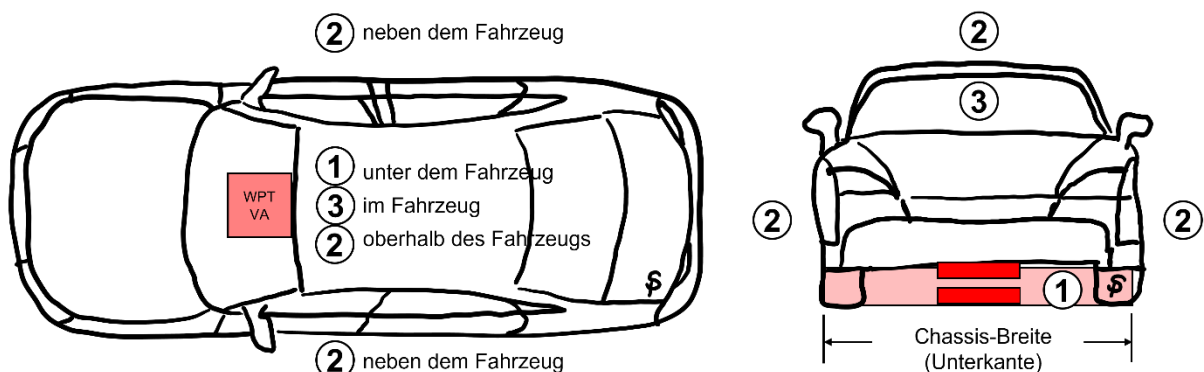


Abbildung 2.8: Zu betrachtende Raumbereiche für die Expositionsbewertung bei induktiven Ladesystemen gemäß den Festlegungen in SAE Standard J2954.

Als konkret anwendbare Expositionslimits werden in dem Dokument die Referenzwerte und Basisgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 angeführt.

Als maximaler Außendurchmesser des Messaufnehmers wird 12.5 cm empfohlen mit kreisförmigen 100 cm² Messspulen.

Bezüglich der Expositionserfassungsmethodik findet sich ein allgemeiner Verweis auf andere Standards, wie z. B. IEC 61786-2, IEC 62764-1 und IEEE C95.3, mit der Einschränkung „soweit zutreffend“.

Für Messungen zur Expositionsbewertung in Region 1 wird in SAE J2954 kein Mindestabstand des Messaufnehmers zum Fahrzeug und anderer Objekte festgelegt. Für Regionen 2 und 3 wird jedoch konkret von weniger als 1 cm gesprochen. Die maximale Schrittweite zwischen einzelnen Messpunkten bei der Suche nach dem räumlichen Maximum soll 7.5 cm nicht überschreiten. Es wird in SAE J2954 explizit darauf hingewiesen, dass die Messgrößen beim

Auftreten von transienten Vorgängen keiner zeitlichen Mittelung unterworfen werden dürfen, sondern der Spitzenwert mit dem 1.41-fachen Referenzwert zu vergleichen ist⁹, und es wird explizit von räumlicher Mittelung der Immissionsgrößen abgeraten, solange diesbezüglich keine validen Festlegungen von Standardisierungsinstitutionen getroffen wurden.

Im Hinblick auf den Schutz von Personen mit kardialen aktiven Implantaten wird in SAE J2954, basierend auf Überlegungen bezüglich maximal zulässiger Störspannungen am Eingang von Herzschrittmachern (ISO 14117), ein maximaler, räumlich gemittelter (RMS-) Wert der magnetischen Flussdichte von 15 μT als Limit festgelegt (für den üblichen Frequenzbereich induktiver Ladesysteme für PKWs, d. h. 79 kHz – 90 kHz). Die räumliche Mittelung hat dabei auf Messwerten zu basieren, die mit einem 100 cm² Messaufnehmer entlang eines 2 x 2 Messpunktrasters mit einer Schrittweite von 7.5 cm erfasst wurden. Dieser Schwellenwert darf in keinen Bereichen, in denen sich der Torso einer Person befinden kann, überschritten werden.

Bezüglich der Messprozedur empfiehlt SAE J2954 ein (entsprechend langsames) Abtasten entlang der Grenzen zwischen Region 1 und 2, um die Maximalfeldstärke bzw. Flussdichte zu erfassen. Auch für die zugänglichen Bereiche im Fahrzeuginneren wird ein Abtasten zur Maximumsuche sowie zusätzlich die Messung an 4 Punkten A – D (siehe Abbildung 2.9) pro Sitz empfohlen, und es wird explizit darauf hingewiesen, dass die Messungen für unterschiedliche Streufeld-bestimmende Parameter (Abstand und horizontaler Versatz von Primär- und Sekundärspule) wiederholt werden müssen, um eine konservative Expositionsbewertung zu erhalten.

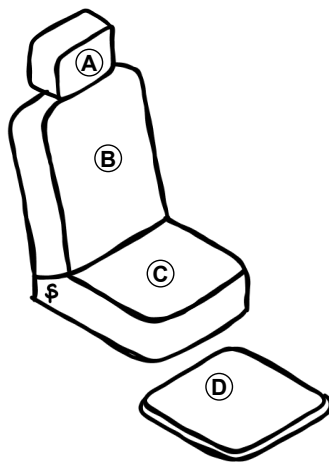


Abbildung 2.9: Zu betrachtende Messpositionen entlang der Sitze (zusätzlich zur Maximumsuche) gemäß den Festlegungen in SAE Standard J2954:2024 und IEC/IEEE 63184:2024.

Zusätzlich stellt SAE J2954 in einem informativen Anhang nützliche und gut strukturierte Informationen zum Thema numerischer Berechnung der externen Felder und körperinterner Bewertungsgrößen mittels homogener und anatomischer Körpermodelle, inklusive Validierung der Simulationsmodelle, bereit.

⁹ Die Frage welcher Referenzwert (bei transienten Vorgängen mit breitem Frequenzspektrum) heranzuziehen ist, bleibt in SAE J2954 jedoch unbeantwortet.

3 Prinzipien und relevante Spezifikationen von Messsystemen

3.1 Allgemeines

Aus früheren Messungen in Fahrzeugen mit Elektroantrieb während des Fahrens ist bekannt, dass die Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte in vielen Fällen als Folge transienter Vorgänge auftreten. Transiente Vorgänge sind auch im Zuge des Ladens aus technischer Sicht nicht auszuschließen, insbesondere in Zusammenhang mit dem Starten und/oder Beenden des Ladevorganges. Demzufolge sind an Messsysteme und Messgeräte, die für eine vollständige und aussagekräftige Charakterisierung der in Zusammenhang mit dem Laden von Elektroautos auftretenden magnetischen Felder als geeignet anzusehen sind, besondere Anforderungen hinsichtlich des Verhaltens im Zeitbereich zu stellen. Beispielsweise müssen Messgeräte, die keine nahezu lückenlose Messung entlang der Zeitachse ermöglichen, als ungeeignet bzw. nur bedingt geeignet für die vollständige Charakterisierung der magnetischen Felder eingestuft werden, da die Möglichkeit besteht, dass relevante transiente Vorgänge verpasst werden. Speziell im Segment der einfachen Kompaktmessgeräte und Exposimeter sind diesbezüglich die Anforderungen oftmals nicht erfüllt, da diese Geräte typischerweise in regelmäßigen Zeitabständen ΔT einen Messwert ermitteln, der auf einer bestimmten Beobachtungszeit T_{obs} der Messgröße beruht, wobei T_{obs} aufgrund der benötigten Zeit für die A/D-Wandlung, die Signalverarbeitung und ggf. die Abspeicherung der Daten oftmals deutlich kleiner ist als ΔT . Dadurch ist die geforderte Lückenlosigkeit nicht mehr gegeben. Eine weitere, sich aus der Notwendigkeit der Erfassung transienter Magnetfelder ergebende Anforderung ist, dass Messgeräte, die ausschließlich Effektivwerte als Messwerte liefern (d. h. keine Möglichkeit zur Anzeige von Spitzenwerten besitzen), ebenfalls als ungeeignet angesehen werden müssen.

Neben den allgemeinen Anforderungen hinsichtlich ausreichender Sensitivität, Messdynamik, Stabilität etc., sind auch der Messfrequenzbereich (idealerweise von 0 Hz bis einige hundert kHz) des Messgerätes und die Möglichkeit einer frequenzselektiven Bewertung der Messergebnisse wesentliche Kriterien, da die zu erwartenden magnetischen Felder in einem relativ weiten Frequenzbereich variieren können, in dem die anzuwendenden Referenzwerte frequenzabhängig sind. Speziell im Hinblick auf die Bewertung von transienten Magnetfeldern sind insbesondere auch Zeitbereichs-Bewertungsverfahren (WPM-TD (ICNIRP, 2003; Keller, 2017; Schmid et al., 2019a)) als vorteilhaft anzusehen.

3.2 Messprinzipien für niederfrequente Magnetfelder

Für die Messung niederfrequenter magnetischer Felder stehen grundsätzlich mehrere physikalische Prinzipien zur Verfügung, es kommen gegenwärtig bezüglich des Sensor-Typs jedoch meist zwei unterschiedliche Messprinzipien zum Einsatz¹⁰:

- Hall-Elemente
- Induktionsspulen

Abbildung 3.1 zeigt die beiden Messprinzipien in einfachen schematischen Skizzen. Bei der Messung mithilfe eines Hall-Effekt-Sensors muss der Hall-Sensor von einer

¹⁰ Seit einigen Jahren werden auch Sensoren basierend auf dem magnetischen Tunnelwiderstand (TMR) in Messgeräte für den Frequenzbereich von DC bis einige hundert kHz verbaut. Wie Hall-Elemente liefern auch TMR-Sensoren ein Ausgangssignal direkt proportional zum einwirkenden Magnetfeld, haben jedoch den Vorteil größerer erreichbarer Messempfindlichkeit. Gegenwärtig wird diese Sensortechnologie jedoch nur in einigen wenigen kommerziellen Messgeräten eingesetzt.

Konstantstromquelle gespeist werden, um eine Messspannung (Hallspannung) proportional zur einwirkenden magnetischen Flussdichte abgreifen zu können, die weiter verstärkt und verarbeitet werden kann. Der wesentliche Vorteil von Hall-Effekt-Sensoren ist die Möglichkeit auch zeitlich invariante Magnetfelder (0 Hz) und Magnetfelder sehr niedriger Frequenzen zu erfassen. Typische obere Frequenzgrenzen von Hall-Effekt-Sensoren liegen im Bereich einiger 10 kHz. Einer der größten Nachteile von Hall-Effekt-Sensoren ist deren vergleichsweise geringe Empfindlichkeit in der Größenordnung von bestenfalls einigen 10 V/T, d. h., bei Breitbandmessungen liegt die Rauschgrenze von typischen Messgeräten deutlich oberhalb von einigen μT .

Die Magnetfeldmessung mittels Induktionsspule nutzt das Induktionsgesetz, demzufolge in einer Leiterschleife (Spule) eine Spannung proportional zur zeitlichen Änderungsrate des die Spule durchsetzenden magnetischen Flusses induziert wird. Die induzierte Spannung muss demzufolge mittels Integrationsverstärker verstärkt werden, um eine Messspannung proportional zur magnetischen Flussdichte zu erhalten.

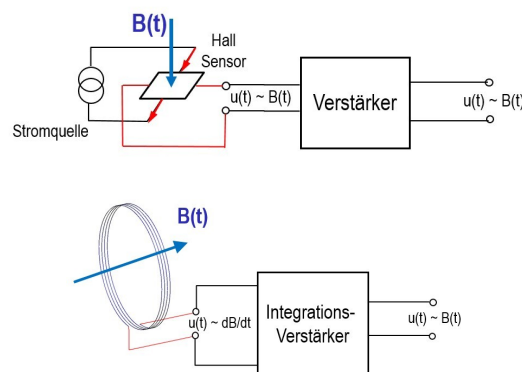


Abbildung 3.1: Prinzip der Magnetfeldmessung mittels Hall-Effekt-Sensor (oben) und Induktionsspule (unten).

Beiden Messprinzipien gemein ist, dass die Ausgangsspannung am Sensorelement ausschließlich zur Normalkomponente der einwirkenden magnetischen Flussdichte proportional ist. Für die Herstellung einer isotropen Messsonde werden daher jeweils drei orthogonal zueinander angeordnete Sensorelemente verbaut und deren Signalpfade parallel realisiert.

3.3 Erforderliche Eigenschaften für die konkrete Aufgabenstellung

Aus den eingangs erwähnten physikalischen Überlegungen, Informationen aus der verfügbaren Literatur, praktischer Erfahrung mit Messungen in Elektro- und Hybridfahrzeugen sowie bei Zugrundelegung aktueller Dokumente bezüglich der Begrenzung der Exposition von Personen können die im Folgenden zusammengefassten Eigenschaften von Messsystemen als erforderlich bzw. wünschenswert für die Messung von Magnetfeldern in bzw. in der Nähe von Elektro- und Hybridfahrzeugen angesehen werden.

3.3.1 Messfrequenzbereiche

- a) Sehr niederfrequent (DC) bis 400 kHz¹¹
- b) Idealerweise mit einstellbaren Frequenzgrenzen¹²

3.3.2 Sensitivität und Aussteuergrenze, Messdynamik

- a) Sensitivität (Breitband) $\leq$ ca. 1 % vom niedrigsten Referenzwert im Messfrequenzbereich
- b) Aussteuergrenze $\geq$ 100 % Referenzwert (Amplitude) über den gesamten Frequenzbereich

Die Anforderung an die Messdynamik ist in der Praxis messgerätetechnisch nicht einfach umzusetzen, insbesondere bei Berücksichtigung potenziell auftretender transienter Vorgänge, die mehr als eine Zehnerpotenz über dem typischen bzw. mittleren Niveau der Messgröße liegen können. Unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Referenzwerte ergibt sich aus den oben angeführten Anforderungen bezüglich Sensitivität und Aussteuergrenze eine erforderliche Messdynamik von deutlich mehr als einem Faktor 1000¹³, der innerhalb eines Messbereiches abgedeckt werden sollte. Für typische batteriebetriebene Kompaktmessgeräte, deren Messverstärker üblicherweise mit relativ geringen Versorgungsspannungen betrieben werden, liegt dies bereits am Limit oder sogar oberhalb der Spezifikation. Die über mehrere Messbereiche reichende Gesamt-Messdynamik derartiger Geräte liegt zwar deutlich höher, innerhalb eines Messbereiches liegt sie jedoch typischerweise unter bzw. maximal bis zu einem Faktor 1000.

Manuelle Messbereichsumschaltung und Auto-Range-Funktionen sind für die zuverlässige Erfassung transienter Vorgänge im Realbetrieb von Elektrofahrzeugen naturgemäß nicht oder nur sehr eingeschränkt geeignet.

Zusammenfassend sollte ein im Rahmen dieses Vorhabens eingesetztes Messsystem die folgenden Anforderungen bezüglich Messdynamik im empfindlichsten Messbereich erfüllen, um die zu erwartenden Messaufgaben effizient bearbeiten zu können:

- DC bis ca. 10 Hz: Eigenrauschen $<$ ca. 10 μ T, Aussteuergrenze $\geq$ 40 mT
- Frequenzbereich von ca. 10 Hz bis 400 kHz: Eigenrauschen $<$ ca. 100 nT, Aussteuergrenze $\geq$ 500 μ T

¹¹ Bei Messungen im Bereich induktiver Ladesysteme im Frequenzbereich 79 kHz – 90 kHz kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine obere Messfrequenzbereichsgrenze von 400 kHz nicht alle Oberwellen korrekt erfasst. Es wird allerdings davon ausgegangen, dass die dadurch entstehende Bewertungsunsicherheit in der Praxis vernachlässigbar ist, da die oberhalb von 400 kHz möglicherweise vorhandenen Oberwellen aufgrund von regulatorischen Vorgaben der elektromagnetischen Verträglichkeit mit großer Wahrscheinlichkeit als vergleichsweise gering zu erwarten sind. Zusätzlich sind die Referenzwerte (für nicht-thermische Wirkungen) im Frequenzbereich oberhalb von 400 kHz (bis 10 MHz) frequenzunabhängig festgelegt, sie nehmen daher mit steigender Frequenz nicht weiter ab. Relevante Expositionen bezüglich thermischer Effekte zufolge solcher Oberwellen sind aus grundlegenden physikalischen Überlegungen ebenfalls nicht zu erwarten. Zur Absicherung der oben formulierten Vermutung sollte im Zuge von Messungen an induktiven Ladesystemen jedoch überprüft werden, ob relevante Frequenzanteile (z. B. zufolge von Oberwellen der Arbeitsfrequenz) oberhalb von 400 kHz vorhanden sind.

¹² Die Möglichkeit, den gesamten Messfrequenzbereich je nach Messaufgabe in Teilbereiche zu unterteilen, bietet, aufgrund der frequenzabhängigen Referenzwerte in der Praxis Vorteile. Insbesondere die Aufteilung in DC und AC ist bei den meisten Messaufgaben essenziell, da andernfalls Breitbandmesswerte häufig durch das geomagnetische Feld dominiert werden. Zusätzlich führt die Tatsache, dass die Referenzwerte für AC-Felder im Frequenzbereich bis 400 kHz um ca. einen Faktor 1000 variieren, dazu, dass die erforderliche Messdynamik mit den in Abschnitt 3.3.2 angeführten Anforderungen sehr groß und mit angemessenem Aufwand in der Praxis kaum erreichbar wird.

¹³ Mit den in Abschnitt 3.3.2 angeführten Anforderungen ergibt sich im Extremfall theoretisch sogar ein Faktor 100 000. In der Praxis erweist sich in den allermeisten Fällen ein Faktor von ca. 10 000 als ausreichend.

3.3.3 Messaufnehmergröße

In der überwiegenden Mehrzahl der Prüfvorschriften für magnetische Felder wird die Verwendung eines Messaufnehmers mit 100 cm² Aufnehmerquerschnitt empfohlen bzw. vorgeschrieben, was sich letztlich technisch sinnvoll nur mit einem Spulen-basierten Aufnehmer realisieren lässt. In räumlich homogenen Feldern ist evident, dass es keine Abhängigkeit des Messwertes vom Messaufnehmerquerschnitt gibt. In nicht-homogenen Feldern (Gradientenfeldern) muss eine solche Abhängigkeit jedoch erwartet werden. Für übliche Feldgradienten in der Nähe von Magnetfeldquellen ($\sim d^{-x}$, mit d als Distanz zur Quelle) ist aufgrund der Mittelungseigenschaften¹⁴ des Messaufnehmers immer eine Unterschätzung des tatsächlichen, im Zentrum des Messaufnehmers herrschenden Feldstärkewertes zu erwarten. Bei vorgegebenem Feldgradienten wird das Ausmaß der Unterschätzung umso kleiner, je kleiner der Messaufnehmerquerschnitt gewählt wird. Umgekehrt sinkt, bei gegebenem Messaufnehmerquerschnitt, das Ausmaß der Unterschätzung mit sinkendem Feldgradienten. Bei Festsetzung eines zulässigen Ausmaßes der Unterschätzung des an einer Position herrschenden Feldstärkewertes und eines maximal dort anzunehmenden Feldgradienten könnte daher ein maximal zulässiger Messaufnehmerquerschnitt bestimmt werden. Im Hinblick auf die Expositionsbewertung, die schlussendlich auf die Begrenzung der im Körper induzierten elektrischen Feldstärken bzw. Stromdichten abzielt, erscheint ein solches Vorgehen jedoch nur eingeschränkt zielführend, da die genannten im Körper induzierten Größen ebenso proportional zu Flächenintegralen der magnetischen Flussdichte sind. D. h. die Unterschätzung der punktuell an einer Position herrschenden magnetischen Flussdichte durch die endlichen Abmessungen des Messaufnehmers ist im Hinblick auf die im Körper induzierten Größen von untergeordneter Bedeutung. Im Hinblick auf die Expositionsbewertung erscheint vielmehr die Frage relevant, ob ein bestimmter Messaufnehmerquerschnitt (z. B. 100 cm²) für realistische Feldgradienten in der Lage ist, ein konservatives Ergebnis bei einer Beurteilung auf Grundlage der Referenzwerte zu liefern, d. h., ob sichergestellt werden kann, dass aus dem Befund Messwert $\leq$ Referenzwert auf die Unterschreitung der Basisgrenzwerte geschlossen werden kann. Eine, allerdings auf einer eingeschränkten Zahl anatomischer Körpermodelle und Expositionssituationen beruhende, Analyse dieser Fragestellung deutet darauf hin, dass für Gliedmaßen und typische Feldgradienten, wie sie in einigen Zentimetern Entfernung von Leiterstrukturen zu erwarten sind, ein 100 cm² Messaufnehmer diese Anforderung für Expositionsbeurteilungen auf Basis 1999/519/EG und ICNIRP 2010 erfüllt (Schmid, 2018).

Für die konkret zu erwartenden Messaufgaben zur Expositionsbewertung auf Grundlage von Referenzwerten, erscheint die Verwendung eines 100 cm² Messaufnehmers daher als ausreichend. Im Falle der Notwendigkeit, Feldverteilungen in wenigen Zentimetern Entfernung zu Quellen detailliert zu charakterisieren (z. B. zum Zwecke der Validierung einer numerischen Ersatzfeldquelle), sind jedoch kleinere Messaufnehmer (z. B. 3 cm²) erforderlich.

¹⁴ Die Induktionsspannung im Messaufnehmer ist proportional dem Flächenintegral der zeitlichen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte über die Messaufnehmerfläche. Für harmonische (sinusförmige) Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte vereinfacht sich diese Aussage folgendermaßen: Der Effektiv- bzw. Spitzenwert der Induktionsspannung ist proportional dem Produkt aus der Frequenz und dem Flächenintegral der magnetischen Flussdichte (Effektiv- bzw. Spitzenwert) über die Messaufnehmerfläche.

3.3.4 Abtasteigenschaften

Kompaktmessgeräte verwenden typischerweise eine fest vorgegebene Abtastrate (ca. 1 MHz – 2 MHz bei einer oberen Messfrequenzbereichsgrenze von 400 kHz) und eine fest vorgegebene Messintervall-Länge von einigen hundert Millisekunden, in denen das digitalisierte Messsignal ausgewertet und z. B. als RMS- oder Spitzenwert zur Anzeige gebracht wird (Aktualisierungsintervall der Anzeige). Manche Geräte erlauben davon unabhängig eine RMS-Wertbildung über größere Zeitintervalle und/oder haben die Möglichkeit, die Messdaten (zumeist in Form von RMS- oder Spitzenwerten) abzuspeichern. Da die A/D-Wandlung, die Signalauswertung und vor allem das Speichern von Messdaten nicht beliebig schnell¹⁵ erfolgen kann, existiert das Problem, dass zwischen einzelnen am Gerät abgespeicherten Messwerten bei Kompaktmessgeräten eine zeitliche „Lücke“ von typischerweise zumindest einigen 10 ms entsteht (siehe Kapitel 3.1), was bei den genannten Messintervall-Längen von einigen wenigen hundert Millisekunden bereits einen erheblichen Anteil der gesamten Messdauer ausmacht, in dem das Messgerät „blind“ für die Messgröße ist. Grundsätzlich ist eine Minimierung dieses „Blindzeit“-Anteils wünschenswert.

3.3.5 Erfassung / Bewertung des Zeitsignals

Die alleinige Erfassung (und ggf. Speicherung) von einzelnen Messwerten (RMS- oder Spitzenwerten) ist zufolge der Frequenzabhängigkeit der Referenzwerte naturgemäß unzureichend. Daher bieten moderne Messgeräte oftmals die Möglichkeit, das Messergebnis optional bereits in bewerteter Form (in % vom Referenzwert) zur Anzeige zu bringen (und ggf. abzuspeichern). Als dazu eingesetzte Methoden kommen entweder die MFR, die WPM-FD im Frequenzbereich (nach FFT-Transformation der digitalisierten Signaldaten) oder auch die WPM-TD im Zeitbereich (entweder durch Implementierung zuschaltbarer Hardware-Filter vor A/D-Wandlung oder durch digitale Filter nach A/D Wandlung) zur Anwendung (ICNIRP, 2003; Keller, 2017; Schmid et al., 2019a). Notwendig für die direkte Erfassung/Messung in bewerteter Form ist naturgemäß die Vorauswahl des zugrunde gelegten Frequenzverlaufs der Referenzwerte (unterschiedlich je nach Dokument). Eine Umrechnung derart bewerteter Messergebnisse zwischen unterschiedlichen Frequenzverläufen der Referenzwerte ist im Allgemeinen nicht möglich, ohne den exakten Zeitverlauf der Messgröße zu kennen. D. h., die einzige Möglichkeit, um magnetische Felder mit nicht-sinusförmigem Zeitverlauf zu erfassen und gleichzeitig die Möglichkeit zu bewahren, diese nach unterschiedlichen Referenzwert-Dokumenten wie z. B. ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 zu bewerten, ohne die Messungen mehrfach durchführen zu müssen, ist die Messung und Aufzeichnung (Speicherung) des Zeitsignals der Messgröße. Bei hinreichend guter A/D-Wandlung mit ausreichender Abtastrate sowie ausreichender Unterdrückung von Aliasing-Effekten¹⁶ liegt mit dem digitalisierten und gespeicherten Zeitsignal die gesamte erforderliche Information vor, die eine Bewertung nach beliebigen Referenzwertdokumenten ermöglicht.

Aus diesem Grund bieten einige der gegenwärtig verfügbaren Messgeräte Echtzeit-Analogausgänge der Messsignale der drei orthogonal zueinander ausgerichteten

¹⁵ Speziell bei batteriebetriebenen Kompaktmessgeräten wird die interne Taktrate des Prozessors aus Gründen der Batterielebensdauer relativ gering gewählt.

¹⁶ Unter „Aliasing“ versteht man das ungewollte Erzeugen von zusätzlichen, im Messsignal ursprünglich nicht vorkommenden, Frequenzkomponenten bei der vor der A/D-Wandlung erforderlichen Signalabtastung, das immer dann entsteht, wenn das Messsignal Frequenzanteile enthält, die größer sind als die halbe Abtastfrequenz.

Messachsen, um dem/der Anwendenden die Aufzeichnung dieser Signale, z. B. mittels Speicheroszilloskop, zu ermöglichen.

Ein weiterer Vorteil der Aufzeichnung des Zeitsignals ist die bessere Identifizierungsmöglichkeit von Artefakten bzw. von außen einwirkenden Störgrößen. Insbesondere im Hinblick auf zu erwartende transiente Magnetfeldverläufe und deren strahlenschutztechnische Bewertung nach unterschiedlichen Empfehlungen (mit unterschiedlicher Frequenzabhängigkeit der Referenzwerte), ist die Möglichkeit der Aufzeichnung des Zeitverlaufs der magnetischen Flussdichte als eine konkrete Anforderung an ein für die zu erwartenden Messaufgaben effizient einsetzbares Messsystem zu sehen.

3.3.6 Simultane Messung an mehreren Positionen

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, erfordert die Erfassung und Bewertung magnetischer Felder während des Ladens von Elektroautos Messungen an mehreren Messpunkten, was aus strahlenschutztechnischer Sicht sinnvoll erscheint. Bei vorgegebenen Grenzen der aufwendbaren Zeit für derartige Messungen wäre daher ein Messsystem, das simultane Messungen an mehreren Messpunkten ermöglicht, im Sinne der Effizienz (mehrere Messpunkte bei gleichem Zeitaufwand) bzw. zur Steigerung der Aussagekraft (Messdaten an mehreren Positionen bei derselben Expositionssituation anstatt ähnlicher Expositionssituationen zufolge hintereinander durchgeführter Messdurchläufe) wünschenswert.

3.4 Vergleichende Diskussion unterschiedlicher Messsysteme

3.4.1 Systeme bzw. Geräte mit nur einem isotropen Messkanal

Die Menge an kommerziell erhältlichen Magnetfeldmessgeräten bzw. -systemen in diesem Segment ist groß. Setzt man jedoch nur die in den aktuellen Messvorschriften im Bereich Elektromobilität geforderte und von uns für dieses Projekt als geeignet bewertete obere Messfrequenzbereichsgrenze von 400 kHz als Mindestanforderung voraus, so wird die Anzahl der Geräte, die als tauglich eingestuft werden können, bereits überschaubar¹⁷.

Drei gegenwärtig weit verbreitete und etablierte Messgeräte in dieser Kategorie mit einem Messfrequenzbereich von einigen wenigen Hz bis 400 kHz sind in Abbildung 3.2 dargestellt:

- a) ELT-400 (Narda Safety Test Solutions GmbH, Pfullingen, Deutschland)
<https://www.narda-sts.com/de/emv-produkte/elt-400/>
- b) ESM-100 (Maschek Elektronik, Bad Wörishofen, Deutschland)
<https://www.maschek.de/de/produkte/esm-100-h-e-feldstaerkemessgeraet>
- c) SMP2 + WP400 (Wavecontrol S.L., Barcelona, Spanien)
https://www.wavecontrol.com/rfsafety/images/data-sheets/de/SMP2_Datasheet_DE.pdf

¹⁷ Es wurden dabei auch Messgeräte ausgeschlossen, in deren Spezifikation zwar ein Messfrequenzbereich bis 400 kHz angegeben ist, die diesen aber nicht durchgängig (beginnend von Frequenzen < 10 Hz) zur Verfügung stellen, sondern stufenweise. Beispielsweise wird beim Messgerät Narda STS EHP-50F ein Frequenzbereich 1 Hz – 400 kHz spezifiziert, es stehen aber tatsächlich acht diskrete, wählbare Frequenzbereiche 1 Hz – 100 Hz, 2.4 Hz – 200 Hz, ..., 4.8 kHz – 400 kHz zur Verfügung.



Abbildung 3.2: Drei gegenwärtig weit verbreitete und etablierte Kompaktmessgeräte zur Erfassung von magnetischen Feldern im Frequenzbereich von wenigen Hz bis 400 kHz: ELT-400 (links, abgebildet mit über Verlängerungsleitung angeschlossenem 100 cm² Messaufnehmer und ebenfalls abgebildetem 3 cm² Messaufnehmer), ESM-100 (Mitte) und SMP2 mit 100 cm² Messaufnehmer WP400 (rechts).

Das Gerät ELT-400 (alternativ mit 100 cm² und 3 cm² isotropen Spulen-Messaufnehmern betreibbar) ist seit langem am Markt etabliert und wurde speziell für die Erfassung und Bewertung von magnetischen Feldern mit nicht-sinusförmigem Zeitverlauf konzipiert und optimiert. Neben einschaltbaren Analogfiltern zur WPM-Bewertung bietet es auch fix verdrahtete Echtzeit-Analogausgänge der Messsignale aller 3 Messachsen des isotropen Messaufnehmers. Am Gerätedisplay können alternativ RMS-Werte, Spitzenwerte (PEAK-Werte) oder die prozentuelle Ausschöpfung des Referenzwertes angezeigt werden. Mittels zuschaltbarer Hochpass-Filter (1 Hz / 10 Hz / 30 Hz) am Eingang können ggf. störende niederfrequente Signalanteile unterdrückt werden. Unter der Voraussetzung der Nutzung der Analogausgänge erfüllt dieses Gerät von den drei genannten Geräten die in Kapitel 3.3 angeführten Anforderungen am besten. Die Messung von DC-Magnetfeldern ist mit dem ELT-400 nicht möglich.

Die kombinierte E- und H-Feldsonde ESM-100 bietet die Möglichkeit, simultan elektrische und magnetische Feldstärkemessungen mit einem kompakten Handgerät (mit fix montiertem Messaufnehmer für E- und H-Feld) durchzuführen. Der Aufnehmerquerschnitt der Messspulen beträgt ca. 8 cm². Der Messfrequenzbereich ist mit 5 Hz – 400 kHz spezifiziert, wobei mittels zuschaltbarer Filter die Sub-Frequenzbereiche 5 Hz – 2 kHz, 2 kHz – 400 kHz sowie Bandfilter für 16 2/3 Hz und 50 Hz realisierbar sind. Die Anzeige des Gerätes liefert nur RMS-Werte, nach Verbindung des Gerätes mit einem Computer können über eine zugehörige Software auch weitere Funktionalitäten realisiert werden, wie z. B. Frequenzbereichsanalysen und die Bewertung nach Referenzwertdokumenten. Das Gerät bietet ebenfalls Analogausgänge der Messsignale, allerdings müssen diese erst mithilfe der Software konfiguriert werden, um alle drei Achsen der magnetischen Feldgröße an die Analogausgänge zu schalten. Im Hinblick auf die in Kapitel 3.3 angeführten Anforderungen wirken vor allem die unübliche Messaufnehmergröße, die fixe (starre) Verbindung von Messaufnehmer und Anzeigeeinheit sowie die Notwendigkeit der Konfiguration der Analogausgänge per Computer und Software als limitierend für den praktischen Einsatz in diesem Projekt. Ebenso besteht durch die relativ geringe Aussteuergrenze im empfindlichsten Messbereich, in Kombination mit

der nicht deaktivierbaren Autorange-Funktion potenziell das Problem, dass transiente Vorgänge bei Messungen nicht korrekt erfasst werden. Die Messung von DC-Magnetfeldern ist mit dem ESM-100 nicht möglich.

Das im Vergleich zu ELT-400 und ESM-100 deutlich jüngere Gerät SMP2 (bzw. auch dessen Nachfolger SMP3) folgt dem Konzept mit einem einzigen Anzeigegerät Feldmessungen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 60 GHz zu ermöglichen¹⁸, wobei je nach interessierendem Teilfrequenzbereich unterschiedliche Messaufnehmer an das Gerät angeschlossen werden können. Konkret für die Messungen von Magnetfeldern in Zusammenhang mit der Elektromobilität ist der Messaufnehmer WP400 die sinnvollste Wahl, mit dem der Frequenzbereich von 1 Hz – 400 kHz abgedeckt werden kann. Dieser Messaufnehmer enthält für Magnetfeldmessungen 100 cm² Messspulen und weitere Sensorelemente zur Messung der elektrischen Feldstärke. Ein 3 cm² Messaufnehmer für kombinierte elektrische und magnetische Feldmessungen ist ebenfalls erhältlich. Mittels zuschaltbarer Hochpass-Filter (1 Hz / 10 Hz / 25 Hz / 100 Hz) am Eingang können ggf. störende niederfrequente Signalanteile unterdrückt werden. Am Display des Gerätes werden sowohl RMS- als auch PEAK-Werte angezeigt und durch eine im Gerät integrierte FFT kann auch das Signalspektrum direkt am Display angezeigt werden. Eine Anzeige der bewerteten Messgrößen in % vom Referenzwert ist durch die (gemäß Herstellerangaben digital im Zeitbereich implementierte) WPM-Bewertung für eine Vielzahl von Referenzwertdokumenten möglich. Das Gerät bietet jedoch keine Analogausgänge der Messsignale, was gleichzeitig auch den wesentlichsten limitierenden Faktor im Hinblick auf die in Kapitel 3.3 angeführten Anforderungen darstellt. Zusätzlich besteht, ähnlich wie beim ESM-100, durch die Autorange-Funktion potenziell das Problem, dass transiente Vorgänge bei Messungen nicht korrekt erfasst werden. Für die Messung von DC-Magnetfeldern ist ein separater Messaufnehmer, basierend auf Hallsensoren, verfügbar.

Tabelle 3.1 fasst die wichtigsten technischen Daten der drei voranstehend beschriebenen Geräte zusammen.

Tabelle 3.1: Vergleichende Zusammenfassung der wichtigsten technischen Daten der Messgeräte ELT-400, ESM-100 und SMP2+WP400. Es handelt sich dabei um Kompaktgeräte mit jeweils einem isotropen Messkanal, d. h. simultane Verarbeitung von drei orthogonalen Spulensensor-Signalen und nachfolgender Vektorbildung.

	ELT-400	ESM-100	SMP2 + WP400
Messfrequenzbereiche (analog)	1 Hz – 400 kHz 10 Hz – 400 kHz 30 Hz – 400 kHz	5 Hz – 400 kHz 5 Hz – 2 kHz 2 kHz – 400 kHz	1 Hz – 0.4 / 4 / 40 / 400 kHz 10 Hz – 0.4 / 4 / 40 / 400 kHz 25 Hz – 0.4 / 4 / 40 / 400 kHz 100 Hz – 0.4 / 4 / 40 / 400 kHz
Eigenrauschen im untersten Messbereich (Breitband)	< 50 nT (10 Hz – 400 kHz) < 200 nT (1 Hz – 400 kHz)	< 10 nT (5 Hz – 400 kHz) < 2 nT (5 Hz – 2 kHz) < 8 nT (2 kHz – 400 kHz)	< 50 nT (10 Hz – 400 kHz) < 200 nT (1 Hz – 400 kHz)
FFT im Gerät implementiert	nein	ja	ja

¹⁸ Inzwischen wurde auch von Narda STS ein diesem Konzept folgendes Produkt „FieldMan“ auf den Markt gebracht. Die Markteinführung erfolgte jedoch zu einem Zeitpunkt, an dem die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Messungen bereits abgeschlossen waren. Eine detaillierte Analyse der Eigenschaften dieses Messgerätes und ein entsprechender Vergleich mit anderen Geräten wurde im Rahmen dieses Projektes daher nicht mehr durchgeführt. Mit der Markteinführung des FieldMan hat Narda STS die Vermarktung des Messgerätes ELT 400 eingestellt.

Frequenzauflösung (FFT)	-	400 Hz (bei 400 kHz Bandbreite) 200 Hz (bei 200 kHz Bandbreite) 30 Hz (bei 32 kHz Bandbreite)	1 kHz (bei 400 kHz Bandbreite) 100 Hz (bei 40 kHz Bandbreite)
Eigenrauschen (Spektrum nach FFT) bei 400 kHz Messbandbreite	-	< 5 nT @ 400 Hz, < 1 nT @ f > 2 kHz	< 20 nT @ 1 kHz, < 4 nT @ f > 2 kHz
Aussteuergrenze im empfindlichsten Messbereich	±45 µT (32 µT _{RMS})	±28 µT (20 µT _{RMS})	aus Manual nicht ableitbar; experimentell bestimmt ca. ±35 µT (25 µT _{RMS})
Autorange-Funktion	nein	ja	ja
Messwertanzeige	alternativ RMS, PEAK, oder % vom Referenzwert (WPM)	RMS	RMS und PEAK gleichzeitig oder % vom Ref.-Wert (WPM)
Abtastrate A/D-Wandlung	1 MS/s	nicht bekannt	1 MS/s
kürzestes Messzeitintervall	250 ms	500 ms	500 ms
(automatische) Speicherung von Messdaten am Gerät	(nein) nein	(ja) ja Speicherzeitintervalle 1 s, 2 s, 5 s, 10 s, 30 s	(ja) ja Speicherzeitintervalle 0.5 s, 1 s, 5 s, 10 s, 15 s, 30 s, 1 min, 6 min
Analogausgang	±1.1 V fix verdrahtet	±0.85 V per Software zu konfigurieren	nein
Möglichkeit der Bewertung	WPM hardwaremäßig implementiert; Je nach Geräteversion, max. 2 – 3 unterschiedliche Filter pro Gerät verfügbar. Bewertung für Allgemeinbevölkerung nach ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 zwar verfügbar, aber dzt. nicht beides auf einem Gerät	nur mittels zugehöriger Software nach FFT; Bewertung nach ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 verfügbar; Bewertungsmethode (WPM oder MFR) unklar (in Bedienungsanleitung nicht beschrieben)	Softwareseitig mittels digitaler WPM-Filter im Gerät implementiert. Bewertung nach ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 verfügbar
Messaufnehmer (Spulen)	abnehmbar, 100 cm ² , 3 cm ²	fix verbaut, ca. 8 cm ²	abnehmbar, 100 cm ² , 3 cm ²
Sonstiges	-	gleichzeitig auch elektrische Feldsonde	gleichzeitig auch elektrische Feldsonde

3.4.2 Personendosimeter (Exposimeter)

Im Marktsegment der Personendosimeter (Exposimeter) gibt es kaum Produkte, die den in Kapitel 3.3 formulierten Anforderungen näherungsweise entsprechen. Grund dafür ist, dass derartige Geräte üblicherweise nicht für eine entlang der Zeitachse lückenlose Aufzeichnung von Expositionsdaten ausgelegt sind, sondern vielmehr dafür, über relativ große Zeiträume statistisch repräsentative Messdaten zu sammeln, um aussagekräftige Datensätze, z. B. für epidemiologische Studien, zu erhalten (z. B. im Zusammenhang mit der Exposition der Bevölkerung in Magnetfeldern, verursacht durch das Energieversorgungsnetz). Die Erfassung von transienten Vorgängen steht bei Personendosimetern nicht im Vordergrund. Zudem sind diese Geräte typischerweise sehr kompakt und leicht konzipiert, um eine entsprechend hohe Akzeptanz für das Tragen der Geräte zu erreichen. Dies limitiert die Größe der Energieversorgung (Akku bzw. Batterie) und um damit praktikable Akku- bzw. Batterielaufzeiten zu erzielen, müssen die Möglichkeiten und die Geschwindigkeit der digitalen Signalverarbeitung in den Geräten beschränkt bleiben. Die meisten Personendosimeter haben obere Messfrequenzbereichsgrenzen deutlich kleiner als 100 kHz und bieten die Möglichkeit, in Abständen von einigen Sekunden Effektiv- oder Spitzenwerte (PEAK-Werte) der Messgröße aufzuzeichnen. Die Aufzeichnung des Zeitsignals der Messgröße bis 100 kHz und damit die

Möglichkeit, die aufgezeichneten Messdaten später detailliert zu analysieren, bietet hingegen gegenwärtig nur das ExpoM – ELF (Fields at Work GmbH, Zürich, Schweiz). Aus den genannten Gründen beträgt die Länge der pro Messintervall aufgezeichneten Signallänge bei 100 kHz Messbandbreite allerdings nur ca. 13 ms bei einem minimalen einstellbaren Messintervall von 4 Sekunden, d. h. mehr als 99 % des Messintervalls verstreichen ohne Aufzeichnung des Messsignals.

3.4.3 Mehrkanal-Messsysteme

Die Tatsache, dass bei Magnetfeldmessungen in Zusammenhang mit Elektroautos eine Vielzahl von Messpositionen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen zu betrachten sind, hat zur Entwicklung von Mehrkanal-Messsystemen für magnetische Felder speziell für diese Anwendung geführt.

Data Processor 7904A-001 (Eiden Co., Ltd) für ELT-400 Geräte

Die japanische Firma Eiden Co., Ltd. bietet unter dem Namen *Data Processor 7904A-001* seit einigen Jahren ein System an, an das bis zu 15 der in Kapitel 3.4.1 beschriebenen ELT-400 Geräte angeschlossen werden können, um ein Mehrkanalmesssystem zur Erfassung der magnetischen Felder in Fahrzeugen zu realisieren (Eiden, 2021).

Dabei werden die Elektronik-Einheiten der ELT-Geräte nebeneinander in eine Konsole gesteckt und sowohl deren seriellen Schnittstellen als auch deren Analogausgänge mit der Konsole verbunden. Über die serielle Schnittstelle können die Elektronik-Einheiten für die Messung konfiguriert werden (Messbereichs- und Filtereinstellungen etc.), die Signale der Analogausgänge werden der Elektronik in der Konsole zwecks A/D-Wandlung zugeführt. Mittels entsprechender Software werden die digitalisierten Messdaten ausgewertet und visualisiert. Auf diese Weise wird ein Messsystem realisiert, das den in Kapitel 3.3 angeführten Anforderungen weitestgehend gerecht wird. Als unter Umständen limitierende Eigenschaft verbleibt der ELT-400-inherente, relativ geringe Aussteuerbereich im empfindlichsten Messbereich, der bei transienten Vorgängen in der Nähe der Feldquellen potenziell zur Übersteuerung führen kann. Außerdem fehlt die Möglichkeit der Messung von DC-Magnetfeldern.

Gemäß einer Preisanfrage (Stand Sommer 2021) beim deutschen Vertriebspartner (CMV Hoven GmbH) für das System liegen die Anschaffungskosten für ein System mit zehn isotropen Messkanälen bei einem sechsstelligen Betrag, exklusive der zum Betrieb notwendigen ELT-400 Geräte.

Magnetfeldmesssystem MF EASY (Seibersdorf Labor GmbH)

Auf Basis der Erfahrungen mit Magnetfeldmessungen in Fahrzeugen in mehreren früheren Projekten wurde von der Seibersdorf Labor GmbH ein Multikanal-Magnetfeldmesssystem (**M**agnetic **F**ield **E**xposure **A**ssessment **S**ystem – MF EASY) entwickelt mit dem Ziel, die in Kapitel 3.3 zusammengefassten Anforderungen bestmöglich zu erfüllen.

Das MF EASY bietet 10 isotope, simultane Messkanäle für Messungen der magnetischen Flussdichte im Frequenzbereich 0 Hz – 400 kHz. Das Messsystem wird von einer 12 V-Batterie versorgt und kann somit portabel für Messungen während Realfahrten in den zu untersuchenden Fahrzeugen (z. B. im Kofferraum) untergebracht werden.

Es ist damit möglich, an 10 Messpositionen gleichzeitig die magnetische Flussdichte im Zeitbereich zu erfassen und deren Zeitverlauf abzuspeichern, wodurch keine der für die

Bewertung relevanten Eigenschaften verloren gehen. Schnelle Algorithmen zur Zeitsignalbewertung auf Basis der WPM-TD ermöglichen optional zusätzlich eine direkte Ablesung und Aufzeichnung des bewerteten Messergebnisses in prozentueller Abhängigkeit von den Referenzwerten der wichtigsten Dokumente zur Begrenzung der Exposition von Personen (1999/519/EG, ICNIRP 2010). Abtastrate (bis max. 2 MHz) und Messintervalllänge können in weiten Grenzen flexibel angepasst werden¹⁹ und in Stufen schaltbare Eingangs- und Ausgangsfilter in den Messverstärkern erlauben eine flexible Anpassung des Messfrequenzbereichs zwischen 0 Hz und 400 kHz. Abbildung 3.3 zeigt ein vereinfachtes Schema des Systemkonzepts vom MF EASY.

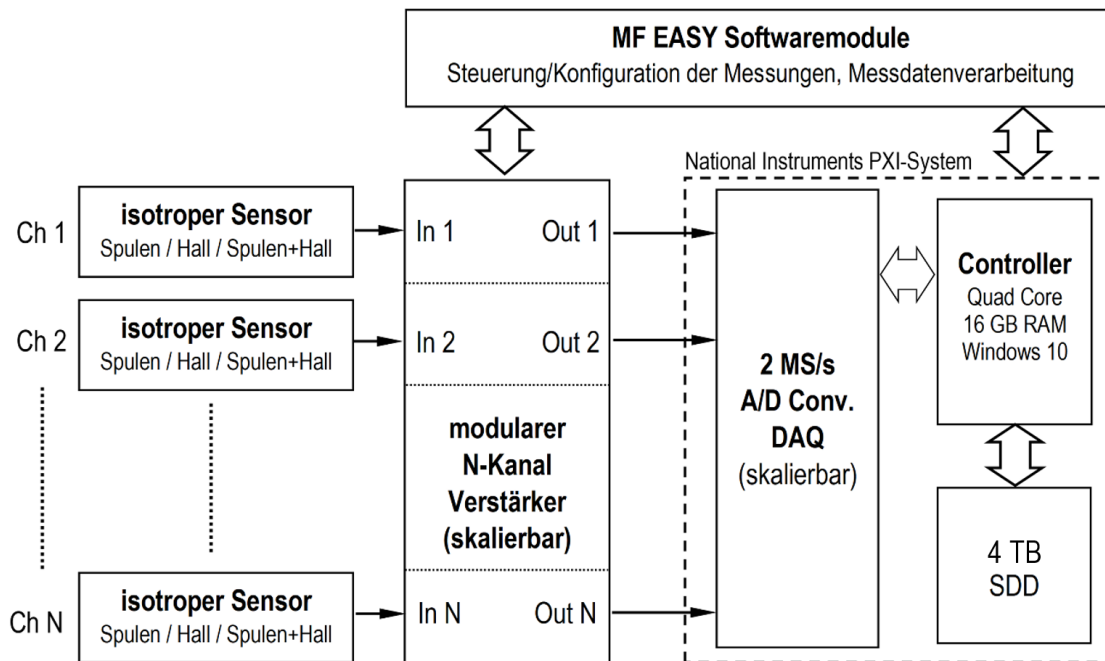


Abbildung 3.3: Vereinfachtes Schema des Systemkonzepts vom MF EASY.

Zur Abdeckung des gesamten Frequenzbereiches von 0 Hz bis 400 kHz sind in den Messaufnehmern (Sonden) isozentrisch positionierte Triples von Hall-Elementen und Messspulen angeordnet (Abbildung 3.4). Für unterschiedliche Anwendungen stehen Sonden in unterschiedlichen Größen zur Verfügung (Abbildung 3.5).

¹⁹ Die eingesetzte Hardware erlaubt das Streaming von Messdaten direkt in den Arbeitsspeicher des Controllers ohne die CPU zu belasten (DMA – direct memory access). Auf diese Weise hängt das maximal sinnvoll wählbare Messintervall, bei vorgegebener Abtastrate und Kanalzahl, vom verfügbaren Arbeitsspeicher des Systems ab. Beim konkret eingesetzten System (3 x 10 Kanäle mit je 2 MS/s und 3 x 10 Kanäle mit je 50 kS/s) sind Messintervalle mit lückenloser Aufzeichnung von Rohmessdaten über mehrere Minuten möglich. Sofern auf die Messdaten „on-the-fly“ mathematische Operationen angewendet werden, reduziert sich das maximal mögliche Messintervall signifikant (z. B. 5 s bei einer Abtastrate von 2 MS/s), da in diesem Fall DMA-Streaming nicht möglich ist.

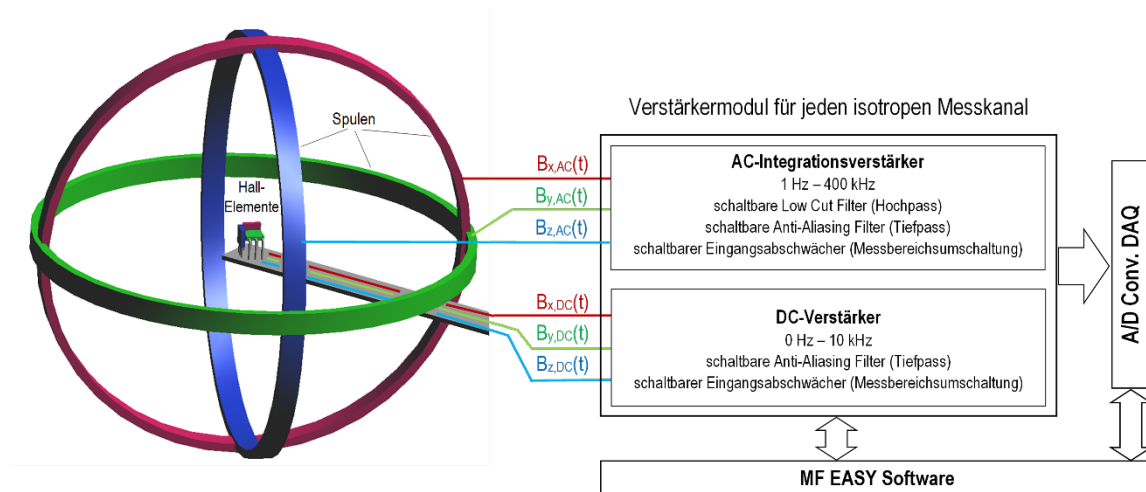


Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau des Messaufnehmers (Sonde) eines isotropen MF EASY Messkanals mit isozentrisch angeordneten Spulen- und Hall-Element-Triples.



Abbildung 3.5: Unterschiedliche verfügbare MF EASY Sondengrößen: oben: 100 cm² Spulen + Hall; Mitte: 3 cm² Spulen + Hall; unten: 10 mm Durchmesser (Hall).

Die A/D-Wandlung der von den Messverstärkern kommenden Signale erfolgt über präzise und leistungsfähige PXI-Analogsignalerfassungsmodule PXIe 6341 und PXIe 6368 (National Instruments, Austin, Texas, USA). Die Einstellung aller Messparameter sowie die Ablaufsteuerung der Messung erfolgt via graphischer Benutzeroberfläche (GUI, portabler Touchscreen) programmiert in LabView 2016.

Abbildung 3.6 zeigt das MF EASY-Gesamtsystem bzw. das Rack mit Verstärkern und Signalerfassungshardware, verstaut im Kofferraum eines Tesla Model 3, vorbereitet für Messungen im Feld (während des Fahrens bzw. an öffentlichen Ladepunkten). Innerhalb der Projektlaufzeit wurde das Messsystem weiterentwickelt und in einem zweiteiligen Gehäuse untergebracht, das in Abbildung 3.7 gezeigt wird²⁰. Abbildung 3.8 zeigt zehn Sonden des

²⁰ Die Weiterentwicklungen betrafen lediglich die digitale Steuerung des Systems und den mechanischen Aufbau, d. h. die gesamte Messkette und die Sonden blieben im gesamten Projektverlauf unverändert.

MF EASY, fixiert in einem Schaumstoff-Dummy, entsprechend verteilt über den rechten Platz auf der Rückbank für Messungen innerhalb des Fahrzeugs.

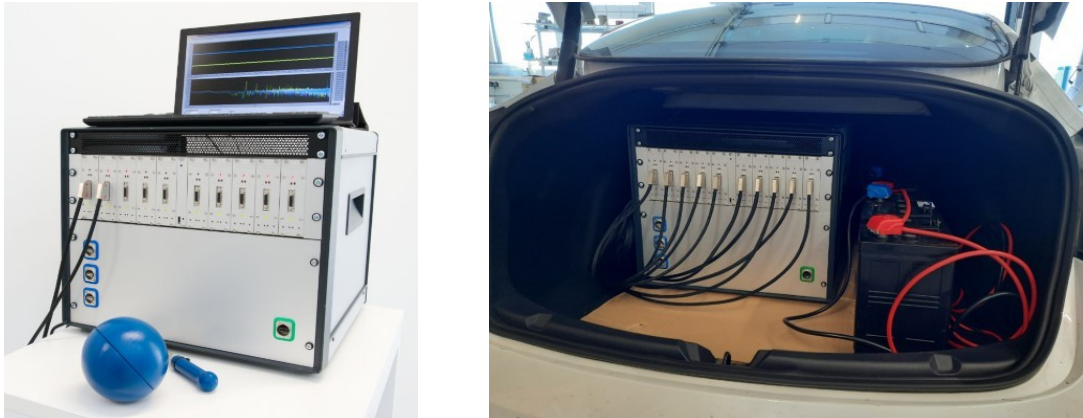


Abbildung 3.6: MF EASY Gesamtansicht mit Sonden (nur zwei Sonden angeschlossen) und Touchscreen (links) und im Kofferraum eines Tesla Model 3, versorgt von einer 12 V-Batterie und mit zehn angeschlossenen Sonden.



Abbildung 3.7: Das weiterentwickelte und in einem neuen, zweiteiligen Gehäuse untergebrachte MF EASY wurde schlussendlich für die weiteren Messungen verwendet (<https://rf.seibersdorf-laboratories.at/products-services/products/mf-easy>).

Tabelle 3.2 fasst die wichtigsten Spezifikationen des MF EASY zusammen, aus denen ersichtlich wird, dass dieses Messsystem vorteilhaft für die Aufgabenstellungen im Rahmen des gegenständlichen Projekts eingesetzt werden kann.

Aufgrund des modularen Systemkonzepts ist das MF EASY in unterschiedlichsten Konfigurationen bezüglich Sondengröße, Messdynamik, Bewertungsmethoden, Messfrequenzbereich und Messkanalanzahl einsetzbar. Die Anschaffungskosten liegen, je nach Konfiguration, bei einem sechsstelligen Euro-Betrag.

Speicher für Messdaten	4 TB (SSD-Festplatte)
Messwertanzeige	RMS, PEAK, WPM (ICNIRP 1998, ICNIRP 2010) gleichzeitig darstellbar, weitere über Software ergänzbar
Möglichkeit der Bewertung	Softwareseitig mittels digitaler WPM-Filter implementiert. Bewertung nach ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 verfügbar. Weitere einfach über Softwaremodul ergänzbar.
Maximale Anzahl isotroper Messkanäle	Modular erweiterbar 5, 10 oder 15
Verfügbare Sonden	isotrop: 100 cm ² Spulen (+ Hall) isotrop: 3 cm ² Spulen (+ Hall) isotrop: 10 mm Durchmesser (nur Hall) Flachspule 20 cm ²

3.4.4 Gradientenfeldsonde MAGPy (SPEAG)

Dieses Messsystem wurde speziell für die Bewertung von Expositionen in unmittelbarer Nähe zu induktiven Energieübertragungssystemen im Frequenzbereich von 3 kHz – 10 MHz entwickelt. Wie aus der Obergrenze des Messfrequenzbereiches ablesbar ist, liegt der Anwendungsbereich des Messsystems nicht ausschließlich bei induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge (Arbeitsfrequenz in Europa typ. 85 kHz), sondern ist deutlich weiter gefasst (z. B. Ladesysteme für elektronische Geräte). Im Messkopf der Sonde befinden sich ein isotroper E-Feldsensor (3 orthogonale Dipole) sowie insgesamt acht kleine, an den Ecken eines würfelförmigen Volumenbereiches angeordnete isotrope Spulensensoren (insgesamt 24 Einzelspulen). Zusätzlich zur Messung der Amplitude der elektrischen und magnetischen Feldstärke kann damit auch der Gradient des Magnetfeldes bestimmt werden. Auf Basis von zugrunde gelegten Ergebnissen aus dosimetrischen Berechnungen (Reihensimulationen unter Verwendung anatomischer Körpermodelle und unterschiedlichen Feldgradienten) erlaubt dieses Messsystem auch unmittelbar eine Abschätzung der im Körper induzierten Feldgrößen (J , E_i , SAR) und damit eine Bewertung auf Grundlage der Basisgrenzwerte. Diese Eigenschaft ist speziell im Frequenzbereich oberhalb von 100 kHz von großer praktischer Bedeutung, da dort eine Expositionsbewertung in der Nähe von induktiven Ladesystemen auf Grundlage der Referenzwerte typischerweise zu einer großen Überbewertung der Exposition führt. Grund dafür ist, dass im Frequenzbereich oberhalb von 100 kHz von ICNIRP auch Referenzwerte im Hinblick auf thermische Wirkungen festgelegt wurden, und diese Referenzwerte unter der Annahme von Fernfeldbedingungen (und damit sehr effizienter Einkopplung der externen Felder in den Körper) abgeleitet wurden. In der Realität handelt es sich bei Expositionen in der Nähe von induktiven Energieübertragungssystemen aber um eine stark lokalisierte Exposition im reaktiven Nahfeld der Quelle, bei der die Einkopplung der Felder in den Körper wesentlich schwächer ist als unter Fernfeldbedingungen.

Für Messungen während des induktiven Ladens ist dieses Messsystem, aufgrund der unteren Messfrequenzbereichsgrenze von 3 kHz nicht geeignet. Für Messungen und Expositionsbewertungen in unmittelbarer Nähe zu induktiven Ladesystemen jedoch wäre es vorteilhaft einsetzbar.

4 Literaturübersicht betreffend Exposition während des Ladens von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen

4.1 Methoden für die Literaturrecherche

Die Recherche nach relevanter deutsch- und englischsprachiger Literatur zu Expositionserhebungen in Zusammenhang mit dem Laden von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen wurde in den Datenbanken EMF-Portal (<https://www.emf-portal.org/de>) und IEEE Xplore (ieeexplore.ieee.org) durchgeführt. Darüber hinaus wurden die Referenzlisten von relevanten Artikeln nach weiteren Treffern durchsucht.

Die Publikationen stammten gemäß Vorgabe der Leistungsbeschreibung aus den Jahren 2009 bis 2024.

4.2 Arbeiten über Messungen an BEV und/oder PHEV während konduktiver Ladevorgänge

4.2.1 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten

Lediglich sechs Studien befassten sich mit der Magnetfeldexposition während konduktiver Ladevorgänge (Lennerz et al., 2020, 2018; Okumura et al., 2017; Pääkkönen und Korpinen, 2019; Trentadue et al., 2020b, 2020a).

Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 fassen die wichtigsten Informationen und Ergebnisse dieser Studien zusammen.

Lennerz et al. haben vier BEV (BMW i3, Nissan Leaf, Tesla Model 85S und Volkswagen e-up!) während des AC-Ladens mit Messungen entlang des Ladekabels untersucht. Die Messwerte sind in μT sowie als Prozentwert bezogen auf die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung aus ICNIRP 1998 angeführt. Nachdem für die Messungen das Messgerät ELT-400 von Narda verwendet wurde, ist davon auszugehen, dass bei den angeführten Prozentwerten die WPM im Zeitbereich angewendet wurde. Explizit erwähnt wird die Bewertungsmethode jedoch nicht (Lennerz et al., 2020, 2018). Die Aufgabenstellung bezog sich auf die Abklärung möglicher Störbeeinflussungen von kardialen Implantaten. Solche konnten gemäß den Autoren nicht festgestellt werden.

Die Informationen aus Pääkkönen und Korpinen (2019) können nicht für eine fundierte Expositionsbewertung während des Ladens verwendet werden, da lediglich ein Einzelwert („less than 5 μT “) ohne klare Festlegung der Messposition angegeben wird („in the charging tower“).

In der Arbeit Okumura et al. (2017) werden einzelne Messwerte berichtet, gemessen in unmittelbarer Nähe von Komponenten der Ladeinfrastruktur beim Laden an einer Haushaltssteckdose und an einer Schnellladestation. Statische magnetische Flussdichten bis 1.6 mT an der DC-Schnellladestation und AC-Flussdichten bis 91 μT für den Ladevorgang an der Haushaltssteckdose werden angegeben.

In Trentadue et al. (2020a) wurden fünf unterschiedliche DC-Ladesäulen untersucht. Messungen erfolgten in 7.5, 20 und 50 cm Distanz zu den Ladesäulen, jeweils an der Vorderseite und seitlich während Ladevorgängen mit Ladeleistungen im Bereich von 40-50 kW. Messungen erfolgten frequenzselektiv und im Zeitbereich. Die Messergebnisse wurden mittels WPM auf Grundlage der Referenzwerte gemäß EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG bewertet. Unmittelbar an einer der Ladesäulen (in 7.5 cm Distanz) wurden Expositionsindizes bis zu 381 % gemessen, in 50 cm Distanz zu den Ladesäulen ergaben sich keine Hinweise auf Überschreitungen der Referenzwerte mehr.

Trentadue et al. (2020b) berichten Ergebnisse von Messungen in zwei Fahrzeugen während des DC-Ladens, in einem Fall in Form von magnetischen DC- und AC-Flussdichtewerten (unklar ob RMS- oder PEAK-Werte) und im anderen Fall zusätzlich in Form von Expositionsindizes. Für die AC-Messungen wurde eine Messbandbreite von 25 Hz – 2 kHz verwendet. Die berichteten Maximalwerte lagen bei 172 μT (DC) und 0.61 μT (AC), letzterer entsprechend 1.58 % Referenzwertausschöpfung.

Tabelle 4.1: Messwerte aus Messungen bei induktiven Ladevorgängen in/bei Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs, wie BEV und PHEV bzw. bei Ladesäulen bzw. entlang des Ladekabels. Detailinformationen zu den einzelnen Publikationen sind noch in Tabelle 4.2 auf Seite 47 zusammengefasst. Prozentangaben in der Spalte „Messwert“ beziehen sich auf Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 (bei Lennerz et al. 2018, 2020 ist allerdings nicht klar, ob ICNIRP 1998 oder ICNIRP 2020). Sofern in der Tabelle nicht angegeben, bleibt unklar, ob der Messwert RMS- oder PEAK-Wert ist. *) vorhandene Messdaten in magnetische Flussdichte B in μT umgerechnet. **) keine näheren Frequenzangaben in der Publikation.

Publikation	Messwert B [μT] (%)	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
Lennerz et al. (2018, 2020)	54.5 (33.6 %)	1 – 400 k	Entlang des Ladekabels	räumliches Maximum (WPM-Auswertung)	BEV, BMW i3, Laden mit 20 A Ladestrom (AC)
	30.1 (28.9 %)	1 – 400 k	Entlang des Ladekabels	räumliches Maximum (WPM-Auswertung)	BEV, Nissan Leaf, Laden mit 16 A Ladestrom (AC)
	78.0 (50 %)	1 – 400 k	Entlang des Ladekabels	räumliches Maximum (WPM-Auswertung)	BEV, Tesla 85S, Laden mit 20 A Ladestrom (AC)
	116.5 (89.6 %)	1 – 400 k	Entlang des Ladekabels	räumliches Maximum (WPM-Auswertung)	BEV, Tesla 85S, Laden mit 32 A Ladestrom (AC)
	50.5 (31.2 %)	1 – 400 k	Entlang des Ladekabels	räumliches Maximum (WPM-Auswertung)	BEV, VW e-up!, Laden mit 10 A Ladestrom (AC)
Pääkkönen et al. (2019)	5	50	Nahe Ladesäule	Einzelwertangabe (RMS) ohne nähere Details	Während Ladevorgang, ohne nähere Angabe
Okumura et al. (2017a)	91*	AC**	am Ladekabel	Maximum	Während Ladevorgang an Haushaltssteckdose
	41*	AC**	an Steuerbox	Maximum	Während Ladevorgang an Haushaltssteckdose
	51*	AC**	am Ladestecker	Maximum	Während Ladevorgang an Haushaltssteckdose
	300	DC**	am Ladekabel	Maximum	Während Ladevorgang an Haushaltssteckdose
	300	DC**	an Steuerbox	Maximum	Während Ladevorgang an Haushaltssteckdose
	200	DC**	am Ladestecker	Maximum	Während Ladevorgang an Haushaltssteckdose
	5.8*	AC**	an der Ladesäule	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
	2.8*	AC**	Kabelausgang Ladesäule	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
	0.3*	AC**	am Ladekabel	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
	0.3	AC**	am Ladestecker	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
	1600	DC**	an der Ladesäule	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
	730	DC**	Kabelausgang Ladesäule	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
	920	DC**	am Ladekabel	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
	570	DC**	am Ladestecker	Maximum	Während Ladevorgang an Schnellladestation
Trentadue et al. (2020a)	45 (111 %)	25 – 2 k	7.5 cm v. Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule A, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	0.68	25 – 2 k	50 cm von Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule A, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	2.1 (6.9 %)	25 – 2 k	7.5 cm v. Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule B, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	0.80	25 – 2 k	50 cm von Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule B, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	8.7 (38 %)	25 – 2 k	7.5 cm v. Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule C, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	0.74	25 – 2 k	50 cm von Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule C, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	127 (381 %)	25 – 2 k	7.5 cm v. Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule D, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	0.68	25 – 2 k	50 cm von Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule D, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	112 (288 %)	25 – 2 k	7.5 cm v. Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule E, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW

Publikation	Messwert B [μ T] [%]	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
	0.32	25 – 2 k	50 cm von Ladesäule	Maximum an unterschiedlichen Seiten	DC-Ladesäule E, Ladeleistung bei Messung 40-50 kW
	172	0 - 1	hintere Sitzreihe, rechts, Füße	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen	BEV, Hyundai Ioniq, DC Laden, I_{DC} = ca. 180 A
Trentadue et al. (2020b)	0.19	25 - 2k	hintere Sitzreihe, rechts, Füße	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen	BEV, Hyundai Ioniq, DC Laden, I_{DC} = ca. 180 A
	0.612 (1.58 %)	25 - 2k	hintere Sitzreihe, links, Füße	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen	BEV, Jaguar I-PaceM, DC Laden, I_{DC} = ca. 200 A

Tabelle 4.2: Zusätzliche Informationen zu den in Tabelle 4.1 auf Seite 45 zusammengefassten Messdaten von Messungen bei konduktiven Ladevorgängen an Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs wie BEV und PHEV, bei Ladesäulen bzw. entlang des Ladekabels. Nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d.“ gekennzeichnet. Für die jeweilige Publikation nicht-zutreffende Felder sind mit „-“ gekennzeichnet. „bb“ ... Breitbandmessung, „fs“ ... frequenzselektive Messung.

Publikation	Ladevorgang	Messgeräte	Sitzpositionen	Messposition (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Messmethode	identische Ladezustände bei hintereinander erfolgten Messungen	Stör-/Hintergrund-Feldstärke	Randbedingungen	Sonstiges
Lennerz et al. (2018, 2020)	j	Narda ELT-400 mit 100 cm ² Sonde	entlang des Ladekabels	-	n. d.	bb	n. d.	n. d.	Rollenprüfstand; und im öffentlichen Raum	Studien befassen sich mit kardialen implantierbaren elektrischen Geräten
Pääkkönen et al. (2019)	j	Combinova MFM3300 Enviromentor ML-1 (Magnetfeldlogger)	-	-	n. d.	fs	n. d.	Hintergrund Magnetfeld < 0.02 µT	öffentliche Ladesäule	nur Außenbereich, keine Messungen im Fahrzeug
Okumura et al. (2017a)	j	Milligaußmeter, nicht näher spezifiziert	-	-	Direkt an einzelnen Komponenten	bb	n. d.	0.05 – 0.4 µT (AC) 200 – 300 µT (DC)	Haushaltssteckdose und öffentliche DC-Schnelladesäule	nur Außenbereich, keine Messungen im Fahrzeug
Trentadue et al. (2020a)	j	Narda EHP 50E	-	-	In unterschiedl. Distanzen zu den untersuchten Ladesäulen	fs	ja	n. d.	Labormessungen	nur Außenbereich, keine Messungen im Fahrzeug
Trentadue et al. (2020b)	j	Narda EHP-50G (1 - 400 kHz); Narda HP01 (DC, 0 - 1 kHz); Hioki Klemme (0 - 500 A, 0 - 200 kHz); YOKOGAWA WT 1800, WT1806; DEWESoft SIRIUSi-CD;	n. d.	3 pro Sitz	n. d.	fs	n. d.	Hintergrund-MF mit ein- und ausgeschaltetem Auto geprüft	n. d.	-

4.2.2 Zusammenfassung der recherchierten Ergebnisse zum induktiven Laden

Aufgrund der nur vereinzelt vorliegenden Messdaten von Magnetfeldimmissionen innerhalb von Fahrzeugen während des induktiven Ladens, ist keine repräsentative Aussage möglich, die vorliegenden Daten aus einer Arbeit zeigen jedoch nur sehr geringe Flussdichtewerte und Ausschöpfungsgrade der Referenzwerte. Zusätzlich deuten die Daten darauf hin, dass aus strahlenschutztechnischer Sicht beim DC-Laden das vom überlagerten AC-Anteil des Ladestroms verursachte magnetische Wechselfeld relevanter ist als das vom DC-Anteil des Ladestromes verursachte statische Magnetfeld. Die recherchierten Ergebnisse von Messungen im Nahbereich von Ladesäulen und Ladekabeln in wenigen Zentimetern Abstand zeigen teilweise Überschreitungen der Referenzwerte, in Distanzen von 50 cm und darüber ist dies jedoch nicht mehr der Fall, wobei auch hier hinsichtlich der Repräsentativität dieser Daten die geringe Anzahl vorliegender Untersuchungen beachtet werden muss.

4.3 Arbeiten über Messungen an BEV und/oder PHEV an induktiven Ladepunkten

Hinsichtlich der Expositionsbewertung im Bereich von Systemen zur induktiven Energieübertragung (Wireless Power Transfer, WPT) existieren eine Vielzahl von Publikationen, insbesondere numerische Berechnungen zur Überprüfung der Einhaltung der Basisgrenzwerte. Ein umfassender Überblick hinsichtlich der Sicherheitsaspekte von WPT-Systemen für Elektrofahrzeuge in Bezug auf EMV und EMF wird in Maradei et al. (2024) gegeben.

In vielen weiteren dieser Arbeiten werden jedoch WPT-Systeme betrachtet, die nicht für das Laden von Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs vorgesehen sind. Zudem berichten nur ganz wenige dieser Arbeiten Messungen und/oder Berechnungen von in der Praxis eingesetzten WPT-Systemen, sondern fast ausschließlich von Laborprototypen bzw. in der überwiegenden Mehrzahl sogar nur von rein numerischen Modellen. Aus den meisten dieser Arbeiten lassen sich daher nur sehr eingeschränkt Daten ableiten, die als unmittelbar relevant für die Aufgabenstellung in diesem Forschungsvorhaben angesehen werden können. Es werden in der folgenden Tabelle 4.3 nur jene Arbeiten angeführt, die sich mit WPT-Systemen im Übertragungsfrequenzbereich 20 kHz – 150 kHz beschäftigten und die einen Bezug zum Laden von Elektrofahrzeugen aufzeigen. Aus diesen Arbeiten werden die wichtigsten Ergebnisse in der Tabelle 4.3 zusammengefasst.

Insgesamt sind die vorliegenden Daten sehr heterogen hinsichtlich betrachteter Übertragungsfrequenzen, Leistungen und vor allem hinsichtlich der betrachteten Messpositionen bzw. betrachteter Aufenthaltspositionen von Personen. Trotz dieser Heterogenität zeigen die Arbeiten weitgehend übereinstimmend, dass in üblicherweise zugänglichen Aufenthaltsbereichen innerhalb und rund um Fahrzeuge während des induktiven Ladens zwar lokal die Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 und/oder ICNIRP 2010 überschritten werden können, jedoch bleiben die relevanten körperinternen dosimetrischen Größen unterhalb der zugrundeliegenden Basisgrenzwerte. Dies gilt nicht mehr zwingend, wenn man sich dem WPT-System auf weniger als einige zehn Zentimeter Abstand nähert, was in der Praxis einem Aufenthaltsbereich unterhalb des Fahrzeugbodens gleichkommt. In Ausnahmefälle, in denen Überschreitungen der Basisgrenzwerte auch in üblichen Aufenthaltsbereichen berichtet werden (De Santis et al., 2018), sind die Expositionswerte oberhalb der Basisgrenzwerte mit großer Wahrscheinlichkeit auf die Bewertungsmethode zurückzuführen (z. B. fehlende Elimination von numerischen Artefakten durch Verwendung des Maximalwertes der induzierten elektrischen Feldstärke).

Tabelle 4.3: Zusammenfassung von Literaturdaten aus Arbeiten über induktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge des Individualverkehrs, in denen Aspekte der Exposition von Personen betrachtet wurden. Für die jeweilige Publikation nicht-zutreffende Felder sind mit „-“ gekennzeichnet.

Publikation	Expositionswert E_i (V/m), J (A/m ²), B (μT), SAR (W/kg) Explnd [%]	Frequenz, Leistung	Position, (Teil-) Körperbereich, Expositionssituation	Details zur Angabe der dosimetrischen Größe in der Arbeit	Anmerkungen
Arduino et al. (2020)	2.5 V/m 4.7 V/m 5.5 V/m	85 kHz 11 kW	Kindermodell in 1 m Distanz zum Spulenzentrum stehend Erwachsenenmodell in 1 m Distanz zum Spulenzentrum stehend Erwachsenenmodell in 1 m Distanz zum Spulenzentrum knieend	Artefakt-korrigierte E_i -Werte, 1 mm Gitterschrittweite	ausschließlich numerische Analyse
Campi et al. (2017a)	~ 10 μT ~ 27 μT < 10 μT	85 kHz 7.7 kW	neben Fahrzeug auf Straßenniveau bei max. Versatz unterhalb des Fahrzeugs auf Straßenniveau bei max. Versatz neben Fahrzeug auf Straßenniveau ohne Versatz	magnetische Flussdichte nur als Farb-Plot	ausschließlich numerische Analyse
Campi et al. (2017b)	< 8 μT < 1 μT < 20 μT < 5 μT	85 kHz 22 kW	im Fahrzeug bei max. Versatz im Fahrzeug bei ohne Versatz neben Fahrzeug auf Straßenniveau bei max. Versatz neben Fahrzeug auf Straßenniveau ohne Versatz	magnetische Flussdichte nur als Farb-Plot	ausschließlich numerische Analyse
Campi et al. (2019a)	~ 37 μT ~ 9 μT	85 kHz 7.7 kW	Max. entlang Fahrzeugumfang auf Straßenniveau Fahrzeug 1 Max. entlang Fahrzeugumfang auf Straßenniveau Fahrzeug 2	Verlauf der magnetischen Flussdichte als Farb-Plot und entlang Fahrzeugumfang für unterschiedlichen Versatz	ausschließlich numerische Analyse
Campi et al. (2019b)	149 V _{pp} 2.61 V _{pp} 0.06 V _{pp}	85 kHz 7.7 kW	Person mit Herzschrittmacher unterhalb Fahrzeug Person mit Herzschrittmacher neben Fahrzeug Person mit Herzschrittmacher im Fahrzeug	Spitze-Spitze Spannung am Herzschrittmacher einer Person	ausschließlich numerische Analyse
Chakarothei et al. (2018)	72 μT 2.13 V/m	125 kHz 7.7 kW	B und E_i Werte in stehendem Erwachsenen, d = 20 cm zur Spule ohne Ferritplatte	E_i (99.9. Perzentil)	numerische Analyse, B auch gemessen an Laborprototyp
	35 μT 0.42 V/m	97 kHz 7.7 kW	mit Ferritplatte		
Chaoqun et al. (2018)	0.7 – 8 μT bis 52 μT	85 kHz 11.4 kW	B neben Fahrzeug B im Fahrzeug (unklar, ob Schirmung durch Fahrzeugboden berücksichtigt wurde)	-	numerische Analyse, B auch gemessen an Laborprototyp
De Santis et al. (2018)	13.3 V/m	85 kHz 7.7 kW 85 kHz 7.7 kW	Körpermodell „Duke“ und „Fats“ am Fahrerplatz und neben Fahrzeug, kein Versatz	$E_{i,avg,max}$	ausschließlich numerische Analyse,

Publikation	Expositionswert E_i (V/m), J (A/m ²), B (μT), SAR (W/kg) Explnd [%]	Frequenz, Leistung	Position, (Teil-) Körperbereich, Expositionssituation	Details zur Angabe der dosimetrischen Größe in der Arbeit	Anmerkungen
	19.9 V/m	150 kHz 7.7 kW	Körpermodell „Duke“ und „Fats“ am Fahrerplatz und neben Fahrzeug, maximaler Versatz		Carbonfaser Chassis des Fahrzeugs angenommen
	35 V/m		Körpermodell „Duke“ und „Fats“ am Fahrerplatz und neben Fahrzeug, maximaler Versatz		
Dergham et al. (2020a)	16.5 V/m 0.8 V/m	30 kHz 0.16 kW	Hand zwischen Ladespulen des Ladesystems für Scooter Kopf unmittelbar neben Ladespulen des Ladesystems für Scooter	$E_{i,max}$	Feldverteilung an realem System messtechnisch validiert
Dergham et al. (2020b)	< 20 μT	30 kHz 0.1 kW	B im Bereich einer Person am Scooter, Ladesystems für Scooter	$E_{i,max}$	Feldverteilung an realem System messtechnisch validiert
Ding et al. (2014)	< Basisgrenzwerte	30 kHz 0.1 kW	Körpermodell („Duke“) stehend in ca. 0.8 m Distanz Körpermodell („Duke“) liegend in ca. 0.8 m Distanz	schlecht lesbare Farb-Plots, Werte nicht quantifizierbar	ausschließlich numerische Analyse
Haider & Russer (2017)	< 36 μT	22 kHz k. A.	B im Fahrzeuginnenen	als 2D Diagramm angegeben	ausschließlich numerische Analyse, Ladesystem für Laden während des Fahrens
Hakuta & Watanabe (2018)	11.5 V/m	85 kHz 3.7 kW	Körpermodell („Taro“) stehend in 0.2 m Distanz zum Fahrzeug	E_i (99.9. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse
Hikage et al. (2016)	keine Beeinflussung	85 kHz 2 & 3 kW	Störbeeinflussungsuntersuchung mit AIMD	-	Experimentelle Studie
Ibrahim et al. (2015)	~ 5 μT	33 kHz 2 kW	neben Fahrzeug gemessen an Prototyp und simuliert	-	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Ibrahim et al. (2018)	5.4 μT	85 kHz 7 kW	0.8 m von Spulenmitte, 0.1 m von Spulenrand	als 2D Diagramm angegeben	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Kim et al. (2015)	1.98 μT	20 kHz 1 kW	Maximum neben Fahrzeug	als 2D Diagramm angegeben	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Laakso et al. (2014)	2.3 V/m	85 kHz 7 kW	Maximum aus mehreren Simulationen mit unterschiedlichen Körpermodelle in unterschiedlichen Distanzen zum Fahrzeug	$E_{i,avg}$ (99. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse

Publikation	Expositionswert E_i (V/m), J (A/m ²), B (μT), SAR (W/kg) Explnd [%]	Frequenz, Leistung	Position, (Teil-) Körperbereich, Expositionssituation	Details zur Angabe der dosimetrischen Größe in der Arbeit	Anmerkungen
Laakso & Hirata (2013)	2.96 V/m	85 kHz 7 kW	Maximum aus mehreren Simulationen mit unterschiedlichen Körpermodelle in unterschiedlichen Distanzen zum Fahrzeug	$E_{i,avg}$ (99. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse
Lämmle et al. (2020)	16.9 μT		Maximum oberhalb Fahrzeugschweller ohne Abschirmung	als 2D Diagramm angegeben	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Li et al. (2022)	1.14 – 10.1 μT 0.075 – 0.08 μT	85 kHz 6.6 kW	B Messungen in 20 cm Distanz rund um Fahrzeug B Messungen im Fahrzeug	-	Messungen an realem System
Miwa et al. (2019, 2020)	0.53 V/m	85 kHz 3.7 kW	Maximum für Körpermodell Taro am Fahrersitz	$E_{i,avg}$ (99.9. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse
Mohamed et al. (2018, 2019)	18.5 μT 1.0 μT	21 kHz 25 kW	Maximalwert hinter Fahrzeug Maximalwert im Fahrzeug	als 2D Diagramm angegeben	Messungen
Mohammad et al. (2019)	65 μT 24.9 μT	22 kHz 100 kW 85 kHz 11 kW	Maximalwerte aus Variationen mit unterschiedlichen Abschirmungen in 0.8 m von Spulenmitte, 0.1 m von Spulenrand	teilweise 2D Diagramme	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Mou & Lu (2021)	0.9 μT, 0.18 V/m 0.03 μT, 0.05 V/m 0.01 μT, 0.02 V/m	22 kHz 22.5 kW	Maximalwerte B und E_i im Kopf (im Fahrzeug): Carbonfaser-Chassis und 1.3 mm Schirmblech Stahl-Chassis und 1.3 mm Schirmblech Aluminium-Chassis und 1.3 mm Schirmblech	-	ausschließlich numerische Analyse, stark vereinfachtes Körpermodell im Fahrzeug
Mou & Lu (2022)	351 μT 0.84 μT	22 kHz 22 kW	Maximalwerte von B entlang des Körpers (im Fahrzeug) bei gleichzeitiger Aktivität von zwei benachbarten WPT-Systemen: ohne Chassis mit Aluminium Chassis	-	ausschließlich numerische Analyse
Park (2018)	0.33 V/m 0.12 V/m 0.028 A/m ²	85 kHz 3.3 kW	Max. E_i - und J-Werte, Modell „Taro“ in d = 10 cm den Spulen: WPT-System in Bauchhöhe WPT-System in Kopfhöhe WPT-System in Kopfhöhe	E_i (99. Perzentil)	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Pehrman & Liu (2019)		85 kHz	Maximalwerte mit/ohne Versatz in d = 20 cm zum Fahrzeug:	-	Messungen

Publikation	Expositionswert E_i (V/m), J (A/m ²), B (μT), SAR (W/kg) Explnd [%]	Frequenz, Leistung	Position, (Teil-) Körperbereich, Expositionssituation	Details zur Angabe der dosimetrischen Größe in der Arbeit	Anmerkungen
	0.39 μT / 0.24 μT 0.18 μT / 0.14 μT 0.11 μ / 0.08 μT 0.12 μT / 0.07 μT < 0.05 μT	3.3 kW	50 cm Höhe 100 cm Höhe 10 cm Höhe Maximalwerte mit/ohne Versatz im Fahrzeug: Fußbereich Fahrerplatz Fußbereich Beifahrerplatz		
Pinto et al. (2017)	0.23 V/m 0.05 V/m, 30 mA/m ² 0.01 V/m, 6 mA/m ²	85 kHz 0.56 kW	Max. E_i in Ellipsoidmodell: WPT-System in 80 cm Höhe (d = 30 cm) Max. E_i und J-Werte in anatomischem Körpermodell: WPT-System in 80 cm Höhe (d = 30 cm) WPT-System am Boden (d = 30 cm)	E_i (99. Perzentil)	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Shah et al. (2021)	10.2 V/m / 0.42 V/m 12.68 V/m / 0.58 V/m 2.12 V/m / 0.09 V/m 1.13 V/m / 0.10 V/m 0.91 V/m / 0.05 V/m 1.16 V/m / 0.07 V/m	85 kHz 22 kW	Max. $E_{i,avg}$ - Werte in anatomischem Körpermodell in d = 70 cm zum Fahrzeug mit / ohne Implantate: Hüftprothesen (3 Typen) Verriegelungsnagel Unterschenkel (3 Typen) Herzschrillmacher mit Elektrode Leadless Herzschrillmacher Max. $E_{i,avg}$ - Werte in anatomischem Körpermodell im Fahrzeug mit / ohne Implantate: Hüftprothesen (3 Typen) Verriegelungsnagel Unterschenkel (3 Typen)	$E_{i,avg}$ (99. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse
Shimamoto et al. (2015a)	0.41 V/m 0.25 V/m 0.18 V/m	85 kHz 7.7 kW	Max. E_i - Werte in anatomischem Schwangeren-Körpermodell in unterschiedlichen Distanzen zum Fahrzeug direkt am Chassis d = 20 cm d = 40 cm	E_i (99.9. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse
Shimamoto et al. (2015b)	0.4 V/m 0.0024 V/m 0.92 V/m	85 kHz 7 kW	Max. E_i - Werte im Körpermodell TARO stehend neben Fahrzeug sitzend am Fahrerplatz knieend neben Fahrzeug	E_i (99.9. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse

Publikation	Expositionswert E_i (V/m), J (A/m ²), B (μT), SAR (W/kg) Explnd [%]	Frequenz, Leistung	Position, (Teil-) Körperbereich, Expositionssituation	Details zur Angabe der dosimetrischen Größe in der Arbeit	Anmerkungen
	5.95 V/m (Unterarm) 0.55 V/m		liegend am Boden, Unterarm im Luftspalt des WPT-Systems stehend auf Primärspule		
Songcen et al. (2019)	43.2 μT	20 kHz 20 kW	B in „side area of vehicle“ ohne nähere Spezifikation	-	Messung an Laborprototyp
Tell et al. (2014)	7.98 μT 0.3 μT 2.5 μT	20 kHz 60 kW	Max. B Werte an unterschiedlichen Positionen: am Boden im Fahrzeuginneren über Spule auf Sitzplätzen außerhalb des Fahrzeugs entlang des Chassis	-	Messung an realem WPT-System zum Laden von Shuttlebussen
Wang et al. (2017)	ca. 25 % ca. 16 % ca. 130 % ca. 300 %	85 kHz 10 kW	Max. E_i Werte in einfachen Körpermodellen nur als „Compliance Werte“(in %) in schlecht lesbarem Diagramm angegeben: Erwachsener am Fahrerplatz sitzend Erwachsener hinter Fahrzeug stehend (nahe WPT-System) Erwachsener am Boden liegend, teilweise unter Fahrzeug Kind am Boden liegend, teilweise unter Fahrzeug	-	ausschließlich numerische Analyse
Wang et al. (2019)	0.424 V/m 0.102 V/m 1.246 V/m 0.817 V/m 19.9 V/m 11.5 V/m	85 kHz 10 kW	Max. E_i Werte in einfachen Körpermodellen Erwachsener am Fahrerplatz sitzend Erwachsener am Beifahrerplatz sitzend Erwachsener im Fahrzeug hinten links (nahe WPT-System) Erwachsener im Fahrzeug hinten rechts (nahe WPT-System) Erwachsener außen, hinter Fahrzeug stehend (nahe WPT- System) Erwachsener am Boden liegend, teilweise unter Fahrzeug Katze am Rand der Spulen, teilweise im Luftspalt	E_i (99. Perzentil)	ausschließlich numerische Analyse
Yavolovskaya et al. (2017)	10 μT 4.76 V/m 1.07 V/m 2.15 μT 3.04 V/m	85 kHz 11 kW	Max. B und E_i Werte in einfachem Körpermodell für zwei unterschiedliche Spulenformen: mit kreisförmiger Spule B am Fahrerplatz E_i (PNS) am Fahrerplatz E_i (CNS) am Fahrerplatz B stehend neben Fahrzeug E_i (PNS) stehend neben Fahrzeug	.	ausschließlich numerische Analyse

Publikation	Expositionswert E_i (V/m), J (A/m ²), B (μT), SAR (W/kg) Explnd [%]	Frequenz, Leistung	Position, (Teil-) Körperbereich, Expositionssituation	Details zur Angabe der dosimetrischen Größe in der Arbeit	Anmerkungen
	3.19 V/m		E_i (CNS) stehend neben Fahrzeug		
	25 μT 2.96 V/m 0.88 V/m 16.2 μT 2.9 V/m 10.3 V/m		mit „DD“ Spule B am Fahrerplatz E_i (PNS) am Fahrerplatz E_i (CNS) am Fahrerplatz B stehend neben Fahrzeug E_i (PNS) stehend neben Fahrzeug E_i (CNS) stehend neben Fahrzeug		
Zhang et al. (2015)	2.48 μT / 1.36 μT 2.81 V/m / 2.83 V/m	85 kHz 3.3 kW	Max. B und E_i Werte in einfachem Erwachsenmodell am Boden liegend neben Fahrzeug mit / ohne Versatz	.	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Zhang et al. (2021)	45 μT	85 kHz 200 kW	Max. B Wert in 1 m seitlich vom Spulenmittelpunkt	.	ausschließlich numerische Analyse
Zhong & Xu (2018)	1.41 μT 1.30 μT 25 μT 19.8 μT	85 kHz 200 kW	B Werte „nahe Fahrzeug“, nicht näher definiert ohne Luftspalt, ohne Schirmung ohne Luftspalt, mit Schirmung mit Luftspalt, ohne Schirmung mit Luftspalt, mit Schirmung	.	numerische Analyse, validiert an Prototyp
Zucca et al. (2019)	0.7 μT 0.01 V/m	85 kHz 7.7 kW	Max. B und E_i Werte in anatomischem Körpermodell („Duke“) Neben Fahrzeug stehend (d = 20 cm)	.	ausschließlich numerische Analyse

5 Markt- und Technik-Übersicht von Ladesystemen

5.1 Ladetechnologie von Elektroautos

Das Aufladen der (Hochvolt-)Batterie von BEV und PHEV muss grundsätzlich mit Gleichstrom erfolgen. Da das öffentliche elektrische Energieversorgungsnetz beim Verbraucher jedoch ausschließlich Wechselspannung anbietet, muss vor dem Einspeisen in die Batterie eine Gleichrichtung erfolgen. Dadurch gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Ladearten: Entweder direkt am Wechselstromnetz (AC) mit Gleichrichtung im Fahrzeug oder über entsprechende Ladestationen mit Gleichstrom (DC), was meist gleichbedeutend mit Schnellladen ist.

5.1.1 Wechselstrom (AC-) Laden

Beim Wechselstromladen (AC-Laden) wird das Fahrzeug über ein Ladekabel an das Niederspannungs-Wechselstromnetz angeschlossen und im Bordladegerät des Fahrzeuges wird der Wechselstrom in Gleichstrom umgewandelt. Die mögliche AC-Ladeleistung hängt dabei von verschiedenen Faktoren ab. Minimal laden Elektroautos an einer Stromphase bei 230 Volt Spannung mit 6 A Ladestrom, was 1.4 kW Ladeleistung entspricht. Die sogenannten „Notladekabel“ für die Haushaltssteckdose sind im Regelfall auf 10 A limitiert, was 2.3 kW Ladeleistung entspricht. Maximal sind an drei Stromphasen mit so genannten „Wallboxen“ (siehe Kapitel 5.2.5) oder öffentlichen AC-Ladestationen bis zu 32 A möglich, was 22 kW Ladeleistung bedeutet. Diese AC-Ladeleistung kann jedoch nur von sehr wenigen Elektrofahrzeugen genutzt werden, wie z. B. von Renault Zoe serienmäßig und gegen Aufpreis von Renault Twingo, Smart EQ, Porsche Taycan sowie Audi e-tron. Inzwischen hat sich als Standard für die Bordladegeräte der meisten Elektroautos die Ladeleistung von 11 kW (3 x 16 A) etabliert, welche für einen typischen Ladevorgang zuhause über Nacht vollkommen ausreicht. Zudem hat dies für den Privathaushalt den Vorteil, dass eine 11 kW Lademöglichkeit zwar beim Netzbetreiber gemeldet werden muss, aber nicht genehmigungspflichtig ist. Beim AC-Laden bleibt die Ladeleistung im Regelfall bis kurz vor Ende des Ladevorganges weitgehend konstant und wird erst gegen Ende reduziert. Demnach wäre zu erwarten, dass die Effektivwerte der magnetischen Flussdichte beim AC-Laden über den gesamten Ladezyklus näherungsweise konstant bleiben. Als Stecker hat sich für das AC-Laden der sogenannte „Typ 2“ Stecker, kompatibel mit dem „Combo 2“ für das DC-Laden durchgesetzt (siehe Abbildung 5.1).

5.1.2 Gleichstrom (DC-) Laden

Das Laden mit Gleichstrom (DC-Laden) erfolgt bei nahezu allen neuen Elektroautos über den Combined Charging System Standard (auch CCS oder Combo genannt). Ältere Fahrzeuge haben teilweise den japanischen CHAdeMO-Ladeanschluss, der aber in Europa kaum mehr eine Rolle spielt. Beim Gleichstromladen wird die Wechselspannung bereits extern in der DC-Ladesäule in Gleichspannung umgewandelt. Dadurch kann eine viel höhere Leistung in die Batterie geladen werden als beim AC-Laden mit den vergleichbar kleinen Bordladegeräten. Die maximale Ladeleistung des CCS-Standards beträgt aktuell 350 kW. Die Spannung kann dabei bis zu 1000 Volt und der Strom bis zu 500 A betragen. Wieviel Ladeleistung und Stromstärke bei welcher Spannung tatsächlich genutzt wird, hängt vom Fahrzeug ab, welches der Ladesäule die Ladeparameter vorgibt. Die Spitzenreiter sind aktuell der Porsche Taycan und der technisch vergleichbare Audi e-tron GT mit max. 270 kW, die mit ihrer 800 V Batterietechnologie knapp 350 A Strom beziehen. Üblich ist bei der Batterietechnologie bisher aber noch die 400 V

Technik, bei der die Ladeleistungen zwar einiges geringer sind, nicht jedoch die Ladeströme. Die DC-Ladeleistung bleibt während des DC-Ladevorganges nicht konstant, sondern ist bei niedrigerem Batteriestand größer und reduziert sich ab einem gewissen Punkt mit zunehmendem Batterieladestand, um den Akku nicht zu schädigen²¹. Deswegen erscheint es sinnvoll, bei ca. 80 % den Ladevorgang zu beenden, weil der Zeitaufwand dann immer ungünstiger im Vergleich zur nachgeladenen Reichweite wird. Für den Kunden ist bei der Nutzung weniger die maximale Ladeleistung, sondern die durchschnittliche Ladeleistung während eines Ladevorganges im gängigen Bereich von ca. 10 % bis 80 % Batterieladestand ausschlaggebend. Im Hinblick auf die magnetischen Felder lässt sich aus der Ladeleistung nicht direkt auf die Exposition im Verhältnis zu den Referenzwerten schließen, da aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Referenzwerte, der Restwelligkeit des Ladestromes diesbezüglich große Bedeutung zukommt. Die aufgrund der DC-Ladeströme zu erwartenden magnetischen DC-Felder können selbst in wenigen Zentimetern Distanz zur Ladeinfrastruktur (Kabel, Ladesäule, Fahrzeugbuchse) von vornherein als praktisch vernachlässigbar im Vergleich zum von ICNIRP (2009) empfohlenen Referenzwert (400 mT) angesehen werden. Der für das Ansprechen des Reed-Schalters aktiver elektronischer Implantate weithin anerkannte Schwellwert von 500 μ T kann jedoch in unmittelbarer Nähe zu den genannten Komponenten in der Praxis überschritten werden (siehe Kapitel 4.2).

Im Bereich der Schnellladetechnologie überbieten sich die Fahrzeughersteller aktuell durch möglichst hohe und konstante Ladeleistungen, mit denen die Elektroautos langstreckentauglicher werden und sich die Ladezeiten reduzieren. In den nächsten Jahren könnten heute gängige Ladeleistungen von 100 bis 150 kW schon nicht mehr Stand der Technik sein.

Bei den PHEV können aktuell nur wenige Fahrzeuge auch über Gleichstrom geladen werden. Lediglich Mercedes, Mitsubishi und Jaguar bieten diese Möglichkeit an. Die maximalen Ladeleistungen bleiben dabei mit 20 bis 60 kW im Vergleich zu BEV geringer. Die große Mehrheit der PHEV kann nur einphasig mit bis zu 3,7 kW an Wechselstrom (AC) aufgeladen werden.

5.2 Kabelgebundene Ladesysteme (konduktives Laden)

5.2.1 Ladebetriebsarten

Die grundsätzlichen Möglichkeiten, ein Elektroauto mit Wechsel- und mit Gleichstrom zu laden, wurden bereits im Kapitel 5.1 ausführlich erläutert.

In IEC 61851-1 sind die Ladestationen und die unterschiedlichen Ladearten als Lademodus 1 bis 4 spezifiziert. Dabei beschreiben die Lademodi 1 bis 3 verschiedene Varianten des Wechselstromladens über das im Fahrzeug befindliche Bordladegerät und der Lademodus 4 das Laden mit Gleichstrom, bei dem die Gleichrichtung in der DC-Ladestation außerhalb des Fahrzeuges erfolgt.

Die Steckvorrichtungen zum Verbinden eines Elektroautos mit der Ladeinfrastruktur sind in IEC 62196 spezifiziert.

Die in den Normen der Reihe IEC 61851 bzw. IEC 62196 spezifizierten Maximalspannungen liegen oberhalb der Normspannungen des europäischen bzw. des deutschen

²¹ Der ADAC ermittelt regelmäßig Ladekurven von Elektrofahrzeugen und stellt die Daten unter der Internetadresse <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/schnellladen-langstrecke-ladekurven/> bereit.

Niederspannungsnetzes (230 V einphasig, 400 V dreiphasig). Im Folgenden wird ausschließlich auf die Verhältnisse für die Normspannungen 230 V / 400 V Bezug genommen.

Ladebetriebsart 1:

Grundsätzlich ist in der Ladebetriebsart 1 das AC-Laden an Standardsteckdosen mit bis zu 16 A bei 230 V (AC) einphasig (3.7 kW) oder 400 V (AC) dreiphasig (11 kW) möglich. Diese Ladebetriebsart spielt jedoch aus Sicherheitsgründen keine Rolle mehr und ist sogar in einigen Ländern verboten. Im Ladekabel sind keine Sicherheitseinrichtungen verpflichtend, lediglich in der Hausinstallation ist eine Fehlerstrom-Schutzeinrichtung (RCD) vorgeschrieben.

Ladebetriebsart 2:

Bei dieser Ladebetriebsart ist das AC-Laden an Standardsteckdosen mit bis zu 32 A bei 230 V (AC) einphasig (7.4 kW) oder 400 V (AC) dreiphasig (22 kW) möglich. Dazu ist ein Ladekabel mit integrierter In-Cable Control Box (ICCB) bzw. In-Cable-Control-and-Protection-Device (IC-CPD) notwendig, welches die Ladesteuerung und Sicherheitsüberwachung übernimmt. Im Regelfall sind diese Ladekabel für die Haushaltssteckdosen auf 10 A limitiert und werden auch als sogenannte Notladekabel bezeichnet, mit denen die Ladeleistung auf ca. 2.3 kW begrenzt bleibt. Es gibt jedoch auch ICCB, die mittels Adapterlösungen an andere gängige Netz-Steckdosensysteme bis hin zur Industriesteckdose mit 3 x 32 A angeschlossen werden können. Mit diesen „mobile Charger“ können Elektroautos flexibel an zahlreichen Stromanschlüssen geladen werden.

Ladebetriebsart 3:

Die Ladebetriebsart 3 ist die sicherste und gegenwärtig gängigste Art, ein Elektroauto am Wechselstromnetz zu laden. Dabei sind laut Norm Stromstärken bis zu 63 A bei 230 V (AC) einphasig (14.6 kW) oder 400 V (AC) dreiphasig möglich, was 43 kW entspricht. Am gängigsten sind jedoch Ladepunkte mit 11 kW (3 x 16 A) und 22 kW (3 x 32 A), die in Form von sogenannten „Wallboxen“ (siehe Kapitel 5.2.5) im privaten Umfeld anzutreffen sind. Die Sicherheitseinrichtungen sind im Gegensatz zur Ladebetriebsart 2 fester Bestandteil der Ladestation. Eine Steckerverriegelung ermöglicht den unbeaufsichtigten Betrieb auch im öffentlichen Raum.

Ladebetriebsart 4:

Das DC-Laden erfolgt in der Ladebetriebsart 4. Das Fahrzeug kommuniziert dabei mit der DC-Ladesäule und gibt die Ladespannung und den Ladestrom vor. Beim DC-Laden sind höhere und komplexere Schutzfunktionen implementiert, wie z. B. Isolationsüberwachung.

5.2.2 Ladeleistungen beim AC-Laden

Gemäß der Ladesäulenverordnung gelten in Deutschland Ladeleistungen bis 22 kW als „Normalladen“ und bei über 22 kW wird vom „Schnellladen“ gesprochen. AC-Schnellladen kann daher definitionsgemäß (siehe oben) nur Ladebetriebsart 3 sein. Die AC-Schnellladung mit bis zu 43 kW hat inzwischen allerdings keine praktische Relevanz mehr, da bis auf einige ältere Renault Zoe-Modelle kein Fahrzeug diese AC-Ladeleistung nutzen kann und so bedeutet AC-Laden gegenwärtig meist bis maximal 22 kW (sowohl in Ladebetriebsart 2 als auch in Ladebetriebsart 3 möglich). Dies bedeutet gleichzeitig, dass im Alltag mit „Schnellladen“ praktisch immer DC-Laden gemeint ist.

Einphasiges AC-Laden:

- 2.3 kW (10 A, typischerweise an Haushaltssteckdosen)

- 3.7 kW (16 A)
- 4.6 kW (20 A)
- 7.4 kW (32 A)

Die einphasigen Bordladegeräte mancher Elektrofahrzeuge könnten technisch auch bis zu 32 A Stromstärke und somit 7.4 kW realisieren, in Deutschland ist jedoch eine maximale Phasenschieflast von 20 A zulässig.

Dreiphasiges AC-Laden:

- 11 kW (3 x 16 A)
- 22 kW (3 x 32 A)
- 43 kW (3 x 63 A)

Der Standard-Hausanschluss eines modernen Einfamilienhauses in Deutschland ist üblicherweise mit 3 x 50 A abgesichert. Das Laden mit 3 x 32 A würde somit schon fast zwei Drittel des gesamten Stromanschlusses ausnutzen und es bliebe nur noch wenig Reserve für andere Verbraucher. Deswegen und zur Vermeidung von Netzüberlastungen sind Ladeeinrichtungen ab einer Ladeleistung von 3.7 kW in Deutschland generell beim Netzbetreiber meldepflichtig und ab einer Summenbemessungsleistung von 12 kVA (11.4 kW) genehmigungspflichtig.

Manche Elektrofahrzeuge haben ein Bordladegerät, welches zwei Stromphasen mit je 16 A nutzen kann. Damit sind dann an einer dreiphasig angeschlossenen Ladesäule 7.4 kW (2 x 16 A) Ladeleistung möglich.

5.2.3 Ladeleistungen beim DC-Laden

Die möglichen Ladeleistungen von DC-Ladeeinrichtungen (Wandladestationen, Ladesäulen) hängen einerseits von der verfügbaren Leistung des Netzanschlusses und andererseits von der Leistungsfähigkeit der Ladeeinrichtung ab. DC-Ladeeinrichtungen bis 50 kW können noch am Niederspannungsnetz betrieben werden, DC-Schnelllader und High-Power-Charger werden über entsprechend leistungsfähige Trafos am Mittelspannungsnetz angeschlossen. Typische Leistungsabstufungen von Ladestationen beim DC-Laden sind:

- 20 kW (DC-Wandladestation)
- 50 kW
- 150 kW
- bis 350 kW (400 kW)

Von 50 kW bis 150 kW spricht man vom DC-Schnellladen, ab 150 kW wird vom High-Power-Charging (HPC) gesprochen.

Abbildung 5.1 fasst die unterschiedlichen Ladearten, Ladeleistungen und Steckerformen zusammen.

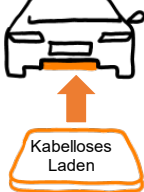
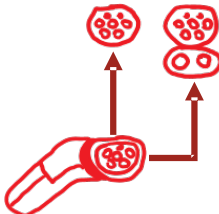
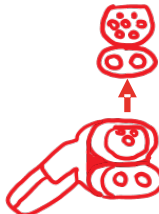
Magnetische Induktion	AC-Laden	DC-Laden
3.7 kW 7.4 kW 11 kW 22 kW	3.7 kW 11 kW 22 kW 44 kW	50 kW 150 kW 400 kW
Primär-, Sekundärspule  Kabelloses Laden	Typ 2 Combo 2 	Combo 2 

Abbildung 5.1: Übersicht Lademöglichkeiten und typische Ladeleistungen, basierend auf der Deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020.

5.2.4 Normen in Zusammenhang mit dem konduktiven Laden

Eine umfangreiche Übersicht zu allen Aktivitäten und Normen rund um die Elektromobilität bietet die „Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität“ (NPE, 2020) an. Diese entstand in der AG 4 der früheren „Nationalen Plattform für Elektromobilität (NPE)“, wurde über die Jahre mehrmals aktualisiert und wird nun in der AG 6 der „Nationalen Plattform Zukunft der Mobilität (NPM)“ (NPM, 2021) fortgeführt. Abbildung 5.2 zeigt eine anschauliche Übersicht über die Normung in Zusammenhang mit dem kabelgebundenen Laden von Elektroautos.

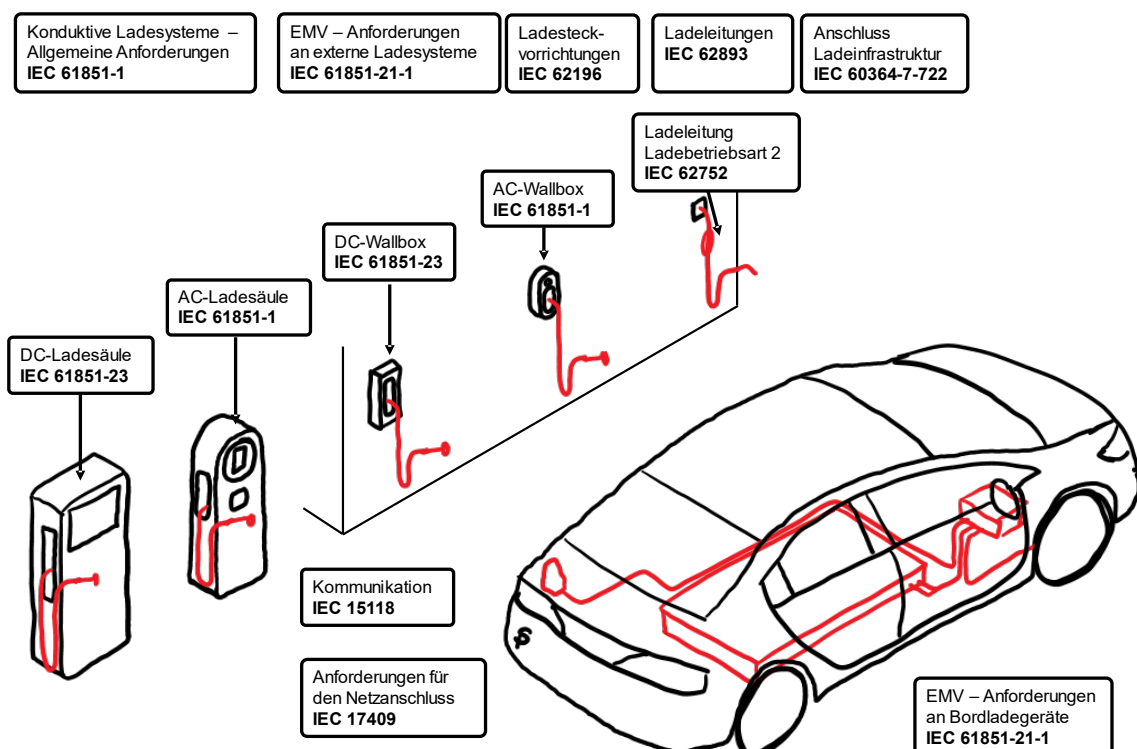


Abbildung 5.2: Übersicht Normung zum kabelgebundenen Laden von Elektrofahrzeugen, basierend auf der Deutschen Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020 (NPE, 2020).

5.2.5 Varianten von Ladesäulen bzw. Ladestationen

Die deutsche Ladesäulenverordnung unterscheidet grundsätzlich zwischen privaten und öffentlich zugänglichen Ladepunkten. Öffentliche Ladepunkte auf privatem Grund werden auch als halböffentlich bezeichnet.

AC-Wallboxen

Die Wallboxen im privaten Bereich sind im Normalfall dreiphasig angeschlossen mit einer Leistung von üblicherweise 11 kW, seltener auch mit 22 kW. Einphasige Wallboxen sind nur noch selten zu finden, denn der Aufpreis zu einer dreiphasigen Variante ist überschaubar und eine dreiphasige Wallbox ist zukunftsfähiger, beispielsweise nach einem Fahrzeugwechsel. Der Wallboxmarkt ist bisher sehr unübersichtlich und noch nicht konsolidiert. Seit Bekanntgabe der KFW-Förderung haben sich inzwischen mehr als 100 Hersteller oder Anbieter von Wallboxen mit über 300 förderfähigen Geräten auf die Liste setzen lassen. Einige dieser Anbieter waren bis dato selbst unter Experten noch unbekannt. Es kann davon ausgegangen werden, dass noch weitere Hersteller oder Anbieter versuchen werden, in diesem wachsenden Markt Fuß zu fassen, andererseits wird in Zukunft an einer Konsolidierung kein Weg vorbeiführen. Der ADAC testet seit 2018 regelmäßig Wallboxen von bekannteren Herstellern, Newcomern oder auch technisch interessante Geräte in unabhängigen Verbraucherschutztests.

Auch wenn Wallboxen sehr unterschiedliche Designs haben, sind der innere Aufbau und die Komponenten vergleichbar. Es gibt letztlich zwei Konzepte, die benötigten Bauteile zu integrieren. Einerseits gibt es den modularen Aufbau aus Komponenten der Elektroinstallationstechnik, die auf Hutschienen montiert werden (Abbildung 5.3). Andererseits gibt es integrierte Platinen-Lösungen, bei denen die Bauteile sehr kompakt auf einer Platine aufgebaut werden. Modulare Wallboxen können bei defekten Bauteilen leichter getauscht werden, Platinen-Lösungen sind im Falle eines Defektes oft nicht durch einfachen Teiletausch reparabel.

Die zentrale Komponente ist der Electric Vehicle Charge Controller (EVCC), welcher die Steuerung der Wallbox und Kommunikation mit dem Elektrofahrzeug übernimmt. Der EVCC schaltet zum Ladevorgang den Schütz, so dass der Ladestrom fließen kann. Weiters kann eine Wallbox ein festes Ladekabel oder eine Ladebuchse haben. Optional sind noch weitere Ausstattungsmerkmale erhältlich, wie z.B. Energiezähler oder Zugangsberechtigungen via Schlüssel oder RFID-Karte. Die Sicherheitstechnik, wie Leitungsschutzschalter und Fehlerstromüberwachung für Gleich- und Wechselströme, können in der Wallbox, oder aber auch in der vorgelagerten Hausinstallation verbaut sein. Viele Wallboxen sind in diversen Konfigurations- und Ausstattungsvarianten erhältlich.

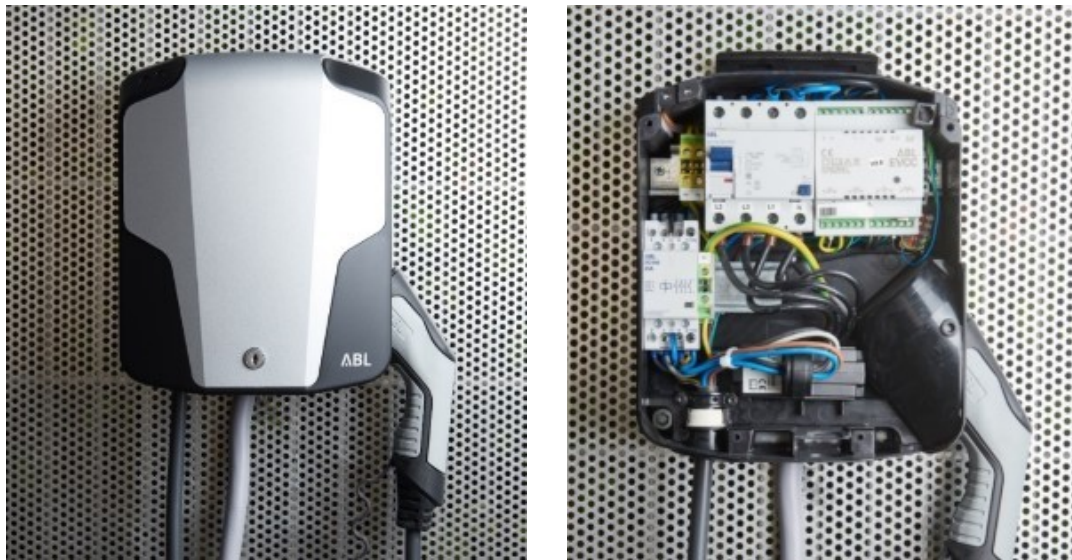


Abbildung 5.3: ABL Wallbox geschlossen (links) und geöffnet (rechts).

Öffentliche AC-Ladesäulen

Üblicherweise sind öffentliche Ladesäulen freistehende Säulen, die besonders robust und witterungsfest für den öffentlichen Raum gestaltet sind. Es können jedoch auch Wallboxen als öffentliche Ladeinfrastruktur eingesetzt werden, sofern Sie die Voraussetzungen der Ladesäulenverordnung und des Eichrechtes erfüllen. Meist ist dieses in Parkhäusern oder an Wänden von Gebäuden im öffentlichen Bereich der Fall. Wallboxen besitzen meistens einen Ladepunkt, die öffentlichen Ladesäulen bieten im Regelfall zwei Ladepunkte mit meist 2x 22 kW Leistung an. In den Ladesäulen muss die komplette Stromanschluss-, Sicherungs- und Kommunikationstechnologie verbaut sein.

Multicharger

Die öffentlichen Schnellladesäulen waren bis ca. 2017 stets sogenannte Multicharger und boten die drei gängigen Stecker und Ladeprotokolle CCS, CHAdeMO und AC mit 43 kW an. Inzwischen wird diese Leistungsklasse vorwiegend noch an Einkaufszentren und im urbanen Raum verwendet, wo es Verweilzeiten von 30 bis 90 Minuten gibt. Für Langstreckenfahrten mit aktuellen Elektroautos und deren maximale Ladeleistungen von bis zu 270 kW ist die Ladeleistung von 50 kW zu gering. Bei Ladeleistungen bis 50 kW werden solche Multicharger ans AC-Niederspannungsnetz angeschlossen, die Stromwandlung zu Gleichstrom erfolgt in der Ladesäule. Ebenfalls ist die gesamte Anschluss-, Sicherungs- und Kommunikationstechnologie in der Säule verbaut. Bei Ladeleistungen über 22 kW müssen die Ladekabel immer fest mit der Ladesäule verbunden sein.

High Power Charger (HPC)

Seit 2018 wurden zunehmend die neuen High-Power-Charger, manchmal auch Ultra-Schnellladesäulen genannt, mit Ladeleistungen von bis zu 350 kW aufgebaut (Beispiele, siehe Abbildung 5.4). Bei hohen Ladeleistungen ist eine Kühlung der Ladekabel zur Wärmeabfuhr erforderlich. Die Flüssigkeitskühlung kostet zusätzliche Energie und verursacht Geräusche. HPC-Charger werden meist nur noch mit CCS-Ladestecker ausgerüstet, da sich inzwischen CCS als der europäische Schnellladestandard etabliert hat. Zudem können die allermeisten älteren CHAdeMO-Fahrzeuge maximal bis 50 kW Ladeleistung nutzen.

Aufgrund der hohen Leistungen werden HPC-Charger über eigene Trafostationen ans Mittelspannungsnetz angeschlossen. Im Regelfall werden aus Kostengründen und im Hinblick auf den steigenden Bedarf gleich mehrere HPC-Charger an einem Standort installiert. Die Stromwandlung zu Gleichstrom erfolgt je nach Hersteller entweder in der Ladesäule selbst oder aber in separaten Stromwandlungseinheiten, die meist in einigen Metern Entfernung stehen.



Abbildung 5.4: Ionity HPC-Charger (links) und EnBW Hypercharger (rechts).

Tesla Supercharger

Die amerikanische Firma Tesla begann bereits im Jahr 2013 mit dem Aufbau der Supercharger, an denen zunächst nur Tesla Fahrzeuge laden konnten und welche bereits damals schon Ladeleistungen von über 120 kW ermöglichten. Die Standorte hatten zu Beginn 4 bis 8 Ladepunkte, inzwischen haben die größten Supercharger bis zu 50 Ladepunkte. Das Grundprinzip aus Trafostation, separate Stromwandler und den Ladesäulen („Stalls“) ist bis heute gleich und stellt somit das Vorbild für die heutige HPC-Ladeinfrastruktur der anderen Anbieter dar. Die Supercharger von Tesla gibt es inzwischen in der dritten Version und mit Ladeleistungen von bis zu 250 kW. Seit Mitte 2024 erfolgte auch in Deutschland eine Öffnung des Superchargers für Elektroautos anderer Hersteller.

5.2.6 Gegenwärtige Verbreitung der Ladestationen

Die Bundesnetzagentur berichtete mit Stand 01.12.2024 von 120.680 öffentlichen Normalladepunkten (bis 22 kW) und 33.419 Schnellladepunkten (mehr als 22 kW) in Deutschland (siehe Tabelle 5.1).

Tabelle 5.1: Anzahl Ladepunkte in Deutschland (Stand 01.12.2024), Quelle Bundesnetzagentur.

Bundesland	Normalladepunkte	Schnellladepunkte
Baden-Württemberg	22 315	4 180
Bayern	23 787	6 677
Berlin	4 567	793

Brandenburg	2 782	1 032
Bremen	962	156
Hamburg	2 588	648
Hessen	9 746	2 481
Mecklenburg-Vorpommern	1 487	557
Niedersachsen	11 256	3 871
Nordrhein-Westfalen	23 233	6 066
Rheinland-Pfalz	4 131	2 049
Saarland	916	254
Sachsen	4 293	1 352
Sachsen-Anhalt	1 754	839
Schleswig-Holstein	4 668	1 388
Thüringen	2 133	1 076
Gesamtes Bundesgebiet	120 680	33 419

Private Ladepunkte sind zwar beim jeweiligen Netzbetreiber anzumelden, diese Zahlen werden jedoch an keiner zentralen Stelle zusammengeführt. Somit ist nicht bekannt, wie viele private Lademöglichkeiten es an Häusern und Firmenparkplätzen in Deutschland tatsächlich gibt. Die Annahme, dass der größte Teil der Elektroauto-Besitzenden und ein größerer Teil der Plug-In-Hybrid Nutzenden eine eigene Lademöglichkeit besitzen ist durchaus plausibel. Insofern dürften für die aktuell ca. 1 Million BEV und PHEV in Deutschland schätzungsweise zwischen 500.000 bis 800.000 private Lademöglichkeiten vorhanden sein. Im Rahmen der KfW-Förderung von privaten Wallboxen stehen Fördermittel für ca. 740.000 Ladepunkte zur Verfügung, die auch teilweise schon errichtet wurden.

Über die Verkaufszahlen und Modelle von öffentlichen Ladesäulen oder besonders auch Wallboxen für private Ladepunkte sind keine validen Daten verfügbar. Es kann somit nicht zuverlässig festgestellt werden, welche Modelle oder Hersteller die „Marktführer“ sind.

5.3 Kabellose Ladesysteme (induktives Laden)

Beim induktiven Laden wird die Ladeenergie berührungslos über elektromagnetische Felder von einer Bodenplatte (Basisereinheit, Primärspule) an eine am Unterboden des Fahrzeuges angebrachte Empfängerspule (Fahrzeuginhaltereinheit, Sekundärspule) übertragen (Abbildung 5.5). In Europa liegt die dabei für das Laden von Elektroautos genutzte Übertragungsfrequenz im Frequenzbereich zwischen 79 kHz und 90 kHz (typisch 85 kHz). Diese Lademöglichkeit für das Laden zuhause wurde in den Jahren von 2015 bis 2018 von Autoherstellern wie Audi, BMW und Mercedes als künftige, optionale Zusatzausstattung für ihre Plug-In-Hybrid Oberklassefahrzeuge angekündigt.

Doch obwohl die kabellosen Ladesysteme teilweise schon in den Ausstattungslisten zu finden waren, schafften sie es nicht in die Fahrzeuge und wurden wieder aus dem Angebotsportfolio gestrichen. So ist im Jahr 2024 noch immer kein induktives Ladesystem serienmäßig für Elektrofahrzeuge erhältlich. Gründe gibt es dafür diverse, so ist die genaue Positionierung über der Ladeplatte für die Ladeeffizienz wichtig und auch der Abstand der Ladeplatten zueinander

sollte möglichst gering sein. Auch die Standardisierung ist noch nicht vollständig abgeschlossen, was zu Technologieunsicherheit führt. In Summe steht beim induktiven Ladesystem ein geringer Komfortnutzen einem hohen Kosten- und Technikaufwand entgegen.

Mit einem eigenen Geschäftszweig für berührungslose Ladetechnologien für Elektrofahrzeuge und ihrem „Halo“-Ladesystem war die Firma Qualcomm Entwicklungspartner für viele Autohersteller. Dieser Geschäftszweig wurde 2019 vom Spezialisten für drahtlose Energieübertragung WiTricity übernommen. Seitdem arbeitete WiTricity stark an der internationalen Standardisierung des Ladeverfahrens sowie an der Steigerung der Ladeleistungen und Effizienz. Abbildung 5.5 zeigt eine anschauliche Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Standardisierung im Bereich des induktiven Ladens.

WiTricity entwickelte das „DRIVE“-System, welches auch die Basis für den chinesischen Induktions-Ladestandard bildet. Insofern schien ein einheitliches System für induktives Laden nicht mehr in allzu weiter Ferne. Trotzdem gab es seit 2018 seitens der Autohersteller keine neuen Ankündigungen bezüglich einer Markteinführung drahtloser Ladesysteme für Elektrofahrzeuge.

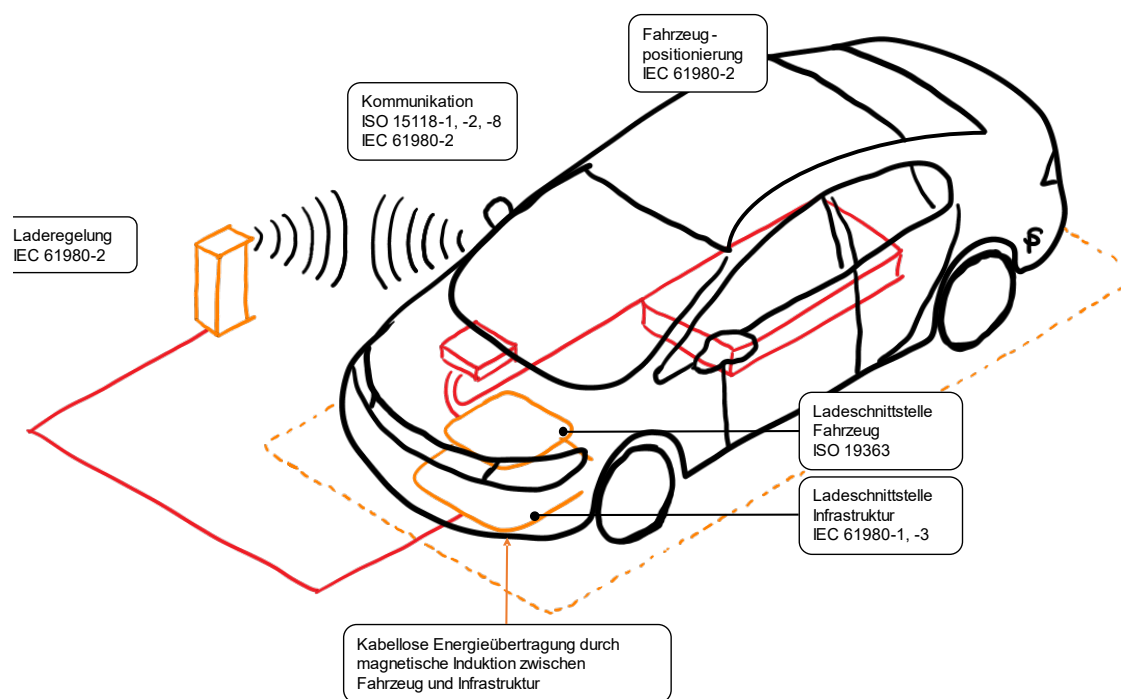


Abbildung 5.5: Übersicht Normung zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen basierend auf Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020 (NPE, 2020).

Im Rahmen des Projektes „Taxi-Lade-Konzept für den öffentlichen Raum“ (TALAKO) wurde in Köln eine Pilotanlage für induktives Laden von speziell dafür adaptierten (PHEV-) Fahrzeugen entwickelt, die in unmittelbarer Nähe des Kölner Hauptbahnhofes im Mai 2022 in Betrieb ging (Proff et al., 2023). Eine Fortführung hin zu einer breiten Nutzung blieb jedoch bisher aus.

6 Testmessungen bei induktiven Ladepunkten

Im Zuge von Testmessungen mit dem Ziel der Verbesserung bzw. Optimierung der Messverfahren wurden im ADAC Technik Zentrum Immissionsmessungen an unterschiedlichen kabelgebundenen AC- und DC-Ladepunkten durchgeführt. Eine der zentralen Fragen dabei war, in welchen Phasen des Ladezyklus maximale Magnetfeldimmissionen (in Relation zu den Referenzwerten) zu erwarten sind. Grundsätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die magnetische Flussdichte in der Nähe des Ladekabels proportional zum Ladestrom ist. Der Effektivwert des Ladestromes allein, d. h. ohne Information über die spektrale Zusammensetzung des Stromverlaufes, ist jedoch kein zuverlässiger bzw. aussagekräftiger Indikator für die resultierende bewertete Magnetfeldimmission, da die Referenzwerte frequenzabhängig festgelegt sind. Es wurde daher nach einer einfachen Methode gesucht, mit deren Hilfe Aufschlüsse über die Veränderung des Effektivwerts und des Oberwellengehalts bzw. der Restwelligkeit der magnetischen Flussdichte während des Ladevorganges und über Unterschiede bezüglich Oberwellengehalt bzw. Restwelligkeit der magnetischen Flussdichte bei unterschiedlichen Kombinationen von Ladestation und Fahrzeug gewonnen werden können. Verwendet wurde dazu ein Magnetfeld-Exposimeter (ExpoM-ELF, Fields at Work GmbH, Zürich, Schweiz), das direkt am Ladekabel während des gesamten Ladezyklus fixiert wurde (Abbildung 6.1). Auf diese Weise konnten im Zuge von routinemäßig durchgeführten Ladezyklus-Untersuchungen im ADAC Technik Zentrum die Verläufe der magnetischen Flussdichte in unmittelbarer Nähe des Kabels und deren spektrale Zusammensetzung über der Zeit für mehrere Fahrzeug-Ladepunkt Kombinationen qualitativ ermittelt werden.



Abbildung 6.1: Fixierung des Messgerätes ExpoM-ELF am Ladekabel zur Erfassung des Verlaufs der magnetischen Flussdichte und deren spektraler Zusammensetzung im Verlauf des Ladevorganges.

Abbildung 6.2 und Abbildung 6.3 zeigen Beispiele von Ergebnissen dieser Messungen für das Laden eines Renault Zoe an einer 22 kW AC-Ladestation und für das Laden eines Mercedes-Benz EQS 450+ an einer Ionity 350 kW DC-Ladestation.

Für die Messungen mussten gewisse Kompromisse im Rahmen der Möglichkeiten des eingesetzten Messgerätes eingegangen werden. Da die Magnetfeldmessungen über die gesamte vom Messgerät zur Verfügung gestellte Frequenzbandbreite (DC – 100 kHz) erfolgen sollten, um gegebenenfalls vorhandene Oberwellen im Frequenzbereich > 10 kHz zu erfassen, bestand die wesentlichste Einschränkung darin, dass die maximale Länge der pro Messintervall (4 s) aufgezeichneten Signallänge nur ca. 13 ms beträgt, was deutlich kürzer ist als die Periodenlänge (20 ms) einer 50 Hz Schwingung. Dies hat zur Folge, dass die aus den

aufgezeichneten Signalen errechneten Effektivwerte, je nach Phasenlage, mehr oder weniger fehlerbehaftet sind und somit der Zeitverlauf der Effektivwerte eine große Schwankungsbreite zeigt (Abbildung 6.2). Trotzdem können aus den Messungen einige Schlussfolgerungen gezogen werden.

Es zeigte sich, dass trotz der vielfach höheren magnetischen Flussdichte beim DC-Laden des Mercedes (Abbildung 6.3), die auf die Referenzwerte gemäß ICNIRP 2010 bezogenen Immissionen (Expositionsindex) direkt am Kabel nur einen Bruchteil der entsprechenden Werte beim AC-Laden des Renault Zoe (Abbildung 6.2) betragen. Grund dafür ist der relativ geringe AC-Anteil (Restwelligkeit) im DC-Ladestrom (führt zu ca. 10 μT Spitze-Spitze, mit einer dominanten Oberwelle von ca. 1.6 kHz, siehe Abbildung 6.3, unten). Demgegenüber enthält der AC-Ladestrom offensichtlich einen ausgeprägten Oberwellenanteil, der direkt am Kabel einen Ripple von mehr als 20 μT (Spitze-Spitze) mit einer Grundwelle von 10 kHz erzeugt (Abbildung 6.2, unten).

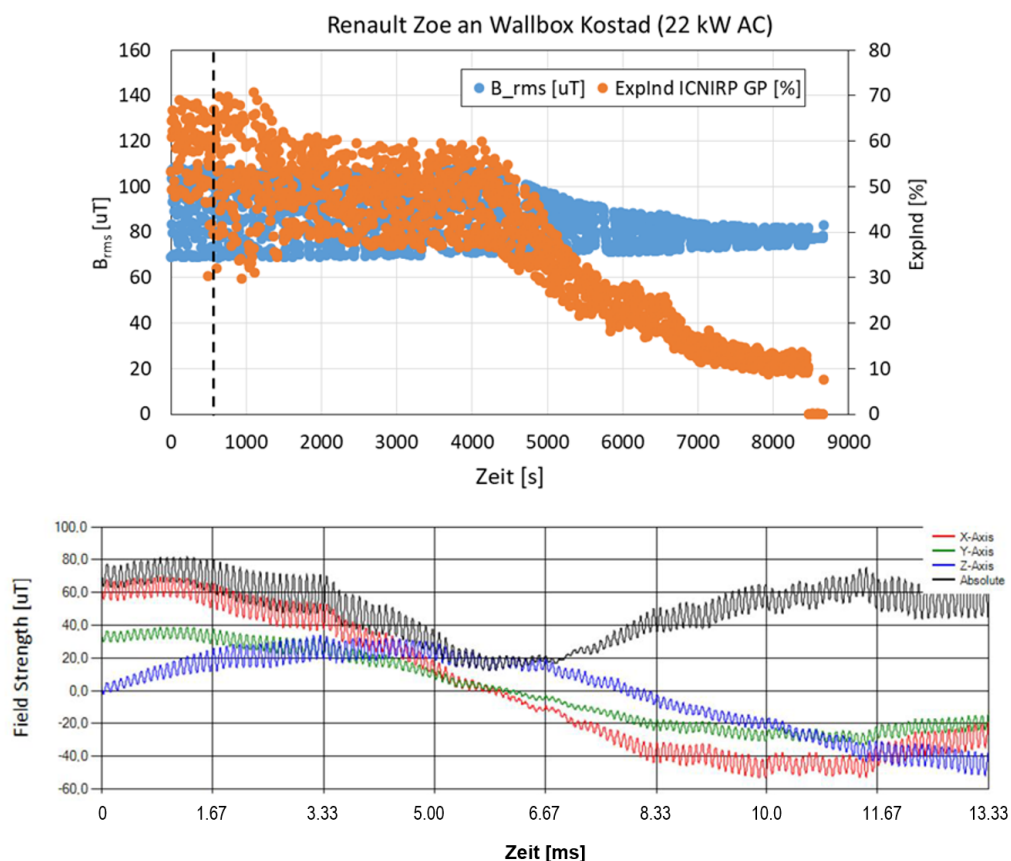


Abbildung 6.2: Verlauf der magnetischen Flussdichte und des Expositionsindex direkt am Ladekabel während des gesamten Ladezyklus von < 10 % bis 100 % Ladestatus der Batterie für einen Renault Zoe an einer 22 kW AC-Wallbox von Kostad (oben). Unten: Signalform der magnetischen Flussdichte direkt am Ladekabel zu der durch die strichlierte vertikale Linie im oberen Teilbild markierten Zeit. Die Ursache für die große Streubreite der Datenpunkte im oberen Diagramm liegt in der Tatsache, dass das verwendete Exposimeter bei einer Messbandbreite von DC - 100 kHz nur ca. 13 ms lange Messsignale aufzeichnen kann, was für eine exakte (schwankungsfreie) Effektivwertberechnung bei einer Grundfrequenz von 50 Hz zu kurz ist.

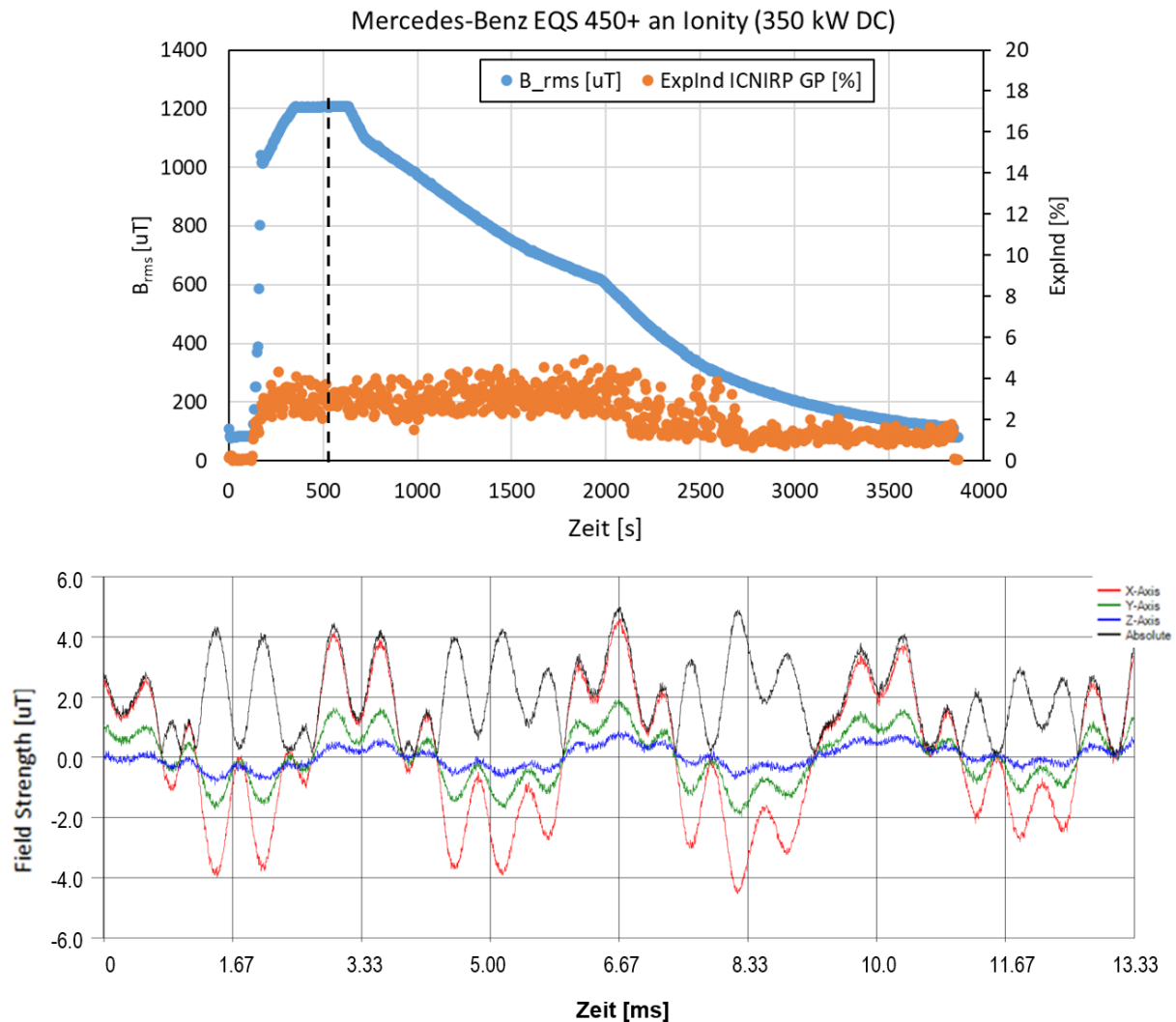


Abbildung 6.3: Verlauf der magnetischen Flussdichte und des Expositionsindex direkt am Ladekabel während des gesamten Ladezyklus von < 10 % bis 100 % Ladestatus der Batterie für einen Mercedes-Benz EQS 450+ an einer 350 kW DC-Ladestation von Ionity (oben). Unten: Signalform der magnetischen Flussdichte direkt am Ladekabel zu der durch die strichlierte vertikale Linie im oberen Teilbild markierten Zeit (DC-Anteil von ca. 1.2 mT unterdrückt, um Restwelligkeit sichtbar zu machen).

Weitere Ergebnisse dieser Testmessungen und Schlussfolgerungen daraus im Hinblick auf die letztlich angewendete Messmethode sind in Kapitel 9.1 dargestellt.

7 Systematisch untersuchte Ladepunkte und Fahrzeuge

7.1 Konduktive Ladepunkte

Systematische Messungen während des konduktiven Ladens wurden mit unterschiedlichen Fahrzeug-Ladepunkt-Kombinationen und jeweils bei Batterie-Ladezuständen $\leq 10\%$ und $\geq 95\%$ durchgeführt.

Tabelle 7.1 fasst die untersuchten Kombinationen von Fahrzeugen, Ladepunkten bzw. Lademodi und Batterieladezuständen zusammen. Abbildung 7.1 zeigt Fotos der untersuchten Ladegeräte bzw. Ladesäulen.

Tabelle 7.1: Untersuchte Kombinationen von Fahrzeugen und Ladepunkten bzw. Lademodi beim konduktiven Laden. Die angegebene maximale Ladeleistung bezieht sich auf den in der ersten Spalte angegebenen Lademodus.

Ladepunkt / Lademodus	Fahrzeuge (max. Ladeleistung)
220 V AC, einphasig Kabel mit In-Line Steuerbox, 2 kW Lademodus 2	Renault ZOE (2 kW)
	Porsche Taycan (2 kW)
400 V AC, dreiphasig 11 kW Wallbox Lademodus 3	Renault ZOE (11 kW)
	BMW i3 (11 kW)
	VW ID.3 (11 kW)
	Tesla Model 3 (11 kW)
	Audi e-tron (11 kW)
	Porsche Taycan (11 kW)
400 V AC, dreiphasig 22 kW Ladesäule Lademodus 3	Renault ZOE (22 kW)
	BMW i3 (11 kW)
	VW ID.3 (11 kW)
	Tesla Model 3 (11 kW)
	Audi e-tron (11 kW)
	Porsche Taycan (11 kW)
DC-Laden 300 kW Ladesäule (Alpitronic) Lademodus 4	BMW i3 (50 kW)
	Porsche Taycan (270 kW)
DC-Laden 350 kW Ladesäule Tritium/Ionity Lademodus 4	BMW i3 (50 kW)



Abbildung 7.1: Untersuchte Ladepunkte: 220V AC In-line Steuergerät des Renault ZOE und des Porsche Taycan (oben, links und Mitte), 3 x 400 V AC, 11 kW Go-e Charger Wallbox (oben rechts), 3 x 400 V AC, 22 kW Erdgas Schwaben Ladesäule (unten, links), 350 kW DC Ionity Ladesäule (unten, Mitte) und 300 kW DC Alpitronic Ladesäule (unten, rechts).

7.2 Induktive Ladepunkte

Für Messungen an induktiven Ladesystemen stand nur die im Rahmen des Projektes TALAKO errichtete Pilotanlage in unmittelbarer Nähe des Kölner Hauptbahnhofes und ein dazugehöriges Fahrzeug (Abbildung 7.2) zur Verfügung (Proff et al., 2023). Die im Rahmen des TALAKO-Projektes entwickelte Pilotanlage für induktives Laden und speziell dafür ausgestattete Taxi-Fahrzeuge besteht aus insgesamt sechs hintereinander angeordneten Ladeplätzen im Bereich eines Taxi-Standplatzes. An jedem Ladeplatz befindet sich eine in der Straße versenkte

Primärspule (Abmessungen ca. 150 cm x 75 cm) des Ladesystems, die bis zu 22 kW Ladeleistung ermöglicht. Unterhalb des Bodens der aus einer Aluminium-Verbund Karosserie bestehenden Fahrzeuge (Hersteller LEVC) befindet sich die Sekundärspule (Abmessungen ca. 75 x 75 cm).



Abbildung 7.2: Untersuchtes Fahrzeug für die Magnetfeldmessungen während des induktiven Ladens.

8 Messmethode

8.1 Verwendete Messgeräte

Alle Messungen der Magnetfeldimmissionen erfolgten mit dem Messsystem MF EASY (Seibersdorf Labor GmbH), das Zeitbereichsmessungen der magnetischen Flussdichte mit zehn simultanen isotropen Magnetfeld-Messkanälen ermöglicht (Abbildung 8.1). Weiters erlaubt das MF EASY eine „on-the-fly“ Berechnung der Expositionsindizes, basierend auf der Methode der gewichteten Spitzenwerte im Zeitbereich (WPM-TD). Sofern nicht explizit anders angeführt, wurden die Messungen mit 100 cm² Sondenquerschnitt (Spulen-Messaufnehmer) durchgeführt. Lediglich die Messposition am Stecker des Ladekabels wurde mithilfe einer 3 cm² Sonde untersucht, um die Magnetfeldexposition der Hand für den Fall zu erfassen, bei dem der Stecker während des Ladens bzw. zu Beginn oder Ende des Ladevorgangs in der Hand gehalten wird (siehe Abbildung 8.4).

Durch die isozentrische Kombination von Hall- und Spulensensoren bietet das MF EASY grundsätzlich einen Messfrequenzbereich von 0 Hz bis 400 kHz. Die Erfahrung während der Messungen an AC-Ladepunkten zeigte jedoch, dass Frequenzanteile unterhalb von 1 Hz in keinem strahlenschutztechnisch relevanten Ausmaß vorhanden waren, sodass bei der Auswertung der Messungen an AC-Ladepunkten (Lademodi 2 und 3) ausschließlich die Messsignale der Spulensensoren für die weiterführenden Analysen herangezogen wurden. Im Fall der Messungen an DC-Ladepunkten (Lademodus 4) wurden sowohl die Messsignale der Spulensensoren als auch jene der Hall-Sensoren ausgewertet. Sofern initiale Messungen mit voller Messbandbreite zuverlässig keine relevanten Spektralanteile im Frequenzbereich oberhalb von 100 kHz zeigten, wurde die Messbandbreite auf 100 kHz eingeschränkt, um die Messempfindlichkeit zu erhöhen (Reduzierung des Eigenrauschens). Ergänzend zu den Detailmessungen mit dem Messsystem MF EASY erfolgten auch Überblicks-Magnetfeldmessungen im Frequenzbereich 9 kHz bis 10 MHz mittels des Messgerätes SRM 3006 mit zugehöriger isotroper Magnetfeld-sonde (Narda STS). Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass keine relevanten Immissionsanteile oberhalb des Messfrequenzbereiches des MF EASY vorlagen.



Abbildung 8.1: Verwendetes Magnetfeld-Messsystem MF EASY (<https://rf.seibersdorf-laboratories.at/products-services/products/mf-easy>).

Zusätzlich wurden im Vorfeld der detaillierten Magnetfeldmessungen die Verläufe der magnetischen Flussdichte bei einer Auswahl von 15 Fahrzeugen und Ladepunkten²² über der Zeit qualitativ ermittelt. Dies erfolgte durch Fixierung eines Magnetfeldexposimeters (ExpoM-ELF, Fields at Work GmbH, Zürich, Schweiz) direkt am Ladekabel während des gesamten Ladezyklus (siehe Abbildung 6.1 in Kapitel 6).

Für die Messungen während des induktiven Ladens wäre alternativ bzw. ergänzend auch die in Kapitel 3.4.4 beschriebene Gradientenfeldsonde MAGPy vorteilhaft einsetzbar. Nach Abwägung aller Vor- bzw. Nachteile und vor allem aufgrund der Tatsache, dass für die konkrete Aufgabenstellung die gleichen Informationen (wenn auch etwas aufwändiger) auch mit dem MF-EASY gewonnen werden können, wurde entschieden, dass eine Anschaffung des MAGPy aus wirtschaftlicher Sicht nicht gerechtfertigt werden kann, insbesondere bei Beachtung der Tatsache, dass ohnehin nur ein einziges induktives Ladesystem für Messungen zur Verfügung stand.

8.2 Ablauf der detaillierten Messungen und betrachtete Messpositionen

8.2.1 Messungen während des induktiven Ladens

Die Vormessungen des Zeitverlaufs der Ladestromstärke bei unterschiedlichen Batterie-Anfangsladezuständen zeigten, dass die während der jeweiligen Messung ermittelten, maximalen (stationären) Magnetfeldimmissionen (sowohl bewertet nach ICNIRP 1998 als auch nach ICNIRP 2010) innerhalb der ersten fünf Minuten nach dem Starten des Ladevorganges auftreten (siehe Kapitel 9.1)²³. Als Beobachtungsdauer zur Erfassung der Magnetfeldimmissionen während der Ladevorgänge wurde daher der Zeitraum von unmittelbar vor dem Starten des Ladevorganges bis fünf Minuten nach dem Starten des jeweiligen Ladevorganges festgelegt. Danach wurde der Ladevorgang beendet, wobei auch Messungen während des Beendens des Ladevorganges durchgeführt wurden, um dabei gegebenenfalls auftretende transiente Vorgänge zu erfassen.

Detaillierte Magnetfeldmessungen erfolgten jeweils in zwei potenziellen Aufenthaltsbereichen außerhalb der Fahrzeuge und an zwei Sitzplätzen innerhalb der Fahrzeuge.

Als Situationen, bei denen sich Personen in Aufenthaltsbereichen mit potenziell hohen Immissionen außerhalb des Fahrzeuges befinden, wurden im Rahmen von Vormessungen das Stehen in unmittelbarer Nähe zur Ladesäule und das Stehen in unmittelbarer Nähe zur Ladebuchse des Fahrzeugs identifiziert. Diese Situationen wurden im Zuge der detaillierten Magnetfeldmessungen mittels einer senkrechten Anordnung von neun der insgesamt zehn (100 cm²) Messaufnehmer in 30 cm Distanz zur Ladebuchse des Fahrzeugs (Abbildung 8.2) bzw. zur Front der Ladesäule bzw. Wallbox (Abbildung 8.3) untersucht (Höhe der Messaufnehmer ca. 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 cm über Boden). Der zehnte Messaufnehmer (3 cm²) wurde jeweils unmittelbar am Ladekabelstecker fixiert (Abbildung 8.4), um auch die Magnetfeldexposition der den Stecker während des Ladens umfassenden Hand abschätzen zu können.

²² Diese Auswahl von Fahrzeugen und Ladepunkten entspricht nicht der in Tabelle 7.1 gezeigten Auswahl, die im Rahmen der detaillierten Messungen untersucht wurde.

²³ In einigen Fällen traten auch zu späteren Zeitpunkten vereinzelt noch Expositionsindizes auf, die geringfügig (max. 10 %) oberhalb des Maximalwertes innerhalb der ersten fünf Minuten lagen. Die dadurch entstehende Unsicherheit wurde als akzeptabel angesehen.

Da in Lademodus 2 keine Ladesäule bzw. Wallbox vorhanden ist, erfolgten in diesem Fall, anstelle der Messungen „in 30 cm Distanz Ladesäule“, Messungen mit einer 3 cm² Einzelsonde (ELT 400, Narda STS, Pfullingen, Deutschland) direkt am In-Line Steuergerät (siehe Abbildung 7.1, links bzw. Mitte oben).



Abbildung 8.2: Anordnung der Messaufnehmer bei den Messungen in 30 cm Distanz zu den Ladebuchsen der Fahrzeuge.



Abbildung 8.3: Anordnung der Messaufnehmer bei den Messungen in 30 cm Distanz zur Front der Ladesäulen.



Abbildung 8.4: Anordnung des 3 cm² Messaufnehmers direkt am Ladestecker.

Für die Messungen an den auf Grundlage einer Maximumsuche ausgewählten Sitzplätzen im Fahrzeuginnenen wurde ein Hartschaum-Dummy verwendet, das eine Fixierung von zehn Messaufnehmern (100 cm²) entlang des Körpers erlaubt (Abbildung 8.5, Abbildung 8.6).

Nach abgeschlossener Maximumsuche während des Ladens und Festlegung der zu untersuchenden Sitzplätze bzw. Außenbereiche war der Ablauf der Messungen gleichermaßen für alle betrachteten Fahrzeuge, Ladepunkte und Messpositionen wie folgt:

1. Herstellen bzw. Überprüfen des gewünschten Ladezustandes des Fahrzeuges (Laden auf 95 % bzw. Leerfahren auf 2 – 5 %)²⁴
2. Positionierung der Messaufnehmer
3. Magnetfeldmessungen von unmittelbar vor dem Starten des Ladevorganges bis 5 Minuten nach dem Starten des Ladevorganges sowie während des Beendens des Ladevorganges



Abbildung 8.5: Hartschaum-Dummy zur Fixierung der Messaufnehmer (Messaufnehmer aus Gründen der Übersichtlichkeit ohne Kabel dargestellt).



Abbildung 8.6: Hartschaum-Dummy mit Messaufnehmern auf der Rückbank eines Fahrzeuges.

²⁴ Es war nicht erforderlich für jede betrachtete Messposition erneut die gewünschten Ladezustände herzustellen. Je nach Ladeleistung konnten mehrere bzw. in vielen Fällen sogar alle Messpositionen ohne zwischenzeitliche Reduzierung des Batterieladezustandes erfolgen.

8.2.2 Messungen während des induktiven Ladens

Im Zuge von Vormessungen während des Ladens (mit und ohne seitlichen Versatz zwischen Primär- und Sekundärspule) wurde festgestellt, dass die maximalen Immissionen innerhalb des Fahrzeuges am gegen die Fahrtrichtung orientierten Sitzplatz der zweiten Sitzreihe (rechte Fahrzeugseite) bei seitlichem Versatz der Sekundärspule in Richtung links auftreten (ca. 12 cm Versatz möglich). Innerhalb des Fahrzeuges wurde daher zusätzlich zum Fahrerplatz dieser Sitzplatz für detaillierte Magnetfeldmessungen mittels des Hartschaum-Dummys (Abbildung 8.5, Abbildung 8.6) ausgewählt. Außerhalb des Fahrzeuges zeigten sich die linke und rechte Fahrzeugseite auf Höhe der Sekundärspule (bei längsseitiger Zentrierung der Sekundärspule über der Primärspule) als die strahlenschutztechnisch relevantesten Aufenthaltsbereiche. Daher wurden die messtechnisch zu untersuchenden Bereiche wie in Abbildung 8.7 dargestellt festgelegt, wobei außerhalb des Fahrzeugs jeweils mittels einer Vertikalanordnung von neun der zehn (100 cm²) Messaufnehmer gemessen wurde (Höhe der Messaufnehmer ca. 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180 cm über Boden). Der zehnte Messaufnehmer (100 cm²) wurde jeweils direkt am Boden vor der Vertikalanordnung der anderen neun Messaufnehmer platziert und befand sich daher ca. 6 cm näher am Fahrzeug.

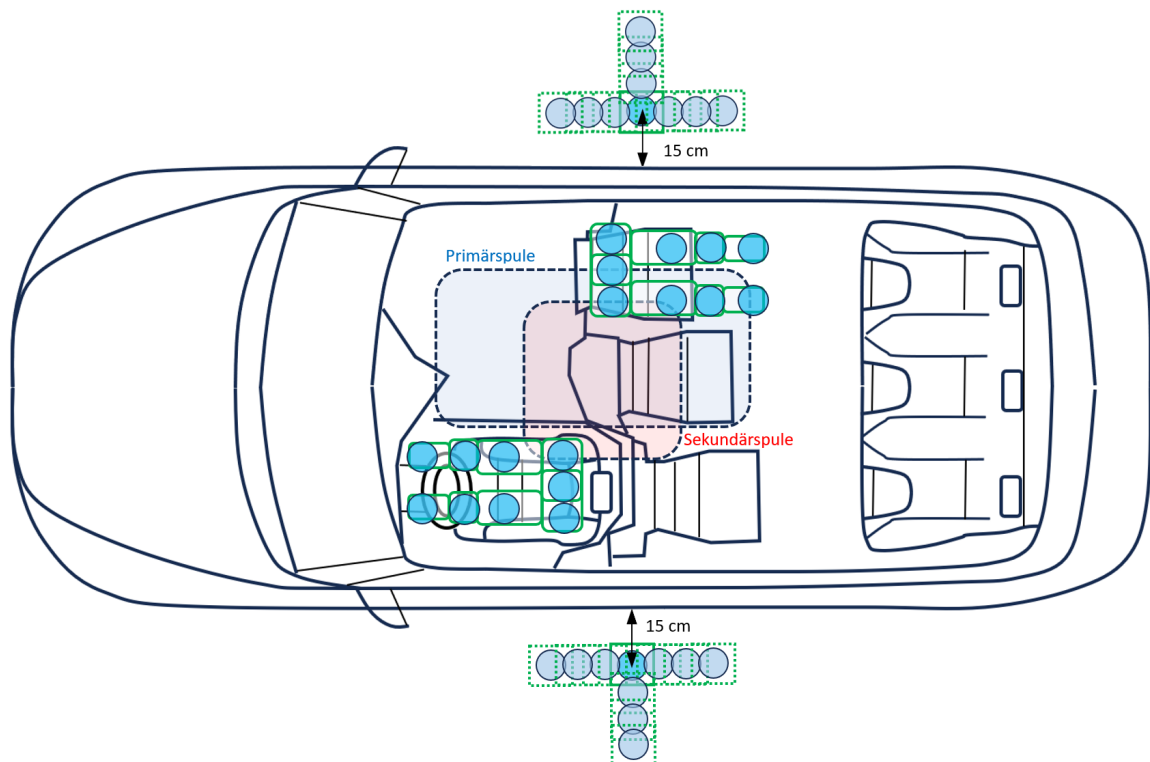


Abbildung 8.7: Schematische Darstellung (Ansicht von oben) der untersuchten Messpositionen mit dem Hartschaum-Dummy auf dem Fahrersitz und dem gegen die Fahrtrichtung orientierten Sitzplatz der zweiten Sitzreihe auf der rechten Fahrzeugseite sowie außerhalb des Fahrzeugs mit den vertikal angeordneten Messaufnehmern, nacheinander aufgestellt in einem T-förmigen Horizontalraster mit 10 cm Abstand. Die blauen Kreise markieren die Messaufnehmer.

Abbildung 8.8 zeigt Fotos von den Messungen an den untersuchten Aufenthaltsbereichen.



Abbildung 8.8: Platzierung des Hartschaum-Dummys am Fahrerplatz (oben, links) und am untersuchten Sitzplatz der zweiten Sitzreihe (oben, rechts). Vertikalanordnung der Messaufnehmer für die Messungen außerhalb des Fahrzeugs (unten).

Nach abgeschlossener Maximumsuche während des Ladens und Festlegung der zu untersuchenden Sitzplätze bzw. Außenbereiche war der Ablauf der Messungen gleichermaßen für alle Messpositionen im Fahrzeuginneren sowie die Messpositionen links und rechts vom Fahrzeug auf Höhe der Sekundärspule in 15 cm Abstand (blaue Positionen in Abbildung 8.7) und bei minimalem und maximalem seitlichem Versatz von Primär- und Sekundärspule wie folgt:

1. Herstellen des gewünschten Ladezustandes des Fahrzeuges (Laden auf 95 % bzw. Leerfahren auf 2 – 5 %)²⁵
2. Positionierung der Messaufnehmer in den jeweiligen Bereichen
3. Magnetfeldmessungen von unmittelbar vor dem Starten des jeweiligen Ladevorganges bis 3 Minuten²⁶ nach dem Starten des Ladevorganges. Danach wurde der Ladevorgang beendet, wobei auch Messungen während des Beendens des Ladevorganges durchgeführt wurden.

In den in Abbildung 8.7 hellblau dargestellten Positionen bzw. Bereichen außerhalb des Fahrzeugs wurden ergänzende Messungen zur detaillierten Erfassung der Feldverteilung neben dem Fahrzeug durchgeführt, die später zur Validierung der numerischen Ersatzfeldquelle im Zuge von Computersimulationen verwendet wurden (siehe Kapitel 10.2).

8.3 Unsicherheitsbetrachtungen

Für die korrekte Interpretation der in den folgenden Kapiteln präsentierten Messergebnisse ist es erforderlich, einige grundlegende Aspekte bezüglich Messunsicherheit, Reproduzierbarkeit, Repräsentativität sowie der daraus resultierenden Gesamtunsicherheit u_{ges} der Messergebnisse zu diskutieren bzw. klarzustellen und die einzelnen Beiträge u_x zur Gesamtunsicherheit zu definieren.

8.3.1 Eingeschränkte Kontrolle über Hintergrundimmissionen verursacht durch die Fahrzeuge und die Umgebung (u_1)

Die Magnetfeldmessungen während des Ladens wurden zu einem großen Teil im öffentlichen Raum durchgeführt und zwangsläufig in Bereichen, in denen eine leistungsstarke elektrische Versorgungs-Infrastruktur für die Anspeisung der Ladepunkte und ggf. auch leistungsstarke Verbraucher wie z. B. andere Elektrofahrzeuge vorhanden waren. Aus diesem Grund war ein vergleichsweise „unruhiger“ magnetischer Hintergrund zu erwarten. Wiederholte „Störhintergrund-Messungen“ im Bereich der Messpositionen ohne die Anwesenheit des untersuchten Fahrzeugs zeigten typische magnetische Hintergrundimmissionen (1 Hz – 400 kHz) im Ausmaß bis zu ca. $0.15 \mu\text{T}$ (B_{RMS}) bzw. $0.25 \mu\text{T}$ (B_{PEAK}) mit einem dominanten Spektralanteil von 50 Hz, entsprechend Expositionsindizes von bis zu ca. 0.0008 (Explnd_{2010}) bzw. ca. 0.002 (Explnd_{1998}).

Zusätzlich sind die untersuchten Fahrzeuge mit einer Vielzahl von unterschiedlichen elektrischen Komponenten und Systemen ausgestattet, über die der Benutzer keine Kontrolle hat und die auch im stillstehenden und abgeschalteten Fahrzeug aktiv sind (zumindest eine Zeit lang nach dem Abschalten). Schließlich bildet der Lüfter zur Kühlung der

²⁵ Es war nicht erforderlich für jede betrachtete Messposition erneut die gewünschten Ladezustände herzustellen. Es konnten alle Messpositionen ohne zwischenzeitliche Reduzierung des Batterieladezustandes durchgeführt werden.

²⁶ Eine Beobachtungszeit von 3 Minuten erwies sich als ausreichend, da sich innerhalb kurzer Zeit ein stabiler stationärer Ladestrom im Bereich zwischen 50 und 55 A einstellte. Die Ladestromstärke wird im Fahrzeug am Anzeigemodul des Ladesystems dargestellt.

Ladesystemkomponenten und der Batterie eine variable Quelle von Magnetfeldimmissionen, da dieser offenbar nur nach Bedarf, je nach thermischem Zustand der Ladesystemkomponenten bzw. der Batterie zugeschaltet wird. Wiederholte „Störhintergrund-Messungen“ im Bereich der Messpositionen innerhalb und in der unmittelbaren Umgebung der Fahrzeuge unmittelbar vor dem Ladevorgang zeigten typische magnetische Hintergrundimmissionen (1 Hz – 400 kHz) im Ausmaß bis zu ca. 0.2 μT (B_{RMS}) bzw. 0.4 μT (B_{PEAK}). Die entsprechenden Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung nach ICNIRP 2010 (Explnd_{2010}) bzw. nach ICNIRP 1998 (Explnd_{1998}) lagen bei 0.002 bzw. 0.008. Messwerte unterhalb von 0.2 μT (B_{RMS}) bzw. 0.4 μT (B_{PEAK}) sowie Expositionsindizes kleiner als 0.002 (Explnd_{2010}) bzw. 0.008 (Explnd_{1998}) konnten daher nicht dem Ladevorgang zugeordnet werden. In ähnlicher Weise waren, unter Einbeziehung der Empfindlichkeit (Rauschgrenze der eingesetzten Hall-Sensoren) statische Magnetfeldbeiträge unterhalb von ca. 50 μT nicht mehr eindeutig dem Ladevorgang zuzuordnen. Bei sehr kleinen Messwerten bzw. Expositionsindizes sind demnach vergleichsweise hohe Unsicherheiten anzusetzen, die umgekehrt proportional mit der Bewertungsgröße abnehmen (Abbildung 8.9), wobei näherungsweise von rechteckförmiger Verteilung dieses Unsicherheitsbeitrages ausgegangen wird. Im Falle der zeitlich veränderlichen magnetischen Flussdichte (AC) wird dieser Unsicherheitsbeitrag mit hoher Wahrscheinlichkeit²⁷ in Richtung einer Überschätzung der Immissionen wirken und wird bei der Berechnung der Gesamtunsicherheit daher nur mit positivem Vorzeichen berücksichtigt. Im Fall der statischen magnetischen Flussdichte (DC) ist diese Annahme aufgrund des geomagnetischen Hintergrundfeldes nicht mehr rechtfertigbar und der Unsicherheitsbeitrag wird bei der Berechnung der Gesamtunsicherheit daher näherungsweise symmetrisch zu Null berücksichtigt.

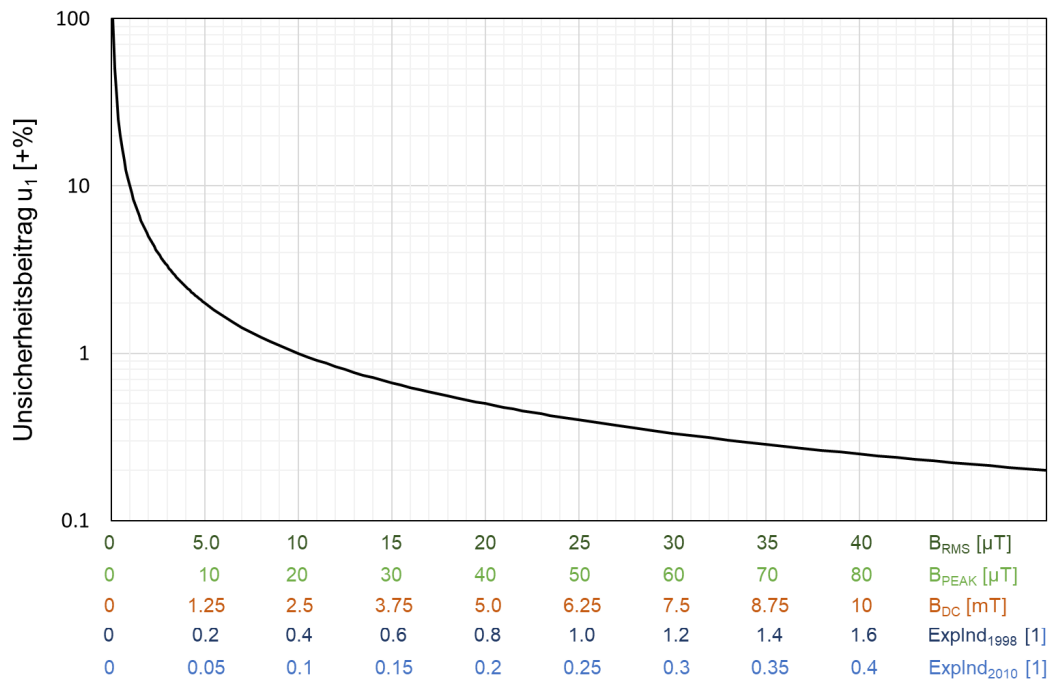


Abbildung 8.9: Vereinfachter, empirisch abgeleiteter Zusammenhang zwischen Unsicherheitsbeitrag u_1 und Expositionsindizes Explnd_{1998} , Explnd_{2010} bzw. Messwerten B_{RMS} , B_{PEAK} und B_{DC} (näherungsweise identisch für alle fünf Bewertungsgrößen angenommen).

²⁷ Relevante destruktive Überlagerungen der Immissionen mit den Hintergrundfeldern erscheinen bei zeitlich veränderlichen Feldern und konzentrierten Feldquellen als unwahrscheinlich.

8.3.2 Reproduzierbarkeit von B_{PEAK} zufolge Initialzustand des On-Board Ladegerätes (u_2)

Im Zuge der Messungen an induktiven Ladepunkten (siehe Kapitel 9.2) wurden bei allen Fahrzeugen vergleichsweise²⁸ hohe B_{PEAK} -Werte in der Initialphase des Ladevorganges (ca. 2 – 5 Sekunden nach dem Starten des Ladevorganges) festgestellt. Im Gegensatz zu den B_{PEAK} - und B_{RMS} -Werten während der stationären Phase des Ladevorganges (spätestens ab ca. 10 Sekunden nach dem Start) zeigte sich die Reproduzierbarkeit der B_{PEAK} -Werte in der Initialphase des Ladevorganges allerdings als gering. Während die Reproduzierbarkeit von Messwerten in der stationären Phase des Ladevorganges innerhalb von $\pm 5\%$ eingegrenzt werden kann, lag sie bezüglich der B_{PEAK} -Werte in der Initialphase des Ladevorganges bei nicht weniger als einem Faktor 2 – 3. Als Ursache dafür wird der Initialzustand von Kapazitäten des On-Board-Ladegerätes in den Fahrzeugen angesehen. Dieser Unsicherheitsbeitrag wird bei der Ermittlung der Gesamtunsicherheit in konservativer Weise als normalverteilt angenommen.

8.3.3 Positionierungsunsicherheit der Messsonden (u_3)

Bei allen Messungen innerhalb der Fahrzeuge wurden die Messsonden durch das oben beschriebene Hartschaum-Dummy in den Fahrzeugen fixiert. Dies ermöglichte weitgehend reproduzierbare Messpositionen entlang des Körpers. Dennoch verbleibt eine Unsicherheit der einzelnen Messsonden-Positionen, die vor allem im Fuß- und Unterschenkelbereich mit ca. ± 3 cm eingegrenzt werden kann. Unter Zugrundelegung der vorgefundenen Feldgradienten führt dies zu einem resultierenden maximalen Unsicherheitsbeitrag zufolge der Positionierung der Messsonden von $\pm 25\%$ im Fuß- und Unterschenkelbereich, $\pm 10\%$ im Oberschenkel- und Unterleibsbereich und $\pm 5\%$ in höheren Körperregionen.

Für die Messungen außerhalb der Fahrzeuge, mit den Sonden entlang einer vertikalen Achse positioniert, konnten folgende normalverteilte Unsicherheiten abgeleitet werden:

- Beim induktiven Laden bei ca. $\pm 15\%$ im Höhenbereich bis 40 cm über Boden, $\pm 10\%$ im Höhenbereich 40 – 80 cm, $\pm 5\%$ im Höhenbereich darüber
- Beim induktiven Laden nahe der Fahrzeug-Ladebuchse bei ca. $\pm 15\%$ im Höhenbereich bis 30 cm oberhalb der Ladebuchse, $\pm 10\%$ im Höhenbereich 30 – 50 cm oberhalb der Ladebuchse, $\pm 5\%$ im Höhenbereich darüber
- Beim induktiven Laden in 30 cm Distanz zur Ladesäule bei ca. $\pm 15\%$ im Höhenbereich bis Oberkante Ladesäule, $\pm 5\%$ im Höhenbereich darüber

8.3.4 Kalibrierung und Isotropie der Messsonden (u_4)

Die Kalibrierunsicherheit der verwendeten Messsonden im Frequenzbereich bis 400 kHz liegt (normalverteilt) bei $\pm 10\%$ ($k = 1$). Der Isotropiefehler der Messsonden im homogenen Magnetfeld beträgt zwar nur wenige %, dieser ist jedoch für die Messungen in starken Gradientenfeldern nicht aussagekräftig. Insbesondere bei Messungen mit großen Messsonden (100 cm² Querschnitt) können in starken Gradientenfeldern vergleichsweise große Unsicherheiten zufolge unterschiedlicher Sondenausrichtung (relativ zum Feldgradienten) auftreten. Eine Verwendung kleinerer Messsonden mit z. B. 3 cm² Querschnitt wäre zur Reduzierung des Problems zwar grundsätzlich denkbar, ist aber aufgrund der deutlich geringeren Empfindlichkeit (bei gleicher Frequenzbandbreite) nicht sinnvoll. Testmessungen zur

²⁸ Im Vergleich mit den maximalen B_{PEAK} - und B_{RMS} -Werten während der stationären Phase des Ladevorganges.

Bestimmung der Unsicherheit zufolge unterschiedlicher Sondenausrichtungen in Gradientenfeldern, wie sie in den Fahrzeugen vorgefunden wurden, führten zu Werten von maximal ca. $\pm 15\%$ in Bereichen mit Distanzen < 50 cm zur Feldquelle, maximal ca. $\pm 10\%$ in Bereichen mit Distanzen < 100 cm zur Feldquelle und maximal ca. $\pm 5\%$ in größerer Entfernung zur Feldquelle (jeweils Normalverteilung).

8.3.5 Resultierende Gesamtunsicherheit

Die Berechnung der resultierenden Gesamtunsicherheit erfolgt nach gängiger Praxis durch geometrische Addition der Einzelbeiträge unter Berücksichtigung deren statistischer Verteilung mittels eines Divisors d . Für rechteckverteilte Beiträge beträgt der Divisor 1.73, für normalverteilte Beiträge beträgt der Divisor 1.

$$u_{ges} = \sqrt{\left(\frac{u_1}{1.73}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{1}\right)^2 + \left(\frac{u_3}{1}\right)^2 + \left(\frac{u_4}{1}\right)^2}$$

Abbildung 8.10 bis Abbildung 8.13 fassen die resultierenden Gesamtunsicherheiten für die unterschiedlichen Bewertungsgrößen und Messungen zusammen.

Die Abhängigkeiten der Gesamtunsicherheit von den Bewertungsgrößen selbst sowie der Bereich von vergleichsweise großen Unsicherheiten ($> 50\%$) beschränkt sich auf den Bereich geringer Immissionen. Aufgrund der Tatsache, dass die Immissionen während des stationären Ladevorganges vergleichsweise gering waren (vgl. Kapitel 9 und 10), ist dies jedoch relevant.

Für die während der Initialphase des Ladevorgangs beobachteten magnetischen Spitzenwerte und für die zugehörigen Expositionsindizes müssen zufolge deren schlechter Reproduzierbarkeit deutlich größere Unsicherheiten im Bereich von ca. einem Faktor 2-3 angesetzt werden (vgl. Kapitel 8.3.2).

Anzumerken bleibt schließlich noch, dass sich die stark steigenden Unsicherheitswerte bei geringen Immissionen vor allem auf das positive Ende des Unsicherheitsintervalls beziehen, d. h. in Richtung einer Überschätzung der Immissionen wirken.

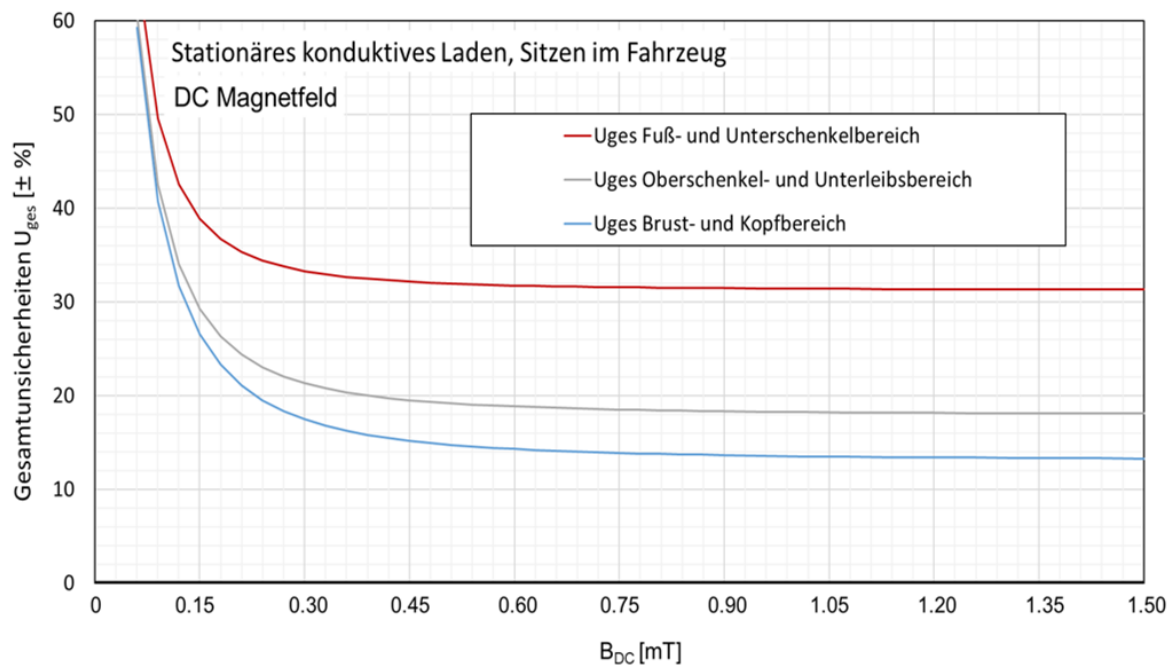
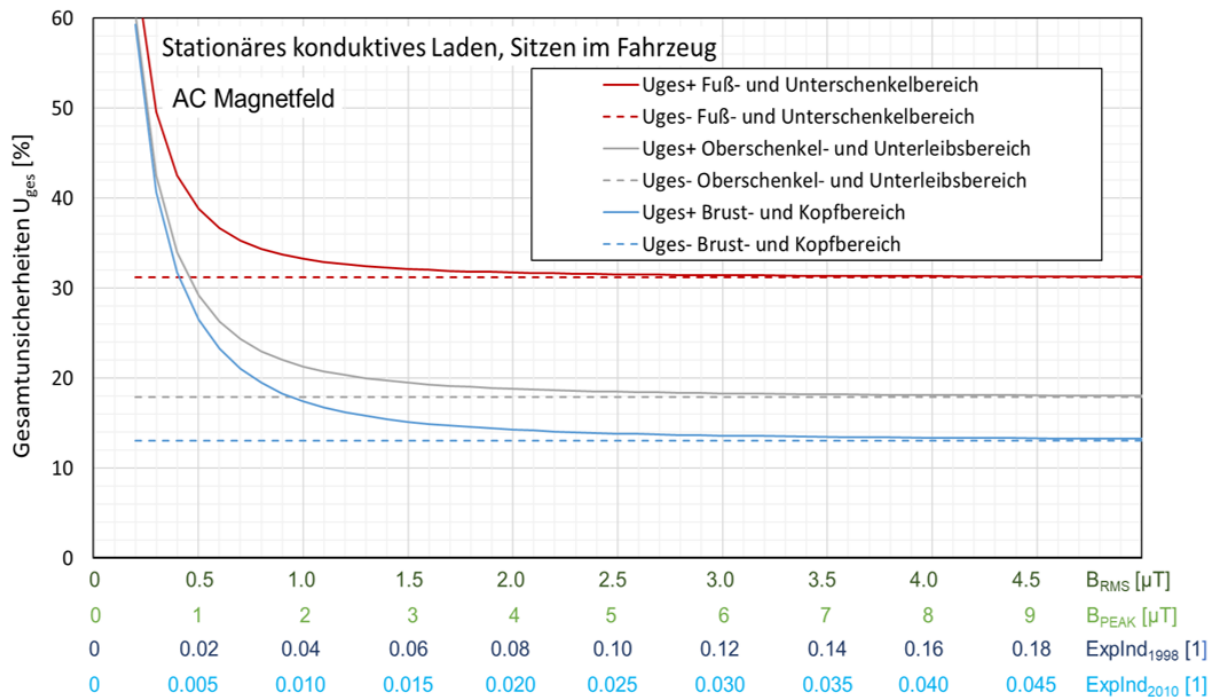


Abbildung 8.10: Resultierende Gesamtunsicherheiten für die Bewertungsgrößen zeitlich veränderlicher magnetischer Immissionen B_{RMS} , B_{PEAK} , $ExplInd_{2010}$ und $ExplInd_{1998}$ (oben) sowie für die statische magnetische Flussdichte B_{DC} (unten) bei den Messungen während des stationären konduktiven Ladens im Fahrzeuginnenen.

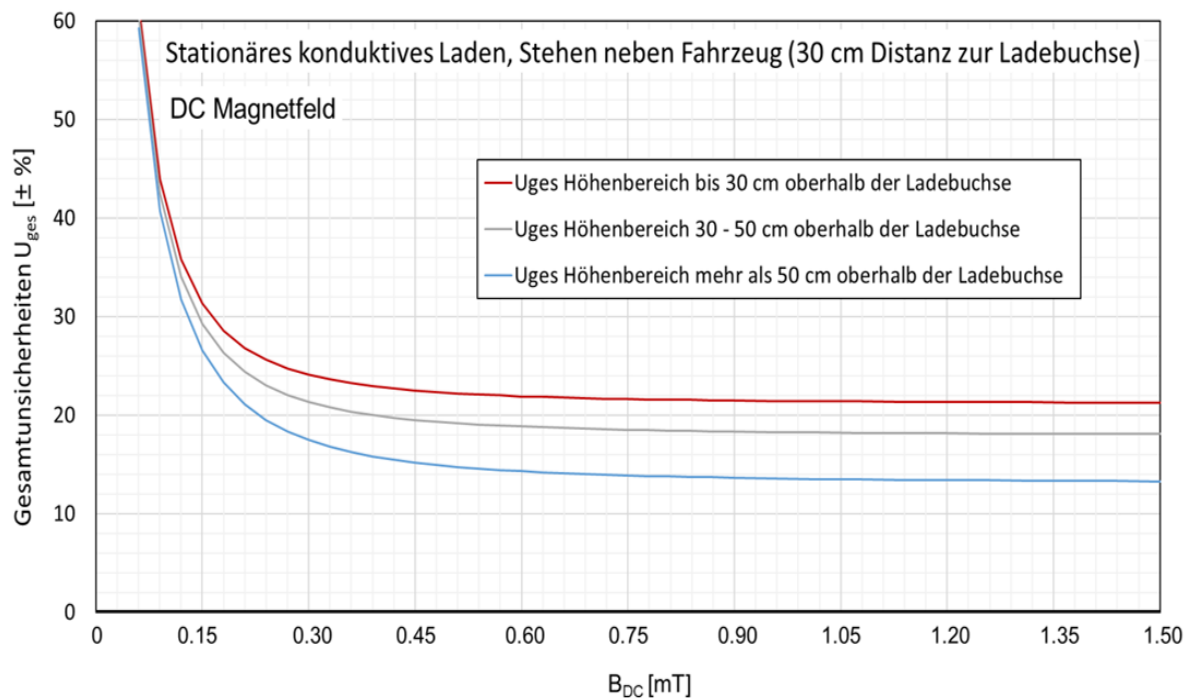
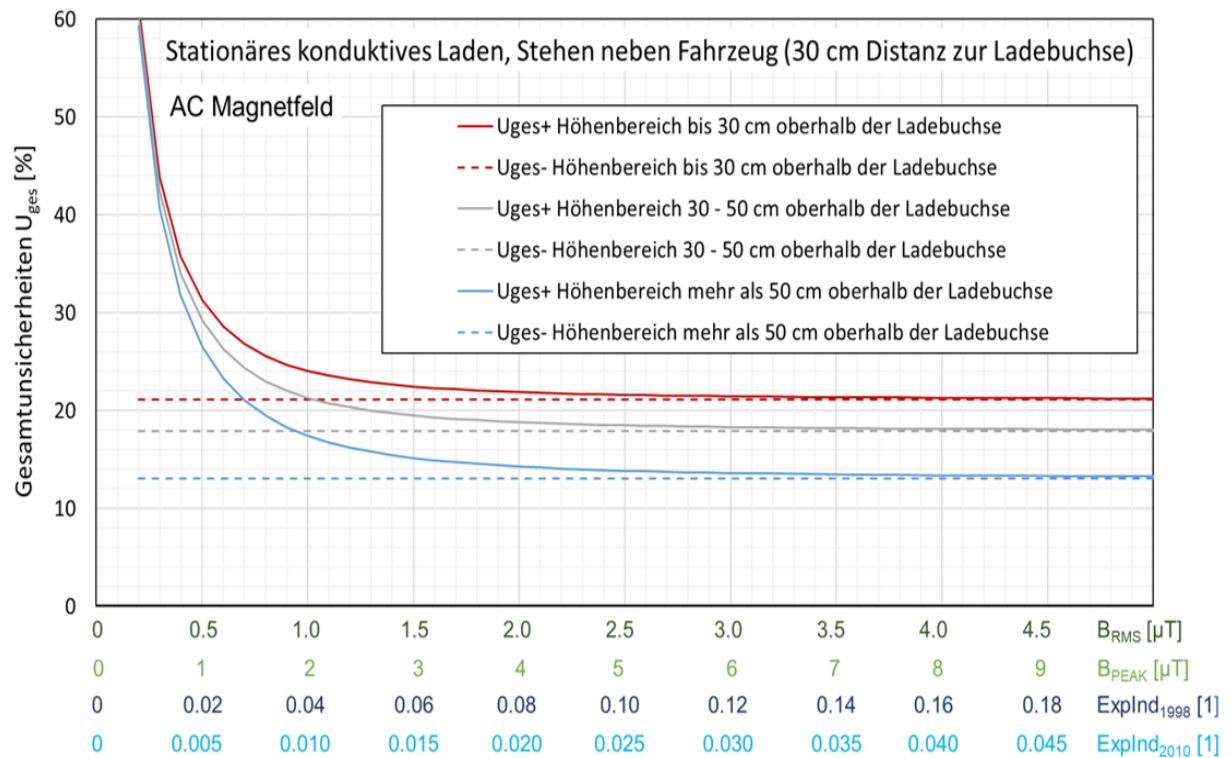


Abbildung 8.11: Resultierende Gesamtunsicherheiten für die Bewertungsgrößen zeitlich veränderlicher magnetischer Immissionen B_{RMS} , B_{PEAK} , $Explnd_{2010}$ und $Explnd_{1998}$ (oben) sowie für die statische magnetische Flussdichte B_{DC} (unten) bei den Messungen während des stationären konduktiven Ladens in 30 cm Distanz zur Fahrzeug-Ladebuchse.

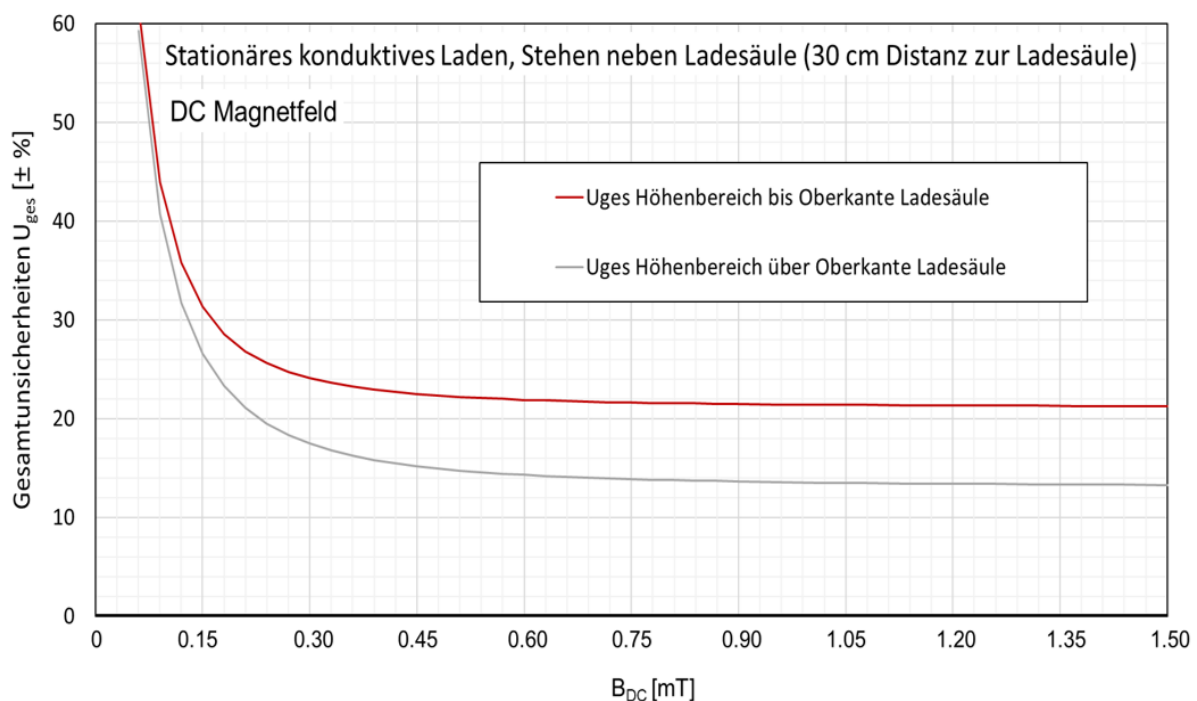
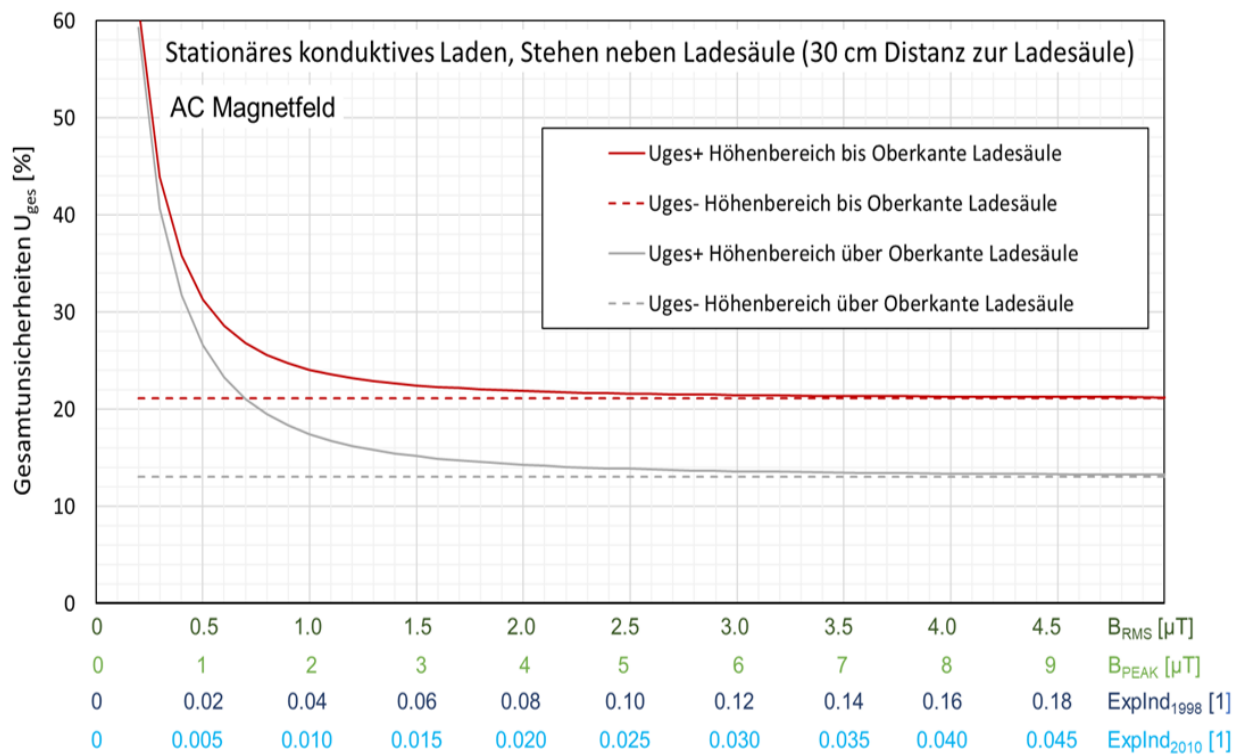


Abbildung 8.12: Resultierende Gesamtunsicherheiten für die Bewertungsgrößen zeitlich veränderlicher magnetischer Immissionen B_{RMS} , B_{PEAK} , $ExplInd_{2010}$ und $ExplInd_{1998}$ (oben) sowie für die statische magnetische Flussdichte B_{DC} (unten) bei den Messungen während des stationären konduktiven Ladens in 30 cm Distanz zur Ladesäule.

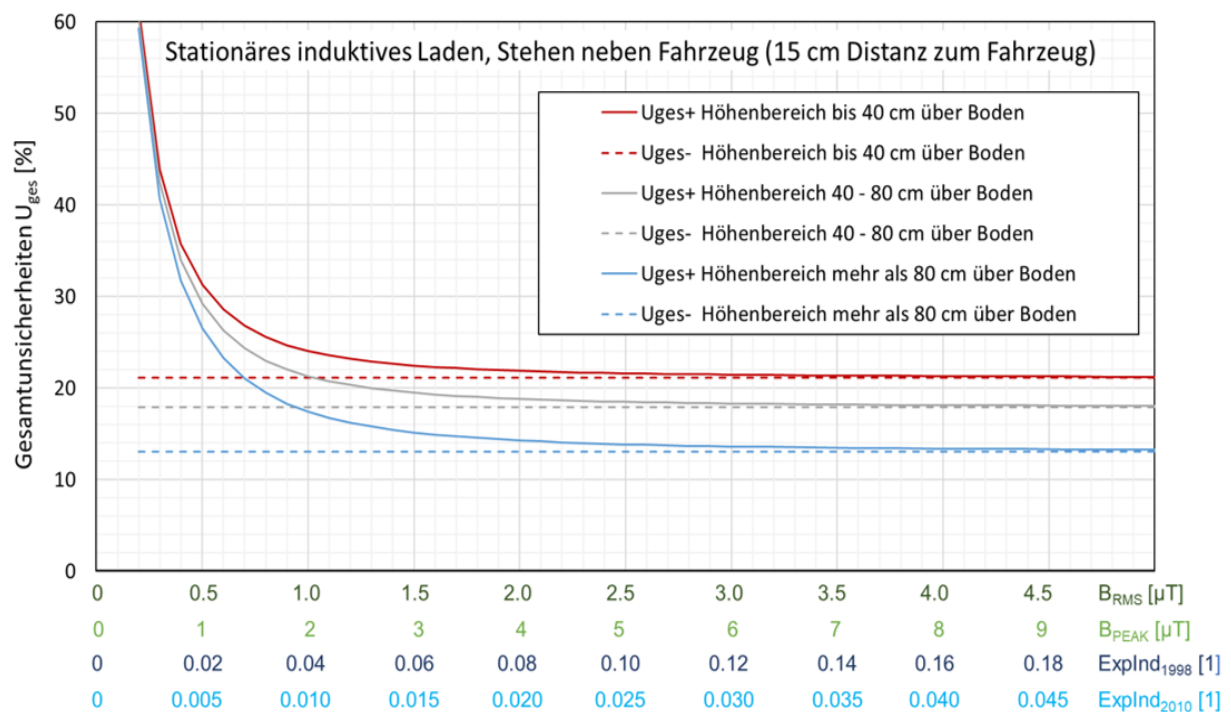
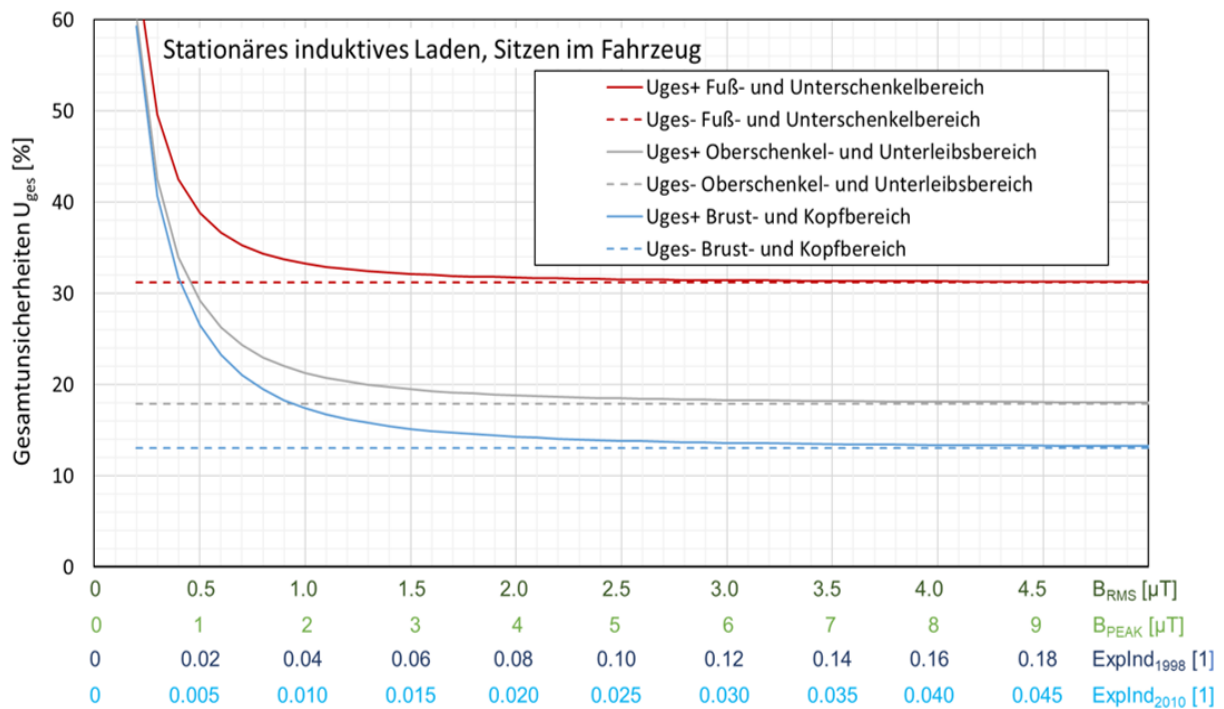


Abbildung 8.13: Resultierende Gesamtunsicherheiten für die Bewertungsgrößen B_{RMS} , B_{PEAK} , $Explnd_{2010}$ und $Explnd_{1998}$ bei den Messungen während des stationären induktiven Ladens innerhalb des Fahrzeugs (oben) und in 15 cm Distanz zum Fahrzeug (unten).

8.3.6 Repräsentativität der untersuchten Messpositionen

Bei allen Messungen wurden die Messsonden an Positionen innerhalb von Bereichen positioniert, die als typische Aufenthaltsorte von Körperteilen angesehen wurden. Es wurden keine Extrempositionen betrachtet, wie z. B. im äußerst vorderen/oberen, äußerst linken oder rechten Bereich des Fußraumes, die zwar grundsätzlich mit dem Vorderfuß erreichbar sind, jedoch nicht als typische Aufenthaltsbereiche angesehen wurden. Zusätzlich verbleibt aufgrund der Wandstärke des Hartschaum-Dummys ein Mindestabstand in links-rechts Richtung von ca. 3 – 4 cm zur Fahrzeugoberfläche im Fuß- und Unterschenkelbereich.

Aufgrund der in diesen Bereichen möglicherweise herrschenden großen Feldgradienten kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass an diesen Extrempositionen höhere Immissionswerte auftreten als im vorliegenden Bericht präsentiert.

Bei den Messungen außerhalb der Fahrzeuge während des konduktiven Ladens kommt der Lage bzw. Führung des Ladekabels große Bedeutung zu. Die im vorliegenden Bericht präsentierten Ergebnisse entsprechen der Situation, bei der das Ladekabel von der Ladesäule kommend zunächst dem natürlichen Verlauf folgend senkrecht zum Boden hängend, dann am Boden entlang bis vor die Ladebuchse des Fahrzeugs und von dort wieder dem natürlichen Verlauf folgend nach oben in Richtung Ladebuchse verlief. Andere Kabelverläufe, die zu einer dichteren Annäherung an die Magnetfeldsonden führen, ergeben naturgemäß höhere Immissionswerte.

9 Ergebnisse für das konduktive Laden

9.1 Ergebnisse der Vormessungen zur Ermittlung der Zeitverläufe der Ladestromstärke

Um abzuklären in welcher Phase des Ladezyklus mit den maximalen Magnetfeldimmissionen zu rechnen ist, wurden Vormessungen mit der in Kapitel 8.1 bzw. Abbildung 6.1 beschriebenen bzw. gezeigten Methode während insgesamt 16 Ladezyklen unterschiedlicher Fahrzeuge und an unterschiedlichen Ladepunkten durchgeführt. Abbildung 9.1 und Abbildung 9.2 zeigen eine repräsentative Auswahl der Messergebnisse, aus der ersichtlich ist, dass die maximalen Ladestromstärken (proportional zur magnetischen Flussdichte unmittelbar am Ladekabel) innerhalb von ca. 5 Minuten nach dem Starten des Ladevorganges erreicht werden. Die große Streubreite der Datenpunkte in den oberen beiden Diagrammen von Abbildung 9.1 (AC-Laden) ist auf die Effektivwertbildung über ein Zeitintervall von nur ca. 13 ms, also weniger als eine Periode der 50 Hz Grundschiwingung zurückzuführen²⁹. Dies ist auch die Ursache für die große Streubreite der orangenen Datenpunkte (Explnd_{2010}). Die Messdaten zeigen maximale DC-Werte der magnetischen Flussdichte von unter 1 mT, was weniger als 0.25 % des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2009 (ICNIRP, 2009) (400 mT) entspricht.

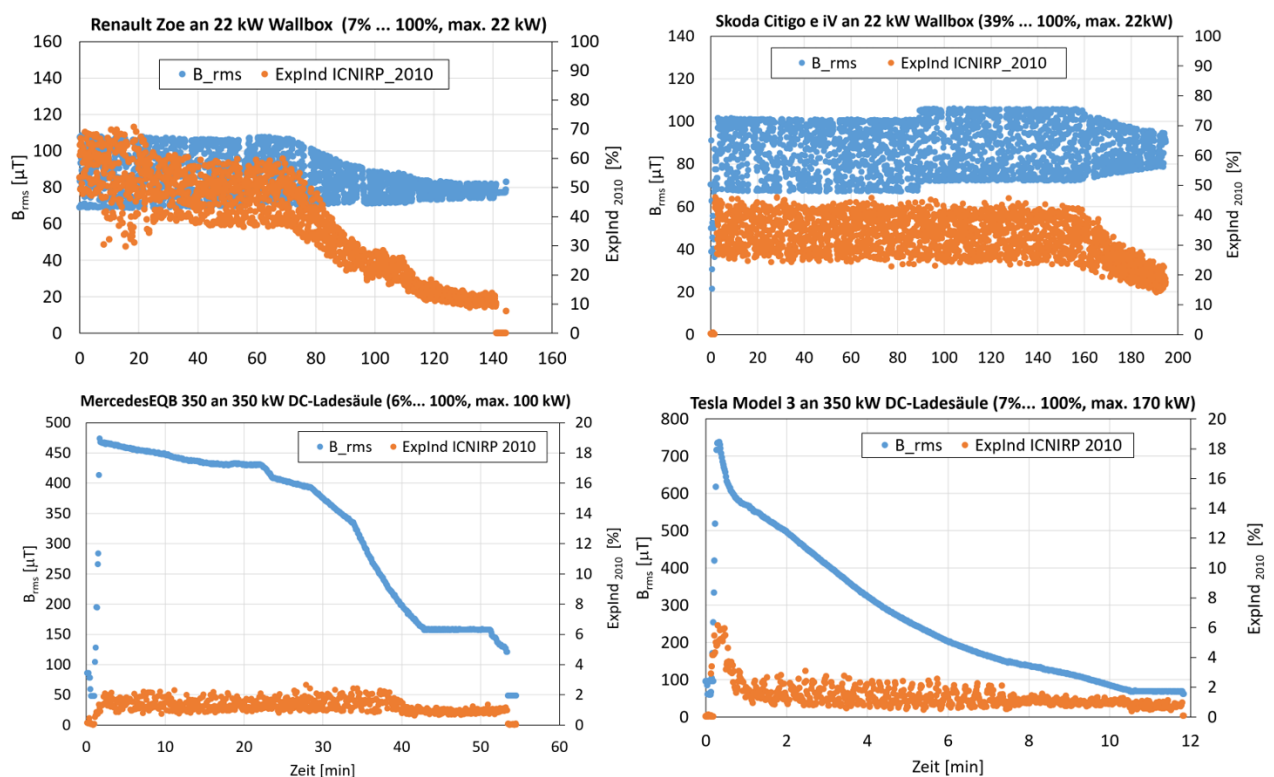


Abbildung 9.1: Verlauf der magnetischen Flussdichte (Effektivwerte über ein Zeitintervall von ca. 13 ms) gemessen mit dem Messgerät ExpoM-ELF direkt am Ladekabel (blaue Punkte) während zwei AC-Ladezyklen (oben) und zwei DC-Ladezyklen (unten) unterschiedlicher Fahrzeuge. Zusätzlich ist der Verlauf des zugehörigen Expositionszindex bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 (Explnd_{2010}) in Prozent angegeben (orangene Punkte). Messbandbreite DC – 100 kHz.

²⁹ Bei der bewusst gewählten Messbandbreite von 100 kHz ist beim verwendeten Messgerät ExpoM-ELF die maximale Messintervalllänge nur ca. 13 ms. Die nächstgeringere, wählbare Messbandbreite (mit größeren Messintervalllängen) wäre 10 kHz.

Der im rechten oberen Teilbild von Abbildung 9.1 sichtbare sprunghafte Anstieg des Effektivwertes der magnetischen Flussdichte um ca. 5 μT bei ca. 85 min ist als Artefakt zu werten, vermutlich verursacht durch eine Veränderung des lokalen Gradienten des Erdmagnetfeldes zufolge eines in der Nähe des Messgerätes platzierten oder entfernten ferromagnetischen Objektes (z. B. Parken eines anderen Fahrzeuges unmittelbar neben dem Messgerät. Eine tatsächliche Veränderung des AC-Ladestroms kann mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden, da dies auch eine merkbare Veränderung des ExplInd hervorgerufen hätte.

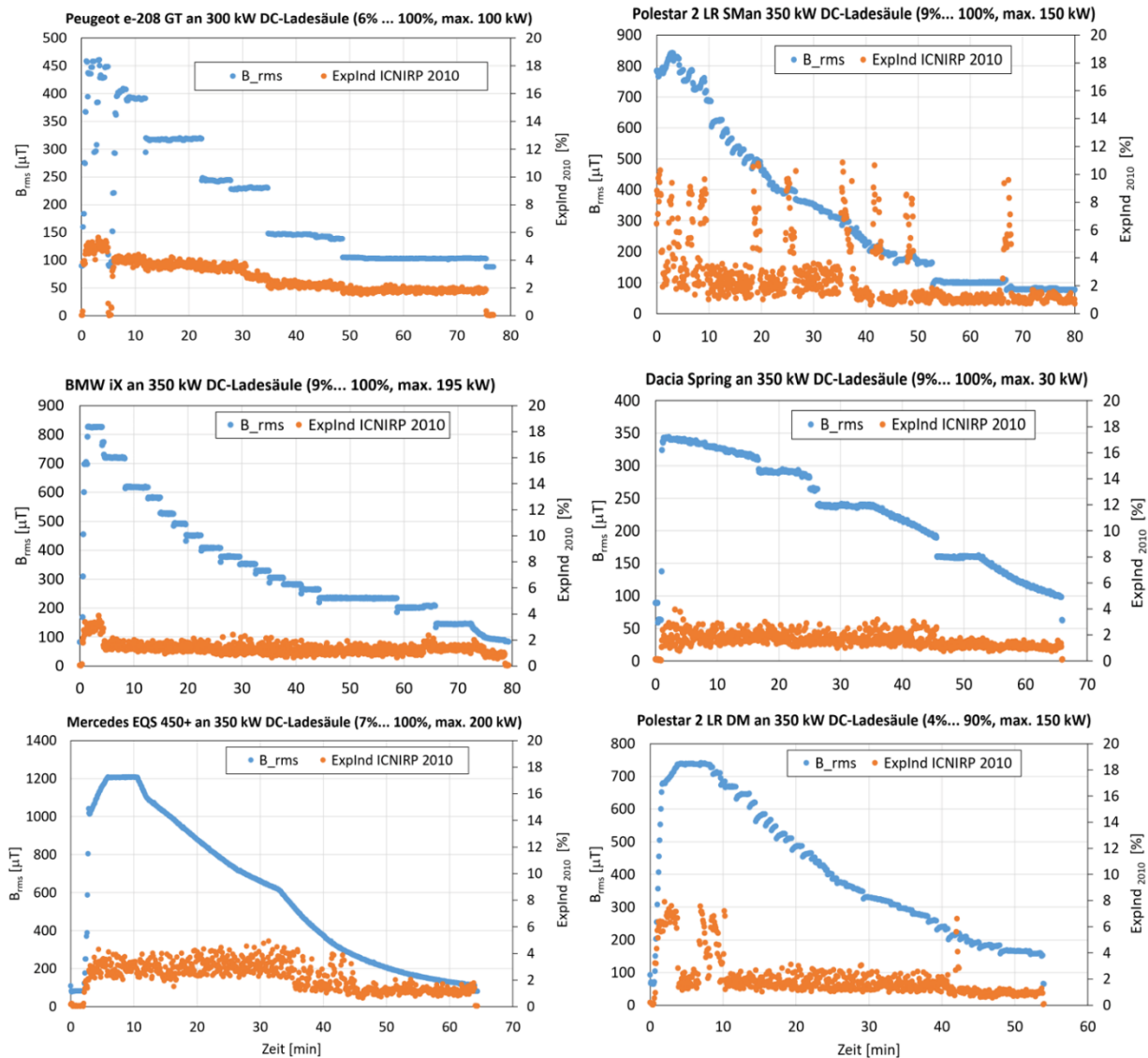


Abbildung 9.2: Verlauf der magnetischen Flussdichte (Effektivwerte über ein Zeitintervall von ca.13 ms) gemessen mit dem Messgerät ExpoM-ELF direkt am Ladekabel (blaue Punkte) während sechs DC-Ladezyklen unterschiedlicher Fahrzeuge. Zusätzlich ist der Verlauf des zugehörigen Expositionsindex bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 (ExplInd₂₀₁₀) in Prozent angegeben (orange Punkte). Messbandbreite DC – 100 kHz.

Auf Grundlage der Erkenntnisse aus den Vormessungen wurde als Beobachtungsdauer zur detaillierten Erfassung der Magnetfeldimmissionen der Zeitraum von unmittelbar vor dem Starten des Ladevorganges bis fünf Minuten nach dem Starten des Ladevorganges festgelegt. Zusätzlich wurden auch Messungen während des Beendens des Ladevorganges durchgeführt,

um dabei gegebenenfalls auftretende transiente Vorgänge zu erfassen. Während der gesamten Messdauer wurden die Zeitbereichs-Messwerte der magnetischen Flussdichte kontinuierlich als Folge von jeweils 1 Sekunde langen Signalverläufen aufgezeichnet.

9.2 Ergebnisse der Detailmessungen

9.2.1 Messungen im Lademodus 2 (230 V AC mit In-Line Steuergerät, 2 kW)

Tabelle 9.1 bis Tabelle 9.3 und Abbildung 9.3 fassen die Ergebnisse der Messungen während des Ladens in Modus 2 des Renault ZOE und des Porsche Taycan zusammen.

Tabelle 9.1: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 2 an den untersuchten Sitzplätzen in den Fahrzeugen in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ und $Explnd_{2010}$. Zusätzlich angegeben sind die Messpositionen, in denen die Werte gemessen wurden.

Fahrzeug				Renault ZOE		Porsche Taycan	
Ladestand während der Messungen				< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
1. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	3.79	3.17	5.4	2.2
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR
		$Explnd_{1998}$	max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.33	0.26	0.51	0.20
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR
		$Explnd_{2010}$	max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.064	0.051	0.095	0.033
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR
	stationäres Laden	B_{RMS}	max. B_{RMS} [μT]	0.21	< 0.20	0.20	< 0.20
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR
		$Explnd_{1998}$	max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.044	0.028	0.02	< 0.018
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR
		$Explnd_{2010}$	max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.007	0.004	0.004	< 0.002
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR
2. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	1.06	1.20	< 0.40	< 0.40
			Position	BS,FL	BS,FL	-	-
		$Explnd_{1998}$	max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.009	0.01	< 0.008	< 0.008
			Position	BS,FL	BS,FL	-	-
		$Explnd_{2010}$	max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.002	0.003	< 0.002	< 0.002
			Position	BS,FL	BS,FL	-	-
	stationäres Laden	B_{RMS}	max. B_{RMS} [μT]	0.37	0.45	< 0.20	< 0.20
			Position	BS,FL	BS,FL	-	-
		$Explnd_{1998}$	max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.008	0.009	< 0.008	< 0.008
			Position	BS,FL	BS,FL	-	-
		$Explnd_{2010}$	max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.003	0.003	< 0.002	< 0.002
			Position	BS,FL	BS,FL	-	-

Legende: FS ... Fahrersitz, BS ... Beifahrersitz, FL ... Fuß links, FR ... Fuß rechts

Tabelle 9.2: Räumliche Verteilung der Immissionen entlang des Körpers auf den jeweils höchstexponierten Sitzplätzen der untersuchten Fahrzeuge während des Ladens im Lademodus 2. In allen Fällen traten die Immissionsmaxima in der Initialphase des Ladevorgangs in Form eines transienten Vorganges auf.

	Renault ZOE, Fahrersitz			Porsche Taycan, Fahrersitz		
	max. B _{PEAK} [μT]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μT]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]
Fuß, links	3.78	0.33	0.064	3.03	0.250	0.049
Fuß, rechts	1.3	0.085	0.017	5.40	0.510	0.105
Unterschenkel, links	1.82	0.069	0.013	1.24	0.120	0.022
Unterschenkel, rechts	0.86	0.040	0.008	2.40	0.220	0.040
Oberschenkel, links	1.07	0.02	0.003	0.74	0.066	0.012
Oberschenkel, rechts	0.55	0.016	0.003	3.30	0.370	0.060
Unterleib	0.7	0.016	0.003	0.81	0.078	0.015
Brust, links	0.43	0.011	0.002	< 0.40	0.025	0.005
Brust, rechts	0.43	0.009	0.002	< 0.40	0.039	0.006
Kopf	< 0.40	0.008	0.002	< 0.40	0.017	0.003

Tabelle 9.3: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 2 an den untersuchten Messpositionen außerhalb der Fahrzeuge, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes Explnd₁₉₉₈ und Explnd₂₀₁₀. Messwerte, die Expositionsindizes > 1 entsprechen, sind in Fettdruck dargestellt.

Fahrzeug			Renault ZOE		Porsche Taycan	
Ladestand während der Messungen			< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
30 cm Dist. zur Fahrzeugbuchse (h = 20 – 185 cm)	Initialphase	max. B _{PEAK} [μT]	0.58	0.5	1.78	2.47
		max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	0.022	0.018	0.035	0.046
		max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	0.005	0.003	0.007	0.009
	Stationäres Laden	max. B _{RMS} [μT]	0.3	0.25	0.18	0.23
		max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	0.009	< 0.008	< 0.008	< 0.008
		max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Direkt am Stecker (an Fahrzeugbuchse)	Initialphase	max. B _{PEAK} [μT]	12.3	10.5	25.8	27.7
		max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	0.81	0.64	2.6	2.86
		max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	0.14	0.12	0.49	0.54
	Stationäres Laden	max. B _{RMS} [μT]	6.85	5.93	2.62	3.16
		max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	0.28	0.25	0.15	0.22
		max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	0.06	0.05	0.035	0.054

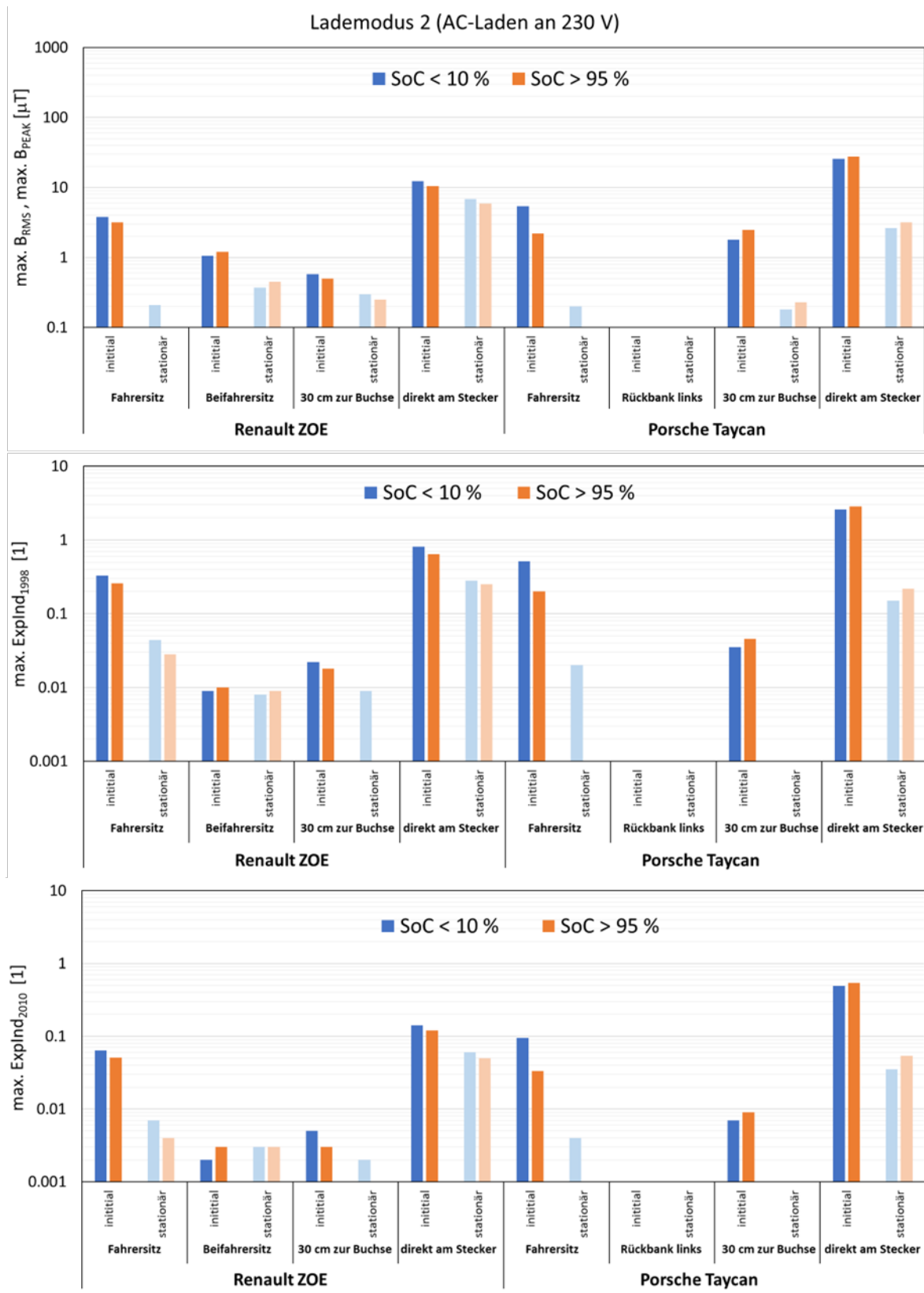


Abbildung 9.3: Grafische Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 2 an den untersuchten Messpositionen in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (oben) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ (Mitte) und $Explnd_{2010}$ (unten). Für Positionen bzw. Zustände, in denen die Messwerte unterhalb der Umgebungsimmissionen lagen, fehlen die zugehörigen Balken in den Diagrammen.

Im stationären Ladezustand, der sich spätestens ca. 5 – 10 Sekunden nach dem Starten des Ladevorganges einstellt, lagen die gemessenen Immissionen innerhalb des Fahrzeugs bei weniger als $0.5 \mu\text{T}$ (B_{RMS}) bzw. bei Expositionsindizes von weniger als 0.05 (Explnd_{1998}) und 0.007 (Explnd_{2010}). Höhere Werte wurden nur in unmittelbarer Nähe zur Ladebuchse bzw. zum Ladekabel gemessen, z.B. $6.85 \mu\text{T}$ (B_{RMS}) direkt am Ladestecker (mit 3 cm^2 Sonde am Stecker aufliegend), entsprechend Expositionsindizes von 0.28 (Explnd_{1998}) und 0.06 (Explnd_{2010}). Das Verhältnis $B_{\text{PEAK}}/B_{\text{RMS}}$ lag im stationären Ladebetrieb durchwegs im Bereich von 1.5 – 2.0. Deutlich höhere Immissionen in Form von kurzzeitig auftretenden Spitzenwerten B_{PEAK} traten in der Initialphase des Ladevorganges innerhalb des Zeitintervalls von ca. 2 – 5 Sekunden nach dem Starten des Ladevorganges auf. Dadurch im Fahrzeuginneren verursachte B_{PEAK} -Werte erreichten $3.79 \mu\text{T}$ im Renault ZOE (linker Fußbereich am Fahrerplatz) und $5.4 \mu\text{T}$ im Porsche Taycan (rechter Fußbereich am Fahrerplatz). Die zugehörigen Expositionsindizes Explnd_{1998} bzw. Explnd_{2010} sind 0.33 bzw. 0.06 (Renault ZOE) und 0.51 bzw. 0.01 (Porsche Taycan). Direkt am Ladestecker traten deutlich höhere B_{PEAK} -Werte in der Initialphase auf (Abbildung 9.4) und erreichten im Fall des Porsche Taycan bis zu ca. $28 \mu\text{T}$ und Expositionsindizes bis zu ca. 2.8 (Explnd_{1998}) bzw. 0.54 (Explnd_{2010}).

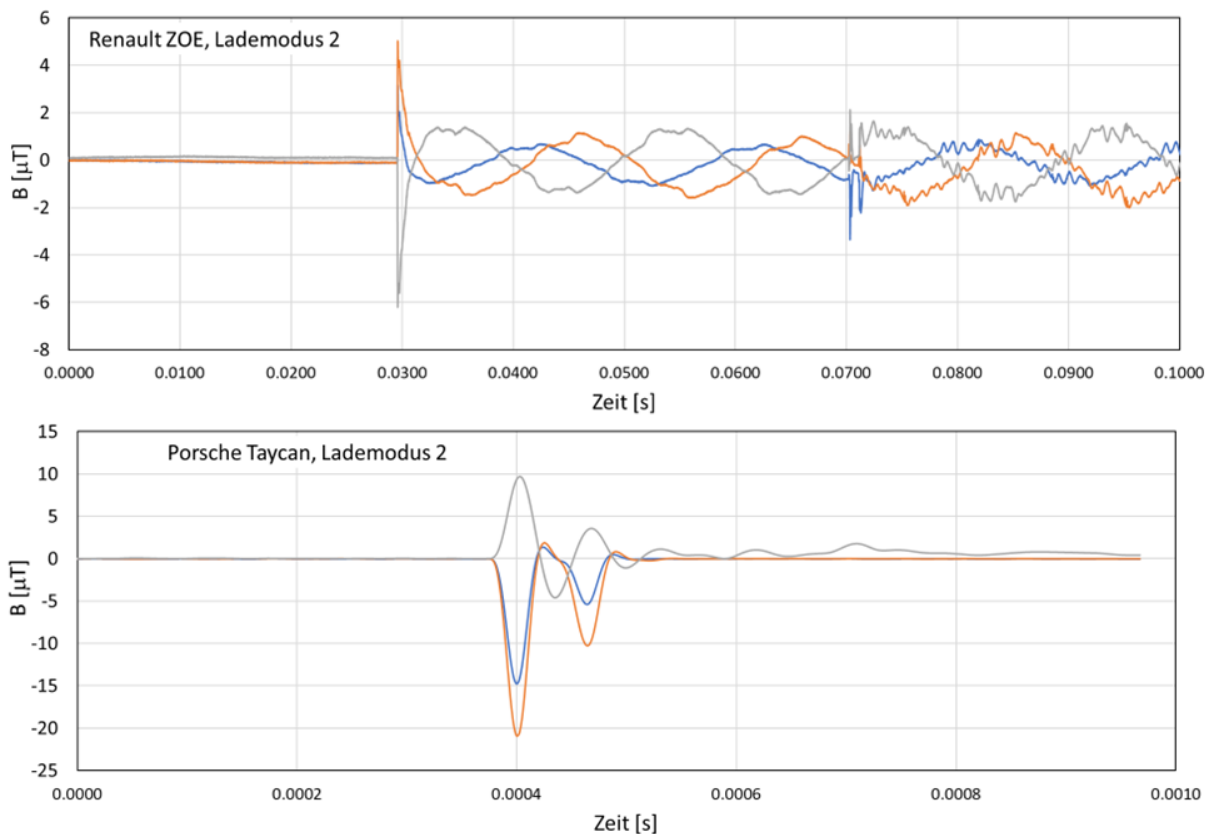


Abbildung 9.4: Beispielzeitverläufe (jeweils x-, y- und z-Komponente) der magnetischen Flussdichte in der Initialphase des Ladevorganges (Modus 2) beim Renault ZOE (oben) und beim Porsche Taycan (unten), die zu maximalen B_{PEAK} -Werten und maximalen Expositionsindizes führten, gemessen direkt am Stecker des Ladekabels in unmittelbarer Nähe der Ladebuchse.

Der DC-Anteil der Magnetfeldimmissionen lag in allen Fällen unterhalb der Nachweisgrenze der eingesetzten Hall-Sensoren (ca. 50 μT)³⁰.

9.2.2 Messungen im Lademodus 3 (400 V AC, 11 kW Wallbox und 22 kW Ladesäule)

Tabelle 9.4 bis Tabelle 9.6 und Abbildung 9.7 fassen die Messergebnisse der Magnetfeldimmissionen beim Laden an einer 11 kW Wallbox und Tabelle 9.7 bis Tabelle 9.9 und Abbildung 9.8 die Messergebnisse der Magnetfeldimmissionen beim Laden an einer 22 kW Ladesäule zusammen.

Der DC-Anteil der Magnetfeldimmissionen lag auch beim Laden im Modus 3 in allen untersuchten Fällen unterhalb der Nachweisgrenze der eingesetzten Hall-Sensoren (ca. 50 μT)³¹.

Wie aus den Ergebnistabellen ersichtlich zeigen sich im Lademodus 3 ähnliche Tendenzen wie im Lademodus 2, d. h. vergleichsweise geringe Immissionen im stationären Ladezustand (vor allem im Fahrzeuginneren) und im Vergleich dazu relativ hohe transiente Magnetfeldimmissionen in der Initialphase des Ladevorganges.

Während der stationären Phase des Ladevorganges blieben die B_{RMS} -Werte und die Expositionsindizes im Inneren der meisten untersuchten Fahrzeugen unterhalb von 1 μT bzw. unterhalb von 0.04 (ExpInd_{1998}) und 0.007 (ExpInd_{2010}). Die einzige Ausnahme stellte der Tesla Model 3 dar, bei dem im Bereich der Rückbank links im Unterleibsbereich bis zu 4.5 μT gemessen wurden, entsprechend Expositionsindizes von 0.05 (ExpInd_{1998}) und 0.02 (ExpInd_{2010}). Außerhalb der Fahrzeuge waren die messbaren B_{RMS} -Werte im stationären Zustand, vor allem in unmittelbarer Nähe zur Ladebuchse höher (bis zu ca. 20 μT direkt am Stecker, gemessen mit aufliegender 3 cm^2 Sonde), was in einigen Fällen zu $\text{ExpInd}_{1998} > 1$ führte (max. 1.54). Die gemessenen B_{RMS} -Werte im stationären Zustand zeigten eine positive Korrelation mit der Ladeleistung und eine negative Korrelation mit dem Batterie-Ladezustand, jedoch keine Proportionalität. Das Verhältnis $B_{\text{PEAK}}/B_{\text{RMS}}$ lag im stationären Ladebetrieb durchwegs im Bereich von 1.5 – 2.0.

Deutlich höhere Immissionen in Form von kurzzeitig auftretenden Spitzenwerten B_{PEAK} traten, wie auch beim Laden in Modus 2, in der Initialphase des Ladevorganges innerhalb des Zeitintervalls von ca. 2 – 5 Sekunden nach dem Starten des Ladevorganges auf. Dadurch im Fahrzeuginneren verursachte B_{PEAK} -Werte erreichten 25.2 μT im Porsche Taycan (rechter Fußbereich am Fahrerplatz) und führten dort zu Expositionsindizes von bis zu 2.19 (ExpInd_{1998}) bzw. 0.4 (ExpInd_{2010}).

³⁰ Bei Ladeleistungen von nur 2 kW und Batteriespannungen der Fahrzeuge von mindestens 400 V kann der maximale vom On-Board Ladegerät an die Batterie abgegebene DC-Ladestrom nur wenige Ampere betragen. Unter Annahme einer Doppelleitung mit 30 – 40 mm Leiterabstand zwischen On-Board-Ladegerät und Batterie kann dies in den zugänglichen Bereichen innerhalb und außerhalb des Fahrzeuges zu maximalen Ladestrom-assozierten DC-Magnetfeldimmissionen im Ausmaß von nicht mehr als einigen wenigen Mikrottesla führen (entsprechend einiger weniger ppm des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß den ICNIRP-Empfehlungen 2009).

³¹ Selbst bei Ladeleistungen von 22 kW und Batteriespannungen der Fahrzeuge von mindestens 350 V liegt der maximale vom On-Board Ladegerät an die Batterie abgegebene DC-Ladestrom bei nicht mehr als ca. 60 Ampere. Unter Annahme einer Doppelleitung mit 30 – 40 mm Leiterabstand zwischen On-Board-Ladegerät und Batterie kann dies in den untersuchten Messpositionen innerhalb und außerhalb des Fahrzeuges zu maximalen Ladestrom-assozierten DC-Magnetfeldimmissionen im Ausmaß von nicht mehr als ca. 10 – 20 μT führen (entsprechend weniger als 0.005 % des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß den ICNIRP-Empfehlungen 2009 bzw. weniger als 0.05 % des Referenzwertes gemäß 1999/519/EG).

Außerhalb der Fahrzeuge in unmittelbarer Nähe der Ladebuchsen lagen die gemessenen B_{PEAK} -Werte deutlich höher und erreichten direkt am Ladestecker Werte bis zu $160 \mu\text{T}$ (beim Audi e-tron) und lokale Expositionsindizes von bis zu 17.4 (ExpInd_{1998}) bzw. 3.62 (ExpInd_{2010}).

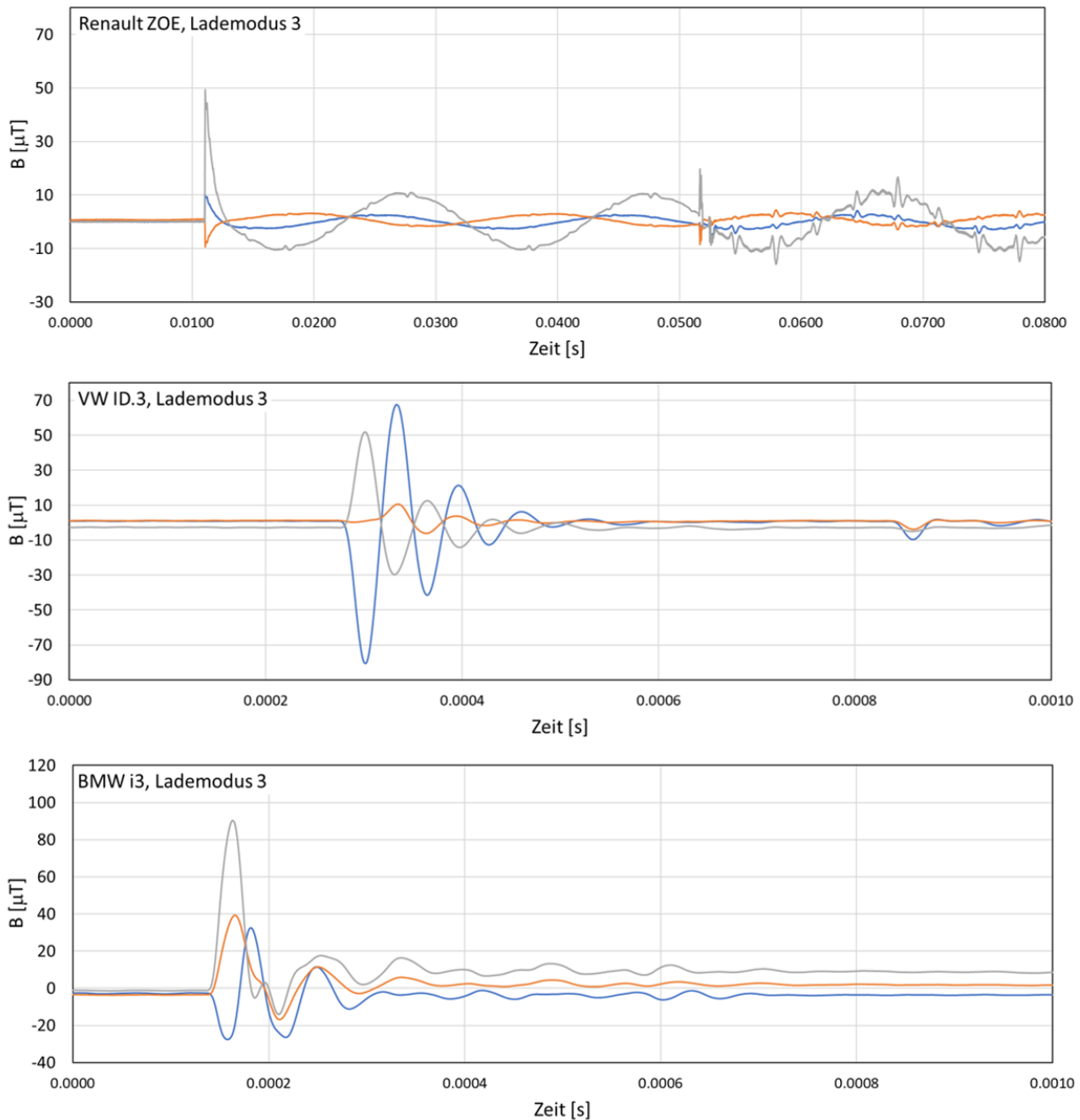


Abbildung 9.5: Beispielzeitverläufe (jeweils x-, y- und z-Komponente) der magnetischen Flussdichte in der Initialphase des Ladevorganges (Modus 3) beim Renault ZOE (oben), VW ID.3 (Mitte) und BMW i3 (unten), die zu maximalen B_{PEAK} -Werten und maximalen Expositionsindizes führten, gemessen direkt am Stecker des Ladekabels in unmittelbarer Nähe der Ladebuchse.

Lokale Überschreitungen der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 direkt am Ladestecker traten im Lademodus 3 in der Initialphase bei allen untersuchten Fahrzeugen auf. Die dafür verantwortlichen transienten Magnetfeldverläufe (Abbildung 9.5 und Abbildung 9.6) zeigten sich jedoch als nicht gut reproduzierbar (Variationsbreite bei mehrmaligem Starten von Ladevorgängen, fahrzeugabhängig bis zu Faktor

2 – 3)³². Daher lässt sich kein eindeutiger Trend zwischen den in der Initialphase auftretenden maximalen Immissionswerten (B_{PEAK} -Werte) und Ladeleistung bzw. Batterieladezustand herstellen.

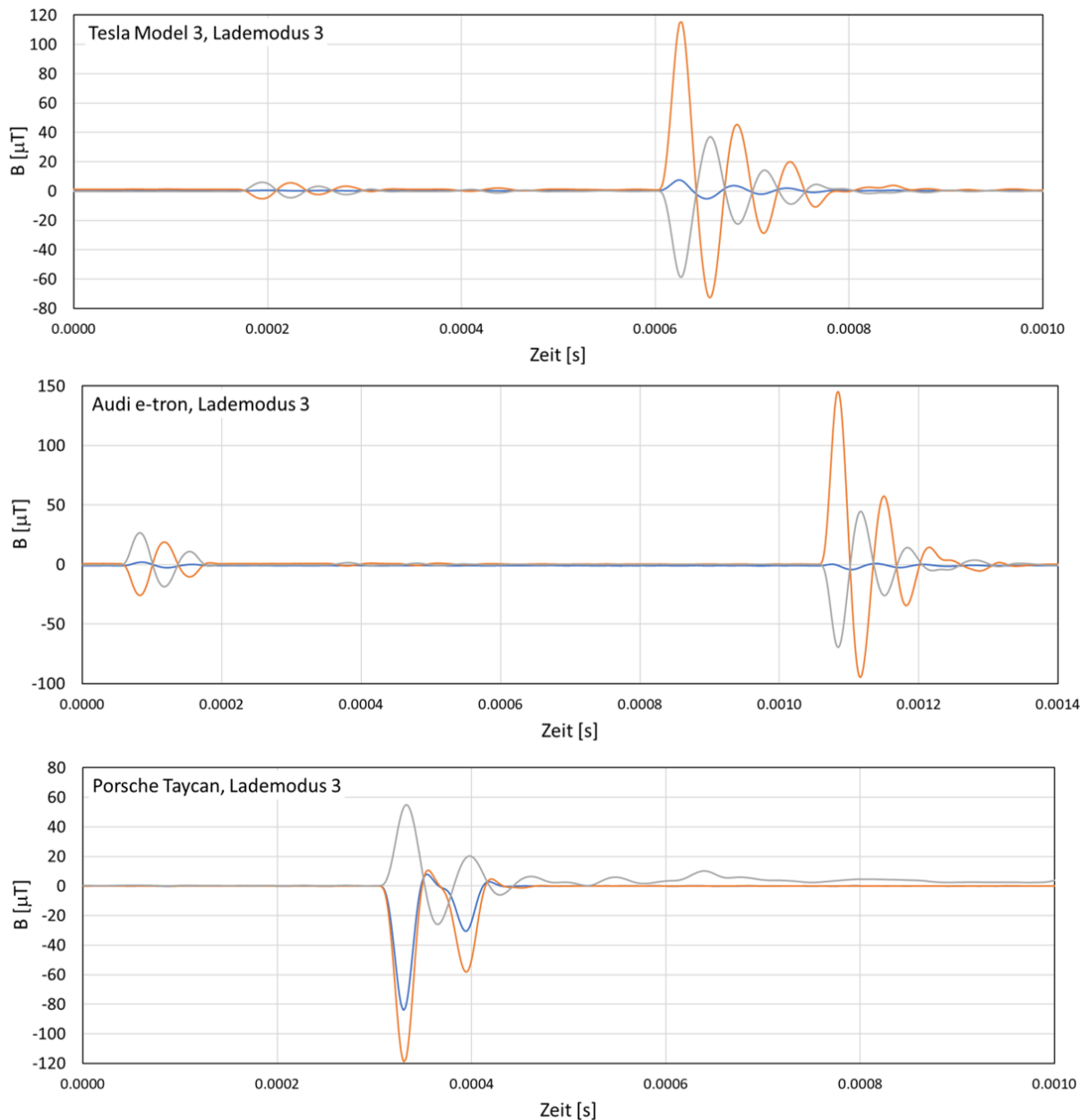


Abbildung 9.6: Beispielzeitverläufe (jeweils x-, y- und z-Komponente) der magnetischen Flussdichte in der Initialphase des Ladevorganges (Modus 3) beim Tesla Model 3 (oben), Audi e-tron (Mitte) und Porsche Taycan (unten), die zu maximalen B_{PEAK} -Werten und maximalen Expositionsindizes führten, gemessen direkt am Stecker des Ladekabels in unmittelbarer Nähe der Ladebuchse.

³² Es wird vermutet, dass die Amplitude der beobachteten transienten Magnetfeldverläufe vom Initialzustand (Ladezustand von Kondensatoren) des jeweiligen On-Board Ladegerätes abhängt.

Tabelle 9.4: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 3 (an 11 kW Wallbox) an den untersuchten Sitzplätzen in den untersuchten Fahrzeugen, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $ExInd_{1998}$ und $ExInd_{2010}$. Zusätzlich angegeben sind die Messpositionen, in denen die Werte gemessen wurden.

Fahrzeug				Renault ZOE		VW ID.3		BMW i3		Tesla Model 3		Audi e-tron quattro		Porsche Taycan	
Ladestand während der Messungen				< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
1. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	4.18	2.99	6.29	11	1.22	0.95	6.4	4.45	4.35	2.85	25.2	15.6
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FR	FS,FR
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.3	0.28	0.28	1.0	0.045	0.036	0.05	0.036	0.31	0.2	2.19	1.33
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FR	FS,FR
	stationäres Laden	$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.061	0.06	0.042	0.14	0.009	0.007	0.021	0.012	0.048	0.032	0.4	0.25
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FR	FS,FR
		B_{RMS}	max. B_{RMS} [μT]	0.23	0.25	0.24	0.21	0.87	0.57	4.5	3.15	0.41	0.35	0.2	< 0.2
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FL	FS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FR	FS,FR
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.035	0.037	0.03	0.027	0.013	0.01	0.05	0.036	0.015	0.015	0.03	0.022
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FL	FS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FR	FS,FR
		$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.007	0.007	0.004	0.004	0.005	0.003	0.021	0.012	0.003	0.004	0.006	0.004
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FL	FS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FR	FS,FR
2. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	2.78	2.64	4.1	2.25	1.15	0.69	0.94	0.76	11.2	12.9	1.66	1.45
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.28	0.26	0.037	0.02	0.028	0.015	0.06	0.051	0.89	1	0.024	0.02
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
	stationäres Laden	$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.05	0.048	0.005	0.003	0.006	0.003	0.015	0.012	0.13	0.151	0.005	0.004
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		B_{RMS}	max. B_{RMS} [μT]	0.88	0.85	< 0.2	0.1	0.6	0.42	0.22	< 0.20	0.41	0.34	0.21	< 0.2
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.015	0.013	0.023	0.015	0.012	0.009	0.035	0.025	0.028	0.018	0.011	0.01
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.005	0.005	0.003	0.002	0.005	0.002	0.007	0.005	0.005	0.004	0.002	0.002
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FR	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL

Legende:
FS ... Fahrersitz, BS ... Beifahrersitz, RB_L ... Rückbank links, RB_R ... Rückbank rechts
FL ... Fuß links, FR ... Fuß rechts, US_L ... Unterschenkel links, US_R ... Unterschenkel rechts, OS_L ... Oberschenkel links, OS_R ... Oberschenkel rechts, UL ... Unterleib

Tabelle 9.5: Räumliche Verteilung der Immissionen entlang des Körpers auf den jeweils höchstexponierten Sitzplätzen der untersuchten Fahrzeuge während des Ladens im Lademodus 3 an der 11 kW Wallbox. In allen Fällen traten die Immissionsmaxima in der Initialphase des Ladevorgangs in Form eines transienten Vorganges auf.

	Renault ZOE, Fahrsitz			VW ID.3, Fahrsitz			BMW i3, Rückbank, links			Tesla Model 3, Rückbank, links			Audi e-tron quattro, Beifahrersitz			Porsche Taycan, Fahrsitz		
	max. B _{PEAK} [μT]	max. ExplInd ₁₉₉₈ [1]	max. ExplInd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μT]	max. ExplInd ₁₉₉₈ [1]	max. ExplInd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μT]	max. ExplInd ₁₉₉₈ [1]	max. ExplInd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μT]	max. ExplInd ₁₉₉₈ [1]	max. ExplInd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μT]	max. ExplInd ₁₉₉₈ [1]	max. ExplInd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μT]	max. ExplInd ₁₉₉₈ [1]	max. ExplInd ₂₀₁₀ [1]
Fuß, links	4.18	0.3	0.061	10.3	0.95	0.13	0.45	0.01	0.002	1.19	0.01	0.004	12.9	1	0.15	22.2	2.09	0.38
Fuß, rechts	2.34	0.15	0.03	11	1	0.13	0.46	0.011	0.002	1.11	0.011	0.004	6.56	0.43	0.064	25.2	2.19	0.4
Unterschenkel, links	1.73	0.067	0.014	2.95	0.18	0.025	< 0.40	0.009	< 0.002	1.61	0.009	0.005	6.3	0.47	0.069	2.3	0.24	0.045
Unterschenkel, rechts	0.84	0.037	0.008	3.11	0.19	0.027	< 0.40	0.009	< 0.002	3.1	0.009	0.011	3.7	0.28	0.041	2.99	0.31	0.058
Oberschenkel, links	0.99	0.025	0.005	1.41	0.081	0.012	< 0.40	0.009	< 0.002	2.44	0.009	0.009	3.71	0.27	0.04	1.44	0.15	0.029
Oberschenkel, rechts	0.57	0.017	0.004	1.41	0.092	0.013	0.6	0.021	0.004	5.67	0.021	0.021	2.13	0.16	0.024	1.43	0.39	0.089
Unterleib	0.8	0.017	0.003	0.69	0.03	0.004	1.22	0.048	0.008	6.4	0.048	0.019	1.48	0.11	0.017	0.49	0.082	0.019
Brust, links	0.46	0.011	0.002	0.53	0.01	0.002	< 0.40	0.009	< 0.002	0.68	0.009	0.002	1.54	0.067	0.01	0.39	0.031	0.006
Brust, rechts	< 0.40	0.008	0.002	0.57	0.011	0.002	< 0.40	0.009	0.002	0.73	0.009	0.003	0.89	0.058	0.009	0.5	0.041	0.009
Kopf	< 0.40	0.008	0.002	0.53	0.009	0.002	< 0.40	< 0.008	< 0.002	0.6	< 0.008	0.002	0.68	0.047	0.007	0.47	0.033	0.006

Tabelle 9.6: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 3 (an 11 kW Wallbox) an den untersuchten Messpositionen außerhalb der Fahrzeuge, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$. Messwerte für Expositionsindizes > 1 sind in Fettdruck dargestellt.

Fahrzeug			Renault ZOE		VW ID.3		BMW i3		Tesla Model 3		Audi e-tron quattro		Porsche Taycan	
Ladestand während der Messungen			< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
30 cm zur Fahrzeugbuchse (h = 20 – 185 cm)	Initialphase	max. B_{PEAK} [μT]	0.85	0.87	1.02	0.95	0.75	0.55	1.02	0.72	0.84	1.39	0.81	0.89
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.018	0.019	0.10	0.092	0.045	0.035	0.098	0.069	0.091	0.15	0.078	0.10
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.007	0.007	0.015	0.014	0.009	0.005	0.021	0.015	0.019	0.031	0.016	0.024
	stationäres Laden	max. B_{RMS} [μT]	0.3	0.29	0.33	0.22	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	< 0.008	< 0.008	0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	0.009	< 0.008	< 0.008	< 0.008
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.002	0.002	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Direkt am Stecker (an Fahrzeugbuchse)	Initialphase	max. B_{PEAK} [μT]	55.6	50.1	76.6	53.9	95.1	79.5	130	91.6	158	139	156	119
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	6.0	5.4	8.7	5.8	10.3	8.6	14.1	9.9	17	15.1	16.9	12.9
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	1.27	1.12	1.75	1.23	2.51	1.76	2.99	2.12	3.56	3.17	3.54	2.77
	stationäres Laden	max. B_{RMS} [μT]	19.3	14.6	20.8	12.6	22.3	9.3	22.3	17.7	22.1	15.2	21.6	13.2
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	1.23	0.82	1.14	0.58	0.69	0.37	0.77	0.49	1.61	1.31	1.43	1.22
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.23	0.16	0.25	0.13	0.17	0.08	0.021	0.12	0.36	0.28	0.35	0.26
30 cm Distanz zur Ladesäule (h = 20 – 185 cm)	Initialphase	max. B_{PEAK} [μT]	0.50	0.40	0.52	0.49	0.28	< 0.40	0.55	0.40	0.65	0.57	0.52	0.46
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.02	0.015	0.035	0.033	< 0.008	< 0.008	0.015	0.011	0.06	0.049	0.051	0.049
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.004	0.003	0.007	0.006	0.002	0.002	0.004	0.003	0.012	0.01	0.011	0.01
	stationäres Laden	max. B_{RMS} [μT]	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002

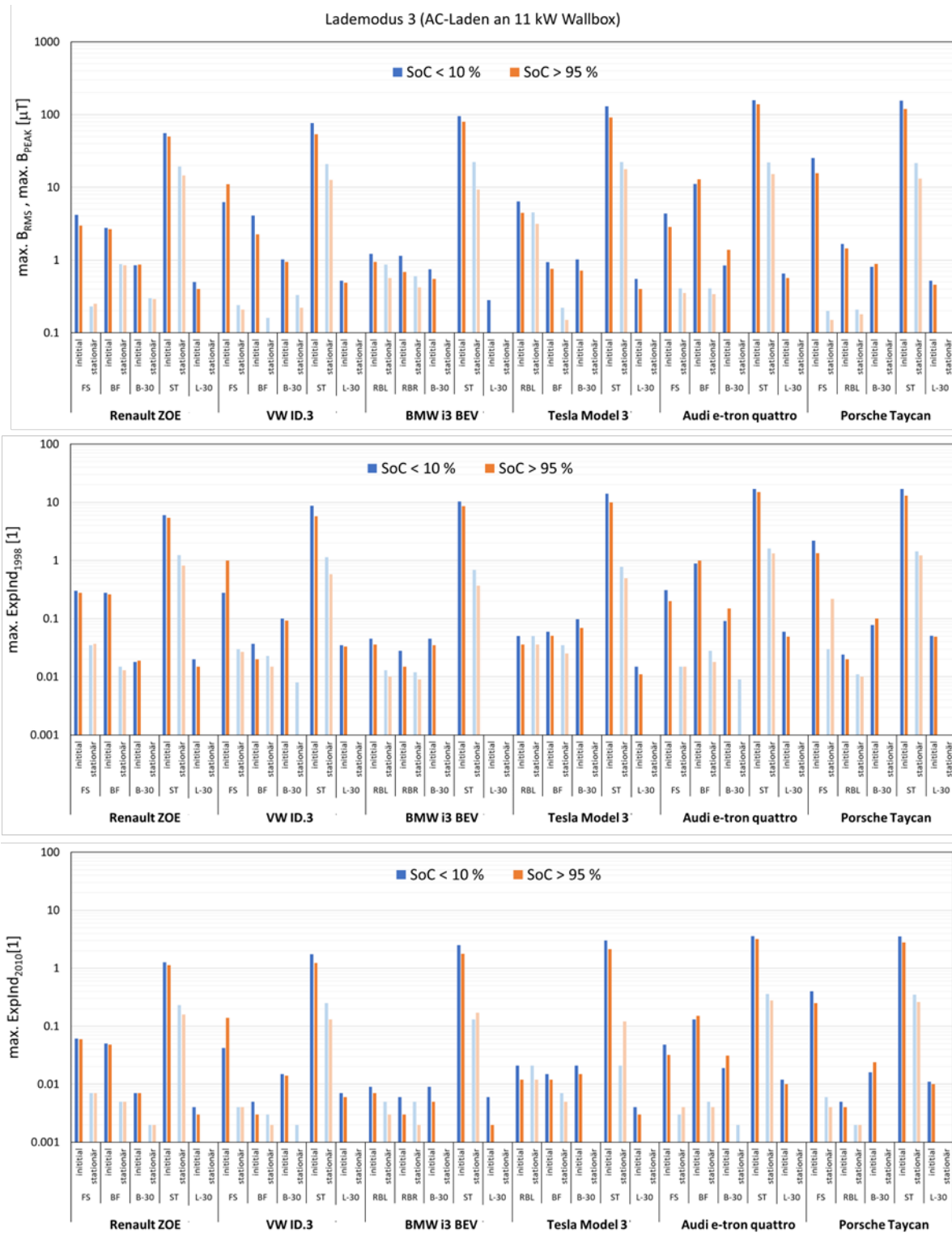


Abbildung 9.7: Grafische Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 3 (11 kW Wallbox) an den untersuchten Messpositionen, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (oben) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ (Mitte) und $Explnd_{2010}$ (unten). Für Positionen bzw. Zustände, in denen die Messwerte unterhalb der Umgebungsimmissionen lagen, fehlen die zugehörigen Balken in den Diagrammen. FS ... Fahrersitz, BF ... Beifahrersitz, RBL ... Rückbank links, RBR ... Rückbank rechts, B-30 ... 30 cm Distanz zur Fahrzeugbuchse, L-30 ... 30 cm Distanz zur Wallbox, ST ... direkt am Stecker.

Tabelle 9.7: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 3 (an 22 kW Ladesäule) an den untersuchten Sitzplätzen in den untersuchten Fahrzeugen, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $ExInd_{1998}$ und $ExInd_{2010}$. Zusätzlich angegeben sind die Messpositionen, in denen die Werte gemessen wurden.

Fahrzeug				Renault ZOE		VW ID.3		BMW i3		Tesla Model 3		Audi e-tron quattro		Porsche Taycan	
Ladestand während der Messungen				< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
1. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	3.37	6.98	8.24	7.85	1.71	0.60	4.20	1.67	4.55	4.78	25.0	27.9
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FL	FS,FR
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.35	0.59	0.56	0.52	0.072	0.02	0.42	0.18	0.38	0.36	1.90	2.08
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FL	FS,FR
		$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.078	0.14	0.085	0.079	0.011	0.003	0.091	0.038	0.062	0.055	0.32	0.33
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FR	FS,FR	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FL	FS,FR
	stationäres Laden	B_{RMS}	max. B_{RMS} [μT]	0.20	0.21	0.21	0.25	0.77	0.43	4.07	1.78	0.34	0.36	< 0.20	< 0.20
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FL	FS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	-	-
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.043	0.058	0.028	0.032	0.011	0.008	0.046	0.021	0.011	0.012	0.01	0.01
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FL	FS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,OR	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FL	FS,FR
		$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.006	0.010	0.004	0.004	0.004	0.003	0.019	0.008	0.003	0.003	0.002	0.002
			Position	FS,FL	FS,FL	FS,FL	FS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	RB _L ,UL	FS,FR	FS,FR	FS,FL	FS,FR
2. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	2.80	2.61	7.75	1.72	0.95	0.49	0.85	0.93	17.2	18.4	1.78	1.50
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.29	0.26	0.56	0.18	0.042	0.018	0.055	0.060	1.39	1.47	0.04	0.036
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.05	0.047	0.075	0.040	0.005	0.003	0.020	0.022	0.21	0.22	0.005	0.004
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
	stationäres Laden	B_{RMS}	max. B_{RMS} [μT]	0.85	0.91	< 0.20	< 0.20	0.40	0.25	0.23	0.25	0.60	0.50	0.25	0.20
			Position	BS,FL	BS,FL	-	-	RB _R ,UL	RB _R ,UL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		$ExInd_{1998}$	max. $ExInd_{1998}$ [1]	0.019	0.021	0.022	0.020	< 0.008	< 0.008	< 0.008	0.070	0.017	0.015	0.010	0.021
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	-	-	-	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL
		$ExInd_{2010}$	max. $ExInd_{2010}$ [1]	0.005	0.005	0.004	0.004	0.002	< 0.002	0.002	0.002	0.005	0.004	0.002	0.002
			Position	BS,FL	BS,FL	BS,FR	BS,FL	RB _R ,UL	-	BS,FR	BS,FL	BS,FL	BS,FL	RB _L ,UL	RB _L ,UL

Legende:
 FS ... Fahrersitz, BS ... Beifahrersitz, RB_L ... Rückbank links, RB_R ... Rückbank rechts
 FL ... Fuß links, FR ... Fuß rechts, US_L ... Unterschenkel links, US_R ... Unterschenkel rechts, OS_L ... Oberschenkel links, OS_R ... Oberschenkel rechts, UL ... Unterleib

Tabelle 9.8: Räumliche Verteilung der Immissionen entlang des Körpers auf den jeweils höchstexponierten Sitzplätzen der untersuchten Fahrzeuge während des Ladens im Lademodus 3 an der 22 kW Ladesäule. In allen Fällen traten die Immissionsmaxima in der Initialphase des Ladevorgangs in Form eines transienten Vorganges auf.

	Renault ZOE, Fahrsitz			VW ID.3, Fahrsitz			BMW i3, Rückbank, links			Tesla Model 3, Rückbank, links			Audi e-tron quattro, Beifahrersitz			Porsche Taycan, Fahrsitz		
	max. B _{PEAK} [μ T]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μ T]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μ T]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μ T]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μ T]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]	max. B _{PEAK} [μ T]	max. Explnd ₁₉₉₈ [1]	max. Explnd ₂₀₁₀ [1]
Fuß, links	6.98	0.59	0.137	7.99	0.51	0.081	0.66	0.014	0.003	1.11	0.012	0.004	18.4	1.47	0.22	25	1.90	0.32
Fuß, rechts	3.11	0.27	0.018	8.24	0.56	0.085	0.68	0.015	0.003	1.04	0.012	0.004	9.08	0.72	0.11	27.9	2.08	0.33
Unterschenkel, links	1.74	0.065	0.014	2.90	0.15	0.022	0.54	0.013	0.002	1.50	0.014	0.005	9.15	0.70	0.10	2.4	0.17	0.025
Unterschenkel, rechts	0.95	0.037	0.008	3.28	0.16	0.023	0.56	0.013	0.002	2.89	0.024	0.01	4.22	0.32	0.049	2.87	0.2	0.03
Oberschenkel, links	0.67	0.016	0.003	0.55	0.025	0.005	0.50	0.012	0.002	2.28	0.02	0.008	3.82	0.29	0.043	1.42	0.096	0.014
Oberschenkel, rechts	0.5	0.008	0.002	1.45	0.071	0.016	0.86	0.029	0.006	5.29	0.046	0.018	2.3	0.18	0.027	1.31	0.11	0.016
Unterleib	0.5	< 0.008	0.002	0.50	0.02	0.004	1.71	0.072	0.011	5.97	0.043	0.019	1.76	0.13	0.018	0.64	0.041	0.006
Brust, links	< 0.40	< 0.008	< 0.002	< 0.40	0.01	0.002	0.40	0.012	0.002	0.63	0.009	0.002	0.98	0.07	0.01	0.53	0.037	0.006
Brust, rechts	< 0.40	< 0.008	< 0.002	< 0.40	0.012	0.002	0.63	0.013	0.003	0.68	0.009	0.003	0.73	0.064	0.01	0.3	0.02	0.003
Kopf	< 0.40	< 0.008	< 0.002	< 0.40	0.008	< 0.002	< 0.40	< 0.008	< 0.002	0.55	0.008	0.002	0.82	0.053	0.008	0.39	0.235	0.004

Tabelle 9.9: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 3 (an 22 kW Ladesäule) an den untersuchten Messpositionen außerhalb der Fahrzeuge, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$. Messwerte für Expositionsindizes > 1 sind in Fettdruck dargestellt.

Fahrzeug			Renault ZOE		VW ID.3		BMW i3		Tesla Model 3		Audi e-tron quattro		Porsche Taycan	
Ladestand während der Messungen			< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
30 cm zur Fahrzeugbuchse (h = 20 – 185 cm)	Initialphase	max. B_{PEAK} [μT]	0.62	0.65	1.20	1.30	2.20	1.51	0.54	0.60	5.0	4.8	0.92	0.90
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.015	0.022	0.12	0.12	0.24	0.18	0.074	0.075	0.56	0.50	0.11	0.10
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.006	0.007	0.015	0.015	0.06	0.039	0.016	0.017	0.12	0.10	0.022	0.02
	stationäres Laden	max. B_{RMS} [μT]	0.26	0.32	0.32	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	0.67	0.55	0.46	0.22
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	< 0.008	< 0.008	0.013	0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	0.052	0.05	0.023	0.011
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.003	0.002	0.003	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.012	0.012	0.005	0.002
Direkt am Stecker (an Fahrzeugbuchse)	Initialphase	max. B_{PEAK} [μT]	44.4	51.6	111	105	118	70.8	79.2	75.4	160	72.4	150	136
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	3.38	5.81	12.3	12.0	12.6	7.62	8.67	8.32	17.4	7.78	17.0	14.6
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.67	1.27	2.62	2.5	2.62	1.62	1.86	1.76	3.62	1.64	3.4	3.08
	stationäres Laden	max. B_{RMS} [μT]	18.0	20.2	18.7	12.3	16.9	4.62	16.6	18.0	18.5	12.9	12.5	11.6
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	1.08	1.00	1.09	1.02	0.93	0.21	0.63	0.89	1.54	1.39	1.16	1.03
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.22	0.25	0.28	0.24	0.15	0.043	0.16	0.15	0.37	0.29	0.24	0.23
30 cm Distanz zur Ladesäule (h = 20 – 185 cm)	Initialphase	max. B_{PEAK} [μT]	0.45	0.48	0.58	0.43	0.45	0.40	0.62	0.70	0.54	< 0.40	< 0.40	< 0.40
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.037	0.025	0.039	0.038	0.035	0.032	0.082	0.085	0.049	0.010	0.030	0.022
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.007	0.006	0.013	0.01	0.008	0.007	0.017	0.018	0.010	0.009	0.006	0.004
	stationäres Laden	max. B_{RMS} [μT]	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	0.20	0.22	0.25	< 0.20	0.20	< 0.20
		max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.008	0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	0.009	0.009	0.009	< 0.008	< 0.008	< 0.008
		max. $ExpInd_{2010}$ [1]	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	0.002	0.002	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002

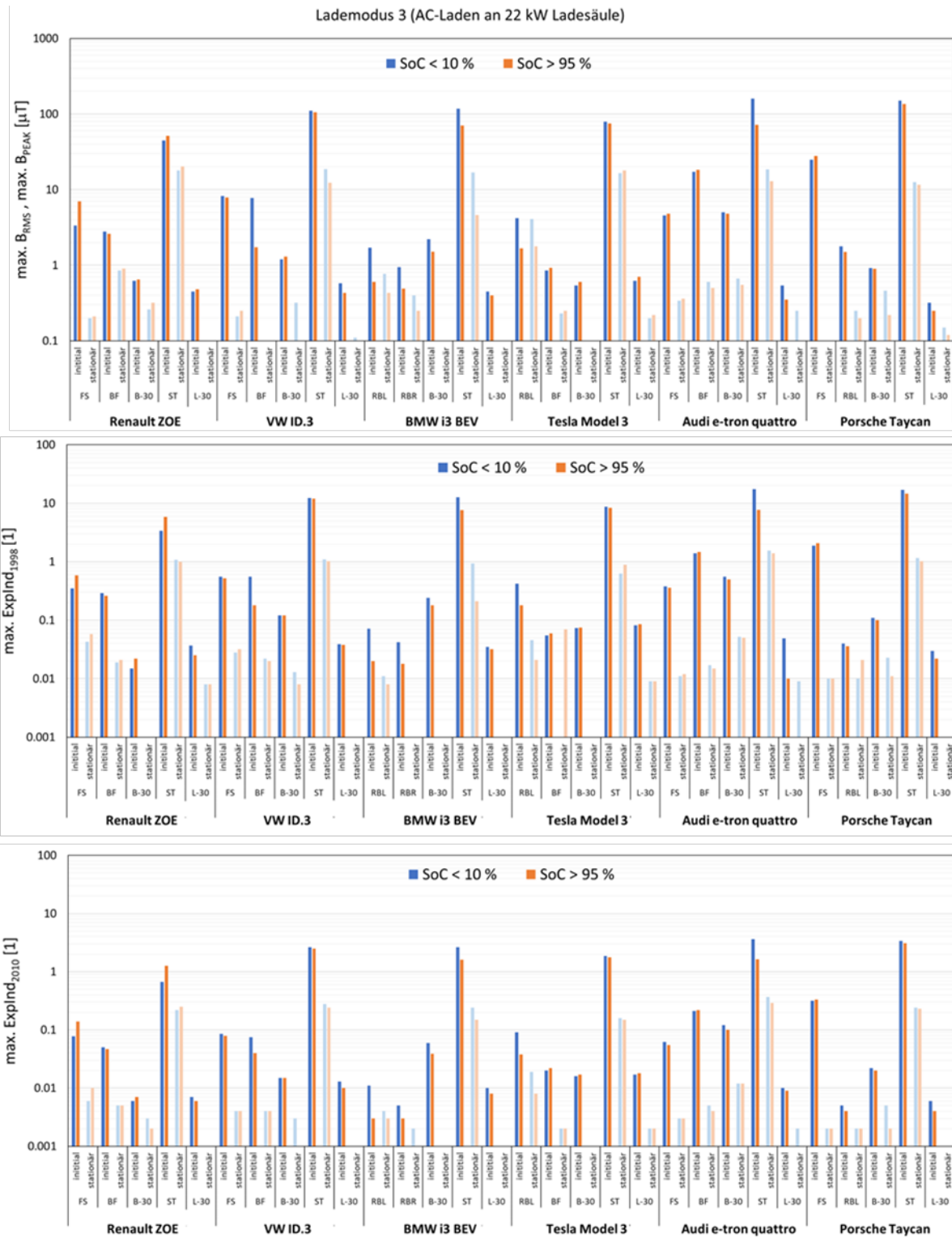


Abbildung 9.8: Grafische Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 3 (22 kW Ladesäule) an den untersuchten Messpositionen, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (oben) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ (Mitte) und $Explnd_{2010}$ (unten). Für Positionen bzw. Zustände, in denen die Messwerte unterhalb der Umgebungsimmissionen lagen, fehlen die zugehörigen Balken in den Diagrammen. FS ... Fahrersitz, BF ... Beifahrersitz, RBL ... Rückbank links, RBR ... Rückbank rechts, B-30 ... 30 cm Distanz zur Fahrzeugbuchse, L-30 ... 30 cm Distanz zur Ladesäule, ST ... direkt am Stecker.

9.2.3 Messungen im Lademodus 4 (DC 350 kW und 300 kW Ladesäulen)

Tabelle 9.10 und Tabelle 9.11 und Abbildung 9.9 fassen die Messergebnisse für die Magnetfeldimmissionen während des DC-Ladens zusammen.

Während der stationären Phase des Ladevorganges blieben die B_{RMS} -Werte (1 Hz – 400 kHz) und die zugehörigen Expositionsindizes im Inneren der untersuchten Fahrzeuge unterhalb der Nachweisgrenze von $0.2 \mu T$ (B_{RMS}) und $0.4 \mu T$ (B_{PEAK}) bzw. 0.008 (Explnd₁₉₉₈) und 0.002 (Explnd₂₀₁₀). Auch der dem Ladevorgang zuordenbare DC-Anteil der Magnetfeldimmissionen lag in den meisten Messpositionen unterhalb der Nachweisgrenze der verwendeten Hall-Sensoren und damit auch unterhalb der typischen geomagnetischen Flussdichte von ca. $50 \mu T$. Nur an einigen Messpositionen (Fußbereich der Rückbank in beiden untersuchten Fahrzeugen) und im Fußbereich des Fahrerplatzes im Porsche Taycan wurden magnetische Flussdichten oberhalb von $50 \mu T$ gemessen (Maximalwert $214 \mu T$ im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz des Porsche Taycan, entsprechend einem Expositionsindex von 0.0005 bezüglich des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß den Empfehlungen der ICNIRP 2009).

Höhere Immissionen in Form von kurzzeitig auftretenden Spitzenwerten B_{PEAK} traten, wie auch beim Laden in Modus 2 und 3, in der Initialphase des Ladevorganges innerhalb des Zeitintervalls von ca. 2 – 5 Sekunden nach dem Starten des Ladevorganges auf. Allerdings zeigten die dabei auftretenden Transienten deutlich geringere Amplituden und andere Zeitverläufe als bei den Messungen in Lademodi 2 und 3 beobachtet (Abbildung 9.10). Die dadurch im Fahrzeuginneren verursachten B_{PEAK} -Werte erreichten maximal $8.5 \mu T$, traten im Porsche Taycan (rechter Fußbereich am Fahrerplatz) auf und führten dort zu Expositionsindizes von bis zu 0.26 (Explnd₁₉₉₈) bzw. 0.036 (Explnd₂₀₁₀).

Außerhalb der Fahrzeuge, in unmittelbarer Nähe der Ladebuchsen lagen die gemessenen B_{PEAK} -Werte deutlich höher und erreichten direkt am Ladestecker Werte bis zu ca. $21 \mu T$ (beim Porsche Taycan) und lokale Expositionsindizes von bis zu 1.18 (Explnd₁₉₉₈) bzw. 0.24 (Explnd₂₀₁₀).

Die maximalen, in unmittelbarer Nähe zum Ladestecker (ca. 1.5 cm Distanz) gemessenen statischen magnetischen Flussdichten während des stationären Ladevorganges betrugen $530 \mu T$, entsprechend einem Expositionsindex von 0.0013 bezüglich des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß den Empfehlungen der ICNIRP 2009. In 30 cm Distanz zum Ladestecker bzw. zum Ladekabel betrug die statische magnetische Flussdichte bereits wieder weniger als $50 \mu T$.

Tabelle 9.10: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 4 (DC -Ladesäulen Alpitronic und Ionity) an den untersuchten Sitzplätzen in den untersuchten Fahrzeugen, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{DC} und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Exlnd_{1998}$ und $Exlnd_{2010}$.

Ladesäule				Alpitronic				Ionity			
Fahrzeug				BMW i3		Porsche Taycan		BMW i3		Porsche Taycan	
Ladestand während der Messungen				< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
1. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	< 0.40	< 0.40	1.12	8.53	< 0.40	< 0.40	7.54	4.94
			Position	-	-	FS,FR	FS,FR	-	-	FS,FR	FS,FR
		$Exlnd_{1998}$	max. $Exlnd_{1998}$ [1]	< 0.008	< 0.008	0.079	0.26	< 0.008	< 0.008	0.26	0.15
			Position	-	-	FS,FR	FS,FR	-	-	FS,FR	FS,FR
		$Exlnd_{2010}$	max. $Exlnd_{2010}$ [1]	< 0.002	< 0.002	0.012	0.032	< 0.002	< 0.002	0.036	0.006
			Position	-	-	FS,FR	FS,FR	-	-	FS,FR	FS,FR
	stationäres Laden	B_{DC}	max. B_{DC} [μT]	< 50	< 50	180	< 50	< 50	< 50	214	< 50
			Position	-	-	FS,FR	-	-	-	FS,FR	-
		B_{RMS} (AC)	max. B_{RMS} [μT]	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20
			Position	-	-	-	-	-	-	-	-
		$Exlnd_{1998}$	max. $Exlnd_{1998}$ [1]	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008
			Position	-	-	-	-	-	-	-	-
		$Exlnd_{2010}$	max. $Exlnd_{2010}$ [1]	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
			Position	-	-	-	-	-	-	-	-
2. Sitzplatz	Initialphase	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [μT]	< 0.40	< 0.40	0.55	1.41	< 0.40	< 0.40	1.95	2.13
			Position	-	-	RB _L , FR	RB _L , FR	-	-	RB _L , FR	RB _L , FR
		$Exlnd_{1998}$	max. $Exlnd_{1998}$ [1]	< 0.008	< 0.008	0.004	0.008	< 0.008	< 0.008	0.08	0.025
			Position	-	-	RB _L , FR	RB _L , FR	-	-	RB _L , UL	RB _L , UL
		$Exlnd_{2010}$	max. $Exlnd_{2010}$ [1]	< 0.002	< 0.002	0.008	0.002	< 0.002	< 0.002	0.012	0.003
			Position	-	-	RB _L , FR	RB _L , FR	-	-	RB _L , UL	RB _L , UL
	stationäres Laden	B_{DC}	max. B_{DC} [μT]	104	< 50	140	< 50	137	< 50	120	< 50
			Position	RB _L , FL	-	RB _L , FR	-	RB _L , FL	-	RB _L , FR	-
		B_{RMS} (AC)	max. B_{RMS} [μT]	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20	< 0.20
			Position	-	-	-	-	-	-	-	-
		$Exlnd_{1998}$	max. $Exlnd_{1998}$ [1]	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008
			Position	-	-	-	-	-	-	-	-
		$Exlnd_{2010}$	max. $Exlnd_{2010}$ [1]	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
			Position	-	-	-	-	-	-	-	-

Legende:
FS ... Fahrersitz, BS ... Beifahrersitz, RB_L ... Rückbank links, RB_R ... Rückbank rechts
FL ... Fuß links, FR ... Fuß rechts, UL ... Unterschenkel links, UR ... Unterschenkel rechts, OS_L ... Oberschenkel links, OS_R ... Oberschenkel rechts, UL ... Unterleib

Tabelle 9.11: Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 4 (DC -Ladesäulen Alpitronic und Ionity) an den untersuchten Messpositionen außerhalb der Fahrzeuge, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs (2 – 5 Sekunden nach Start) und B_{DC} und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (ab ca. 10 Sekunden nach Start) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ und $Explnd_{2010}$. Messwerte die Expositionsindizes > 1 entsprechen sind in Fettdruck dargestellt.

Ladesäule			Alpitronic				Ionity			
Fahrzeug			BMW i3		Porsche Taycan		BMW i3		Porsche Taycan	
Ladestand bei Start			< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %	< 10 %	> 95 %
30 cm Distanz zur Fahrzeugbuchse (h = 20 – 185 cm)	Initial-phase	max. B_{PEAK} [μT]	0.42	0.45	1.90	3.50*	0.70	0.71	0.40	< 0.40
		max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.016	0.016	0.027	0.22*	< 0.008	< 0.008	0.008	< 0.008
		max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.003	0.003	0.005	0.030*	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
	Stationäres Laden	max. B_{DC} [μT]	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
		max. B_{RMS} [μT]	0.25	0.20	0.74	0.24	0.30	0.31	0.20	0.20
		max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.024	0.009	0.027	0.011	< 0.008	< 0.008	0.008	0.008
		max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.003	0.002	0.005	0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002	< 0.002
Direkt am Stecker (an Fahrzeugbuchse)	Initial-phase	max. B_{PEAK} [μT]	5.40	4.50	20.6	5.93	3.23	2.85	6.39	10.7
		max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.46	0.37	0.99	0.35	0.18	0.15	0.069	1.18
		max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.077	0.061	0.11	0.046	0.036	0.032	0.009	0.25
	stationäres Laden	max. B_{DC} [μT]	164	< 50	468	< 50	192	< 50	530	< 50
		max. B_{RMS} [μT]	2.13	1.92	8.66	1.19	1.24	1.31	2.62	1.54
		max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.27	0.30	0.99	0.069	0.086	0.077	0.069	0.08
		max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.033	0.033	0.11	0.009	0.013	0.012	0.009	0.013
30 cm Distanz zur Ladesäule (h = 20 – 185 cm)	Initial-phase	max. B_{PEAK} [μT]	0.55	0.61	7.75	1.42	0.58	0.56	1.15	< 0.40
		max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.016	0.018	0.08	0.06	0.005	0.005	0.005	< 0.005
		max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.003	0.003	0.024	0.008	0.001	0.001	0.002	< 0.001
	stationäres Laden	max. B_{DC} [μT]	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50	< 50
		max. B_{RMS} [μT]	0.29	0.32	5.30	0.50	0.28	0.25	0.75	0.20
		max. $Explnd_{1998}$ [1]	0.014	0.017	0.08	0.06	< 0.008	< 0.008	< 0.008	< 0.008
		max. $Explnd_{2010}$ [1]	0.003	0.003	0.024	0.008	< 0.002	< 0.002	0.002	< 0.002

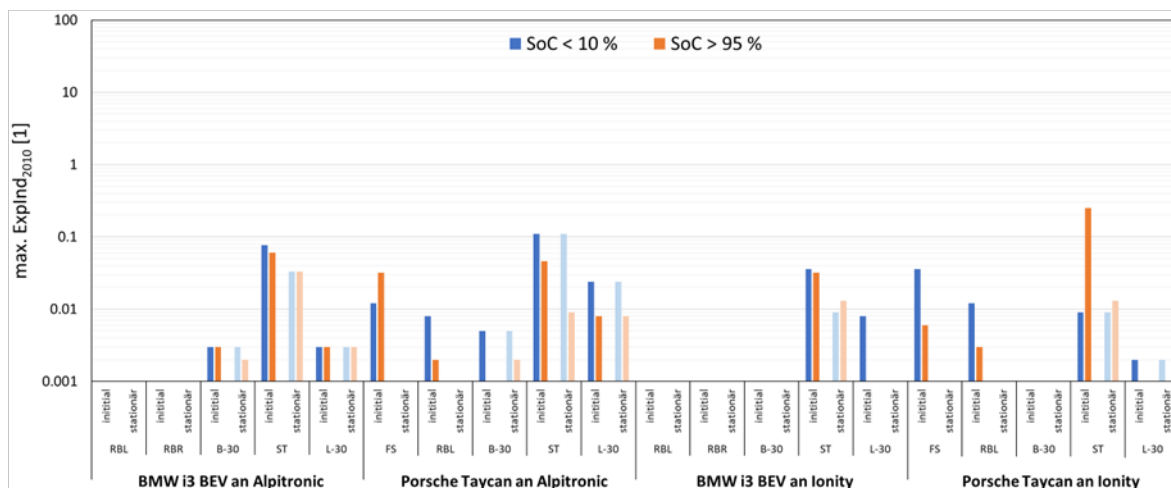
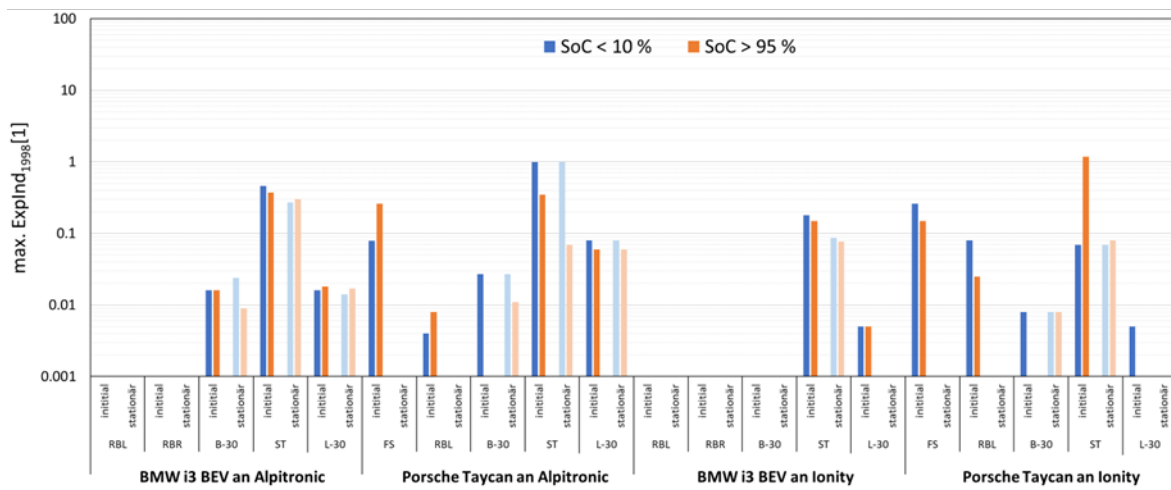
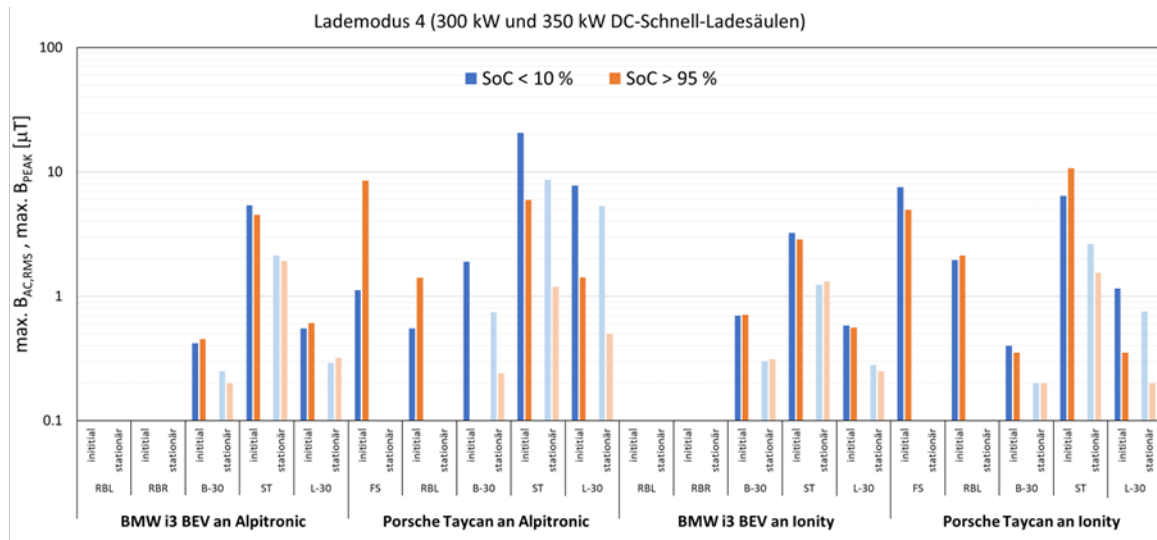


Abbildung 9.9: Grafische Zusammenfassung der Messergebnisse im Lademodus 4 (300 kW und 350 kW DC-Ladesäule) an den untersuchten Messpositionen, in Form der gemessenen Maximalwerte B_{PEAK} während der Initialphase des Ladevorgangs und B_{RMS} während des stationären Ladevorgangs (oben) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ (Mitte) und $Explnd_{2010}$ (unten). Für Positionen bzw. Zustände, in denen die Messwerte unterhalb der Umgebungsimmissionen lagen, fehlen die zugehörigen Balken in den Diagrammen. FS ... Fahrersitz, RBL ... Rückbank links, RBR ... Rückbank rechts, B-30 ... 30 cm Distanz zur Fahrzeugbuchse, L-30 ... 30 cm Distanz zur Ladesäule, ST ... direkt am Stecker.

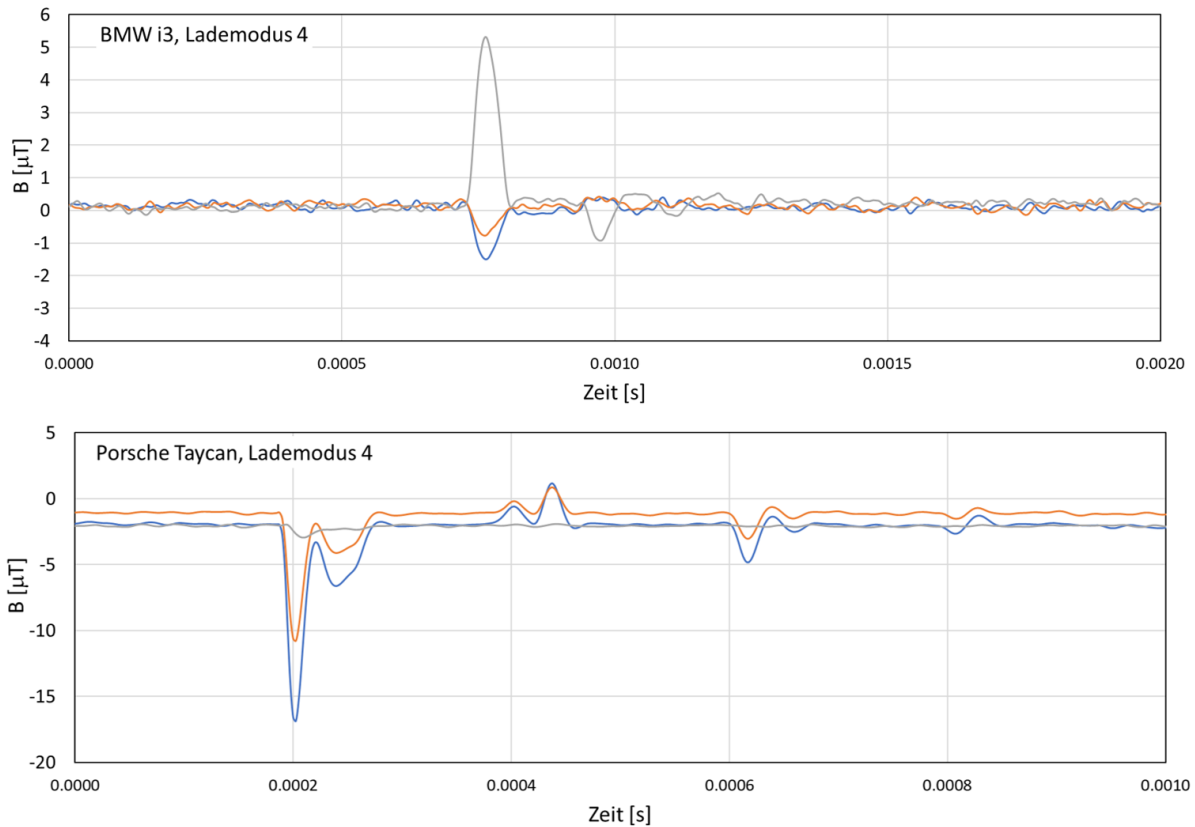


Abbildung 9.10: Beispielzeitverläufe (jeweils x-, y- und z-Komponente) der magnetischen Flussdichte in der Initialphase des Ladevorganges (Modus 4) beim BMW i3 (oben) und beim Porsche Taycan (unten), die zu maximalen B_{PEAK} -Werten und maximalen Expositionsindizes führten (gemessen direkt am Stecker des Ladekabels in unmittelbarer Nähe der Ladebuchse).

Abbildung 9.11 und Abbildung 9.12 fassen abschließend die Messergebnisse in Form der aufgetretenen lokalen Maximalwerte während des konduktiven Ladens für alle Lademodi während der Initialphase (Abbildung 9.11) und während des stationären Ladens (Abbildung 9.12) zusammen.

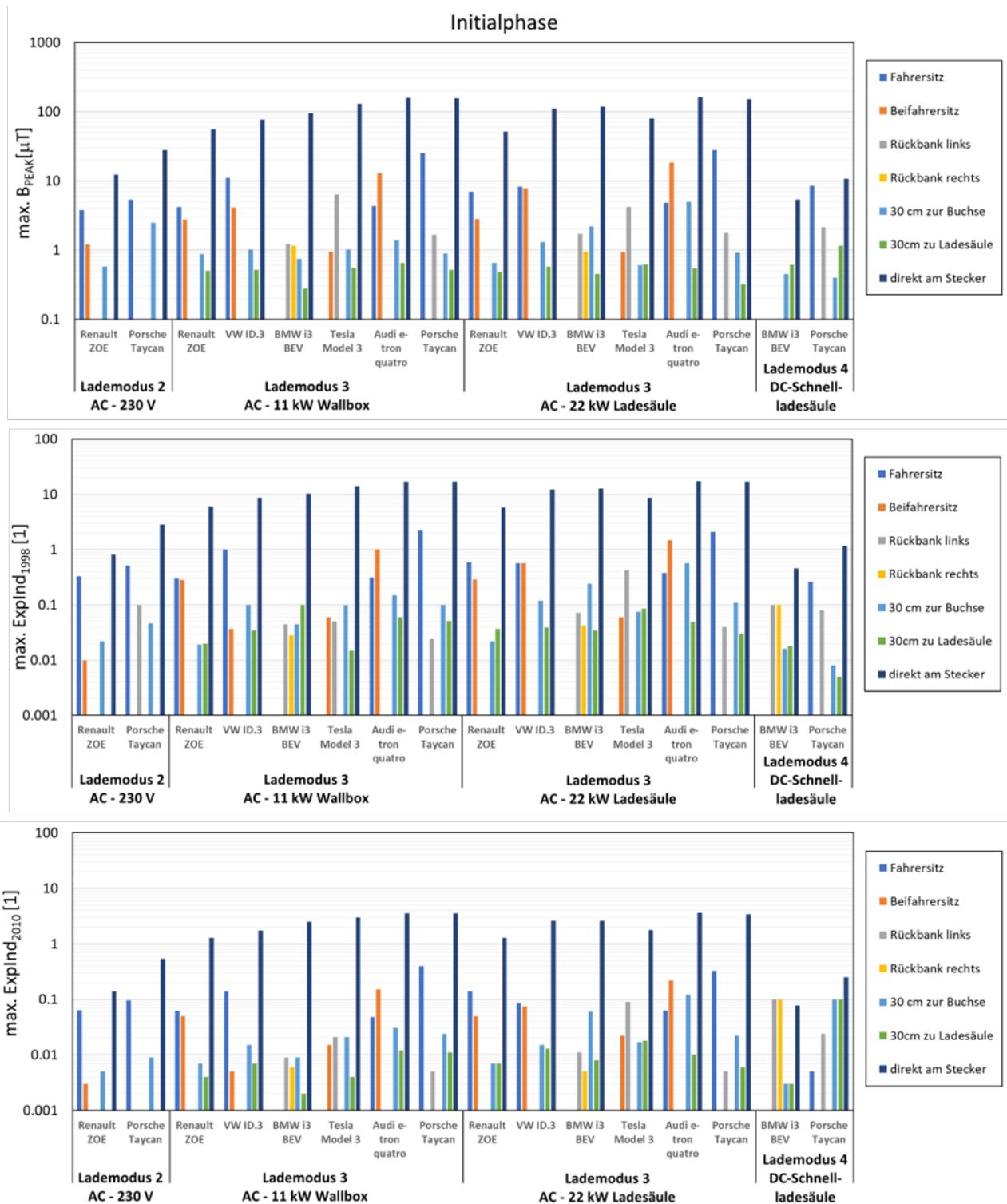


Abbildung 9.11: Grafische Zusammenfassung der Messergebnisse für alle Lademodi während der Initialphase des Ladevorganges, in Form der maximalen gemessenen B_{PEAK} -Werte (oben) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ (Mitte) und $Explnd_{2010}$ (unten). Für Positionen, in denen die Messwerte unterhalb der Umgebungsimmissionen lagen, fehlen die zugehörigen Balken in den Diagrammen.

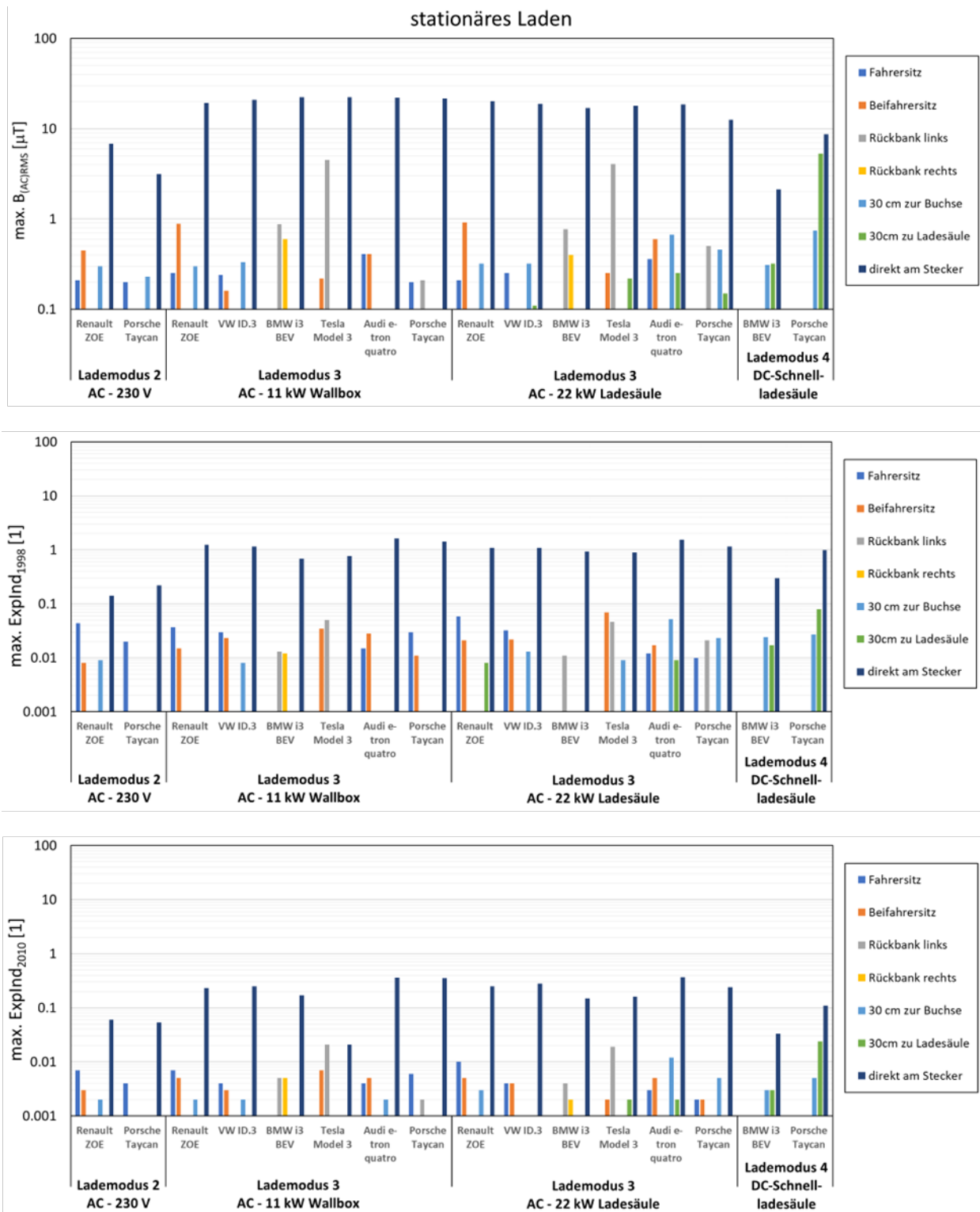


Abbildung 9.12: Grafische Zusammenfassung der Messergebnisse für alle Lademodi während der stationären Phase des Ladevorganges, in Form der maximalen gemessenen B_{RMS} -Werte des AC-Anteils (oben) sowie die zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ (Mitte) und $Explnd_{2010}$ (unten). Für Positionen, in denen die Messwerte unterhalb der Umgebungsimmissionen lagen, fehlen die zugehörigen Balken in den Diagrammen.

9.3 Zusammenfassende Diskussion der Messergebnisse

Die in den vorigen Abschnitten zusammengefassten Messergebnisse für die magnetische Flussdichte innerhalb und außerhalb unterschiedlicher Elektrofahrzeuge während des konduktiven Ladens in unterschiedlichen Lademodi zeigten im Inneren der Fahrzeuge vergleichsweise geringe Immissionswerte. Während der stationären Phase des Ladens, die ab ca. 10 Sekunden nach dem Starten des Ladevorganges angenommen werden kann, lagen die im Inneren der Fahrzeuge messbaren Maximalimmissionen unterhalb der entsprechenden Werte, die während des Fahrens auftreten (vgl. Ergebnisbericht, Teil 1). Der über alle durchgeführten Messungen aufgetretene Maximalwert der magnetischen Flussdichte (B_{RMS}) während des stationären AC-Ladens betrug $4.5 \mu T$ und trat lokal im Unterleibsbereich der Rückbank im Tesla Model 3 auf, was Expositionsindizes von 0.05 (Explnd₁₉₉₈) bzw. 0.021 (Explnd₂₀₁₀) entspricht. In den anderen untersuchten Fahrzeugen waren die Maximalimmissionen während des stationären AC-Ladens jedoch deutlich geringer (B_{RMS} bis maximal $0.87 \mu T$, entsprechend Expositionsindizes von 0.013 (Explnd₁₉₉₈) bzw. 0.005 (Explnd₂₀₁₀)). Ähnlich geringe Maximalimmissionen traten in typischen Aufenthaltsbereichen außerhalb der Fahrzeuge, in Distanzen > 30 cm zum Fahrzeug und zur Ladesäule bzw. Wallbox (bzw. In-Line Steuergerät bei Lademodus 2) auf. Höhere Immissionen treten naturgemäß in unmittelbarer Nähe zur Ladebuchse und zum Ladekabel auf. Die gemessenen Maximalimmissionen während des stationären AC-Ladens unmittelbar am Ladestecker (mit 3 cm^2 Spulenaufnehmer gemessen) lagen bei bis zu ca. $22 \mu T$ und Expositionsindizes von bis zu 1.6 (Explnd₁₉₉₈) bzw. 0.36 (Explnd₂₀₁₀). Die während des DC-Ladens auftretenden Immissionen im Frequenzbereich 1 Hz – 400 kHz während der stationären Ladephase waren wesentlich geringer als im Fall des AC-Ladens und lagen innerhalb der Fahrzeuge unterhalb der Nachweisgrenze von $0.2 \mu T$ (B_{RMS}) und $0.4 \mu T$ (B_{PEAK}) bzw. 0.008 (Explnd₁₉₉₈) und 0.002 (Explnd₂₀₁₀). Die gemessenen Werte der statischen magnetischen Flussdichte während des stationären DC-Ladens lagen bei maximal $214 \mu T$ im Fahrzeuginneren (rechter Fußbereich des Fahrerplatzes im Porsche Taycan) und bei maximal $530 \mu T$ in unmittelbarer Nähe zum Ladestecker. Diese Werte sind im Hinblick auf die von ICNIRP 2009 empfohlenen Referenzwerte für die statische magnetische Flussdichte für die Allgemeinbevölkerung (400 mT) vernachlässigbar (Expositionsindex < 0.0014). Bewertet auf Grundlage der ICNIRP-Empfehlungen, verursachte DC-Laden im Fahrzeuginneren während der stationären Phase des Ladevorganges deutlich geringere Magnetfeldimmissionen als AC-Laden.

Im Vergleich zum stationären Laden traten wesentlich höhere Immissionen in Form von Spitzenwerten B_{PEAK} als Folge transients Vorgänge in der Initialphase des Ladevorganges, typischerweise im Zeitintervall 2 – 5 Sekunden nach dem Start des Ladevorganges, auf. Beim AC-Laden erreichten diese Spitzenwerte im Fahrzeuginneren bis zu ca. $28 \mu T$ und traten lokal im Fußbereich des Fahrersitzes im Porsche Taycan auf (entsprechend Expositionsindizes von ca. 2.1 (Explnd₁₉₉₈) bzw. ca. 0.4 (Explnd₂₀₁₀)). Beim DC-Laden lagen die in der Initialphase auftretenden Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte deutlich niedriger (maximal $8.5 \mu T$, entsprechend Expositionsindizes von ca. 0.26 (Explnd₁₉₉₈) bzw. ca. 0.03 (Explnd₂₀₁₀)). Auch in dieser Hinsicht ist daher DC-Laden mit geringeren Immissionen verbunden als AC-Laden.

Die in typischen Aufenthaltsbereichen außerhalb der Fahrzeuge, in Distanzen > 30 cm zum Fahrzeug und zur Ladesäule bzw. Wallbox (bzw. In-Line Steuergerät bei Lademodus 2) gemessenen maximalen magnetischen Flussdichten in der Initialphase (im Frequenzbereich 1 Hz – 400 kHz) lagen beim AC-Laden bei ca. $5 \mu T$, entsprechend Expositionsindizes von ca. 0.56 (Explnd₁₉₉₈) bzw. ca. 0.12 (Explnd₂₀₁₀) und beim DC-Laden unterhalb von $3.5 \mu T$, entsprechend Expositionsindizes von ca. 0.22 (Explnd₁₉₉₈) bzw. ca. 0.03 (Explnd₂₀₁₀). Die durch

den Ladevorgang verursachte statische magnetische Flussdichte in diesen Bereichen lag bei weniger als 50 μT .

Die gemessenen Maximalimmissionen während der Initialphase des AC-Ladens unmittelbar am Ladestecker lagen bei bis zu ca. 160 μT (B_{PEAK}) und Expositionsindizes von bis zu 17.4 (ExpInd_{1998}) bzw. 3.62 (ExpInd_{2010}). Die während des DC-Ladens auftretenden B_{PEAK} -Werte unmittelbar am Ladestecker in der Initialphase lagen demgegenüber bei maximal 10.7 μT und Expositionsindizes von maximal 1.18 (ExpInd_{1998}) bzw. 0.25 (ExpInd_{2010}).

Der für das Ansprechen des Reed-Schalters von elektronischen Implantaten relevante Wert der statischen magnetischen Flussdichte von 500 μT wird beim DC-Laden nur in unmittelbarer Nähe der Ladebuchse bzw. des Ladesteckers erreicht. In üblichen Distanzen sollte daher beim Laden von Elektrofahrzeugen keine Gefahr für Patienten mit elektronischen Implantaten zufolge des Ansprechens des Reed-Schalters ausgehen.

9.4 Numerische Berechnungen mit anatomischen Körpermodellen

Lokale Überschreitungen der Referenzwerte (Expositionsindizes > 1) treten gemäß den in den voranstehenden Kapiteln zusammengefassten Messergebnissen vor allem durch transiente magnetische Immissionen in der Initialphase des Ladevorganges auf. Die größten Expositionsindizes innerhalb der Fahrzeuge lagen im rechten Fußbereich des Porsche Taycan bei ca. 2.2 (ExpInd_{1998}) bzw. 0.33 (ExpInd_{2010}). Außerhalb der Fahrzeuge (Distanz > 30 cm zum Fahrzeug) traten die maximalen Expositionsindizes in der Nähe der Ladebuchse des Audi e-tron auf. In Distanzen > 30 cm zum Fahrzeug betrug dort $B_{\text{PEAK}} = 5$ μT , $\text{ExpInd}_{1998} = 0.56$ und $\text{ExpInd}_{2010} = 0.12$. Unmittelbar an der Ladebuchse wurden $B_{\text{PEAK}} = 160$ μT , $\text{ExpInd}_{1998} = 17.4$ und $\text{ExpInd}_{2010} = 3.62$ gemessen.

Es wurden daher numerische Simulationen der im Körper anatomischer Modelle induzierten elektrischen Feldstärken E_i und elektrischen Stromdichten J für die Situation von Personen am Fahrerplatz des Porsche Taycan und die Situation des Stehens nahe der Ladebuchse des Audi e-tron während der transienten Magnetfeldverläufe in der Initialphase des AC-Ladens (Modus 3) durchgeführt. Zusätzlich erfolgten numerische Berechnungen für die Situation des Umfassens des Ladesteckers bzw. des Ladekabels.

Alle Berechnungen erfolgten mit einem quasistatischen Lösungsalgorithmus³³ der Simulationsplattform Sim4Life V 7.2.3 und unter Verwendung von insgesamt drei unterschiedlichen hochaufgelösten numerischen Körpermodellen (Duke V 3.1.1, Ella V 3.1 und Roberta V 3.1) der Virtual Population (IT'IS Foundation, Zürich, Schweiz) (Christ et al., 2010; Gosselin et al., 2014). Diese Modelle erlauben eine Veränderung der Körperhaltung entsprechend der Sitzhaltung in den betrachteten Fahrzeugen. Für die Situation des Stehens in der Nähe der Ladebuchse des Audi e-tron wurde das Körpermodell eines Kindes (Roberta) verwendet, das sich mit dem Kopf auf Höhe der Ladebuchse befindet. Zu diesem Zweck wurde dieses Körpermodell auf eine Körpergröße von 90 cm verkleinert (Original-Körpergröße 109 cm).

Die Berechnungen für das Umfassen des Ladesteckers und des Ladekabels wurden mit speziell für die Situation des Umgreifens von Gegenständen entwickelten anatomischen Handmodellen

³³ Der verwendete Solver basiert auf der *Scalar Potential Finite Element (SPFE)* Methode (FE-Methode für ein kubisches Gitter).

durchgeführt (Hirtl et al., 2020; Schneeweiss et al., 2023; Überbacher et al., 2019). Tabelle 9.12 fasst die betrachteten Expositionsszenarien zusammen.

Die relevanten elektrischen Eigenschaften der Gewebe (elektrische Leitfähigkeit) wurden auf Basis der IT'IS Datenbank für thermische und elektromagnetische Parameter biologischer Gewebearten (Hasgall et al., 2022) gewählt („Low Frequency (Conductivity)“ V4.1). Die räumliche Auflösung der Rechendomäne im interessierenden Bereich betrug $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$ bei den Körpermodellen bzw. $0.2 \times 0.2 \times 0.2 \text{ mm}^3$ bei Verwendung der Handmodelle.

Tabelle 9.12: Im Rahmen der numerischen Berechnungen betrachtete Expositionsszenarien.

Szenario	verwendete Körpermodelle
Person sitzend am Fahrerplatz des Porsche Taycan	Duke (männlich, 177 cm) Ella (weiblich, 163 cm)
Person stehend neben Ladebuchse des Audi e-tron	Duke (männlich, 177 cm) Roberta-verkleinert (weiblich, 90 cm)
Person mit Hand Ladestecker haltend (Audi e-tron)	Handmodell P1
Person mit Hand Kabel umgreifend (Audi e-tron)	Handmodell P2

Die numerischen Feldquellen wurden auf Grundlage von Detailmessungen der Feldverteilung im Fußbereich des Porsche Taycan (zuzüglich der Messdaten aus den Messungen mit dem Hartschaum-Dummy) und unter Zuhilfenahme von öffentlich zugänglichen Informationen bezüglich der Verkabelung und der Position des On-Board Ladegerätes im Fahrzeug entwickelt. Ein in 30 cm Distanz horizontal vor den Füßen verlaufender 3-phasiger Leitungszug (Abstand zwischen den beiden Leitern 17 mm) erlaubte die gemessene Feldverteilung im relevanten Bereich (Fuß-, Unterschenkel-, Oberschenkel- und Unterleibsbereich) mit einer Abweichung von weniger als $\pm 20 \%$ anzunähern. Für die Situationen des Stehens neben der Ladebuchse und des Umgreifens des Ladesteckers und des Ladekabels wurde ein Modell des Ladekabels bzw. des Ladesteckers mit den entsprechenden Abständen der Einzelleiter zueinander entwickelt, womit eine Übereinstimmung innerhalb von $\pm 15 \%$ mit den Messdaten erreicht werden konnte.

Die Berechnungen erfolgten bei einer Frequenz von 1 kHz und führten zunächst auf die räumliche Verteilung der im Körper induzierten elektrischen Feldstärke E_i , wie sie durch die reale Feldquelle in der betrachteten Situation verursacht wurde, ohne jedoch noch den konkreten Zeitverlauf der durch die reale Feldquelle im Körper induzierten elektrischen Feldstärke $E_i(t)$ abzubilden. Die auf diese Weise erhaltenen Ergebnisse wurden anschließend mit der Methode von Schneeweiss et al. (2023) skaliert, um WPM-bewertete Expositionsindizes für die induzierte elektrische Feldstärke für die konkret in bzw. neben den Fahrzeugen gemessenen Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte zu erhalten.

Bei dieser Methode wird zunächst der Maximalwert der Zeitableitung $\max(dB(t)/dt)$ des einwirkenden Magnetfeldes aus dem gemessenen Signalverlauf $B(t)$ berechnet und anschließend auf einen Spitzenwert von 1 skaliert. Der auf einen Spitzenwert 1 skalierte Zeitverlauf von $B'(t)$ ist identisch mit dem Zeitverlauf der im Körper induzierten elektrischen Feldstärke $E_i(t)_{\text{norm}}$ bzw. der im Körper induzierten elektrischen Stromdichte $J(t)_{\text{norm}}$ mit einem Spitzenwert von 1 V/m bzw. 1 A/m². Auf das auf den Spitzenwert von 1 V/m bzw. 1 A/m² skalierte Zeitsignal $E_i(t)_{\text{norm}}$ bzw. $J(t)_{\text{norm}}$ wird die bekannte WPM für die jeweilige Basisgröße gemäß

ICNIRP 2010 bzw. ICNIRP 1998 angewendet, woraus sich normierte Expositionsindizes ergeben. Aus der numerischen Berechnung mit einem harmonischen Magnetfeld $B(t)$ mit Amplitude $B_{\text{PEAK,sim}}$ und Frequenz f_0 lässt sich der Zusammenhang zwischen dem $\max(dB/dt) = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot B_{\text{PEAK,sim}}$ und dem dadurch im Gewebe induzierten Spitzenwert der elektrischen Feldstärke bzw. Stromdichte ermitteln. Auf dieser Grundlage können die normierten Expositionsindizes entsprechend den tatsächlichen gemessenen Verhältnissen skaliert werden. Die Methode kann im Niederfrequenzbereich angewendet werden, weil dort die elektrischen Leitfähigkeiten der Körpergewebe als frequenzunabhängig angenommen werden können. Außerdem darf die spektrale Zusammensetzung des einwirkenden Magnetfeldes innerhalb des Volumens des betrachteten Körperteils in keinem relevanten Ausmaß variieren. Diese Bedingungen sind im vorliegenden Fall, nachprüfbar anhand der Messdaten, in sehr guter Näherung erfüllt.

Als Zeitverlauf der resultierenden magnetischen Flussdichte in Nahbereich der Ladebuchse des Audi e-tron wurde für die Ergebnisskalierung die in Abbildung 9.6 (Mitte) gezeigte Funktion verwendet. Im Fußbereich des Porsche Taycan wurde der dort gemessene Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte herangezogen (Abbildung 9.13).

Die Berechnungsergebnisse werden als Expositionsindex gemäß ICNIRP 2010 bezüglich der maximalen, über ein Volumen von $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten elektrischen Feldstärke $E_{i,\text{avg}}$ angegeben sowie zusätzlich deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil³⁴. Diese Auswertung wird, wie in ICNIRP 2010 beschrieben, einerseits für alle Körpergewebe (PNS) und andererseits nur für das Zentralnervensystem (ZNS) durchgeführt. Sofern auch im Bereich des Rückenmarks Immissionswerte oberhalb der Referenzwerte gemäß Ratsempfehlung 1999/519/EU auftraten, wurden auch maximale Expositionsindizes bezüglich der über 1 cm^2 quer zur Stromflussrichtung gemittelten induzierten Stromdichte J_{avg} berechnet.

³⁴ Es ist bekannt, dass numerische Berechnungsergebnisse zufolge der erforderlichen räumlichen Diskretisierung des Rechenraumes und/oder zufolge von Diskretisierungsfehlern in den anatomischen Körpermodellen anfällig für lokale numerische Artefakte sind („Staircasing error“). Eine Expositionsbewertung auf Grundlage von $E_{i,\text{avg,max}}$ führt daher tendenziell zu einer Überschätzung der tatsächlichen Exposition. In den ICNIRP 2010 Empfehlungen wurde aus diesem Grund empfohlen, anstelle von $E_{i,\text{avg,max}}$ das 99.0te Perzentil von $E_{i,\text{avg}}$ mit dem Basisgrenzwert zu vergleichen. Diese Empfehlung basierte jedoch ausschließlich auf den Ergebnissen von Vergleichsstudien bei homogener Ganzkörperexposition. In Situationen mit lokaler Exposition nur einzelner Körperteile muss dieser Ansatz jedoch zwangsläufig zu einer potenziellen Unterschätzung der tatsächlichen Exposition führen, wenn der gesamte Körper in die Bewertung einbezogen wird. Dieses Problem wurde in den letzten Jahren wiederholt und unabhängig voneinander von mehreren Gruppen aufgezeigt und analysiert (Arduino et al., 2020; Chen et al., 2013; Diao et al., 2023; Gomez-Tames et al., 2018; Kos et al., 2012; Laakso und Hirata, 2012; Schmid et al., 2019b). Aus diesen Arbeiten lässt sich ableiten, dass bei lokaler Exposition und hinreichend feiner Auflösung (Gitterschrittweite 1 mm oder feiner) das 99.9te bzw. 99.99te Perzentil von $E_{i,\text{avg}}$ deutlich besser geeignet ist als das 99.0te Perzentil, wenn Unterschätzungen der tatsächlichen Exposition vermieden werden sollen. Die Angabe mehrerer Perzentile als Ergebnisgrößen erlaubt die Überprüfung der Validität dieser Annahme, wenn man die Ergebniswerte über dem zugehörigen Perzentilrang als Abszisse aufträgt und den Verlauf der Steilheit dieser Funktion analysiert. Für die in diesem Bericht dargestellten Ergebnisse zeigten diese Analysen ebenfalls, dass mindestens das 99.9te Perzentil (besser das 99.99te Perzentil) für die Bewertung herangezogen werden sollte, um systematische Unterschätzungen der Exposition zu vermeiden.

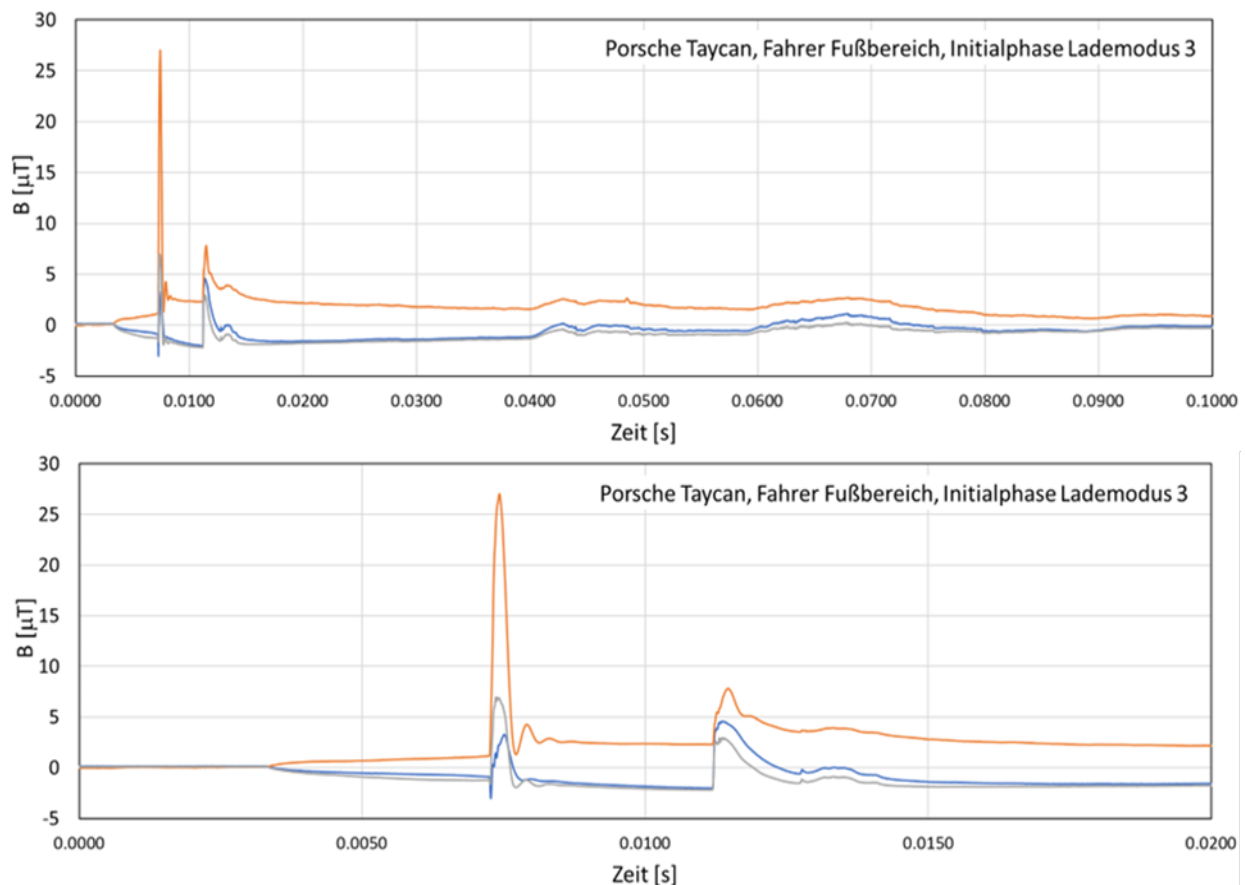


Abbildung 9.13: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte (in zwei unterschiedlichen Auflösungen der Zeitachse) im Fußbereich des Porsche Taycan (jeweils x-, y- und z-Komponente) während des zum maximalen Explnd führenden transienten Vorgangs in der Initialphase des AC-Ladens (Modus 3).

9.4.1 Unsicherheiten der numerischen Berechnungen

Neben den Unsicherheiten zufolge einer eingeschränkt genauen numerischen Nachbildung der realen Feldquellen ($\pm 20\%$ bzw. $\pm 15\%$), sind die Unsicherheiten bezüglich der elektrischen Gewebeeigenschaften einer der relevantesten Unsicherheitsbeiträge. Da für viele Gewebe diese Daten nur mit großer Unsicherheit behaftet verfügbar sind, können extreme Kombinationen dieser Daten zu entsprechend hohen Unsicherheiten ($> 100\%$) bezüglich der in anatomischen Körpermodellen berechneten induzierten elektrischen Feldstärken bzw. Stromdichten führen, insbesondere dann, wenn zu beiden Seiten einer Grenzfläche zwischen niedrig- und hochleitfähigen Geweben (z. B. Fett und Muskel) jeweils extreme Werte eingesetzt werden, die zu maximalem Leitfähigkeitskontrast führen. Für realistische Gewebeparameterkombinationen lassen Daten aus der Literatur (z. B. Schmid et al., 2019) die Annahme einer Unsicherheit von ca. $\pm 20\%$ ($k = 1$) als sinnvoll erscheinen, sofern die räumliche Auflösung der Rechenmodelle hinreichend fein ($\leq 1\text{ mm}$) gewählt wurde. Um das Ausmaß der Variationen über unterschiedliche Körpermodelle grob abschätzen zu können, wurden alle Berechnungen mit zwei unterschiedlichen Körpermodellen durchgeführt. Literaturdaten von vergleichenden Berechnungen für die Exposition des Unterarms mehrerer moderner Körpermodelle führen ebenfalls auf Variationen innerhalb von ca. $\pm 20\%$ (Schmid et al., 2019b). Die resultierende Gesamtunsicherheit liegt, bei Annahme von Normalverteilung und statistischer Unabhängigkeit der Einzelbeiträge daher bei ca. $\pm 35\%$ bzw. $\pm 32\%$ ($k = 1$).

9.4.2 Ergebnisse der Berechnungen am Fahrersitz des Porsche Taycan

Tabelle 9.13 und Tabelle 9.14 sowie Abbildung 9.14 und Abbildung 9.15 fassen die Berechnungsergebnisse zusammen.

Tabelle 9.13: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse am Fahrersitz des Porsche Taycan in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Volumen von $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$) für PNS-Gewebe und ZNS-Gewebe im Kopf.

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP 2010,GP}$							
	$E_{i,avg,max}$		$E_{i,avg,p99.99}$		$E_{i,avg,p99.9}$		$E_{i,avg,p99.0}$	
	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS
Duke	0.0021	0.0103	0.0017	0.0080	0.0014	0.0047	0.0012	0.0024
Ella	0.0028	0.0127	0.0021	0.0072	0.0018	0.0049	0.0015	0.0026

Tabelle 9.14: Zusammenfassung der Berechnungsergebnisse am Fahrersitz des Porsche Taycan in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Flächenelement von 1 cm^2 quer zur Stromflussrichtung gemittelte induzierte elektrische Stromdichte ($J_{avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($J_{avg,p99.99}$, $J_{avg,p99.9}$, $J_{avg,p99.0}$) für ZNS-Gewebe im Kopf sowie im Rückenmark.

	Expositionsindizes für $J_{ICNIRP 1998,GP}$			
	$J_{avg,max}$	$J_{avg,p99.99}$	$J_{avg,p99.9}$	$J_{avg,p99.0}$
Duke	0.0139	0.0122	0.0113	0.0103
Ella	0.0170	0.0157	0.0149	0.0132

Trotz der Überschreitung des $ExpInd_{1998}$ bezüglich der magnetischen Flussdichte, bleiben die induzierten elektrischen Feldstärken und Stromdichten im Körper unterhalb der Basisgrenzwerte gemäß ICNIRP 2010 und ICNIRP 1998. Die Ausschöpfung der Basisgrenzwerte liegt dabei maximal im unteren einstelligen Prozentbereich.

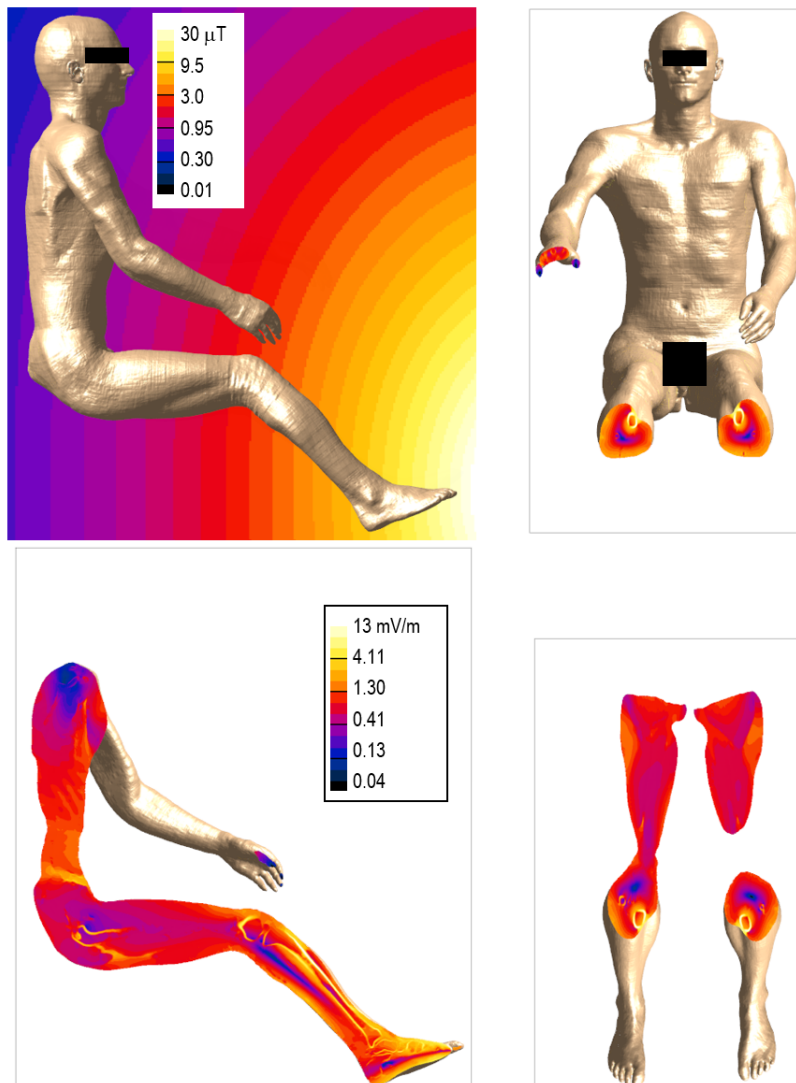


Abbildung 9.14: Körpermodell Duke am Fahrerplatz des Porsche Taycan und Feldverteilung (B_{PEAK}) der magnetischen Flussdichte der numerischen Feldquelle in einem Sagittalschnitt (oben, links) sowie der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg,RMS}$ (restliche Teilbilder) in drei Orthogonalebene durch das Maximum im linken Schienbein unterhalb des Knies.

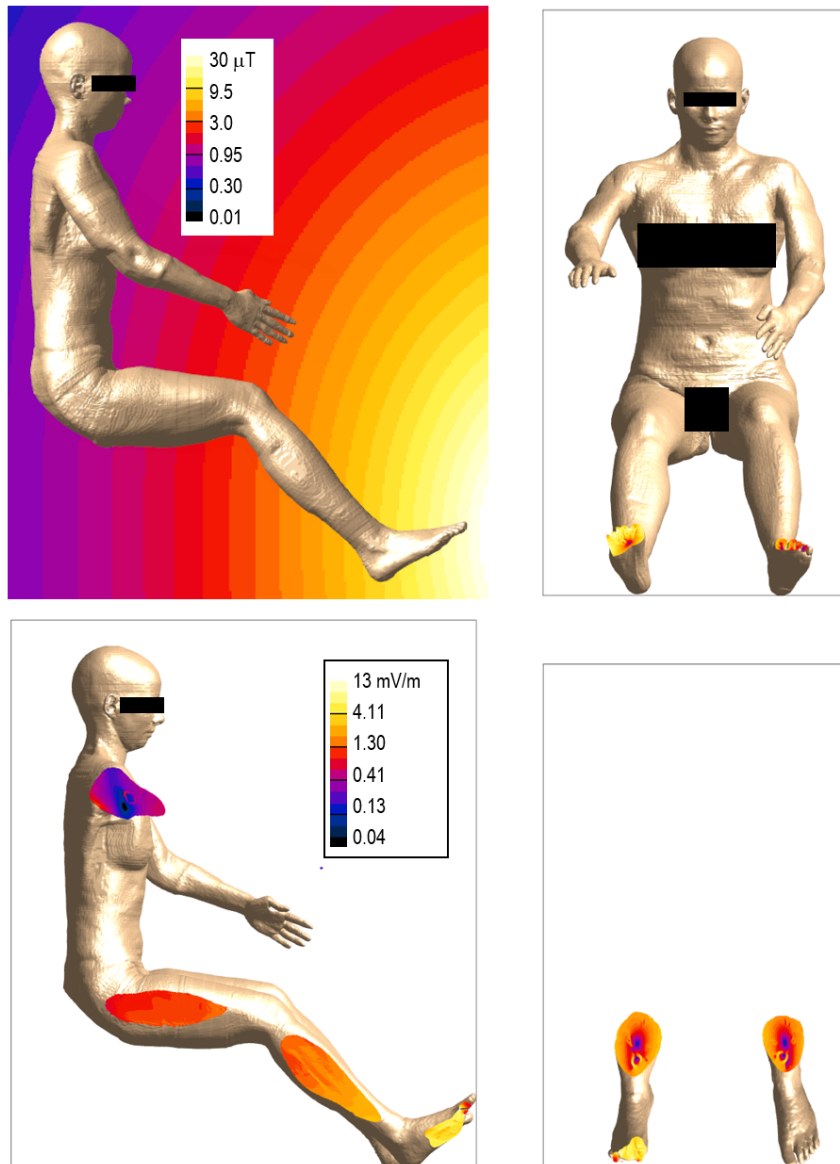


Abbildung 9.15: Körpermodell Ella am Fahrerplatz des Porsche Taycan und Feldverteilung (B_{PEAK}) der magnetischen Flussdichte der numerischen Feldquelle in einem Sagittalschnitt (oben, links) sowie der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg,RMS}$ (restliche Teilbilder) in drei Orthogonalebenen durch das Maximum in der Haut des rechten Vorderfußes.

9.4.3 Ergebnisse der Berechnungen nahe der Ladebuchse des Audi e-tron

Tabelle 9.15 und Tabelle 9.16 sowie Abbildung 9.16 und Abbildung 9.17 fassen die Berechnungsergebnisse zusammen.

Auch in diesen Szenarien treten, trotz der Überschreitung des $ExpInd_{1998}$ bezüglich der magnetischen Flussdichte, keine Überschreitungen der Basisgrenzwerte für die induzierten elektrischen Feldstärken und Stromdichten gemäß ICNIRP 2010 und ICNIRP 1998 auf, wobei die Ausschöpfungsgrade der Basisgrenzwerte für PNS-Gewebe den mittleren einstelligen Prozentbereich erreichen können. Für Kinder, die mit dem Kopf und/oder Rücken nahe der Ladebuchse bzw. dem Ladekabel kommen, können die Ausschöpfungsgrade der Basisgrenzwerte für ZNS-Gewebe den unteren einstelligen Prozentbereich erreichen.

Tabelle 9.15: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse nahe der Ladebuchse des Audi e-tron in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Volumen von $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$) für PNS-Gewebe und ZNS-Gewebe im Kopf.

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP\ 2010,GP}$							
	$E_{i,avg,max}$		$E_{i,avg,p99.99}$		$E_{i,avg,p99.9}$		$E_{i,avg,p99.0}$	
	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS
Duke	0.0020	0.0252	0.0009	0.0143	0.0008	0.0093	0.0007	0.0053
Roberta	0.0145	0.0619	0.0138	0.0205	0.0129	0.0150	0.0113	0.0114

Tabelle 9.16: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse nahe der Ladebuchse des Audi e-tron in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Flächenelement von 1 cm^2 quer zur Stromflussrichtung gemittelte induzierte elektrische Stromdichte ($J_{avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($J_{avg,p99.99}$, $J_{avg,p99.9}$, $J_{avg,p99.0}$) für ZNS-Gewebe im Kopf sowie im Rückenmark.

	Expositionsindizes für $J_{ICNIRP\ 1998,GP}$			
	$J_{avg,max}$	$J_{avg,p99.99}$	$J_{avg,p99.9}$	$J_{avg,p99.0}$
Duke	0.0078	0.0069	0.0061	0.0054
Roberta	0.131	0.131	0.128	0.118

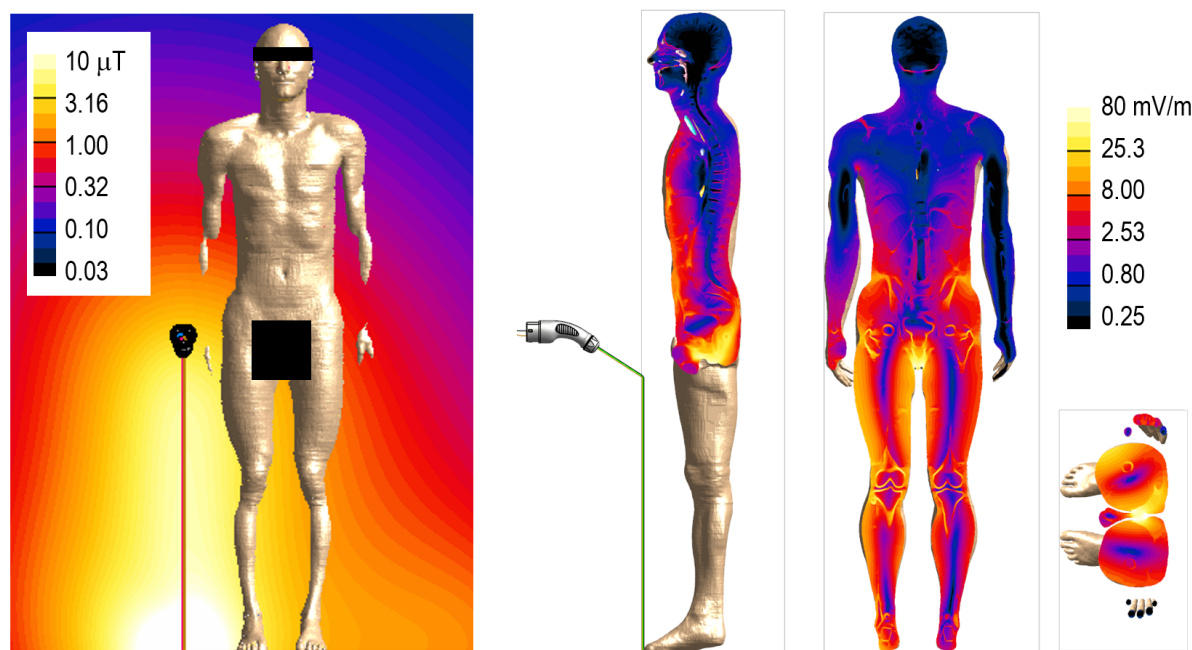


Abbildung 9.16: Körpermodell Duke nahe der Ladebuchse des Audi e-tron und Feldverteilung (B_{PEAK}) der magnetischen Flussdichte der numerischen Feldquelle in einem Frontalschnitt (links) sowie der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg,RMS}$ (restliche Teilbilder) in drei Orthogonalebenen durch das Maximum im Schritt.

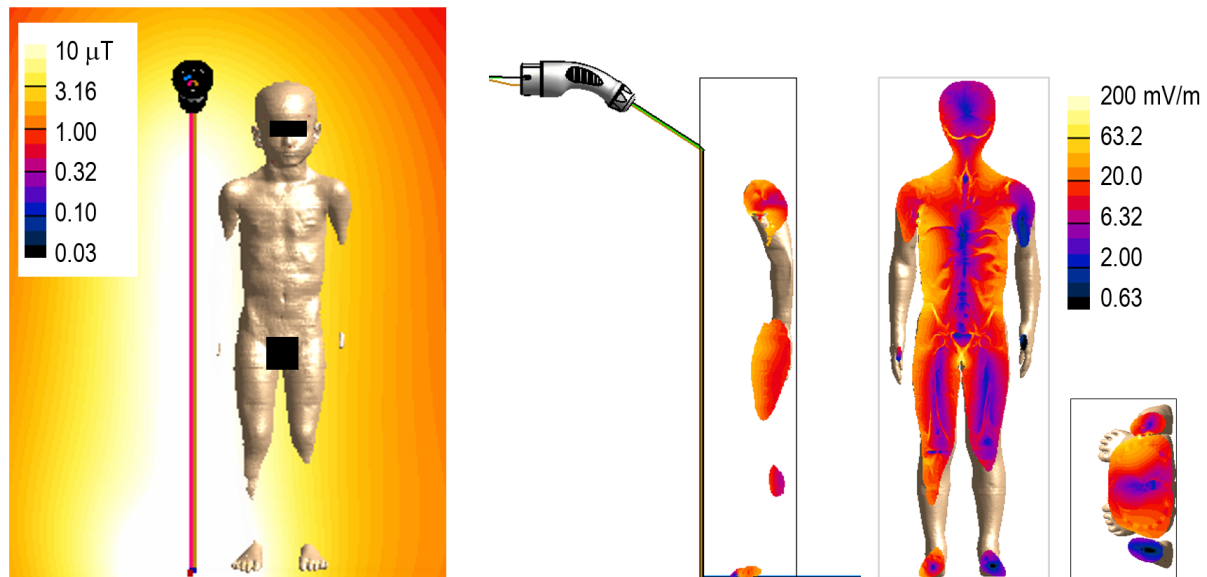


Abbildung 9.17: Körpermodell Roberta nahe der Ladebuchse des Audi e-tron und Feldverteilung (B_{PEAK}) der magnetischen Flussdichte der numerischen Feldquelle in einem Frontalschnitt (links) sowie der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg,RMS}$ (restliche Teilbilder) in drei Orthogonalebene durch das Maximum in der Haut nahe der rechten Achsel.

9.4.4 Ergebnisse der Berechnungen für das Umfassen des Ladesteckers und des Kabels

Tabelle 9.17 und Abbildung 9.18 fassen die Berechnungsergebnisse zusammen.

Tabelle 9.17: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse nahe der Ladebuchse des Audi e-tron in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Volumen von $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$) für PNS-Gewebe.

	Expositionsindizes für $E_{i,CNIRP 2010,GP}$			
	$E_{i,avg,max}$	$E_{i,avg,p99.99}$	$E_{i,avg,p99.9}$	$E_{i,avg,p99.0}$
Stecker umfassen	0.1330	0.1095	0.0869	0.0550
Kabel umfassen	0.2731	0.2221	0.1765	0.1152

Bezüglich der angegebenen Perzentile wird angemerkt, dass die Perzentilbildung nur über jene Körperbereiche erfolgte, die innerhalb des grünen Bereiches in Abbildung 9.18 (Hand- und Unterarm) liegen. Sie dienen lediglich als Indikatoren für die Validität des maximalen $E_{i,avg}$ bzw. des zugehörigen maximalen Explnd. Ein direkter Vergleich von unter Einschluss des gesamten Körpers ermittelten $E_{i,avg}$ -Perzentilwerten mit den Basisgrenzwerten ist für den Fall stark lokalisierter Exposition (wie hier vorliegend) aus dosimetrischer Sicht nicht vertretbar, da dies zu einer systematischen Unterschätzung der Exposition führt.

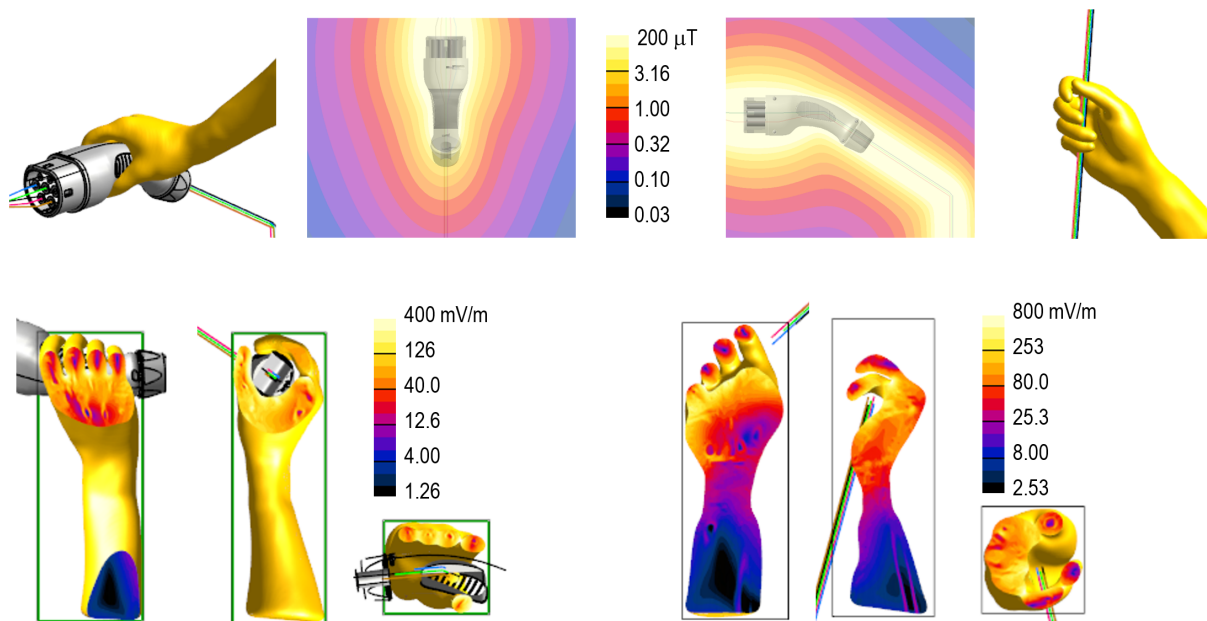


Abbildung 9.18: Anatomische Handmodelle am Ladestecker (links) und am Kabel (rechts) und Verteilung der magnetischen Flussdichte (B_{PEAK}) in unmittelbarer Nähe zum Ladestecker und Ladekabel (oben) sowie Verteilung der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten, in den Handmodellen induzierten elektrischen Feldstärken $E_{i,avg,RMS}$ (unten), jeweils in drei Orthogonalebene durch das Maximum.

Auch in diesen Szenarien treten trotz der Überschreitung des Explnd_{1998} und Explnd_{2010} bezüglich der magnetischen Flussdichte keine Überschreitungen der Basisgrenzwerte für die induzierten elektrischen Feldstärken gemäß ICNIRP 2010 auf, es werden jedoch die Basisgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung im zweistelligen Prozentbereich ausgeschöpft.

Selbst bei Berücksichtigung der anzusetzenden Unsicherheiten (vgl. Kapitel 8.3 und 9.4.1) erscheinen Überschreitungen der Basisgrenzwerte beim konduktiven Laden in den untersuchten Szenarien daher als sehr unwahrscheinlich.

10 Ergebnisse für das induktive Laden

10.1 Messergebnisse

Die mittels der in Kapitel 8 beschriebenen Messmethoden erhaltenen Ergebnisse werden im Folgenden zusammengefasst. Abbildung 10.1 zeigt zunächst das Frequenzspektrum der Immissionen bei aktivem induktivem Ladesystem, gemessen in ca. 7 cm über dem Straßenniveau (Mittelpunkt einer 100 cm² Sonde) und in ca. 10 cm Distanz zur Außenkante des Fahrzeugbodens. Die klare Dominanz des 85 kHz Spektralanteils ist gut erkennbar. Oberwellen oberhalb des Messfrequenzbereichs des MF EASY Messsystems liegen bei deutlich weniger als 1 % der Gesamtsignalenergie (wurde zusätzlich mittels Spektralanalyse im Frequenzbereich 9 kHz bis 10 MHz bestätigt, siehe Abbildung 10.2).

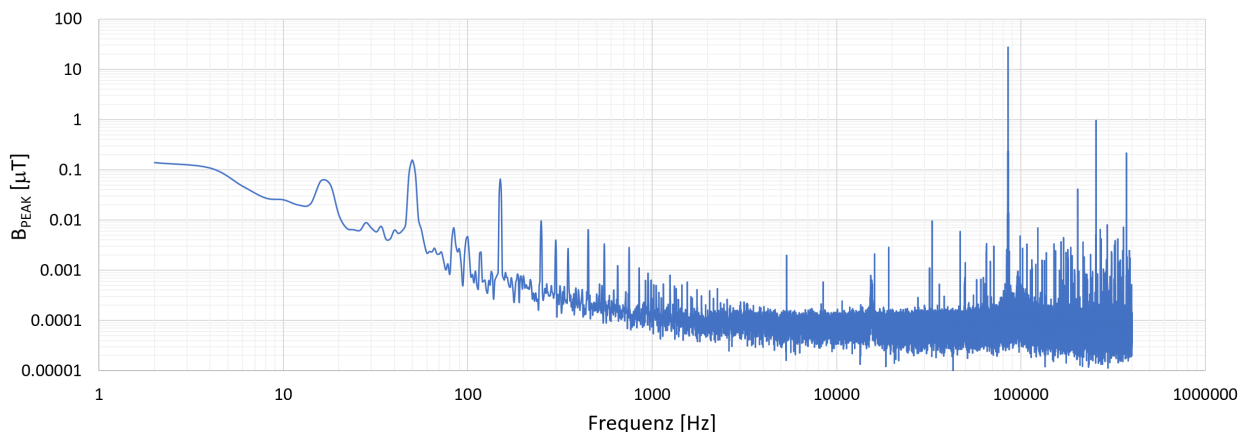


Abbildung 10.1: Frequenzspektrum der Immissionen im Frequenzbereich bis 400 kHz bei aktivem induktivem Ladesystem, ermittelt mittels FFT aus Zeitbereichsdaten gemessen mit dem MF EASY Messsystem in ca. 7 cm Höhe über dem Straßenniveau (Mittelpunkt einer 100 cm² Sonde) und in ca. 10 cm Distanz zur Außenkante des Fahrzeugbodens.

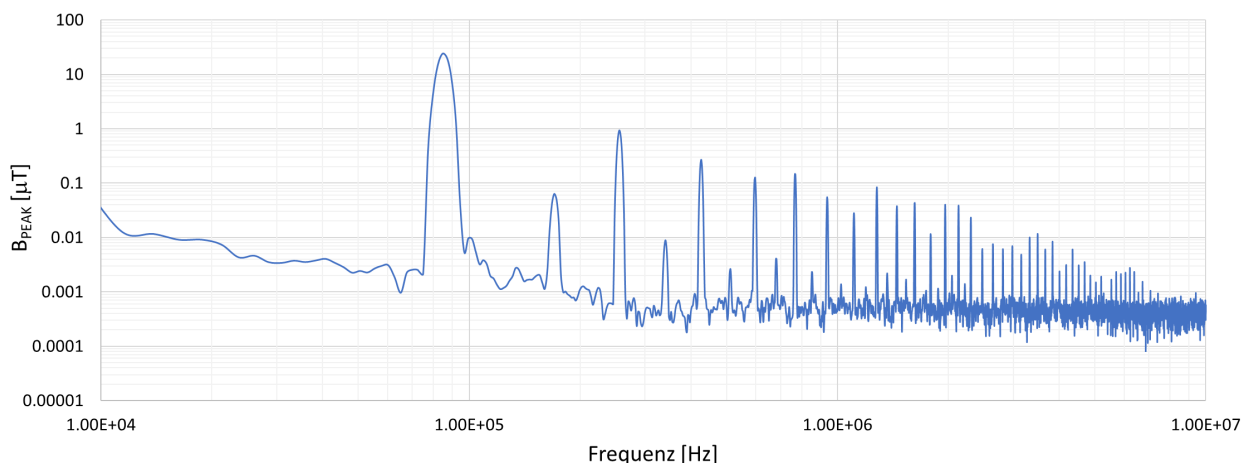


Abbildung 10.2: Frequenzspektrum der Immissionen im Frequenzbereich 9 kHz – 10 MHz bei aktivem induktivem Ladesystem, gemessen mit einem Spektrumanalysator (SRM 3006) in ca. 7 cm Höhe über dem Straßenniveau (Mittelpunkt einer 100 cm² Sonde) und in ca. 10 cm Distanz zur Außenkante des Fahrzeugbodens.

Sowohl das Einschalten als auch das Ausschalten der 85 kHz Energieübertragung erfolgte ohne relevante Immissionsspitzenwerte, die gegenüber der stationären Phase des Ladevorganges

strahlenschutztechnisch relevant wären (Abbildung 10.3 und Abbildung 10.4). Der volle Ladestrom wurde innerhalb von ca. 3 – 4 Sekunden nach dem Einschalten der 85 kHz Energieübertragung erreicht. Das obere Teilbild in Abbildung 10.3 zeigt nur die ersten Stufen der schrittweisen Erhöhung des Ladestromes bzw. der magnetischen Flussdichte auf ca. 27 μT . Das Abschalten erfolgte innerhalb von ca. 120 ms (Abbildung 10.4).

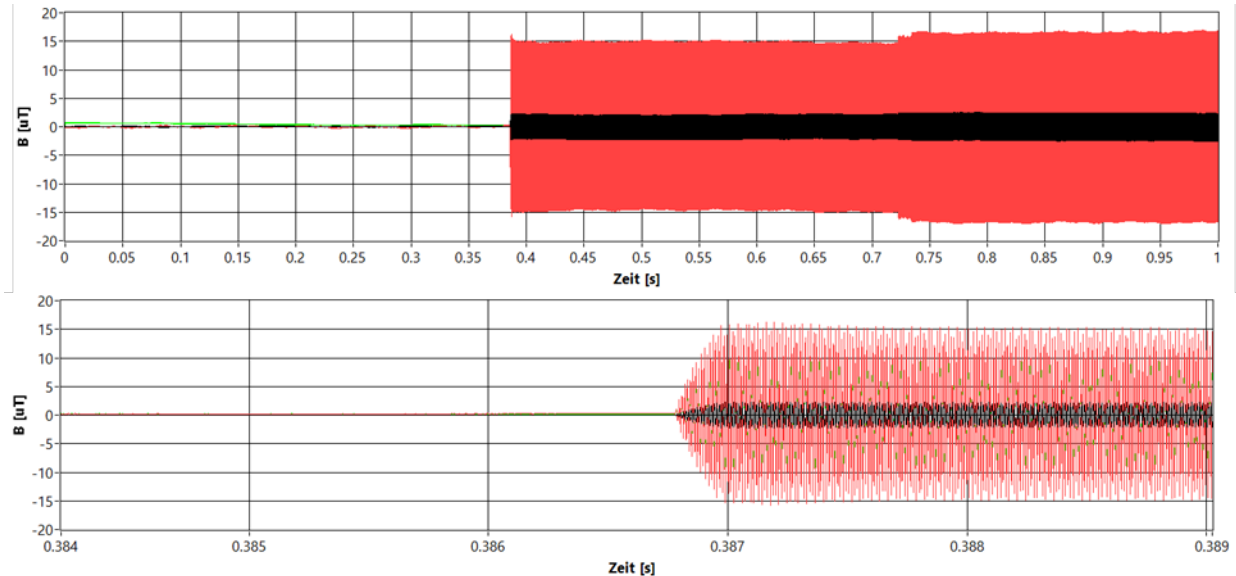


Abbildung 10.3: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte während des Einschaltens der 85 kHz Energieübertragung. Die drei Graphen (rot, schwarz, grün) stellen die Zeitsignale der drei orthogonalen Spulensensoren der Magnetfeldsonde dar (grüner Graph von rotem und schwarzem Graphen weitgehend verdeckt). Das untere Teilbild ist ein Zoom der Zeitachse des oberen Teilbildes.

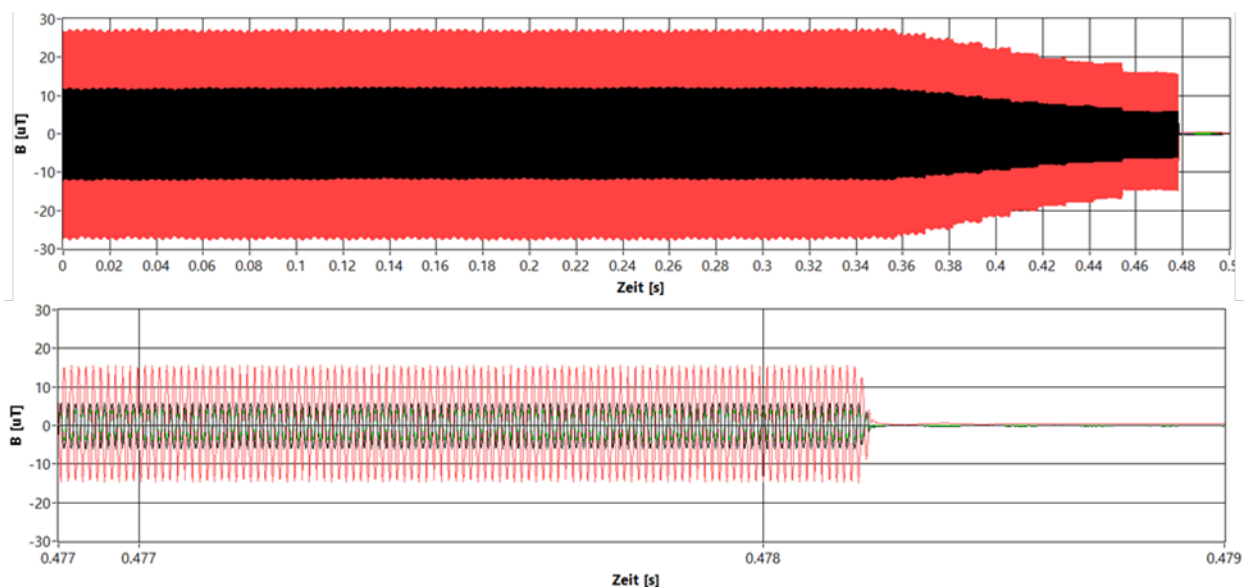


Abbildung 10.4: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte während des Ausschaltens der 85 kHz Energieübertragung. Die drei Graphen (rot, schwarz, grün) stellen die Zeitsignale der drei orthogonalen Spulensensoren der Magnetfeldsonde dar (grüner Graph von rotem und schwarzem Graphen weitgehend verdeckt). Das untere Teilbild ist ein Zoom der Zeitachse des oberen Teilbildes.

Einzig am Fahrerplatz zeigte sich im Fußbereich nach Initiierung des Ladevorgangs ein transients Vorgang mit Spitzenwerten B_{PEAK} der magnetischen Flussdichte von ca. 6 – 7 μT

(Abbildung 10.5), der einige Sekunden vor dem Einschalten der 85 kHz Energieübertragung auftrat. Diese Transiente war allerdings nur am Fahrerplatz messbar. An den anderen untersuchten Sitzplätzen im Fahrzeug konnte sie in keinem relevanten Ausmaß mehr festgestellt werden.

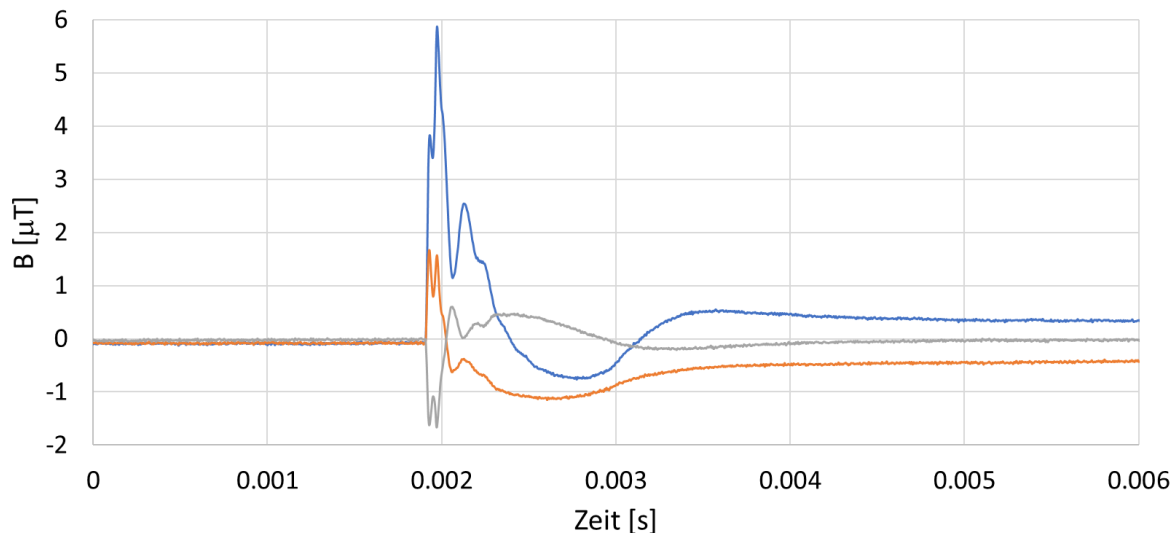


Abbildung 10.5: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte im Fußbereich des Fahrerplatzes während eines transienten Vorganges im Zuge des Aktivierens des Ladevorganges.

Im Folgenden werden die Messergebnisse daher in Form der B_{RMS} -Werte und der Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß den Empfehlungen der ICNIRP 1998 (Explnd_{1998}) und 2010 (Explnd_{2010}) zusammengefasst. Das Verhältnis $B_{\text{PEAK}}/B_{\text{RMS}}$ lag während der stationären Phase des Ladevorganges stets im Bereich zwischen 1.45 und 2.0. Am Fahrerplatz erfolgt zusätzlich eine separate Bewertung des in Abbildung 10.5 gezeigten transienten Vorganges, die Messergebnisse werden dementsprechend in Form der B_{PEAK} -Werte und der Expositionsindizes Explnd_{1998} und Explnd_{2010} angeführt.

Alle Messungen wurden sowohl bei einem Ladezustand $< 10\%$ und bei einem Ladezustand $> 95\%$ durchgeführt. Allerdings erwies sich der Ladestrom (im Fahrzeug ablesbar) und damit auch die gemessenen Immissionswerte bis 97% Ladezustand nahezu konstant (zwischen 50 und 54 A). Es werden im Folgenden daher nur die Ergebnisse für 10% Ladezustand angeführt.

Tabelle 10.1 und Tabelle 10.2 sowie Abbildung 10.6 fassen die Ergebnisse der Messungen an den untersuchten Messpositionen (vgl. Kapitel 8.2.2) innerhalb und außerhalb des Fahrzeuges zusammen. Die Messungen außerhalb des Fahrzeuges wurden bei geöffneten Fahrgastraumtüren durchgeführt, da dies im Zuge von Vormessungen zu geringfügig höheren Immissionswerten führte.

Die Ergebnisse zeigen die erwartete Tendenz höherer Immissionswerte im Falle eines bezüglich der Primärspule nicht optimal ausgerichteten Fahrzeuges. Überschreitungen der Referenzwerte (Expositionsindizes > 1) wurden im Inneren des Fahrzeuges nicht festgestellt.

In möglichen Aufenthaltsbereichen neben dem Fahrzeug wurden im Höhenbereich bis ca. 50 cm Überschreitungen der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 festgestellt (Explnd_{1998} bis ca. 3.9 in 15 cm Distanz und 20 cm über Straße bzw. Explnd_{1998} bis ca. 5.8 in 9 cm Distanz und 8 cm über Straße). Überschreitungen der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 wurden nur unmittelbar am Boden

(Messaufnehmer aufliegend) und nahe der Fahrzeugaußenkante festgestellt (Explnd₂₀₁₀ bis ca. 1.3 in 9 cm Horizontalabstand von Außenkante Fahrgastraumboden (bei geöffneter Tür) bis Mitte Messaufnehmer).

Tabelle 10.1: Zusammenfassung der Messergebnisse während des induktiven Ladens an der Pilotanlage des TALAKO-Projektes in Köln an den untersuchten Sitzplätzen im Inneren des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 8.2.2), in Form der gemessenen B_{RMS}- bzw. B_{PEAK}-Werte sowie der zugehörigen maximalen Expositionsindizes Explnd₁₉₉₈ und Explnd₂₀₁₀.

		stationärer Ladevorgang						Initiierungsphase		
		zentriert			ca. 12 cm seitlich versetzt			zentriert ¹⁾		
Position		B _{RMS} [μT]	Explnd ₁₉₉₈ [1]	Explnd ₂₀₁₀ [1]	B _{RMS} [μT]	Explnd ₁₉₉₈ [1]	Explnd ₂₀₁₀ [1]	B _{PEAK} [μT]	Explnd ₁₉₉₈ [1]	Explnd ₂₀₁₀ [1]
Fahrerplatz	FL	1.12	0.18	0.042	1.75	0.28	0.066	6.25	0.59	0.10
	FR	0.68	0.13	0.028	0.69	0.21	0.036	6.30	0.60	0.10
	US _L	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)
	US _R	1.08	0.19	0.044	1.19	0.20	0.045	2.99	0.28	0.049
	OS _L	1.10	0.20	0.045	1.33	0.22	0.050	1.21	0.12	0.020
	OS _R	0.86	0.16	0.036	1.02	0.18	0.041	1.89	0.17	0.029
	UL	0.70	0.12	0.028	0.78	0.13	0.030	2.00	0.18	0.031
	BL	0.75	0.13	0.030	0.94	0.15	0.035	0.74	0.058	0.010
	BR	0.37	0.063	0.014	0.36	0.057	0.013	0.87	0.070	0.011
	K	0.34	0.063	0.015	0.59	0.099	0.023	0.75	0.037	0.006
Sitzplatz rechts (gegen Fahrtrichtung)	FL ³⁾	3.09	0.49	0.11	5.31	0.88	0.23	-	-	-
	FR	0.84	0.13	0.031	1.32	0.23	0.042	-	-	-
	US _L	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	- 2)	-	-	-
	US _R	0.59	0.10	0.023	1.12	0.20	0.045	-	-	-
	OS _L	0.51	0.086	0.020	1.56	0.26	0.036	-	-	-
	OS _R	0.43	0.084	0.019	0.88	0.16	0.037	-	-	-
	UL	0.48	0.086	0.020	1.08	0.19	0.045	-	-	-
	BL	0.34	0.050	0.012	1.14	0.19	0.044	-	-	-
	BR	0.27	0.042	0.010	0.54	0.093	0.022	-	-	-
	K	0.33	0.049	0.011	0.60	0.11	0.028	-	-	-

Anmerkungen:

¹⁾ Der transiente Vorgang war unabhängig von der Fahrzeugposition bezüglich der Primärspule.

²⁾ Aufgrund eines erst im Postprocessing identifizierten Defektes des Messaufnehmers liegen hier keine Messdaten vor.

³⁾ Messaufnehmer bewusst in Richtung des Feldmaximums unterhalb des Klappsitzes verlegt und entspricht daher einer extremen Fußhaltung (Knie stark abgewinkelt und Fuß möglichst weit unter die Sitzfläche des Klappsitzes geschoben).

Legende:

FL ... Fuß links, FR ... Fuß rechts, US_L ... Unterschenkel links, US_R ... Unterschenkel rechts, OS_L ... Oberschenkel links, OS_R ... Oberschenkel rechts, UL ... Unterleib, BL ... Brust links, BR ... Brust rechts, K ... Kopf

Tabelle 10.2: Zusammenfassung der Messergebnisse während des induktiven Ladens an der Pilotanlage des TALAKO-Projektes in Köln an den untersuchten Positionen außerhalb des Fahrzeugs (vgl. Kapitel 8.2.2, insbesondere Abbildung 8.8), in Form der gemessenen B_{RMS} -Werte sowie der zugehörigen maximalen Expositionsindizes $Explnd_{1998}$ und $Explnd_{2010}$. Die seitliche Fahrzeugtür war während der Messungen geöffnet. Überschreitungen von Referenzwerten (Expositionsindex > 1) sind in Fettdruck dargestellt.

			stationärer Ladevorgang					
			zentriert			ca. 12 cm seitlich versetzt		
	d ¹⁾ [cm]	H ²⁾ [cm]	B_{RMS} [μT]	$Explnd_{1998}$ [1]	$Explnd_{2010}$ [1]	B_{RMS} [μT]	$Explnd_{1998}$ [1]	$Explnd_{2010}$ [1]
neben Fahrzeug (rechte Seite)	9	8	23.6	3.83	0.89	34.9	5.80	1.34
	15	20	15.7	2.56	0.59	23.2	3.89	0.89
	15	40	8.24	1.34	0.31	11.6	1.93	0.45
	15	60	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾
	15	80	3.10	0.51	0.12	3.94	0.66	0.15
	15	100	2.31	0.38	0.087	2.78	0.46	0.11
	15	120	1.91	0.32	0.074	2.39	0.40	0.093
	15	140	1.78	0.29	0.068	2.26	0.38	0.088
	15	160	1.74	0.29	0.066	2.24	0.37	0.087
	15	180	1.53	0.25	0.059	1.99	0.33	0.077
neben Fahrzeug (linke Seite)	9	8	23.3	3.94	0.91	32.5	5.38	1.25
	15	20	15.5	2.62	0.61	21.6	3.59	0.83
	15	40	8.18	1.39	0.32	10.4	1.73	0.40
	15	60	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾	- ³⁾
	15	80	3.29	0.56	0.13	3.38	0.57	0.13
	15	100	2.55	0.44	0.10	2.53	0.42	0.098
	15	120	2.07	0.361	0.083	2.12	0.36	0.084
	15	140	1.88	0.324	0.075	2.08	0.35	0.081
	15	160	1.76	0.302	0.070	2.19	0.37	0.085
	15	180	1.53	0.266	0.062	1.96	0.33	0.076
Anmerkungen: ¹⁾ Horizontaldistanz von Außenkante Fahrgastraumboden (bei geöffneter Tür) bis Mitte Messaufnehmer. ²⁾ Vertikaldistanz von Oberkante Straße bis Mitte Messaufnehmer. ³⁾ Aufgrund eines erst im Postprocessing identifizierten Defektes des Messaufnehmers liegen hier keine Messdaten vor.								

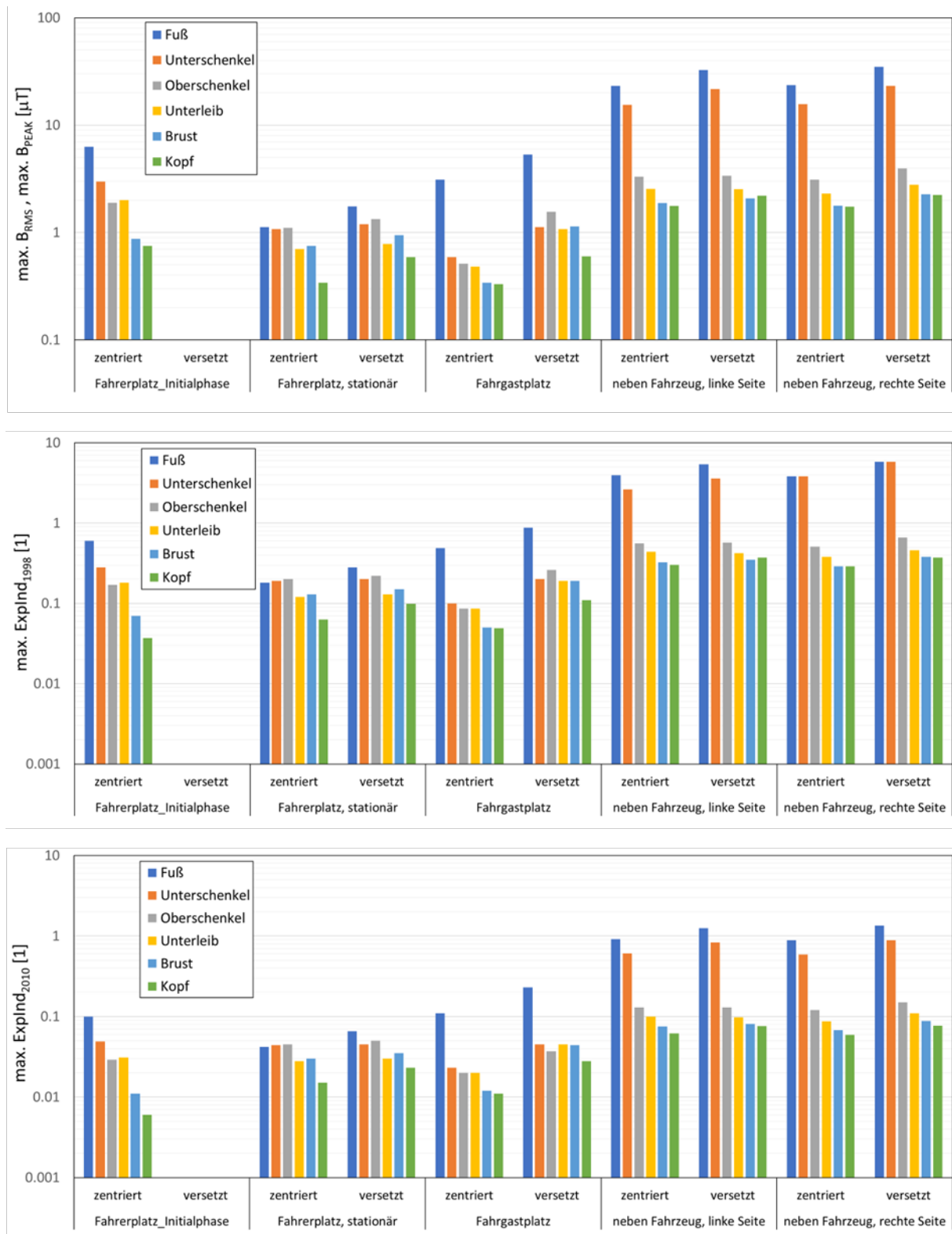


Abbildung 10.6: Grafische Zusammenfassung der Messergebnisse während des induktiven Ladens in Form der maximalen gemessenen B_{RMS} Werte (für die stationäre Phase) bzw. der maximalen gemessenen B_{PEAK} -Werte (am Fahrerplatz für die Initialphase, oben) sowie der zugehörigen maximalen Expositionsdizes $Explnd_{1998}$ (Mitte) und $Explnd_{2010}$ (unten), in den unterschiedlichen Körperregionen. Für die Messungen neben dem Fahrzeug (entlang einer Vertikalen) erfolgte die Zuordnung zu den Körperregionen wie folgt: Fuß: $H = 8$ cm, Unterschenkel: $H = 20$ cm, Oberschenkel: $H = 80$ cm, Unterleib: $H = 100$ cm, Brust: $H = 140$ cm, Kopf = 160 cm.

10.2 Numerische Berechnungen mit anatomischen Körpermodellen

Lokale Überschreitungen von Referenzwerten (Expositionsindizes > 1) treten gemäß den im voranstehenden Kapitel zusammengefassten Messergebnissen nur außerhalb des Fahrzeuges in unmittelbarer Nähe zur Fahrzeugaußenhaut und in Bodennähe (bis ca. 50 cm über der Straßenoberkante) auf.

Um abzuschätzen, wie groß die im Körper induzierten, strahlenschutztechnisch relevanten intrakorporalen Feldgrößen sind, wenn sich Personen in zugänglichen Bereichen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs aufhalten, wurden numerische Simulationen der im Körper anatomischer Modelle induzierten elektrischen Feldstärken E_i und elektrischen Stromdichten J für die Situation von Personen am messtechnisch untersuchten Sitzplatz im Fahrgastraum und die Situation des Stehens neben dem Fahrzeug während des stationären Ladevorgangs durchgeführt.

Die numerischen Feldquellen wurden auf Grundlage von Detailmessungen der Feldverteilung in den relevanten Bereichen und unter Zuhilfenahme von öffentlich zugänglichen Informationen über das TALAKO-Projekt (Proff et al., 2023) entwickelt. Für die messtechnisch untersuchte Situation mit geöffneter Seitentür konnte mit einem vereinfachten Modell, bestehend aus Primärspule, Sekundärspule und dem Fahrzeugboden (Abbildung 10.7, Abbildung 10.8) hinreichend genaue Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung bezüglich der räumlichen Verteilung der magnetischen Flussdichte erreicht werden. Diese betrug $\pm 20\%$ am betrachteten Sitzplatz im Fahrgastraum sowie $\pm 15\%$ im untersuchten Bereich außerhalb des Fahrzeuges.

Alle Berechnungen erfolgten mittels frequenzskalierter FDTD-Methode (Gandhi und Chen, 1992) mit einer Berechnungsfrequenz ($f_{\text{Berechnung}}$) von 5 MHz. Um die im Vergleich zur Zielfrequenz ($f = 85 \text{ kHz}$) bei der Berechnungsfrequenz überhöhten Wirbelstromverluste bei der Berechnung zu kompensieren, wurde die elektrische Leitfähigkeit der Fahrzeugbodenplatte um den Faktor $f_{\text{Berechnung}} / f$ reduziert (Zang et al., 2017). Anstatt der Leitfähigkeit von Aluminium ($3.7 \cdot 10^7 \text{ S/m}$) wurde daher ein Wert von $6.3 \cdot 10^5 \text{ S/m}$ in der Berechnung verwendet. Dabei kam der Hardware-beschleunigte FDTD-Solver der Simulationsplattform Sim4Life V 7.2.3 zum Einsatz. Insgesamt wurden für die Berechnungen drei unterschiedliche hochaufgelöste numerische Körpermodelle der Virtual Population (IT'IS Foundation, Zürich, Schweiz) verwendet. Für die Situationen innerhalb des Fahrzeugs kamen ein weibliches und ein männliches Modell (Duke V 3.1.1 und Ella V 3.1) zum Einsatz. Diese Modelle erlauben eine Veränderung der Körperhaltung entsprechend der Sitzhaltung im betrachteten Fahrzeug. Für die Situation des Stehens neben dem Fahrzeug wurde, neben dem Körpermodell Duke, das Körpermodell eines Kindes verwendet. Die Originalkörpergröße dieses Modells beträgt 109 cm. Um die Situation kleinerer Kinder, deren Kopf näher am Feldmaximum auf Straßenniveau liegt, anzunähern, wurde das Modell auf eine Körpergröße von 90 cm verkleinert.

Tabelle 10.3 fasst die betrachteten Expositionsszenarien zusammen.

Die relevanten elektrischen Eigenschaften der Gewebe (elektrische Leitfähigkeit) wurden auf Basis der IT'IS Datenbank für thermische und elektromagnetische Parameter biologischer Gewebearten (Hasgall et al., 2022) gewählt („Low Frequency (Conductivity)“ V4.1). Die räumliche Auflösung der Rechendomäne im interessierenden Bereich betrug $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$.

Tabelle 10.3: Im Rahmen der numerischen Berechnungen betrachtete Expositionsszenarien.

Szenario	verwendete Körpermodelle
Person sitzend am rechten Sitzplatz (gegen die Fahrtrichtung) im Fahrgastraum	Duke (männlich, 177 cm) Ella (weiblich, 163 cm)
Person / Kind stehend neben dem Fahrzeug im Feldmaximum	Duke (männlich, 177 cm) Roberta-verkleinert (weiblich, 90 cm)

Die Berechnungsergebnisse werden als Expositionsindex gemäß ICNIRP 2010 bezüglich der maximalen, über ein Volumen von $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg}$ angegeben sowie zusätzlich deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil (siehe auch Kapitel 9.4).

Zusätzlich erfolgt die Angabe als Expositionsindex gemäß ICNIRP 1998 bezüglich der maximalen, über eine Fläche von 1 cm^2 quer zur Stromflussrichtung gemittelten induzierten Stromdichte J_{avg} sowie zusätzlich deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil.

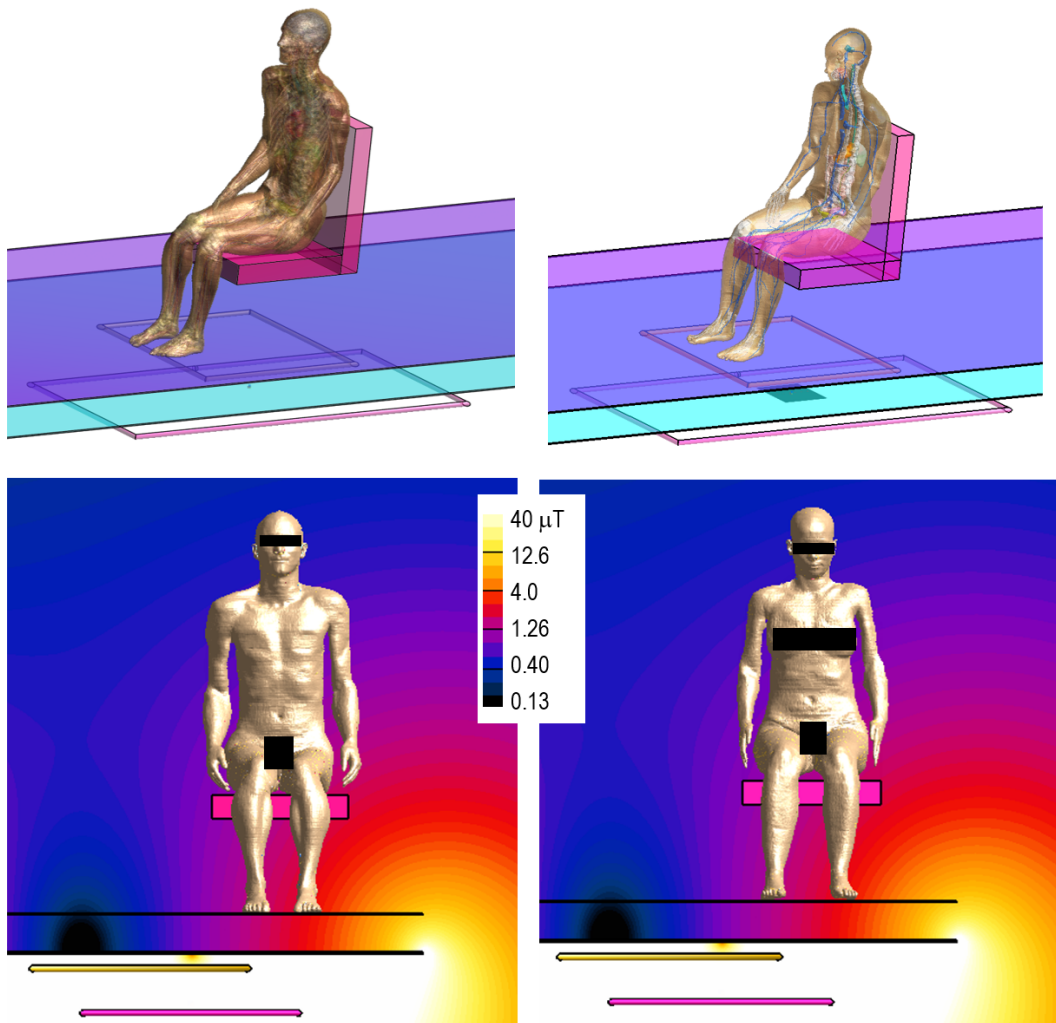


Abbildung 10.7: Körpermodelle Duke und Ella, sitzend am Passagierplatz mit den höchsten Magnetfeldimmissionen im Fahrzeug. Oben: Transparentansicht mit sichtbarem Fahrzeugboden und numerischer Feldquelle. Unten: Frontalansichten der Körpermodelle und räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte in einer Frontalebene durch die Körpermodelle im Feldmaximum.

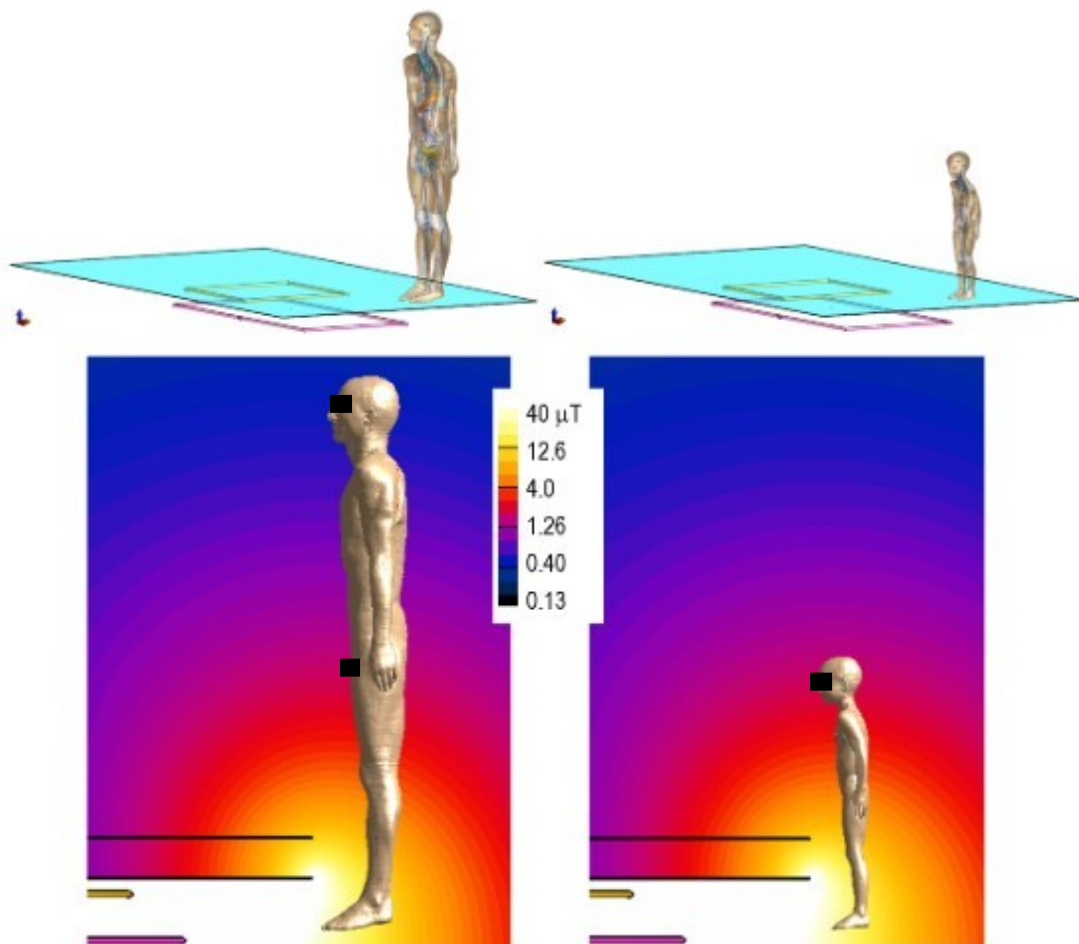


Abbildung 10.8: Körpermodelle Duke und Roberta (verkleinert auf Körpergröße 90 cm), stehend in ca. 15 cm Horizontalabstand zur Außenkante des Fahrgastraumbodens im Bereich höchster magnetischer Flussdichte entlang des Fahrzeugs. Oben: Transparentansicht mit sichtbarem Fahrzeugboden und numerischer Feldquelle. Unten: Seitenansichten der Körpermodelle und räumliche Verteilung der magnetischen Flussdichte in einer Sagittalebene durch die Körpermodelle im Feldmaximum.

10.2.1 Unsicherheiten der numerischen Berechnungen

Neben den Unsicherheiten zufolge einer eingeschränkt genauen numerischen Nachbildung der realen Feldquellen ($\pm 20\%$ bzw. $\pm 15\%$, siehe oben), sind die Unsicherheiten bezüglich der elektrischen Gewebeeigenschaften einer der relevantesten Unsicherheitsbeiträge. Da für viele Gewebe diese Daten nur mit großer Unsicherheit behaftet verfügbar sind, können extreme Kombinationen dieser Daten zu entsprechend hohen Unsicherheiten ($> 100\%$) bezüglich der in anatomischen Körpermodellen berechneten induzierten elektrischen Feldstärken bzw. Stromdichten führen, insbesondere dann, wenn zu beiden Seiten einer Grenzfläche zwischen niedrig- und hochleitfähigen Geweben (z. B. Fett und Muskel) jeweils extreme Werte eingesetzt werden, die zu maximalem Leitfähigkeitskontrast führen. Für realistische Gewebeparameterkombinationen lassen Daten aus der Literatur (z. B. Schmid et al., 2019) die Annahme einer Unsicherheit von ca. $\pm 20\%$ ($k = 1$) als sinnvoll erscheinen, sofern die räumliche Auflösung der Rechenmodelle hinreichend fein ($\leq 1\text{ mm}$) gewählt wurde. Die zufolge der Unsicherheiten der numerischen Feldquelle und der Gewebeparameter resultierende Gesamtunsicherheit ist, unter Annahme von Normalverteilung und statistischer Unabhängigkeit der Einzelbeiträge daher bei ca. $\pm 28\%$ bzw. $\pm 25\%$ ($k = 1$) anzusetzen.

Um auch das Ausmaß der Variationen über unterschiedliche Körpermodelle grob abschätzen zu können, wurden alle Berechnungen mit zwei unterschiedlichen Körpermodellen durchgeführt.

10.2.2 Ergebnisse der Berechnungen im Fahrzeug

Tabelle 10.4 und Tabelle 10.5 sowie Abbildung 10.9 und Abbildung 10.10 fassen die Berechnungsergebnisse zusammen.

Tabelle 10.4: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse am betrachteten Sitzplatz im Fahrgastraum in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Volumen von $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$) für PNS-Gewebe und ZNS-Gewebe im Kopf.

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP 2010,GP}$							
	$E_{i,avg,max}$		$E_{i,avg,p99.99}$		$E_{i,avg,p99.9}$		$E_{i,avg,p99.0}$	
	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS
Duke	0.0011	0.121	0.0010	0.038	0.0009	0.018	0.0008	0.007
Ella	0.0011	0.028	0.0010	0.017	0.0009	0.012	0.0080	0.006

Tabelle 10.5: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse am betrachteten Sitzplatz im Fahrgastraum in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Flächenelement von 1 cm^2 quer zur Stromflussrichtung gemittelte induzierte elektrische Stromdichte ($J_{avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($J_{avg,p99.99}$, $J_{avg,p99.9}$, $J_{avg,p99.0}$) für ZNS-Gewebe im Kopf sowie im Rückenmark.

	Expositionsindizes für $J_{i,ICNIRP 1998,GP}$			
	$J_{avg,max}$	$J_{avg,p99.99}$	$J_{avg,p99.9}$	$J_{avg,p99.0}$
Duke	0.0067	0.0060	0.0056	0.0051
Ella	0.0062	0.0058	0.0054	0.0049

Wie bereits aufgrund der Tatsache, dass an den untersuchten Positionen im Inneren des Fahrzeuges keine Überschreitungen von Referenzwerten festgestellt wurden, vermutet, zeigen die numerischen Berechnungsergebnisse Ausschöpfungsgrade der Basisgrenzwerte für periphere Gewebe lediglich im unteren einstelligen Prozentbereich (bei Verwendung des p99.99 bzw. des p99.9). In ZNS-Geweben bleiben die Ausschöpfungsgrade sogar unterhalb von 1 % der Basisgrenzwerte.

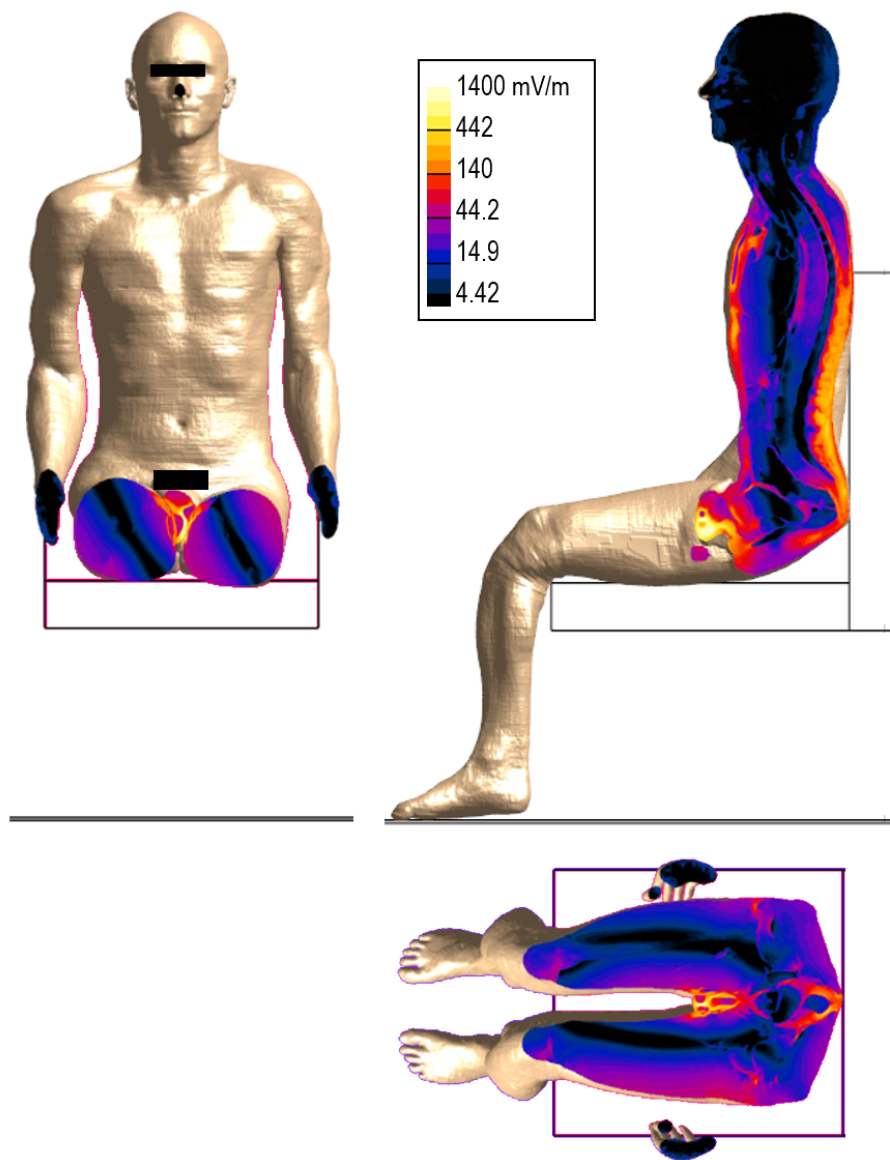


Abbildung 10.9: Körpermodell Duke am betrachteten Sitzplatz im Fahrgastraum sitzend mit Verteilung der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg,RMS}$ in drei Orthogonalebene durch das Maximum (im Unterhautfettgewebe im Unterleibsbereich).

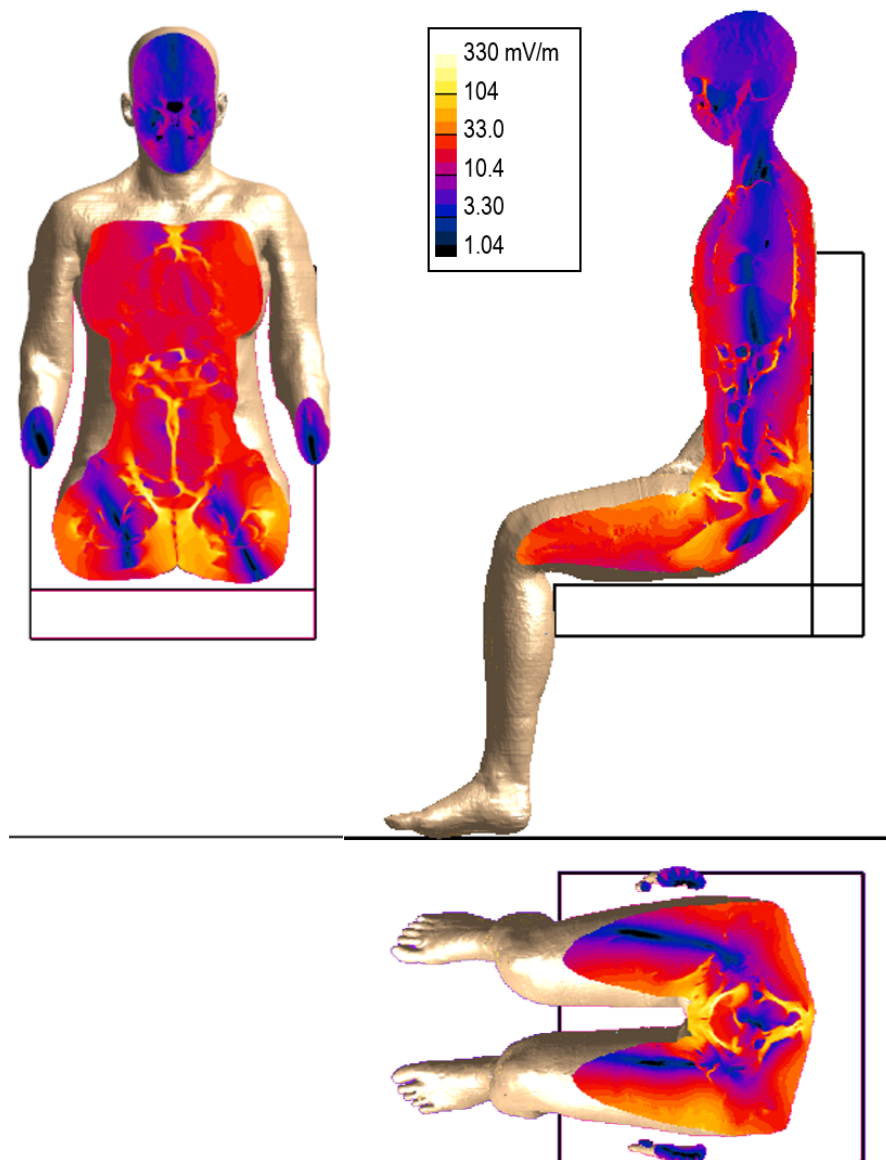


Abbildung 10.10: Körpermodell Ella am betrachteten Sitzplatz im Fahrgastraum sitzend mit Verteilung der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg,RMS}$ in drei Orthogonalebene durch das Maximum (im Fettgewebe im Unterleibsbereich).

10.2.3 Ergebnisse der Berechnungen für Personen außerhalb des Fahrzeugs stehend

Tabelle 10.6 und Tabelle 10.7 sowie Abbildung 10.11 und Abbildung 10.12 fassen die Berechnungsergebnisse zusammen.

Tabelle 10.6: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse außerhalb des Fahrzeugs in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Volumen von $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$) für PNS-Gewebe und ZNS-Gewebe im Kopf.

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP\ 2010,GP}$							
	$E_{i,avg,max}$		$E_{i,avg,p99.99}$		$E_{i,avg,p99.9}$		$E_{i,avg,p99.0}$	
	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS	ZNS	PNS
Duke	0.0011	0.062	0.0009	0.033	0.0008	0.024	0.0007	0.013
Roberta	0.0021	0.058	0.0020	0.037	0.0018	0.026	0.0016	0.015

Tabelle 10.7: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse außerhalb des Fahrzeugs in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Flächenelement von 1 cm² quer zur Stromflussrichtung gemittelte induzierte elektrische Stromdichte ($J_{avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($J_{avg,p99.99}$, $J_{avg,p99.9}$, $J_{avg,p99.0}$) für ZNS-Gewebe im Kopf sowie im Rückenmark.

	Expositionsindizes für $J_{ICNIRP\ 1998,GP}$			
	$J_{avg,max}$	$J_{avg,p99.99}$	$J_{avg,p99.9}$	$J_{avg,p99.0}$
Duke	0.0062	0.0055	0.0051	0.0046
Roberta	0.0144	0.0143	0.0138	0.0129

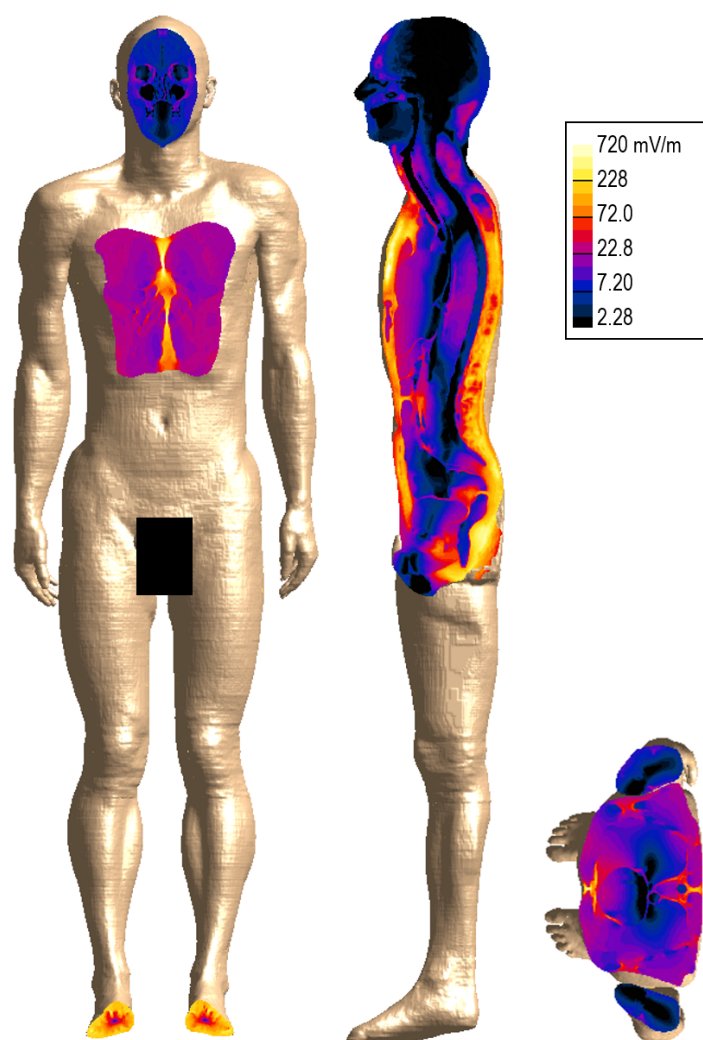


Abbildung 10.11: Körpermodell Duke stehend neben dem Fahrzeug mit der Verteilung der über 2 x 2 x 2 mm³ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg,RMS}$ in drei Orthogonalebene durch das Maximum (im Unterhautfettgewebe der Brust).

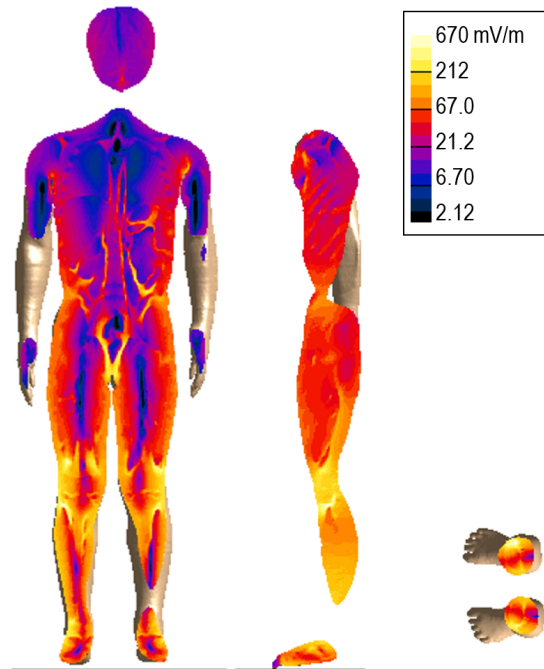


Abbildung 10.12: Körpermodell Roberta (verkleinert auf Körpergröße 90 cm), stehend neben dem Fahrzeug mit der Verteilung der über $2 \times 2 \times 2 \text{ mm}^3$ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,\text{avg,RMS}}$ in drei Orthogonalebene durch das Maximum (im Fettgewebe im Kniebereich).

In den hier betrachteten Szenarien, bei denen im Höhenbereich bis zu ca. 50 cm über Straßenniveau Referenzwertüberschreitungen in Hinblick auf ICNIRP 1998 bestehen, zeigen die numerischen Berechnungen ebenfalls keine Konflikte mit Basisgrenzwerten für die induzierten elektrischen Feldstärken und Stromdichten gemäß ICNIRP 2010 und ICNIRP 1998 auf, wobei die Ausschöpfungsgrade der Basisgrenzwerte für PNS-Gewebe den mittleren einstelligen Prozentbereich erreichen können. Bezüglich ZNS-Gewebe können für Kinder, die mit dem Kopf dem Feldmaximum deutlich näher sind als Erwachsene, die Ausschöpfungsgrade der Basisgrenzwerte für ZNS-Gewebe den unteren einstelligen Prozentbereich erreichen. Für Erwachsene bleiben die Ausschöpfungsgrade der Basisgrenzwerte für ZNS-Gewebe bei unterhalb von 1 %.

11 Zusammenfassung und Gesamtdiskussion der Ergebnisse

Die in den voranstehenden Abschnitten dokumentierten Mess- und Berechnungsergebnisse hinsichtlich der Exposition von Personen, die sich während des Ladens von Elektrofahrzeugen im Inneren oder in unmittelbarer Nähe der Fahrzeuge befinden, zeigen zunächst klar, dass für die untersuchten Expositionsszenarien bei üblichen Verhaltensweisen³⁵ keine Überschreitungen von Basisgrenzwerten für die Allgemeinbevölkerung gemäß den Empfehlungen der ICNIRP 1998 und 2010 zu erwarten sind. Dieser Befund deckt sich auch mit der bisher vorliegenden Literatur.

Kleinträumige Überschreitungen von Referenzwerten für die Allgemeinbevölkerung sind jedoch möglich.

Im Fall von konduktiven Ladevorgängen wurden diese lokalen Referenzwertüberschreitungen durch transiente Vorgänge mit vergleichsweise hohen Spitzenwerten der magnetischen Flussdichte in der Initiierungsphase des Ladevorgangs verursacht. Während des stationären konduktiven Ladevorgangs wurden in üblichen Aufenthaltsbereich keine Referenzwertüberschreitungen festgestellt. Die Ausschöpfung der Referenzwerte liegt typischerweise im unteren einstelligen Prozentbereich und darunter. Insbesondere beim DC-Laden bleibt die Ausschöpfung der Referenzwerte typisch bei deutlich unter 1 %. Lediglich unmittelbar am Ladekabel bzw. am Ladestecker wurden beim AC-Laden magnetische Flussdichten geringfügig oberhalb der Referenzwerte, auch während des stationären Ladens beobachtet (nicht jedoch beim DC-Laden).

Bei Zugrundelegung des gegenwärtigen Bewertungsparadigmas der ICNIRP stellte sich DC-Laden insgesamt als strahlenschutztechnisch weniger relevant (geringere Expositionsindizes) heraus als AC-Laden.

Im Fall des untersuchten induktiven Ladesystems sind die maximalen Magnetfeldimmissionen innerhalb und in unmittelbarer Nähe außerhalb des Fahrzeuges durch den stationären Ladevorgang bestimmt (keine relevanten Transienten beim Ein- und Ausschalten der 85 kHz Energieübertragung). Einzig am Fahrerplatz des untersuchten Fahrzeugs konnten in der Initialphase Transiente gemessen werden, die, bewertet gemäß den ICNIRP Empfehlungen, im Fußbereich zu etwas größeren Expositionsindizes führte als die Immissionen während des stationären Ladens. In typischen Aufenthaltsbereichen innerhalb des untersuchten Fahrzeuges erreichten die gemessenen Magnetfeldimmissionen lokal den mittleren zweistelligen Prozentbereich des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Außerhalb des Fahrzeuges wurden auf dem Straßenniveau entlang des Fahrzeugumfangs lokal 5 bis 6-fache Überschreitungen des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 festgestellt, die jedoch mit zunehmender Höhe über der Straße schnell abnehmen, sodass es ab ca. 50 cm über dem Straßenniveau zu keinen Überschreitungen mehr kommt.

Will man konduktive und induktive Ladesysteme aus strahlenschutztechnischer Sicht vergleichen, so deuten die durchgeführten Messungen und Berechnungen darauf hin, dass konduktives AC-Laden im Hinblick auf kurzzeitig auftretende Expositions-Spitzenwerte und induktives Laden im Hinblick auf die langfristige mittlere Exposition strahlenschutztechnisch relevanter ist.

³⁵ Im Fall von induktiven Ladesystemen ist darunter zu verstehen, dass sich keine Körperteile unterhalb des Fahrzeugbodens befinden.

12 Literatur

- Arduino, A., Bottauscio, O., Chiampi, M., Giaccone, L., Liorni, I., Kuster, N., Zilberti, L., Zucca, M., 2020. Accuracy Assessment of Numerical Dosimetry for the Evaluation of Human Exposure to Electric Vehicle Inductive Charging Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 62, 1939–1950. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2019.2954111>
- BMU, 2013. 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit).
- Chen, X.-L., Benkler, S., Chavannes, N., De Santis, V., Bakker, J., van Rhoon, G., Mosig, J., Kuster, N., 2013. Analysis of human brain exposure to low-frequency magnetic fields: A numerical assessment of spatially averaged electric fields and exposure limits. *Bioelectromagnetics* 34, 375–384. <https://doi.org/10.1002/bem.21780>
- Christ, A., Kainz, W., Hahn, E.G., Honegger, K., Zefferer, M., Neufeld, E., Rascher, W., Janka, R., Bautz, W., Chen, J., Kiefer, B., Schmitt, P., Hollenbach, H.-P., Shen, J., Oberle, M., Szczerba, D., Kam, A., Guag, J.W., Kuster, N., 2010. The Virtual Family--development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations. *Phys Med Biol* 55, N23-38. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/55/2/N01>
- De Santis, V., Campi, T., Cruciani, S., Laakso, I., Feliziani, M., 2018. Assessment of the Induced Electric Fields in a Carbon-Fiber Electrical Vehicle Equipped with a Wireless Power Transfer System. *Energies* 11, 684. <https://doi.org/10.3390/en11030684>
- Diao, Y., Liu, L., Deng, N., Lyu, S., Hirata, A., 2023. Tensor-conductance model for reducing the computational artifact in target tissue for low-frequency dosimetry. *Physics in Medicine & Biology* 68, 205014. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/acfae0>
- Eiden, 2021. Magnetic Field Measurement System 7904A-001 [WWW Document]. URL https://www.eiden-gp.co.jp/product/pdf/magnetic_field/7904A_e_Rev2.pdf
- EU, 2014. Directive 2014/35/EU on the harmonisation of the laws of the Member States relating to the making available on the market of electrical equipment designed for use within certain voltage limits. *Official Journal of the European Union* L96/357-L96/374.
- Europäische Gemeinschaft, 1999. 1999/519/EG: Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz - 300 GHz). *Amtsblatt Nr. L 199 vom 30/07/1999 S. 0059-0070*.
- Gandhi, O.P., Chen, J.-Y., 1992. Numerical dosimetry at power-line frequencies using anatomically based models. *Bioelectromagnetics* 13, 43–60. <https://doi.org/10.1002/bem.2250130706>
- GB, 2014. GB 8702-2014 - Controlling limits for electromagnetic environment.
- GB/T, 2018. GB/T 37130-2018 - Measurement methods for electromagnetic fields of vehicle with regard to human exposure.
- Gomez-Tames, J., Laakso, I., Haba, Y., Hirata, A., Poljak, D., Yamazaki, K., 2018. Computational Artifacts of the In Situ Electric Field in Anatomical Models Exposed to Low-Frequency Magnetic Field. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 60, 589–597. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2017.2748219>
- Gosselin, M.-C., Neufeld, E., Moser, H., Huber, E., Farcito, S., Gerber, L., Maria Jedensjö, Hilber, I., Gennaro, F.D., Lloyd, B., Cherubini, E., Szczerba, D., Wolfgang Kainz, Kuster, N., 2014. Development of a new generation of high-resolution anatomical models for medical device evaluation: the Virtual Population 3.0. *Phys. Med. Biol.* 59, 5287. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/59/18/5287>
- Hasgall, P., Di Gennaro, F., Baumgartner, C., Neufeld, E., Lloyd, B., Gosselin, M.-C., Payne, D., Klingeböck, A., Kuster, N., 2022. IT'IS Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues. Version 4.1, Feb 22, 2022 [WWW Document]. URL <https://itis.swiss/database> (accessed 7.6.22).
- Hirtl, R., Schiessl, K., Überbacher, R., David, M., Schmid, G., 2020. Evaluation of action levels for limb exposure according to 2013/35/EU for different hand postures and skin modelling approaches. Presented at the BioEM 2020, Oxford.
- Hirtl, R., Schmid, G., Überbacher, R., David, M., Kampusch, S., Kaniusas, E., 2019. Bewertung von stark lokalisierten Magnetfeldexpositionen der Hände am Arbeitsplatz

- (Abschlussbericht No. SL-LE-001/19). AUVA - Allgemeine Unfallversicherungsanstalt, Wien.
- ICNIRP, 2010. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Phys* 99, 818–836.
<https://doi.org/10.1097/HP.0b013e3181f06c86>
- ICNIRP, 2009. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. *Health Phys* 96, 504–514. <https://doi.org/10.1097/01.HP.0000343164.27920.4a>
- ICNIRP, 2003. Guidance on determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. *Health Phys* 84, 383–387.
- ICNIRP, 1998. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). *Health Phys* 74, 494–522.
- IEC 61786-1, 2013. IEC 61786-1:2013 -Measurement of DC magnetic, AC magnetic and AC electric fields from 1 Hz to 100 kHz with regard to exposure of human beings - Part 1: Requirements for measuring instruments.
- IEC 61980-1, 2020. IEC 61980-1:2020 - Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements.
- IEC 61980-1, 2015. IEC 61980-1:2015 - Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements.
- IEC 61980-2, 2023. IEC 61980-2:2023 - Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 2: Specific requirements for MF-WPT system communication and activities.
- IEC 61980-3, 2022. IEC 61980-3:2022 - Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 3: Specific requirements for magnetic field wireless power transfer systems.
- IEC 62764-1, 2022. IEC 62764-1:2022 - 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 63184, 2024. Assessment methods of the human exposure to electric and magnetic fields from wireless power transfer systems - models, instrumentation, measurement and numerical methods and procedures (Frequency range of 3 kHz to 30 MHz).
- IEC TR 62905, 2018. IEC TR 62905:2018 - Exposure assessment methods for wireless power transfer systems.
- IEC TS 62764-1, 2019. 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.
- IEEE C95.1-2019, 2019. IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz. IEEE Std C95.1-2019 (Revision of IEEE Std C95.1-2005/ Incorporates IEEE Std C95.1-2019/Cor 1-2019) 1–312. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8859679>
- Keller, H., 2017. The Weighted Peak Method in the Time Domain Compared With Alternative Methods for Assessing LF Electric and Magnetic Fields. *Health Physics* 113, 54–65.
<https://doi.org/10.1097/HP.0000000000000667>
- Kos, B., Valič, B., Kotnik, T., Gajšek, P., 2012. Occupational exposure assessment of magnetic fields generated by induction heating equipment—the role of spatial averaging. *Physics in Medicine and Biology* 57, 5943–5953.
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/19/5943>
- Laakso, I., Hirata, A., 2012. Reducing the staircasing error in computational dosimetry of low-frequency electromagnetic fields. *Physics in medicine and biology* 57, N25-34.
<https://doi.org/10.1088/0031-9155/57/4/N25>
- Lennerz, C., Horlbeck, L., Weigand, S., Grebmer, C., Blazek, P., Brkic, A., Semmler, V., Haller, B., Reents, T., Hessling, G., Deisenhofer, I., Lienkamp, M., Kolb, C., O'Connor, M., 2020. Patients with pacemakers or defibrillators do not need to worry about e-Cars: An observational study. *Technology and Health Care* 28, 1–12.
<https://doi.org/10.3233/THC-191891>

- Lennerz, C., O'Connor, M., Horlbeck, L., Michel, J., Weigand, S., Grebmer, C., Blazek, P., Brkic, A., Semmler, V., Haller, B., Reents, T., Hessling, G., Deisenhofer, I., Whittaker, P., Lienkamp, M., Kolb, C., 2018. Electric Cars and Electromagnetic Interference With Cardiac Implantable Electronic Devices: A Cross-sectional Evaluation. *Ann Intern Med* 169, 350–352. <https://doi.org/10.7326/M17-2930>
- Liorni, I., Lisewski, T., Capstick, M.H., Kuehn, S., Neufeld, E., Kuster, N., 2020. Novel Method and Procedure for Evaluating Compliance of Sources With Strong Gradient Magnetic Fields Such as Wireless Power Transfer Systems. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility* 62, 1323–1332. <https://doi.org/10.1109/TEM.2019.2924519>
- Maradei, F., Ahn, S., Campi, T., Covic, G., Cruciani, S., Hirata, A., Wang, S., Feliziani, M., 2024. EMC and EMF Safety Aspects of Wireless Power Transfer Systems for e-Mobility. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine* 13, 74–92. <https://doi.org/10.1109/MEM.2024.10834399>
- NPE, 2020. Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020 [WWW Document]. Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020. URL <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/mobilitaet/roadmap-elektromobilitaet-67928> (accessed 10.18.21).
- NPM, 2021. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität [WWW Document]. Nationale Plattform Zukunft der Mobilität. URL <https://www.plattform-zukunft-mobilitaet.de> (accessed 10.18.21).
- Okumura, T., Iguchi, E., Kojima, K., 2017. Electro-magnetic interference of EV quick chargers on implantable cardiac pacemakers, in: 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE). Presented at the 2017 IEEE 6th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 1–3. <https://doi.org/10.1109/GCCE.2017.8229474>
- Pääkkönen, R., Korpinen, L., 2019. LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELDS INSIDE CARS. *Radiation Protection Dosimetry* 187, 268–271. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncz248>
- Proff, H., Clemens, M., Marrón, P.J., Schmülling, B. (Eds.), 2023. Induktive Taxiladung für den öffentlichen Raum: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte. Springer Fachmedien, Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-39979-5>
- SAE, 2024. J2954: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology - SAE International.
- Schmid, G., 2018. Expositionsbewertung in unmittelbarer Nähe zu Magnetfeldquellen: Wie wirkt sich die Größe der Magnetfeldsonde auf das Bewertungsergebnis aus? *Strahlenschutzpraxis* Heft 03/2018, S. 64-69.
- Schmid, G., Hirtl, R., 2016. On the importance of body posture and skin modelling with respect to in situ electric field strengths in magnetic field exposure scenarios. *Physics in Medicine and Biology* 61, 4412. <https://doi.org/10.1088/0031-9155/61/12/4412>
- Schmid, G., Hirtl, R., Samaras, T., 2019a. Benchmark of different assessment methods for non-sinusoidal magnetic field exposure in the context of European Directive 2013/35/EU. *J. Radiol. Prot.* <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab0988>
- Schmid, G., Hirtl, R., Samaras, T., 2019b. Dosimetric issues with simplified homogeneous body models in low frequency magnetic field exposure assessment. *J. Radiol. Prot.* 39, 794–808. <https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab25be>
- Schmid, G., Hirtl, R., Schneeweiss, P., Kainz, J., Kubocz, M., Drießen, S., Vogt, M., Kalb, L., Silvestro, D., 2025. Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität: Vorhaben 3620S82473 (Ergebnisbericht – Teil 1: Elektromagnetische Felder beim Fahren No. BfS-RESFOR-243/25), Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz.
- Schmid, G., Überbacher, R., Cecil, S., Petric, B., Göth, P., 2009. Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte: Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben; Vorhaben 3608S04574; SL-LE-0004/09 (No. BfS-RESFOR-21/09). Bundesamt für Strahlenschutz (BfS).
- Schneeweiss, P., Hirtl, R., Schmid, G., 2023. Nonsinusoidal in situ electric field caused by magnetic deactivator device for EAS labels—assessment of field strength inside a

- detailed anatomical hand model. *Journal of Radiological Protection* 43, 011514.
<https://doi.org/10.1088/1361-6498/acb955>
- SSK, 2019. Elektromagnetische Felder in Automobilen durch Funkanwendungen, induktives Laden und elektrisches Fahren. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung. 1–43.
- Trentadue, G., Pinto, R., Salvetti, M., Zanni, M., Pliakostathis, K., Scholz, H., Martini, G., 2020a. Assessment of Low-Frequency Magnetic Fields Emitted by DC Fast Charging Columns. *Bioelectromagnetics* 41, 308–317. <https://doi.org/10.1002/bem.22254>
- Trentadue, G., Zanni, M., Martini, G., 2020b. Assessment of low frequency magnetic fields in electrified vehicles. 1–47. <https://doi.org/10.2760/056116>
- Überbacher, R., Netzker, G., Hirtl, R., Schiessl, K., Schmid, G., 2019. Development of detailed surface-based anatomical hand models for computational dosimetry, in: PA-31. Presented at the BioEM 2019, Montpellier.
- VDA, V. der A. e.V., 2021. VDA 460-100 - Bewertungsempfehlung für den Personenschutz gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern im Kraftfahrzeug.
- Zang, M., Clemens, M., Cimala, C., Streckert, J., Schmuelling, B., 2017. Simulation of Inductive Power Transfer Systems Exposing a Human Body With Two-Step Scaled-Frequency FDTD Methods. *IEEE Transactions on Magnetics* 53, 1–4.
<https://doi.org/10.1109/TMAG.2017.2654798>