Bundesamt
für Strahlenschutz

Ressortforschungsberichte zum Strahlenschutz

Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität

Vorhaben 3620S82473

Ergebnisbericht – Teil 1: Elektromagnetische Felder beim Fahren

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, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMUV (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-243/25

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2025031250843

Salzgitter, April 2025

SEIBERSDORF LABORATORIES

R E P O R T

Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität

Ergebnisbericht – Teil 1:

Elektromagnetische Felder beim Fahren

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

11.11.2024

V1.0

UNIKLINIK RWTH AACHEN

femu Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit

ADAC

November 2024

Bestimmung von Expositionen gegenüber elektromagnetischen Feldern der Elektromobilität

Ergebnisbericht – Teil 1:
Elektromagnetische Felder beim Fahren

Auftraggeberin

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

Auftragsnummer: 3620S82473

Gernot Schmid[1], Rene Hirtl[1], Pia Schneeweiß[1], Johannes Kainz[1,2], Michael Kubocz[2], Sarah Drießen[2], Matthias Vogt[3], Luis Kalb[3], Dino Silvestro[3]

[1]Seibersdorf 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

[3]ADAC 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 9

Abstract 11

1 Einleitung 13

2 Aktuelle Regelungen, Messvorschriften und Empfehlungen mit Relevanz für die Expositionsbeurteilung im Bereich Elektromobilität 15

2.1 Allgemeines 15

2.2 Einordnung der durch Elektromobilität verursachten Magnetfelder im Hinblick auf die 26. BImSchV 15

2.3 Messvorschriften zur Erfassung und Bewertung der Exposition von Personen beim Fahren 15

2.3.1 Internationales / Europäisches Dokument IEC 62764-1:2022 15

2.3.2 Deutsche VDA-Empfehlung 460-100 18

2.3.3 Chinesischer Standard GB/T 37130-2018 19

2.3.4 Situation in den USA 21

2.3.5 Zusammenfassende Gegenüberstellung 22

3 Prinzipien und relevante Spezifikationen von Messsystemen 23

3.1 Allgemeines 23

3.2 Messprinzipien für niederfrequente Magnetfelder 24

3.2.1 Unterscheidung nach Sensor-Prinzip 24

3.3 Erforderliche Eigenschaften für die konkrete Aufgabenstellung 25

3.3.1 Messfrequenzbereich 25

3.3.2 Sensitivität und Aussteuergrenze 25

3.3.3 Messaufnehmergröße 26

3.3.4 Abtasteigenschaften 27

3.3.5 Erfassung / Bewertung des Zeitsignals 27

3.3.6 Simultane Messung an mehreren Positionen 28

3.4 Vergleichende Diskussion unterschiedlicher Messsysteme 28

3.4.1 Systeme bzw. Geräte mit nur einem isotropen Messkanal 28

3.4.2 Personendosimeter (Exposimeter) 32

3.4.3 Mehrkanal-Messsysteme 32

4 Literaturstudie betreffend Exposition während des Fahrens durch Fahrzeuge mit elektrischen Antriebssystemen 38

4.1 Methoden für die Literaturrecherche 38

4.2 Arbeiten über Messungen an BEV und/oder PHEV und/oder HEV 38

4.2.1 Eingesetzte Messgeräte, Messmethoden und betrachtete Fahrzeugzustände 38

4.2.2 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten 39

4.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse 42

4.3 Arbeiten über Simulationen der Exposition in BEV und/oder PHEV 42

4.3.1 Eingesetzte Methoden 42

4.3.2 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten 43

4.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse 44

4.4 Arbeiten betreffend Magnetfeldexposition in elektrisch betriebenen öffentlichen Verkehrsmitteln 44
4.4.1 Eingesetzte Methoden 44
4.4.2 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten 44
4.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse 45
4.5 Tabellen mit Mess- und Berechnungsergebnissen sowie weiteren Informationen aus den in den Kapiteln 4.2 – 4.4 angeführten Literaturstellen 46

5 Markt- und Technik-Übersicht zu Elektroautos 68
5.1 Karosserieformen 68
5.2 Sitzplätze 69
5.3 Antriebstechnologie 69
5.4 Position der elektrischen Komponenten 70
5.5 Analyse der Marktdaten 71
5.6 Auswahlkriterien für die zu untersuchenden BEV und PHEV 71

6 Markt- und Technik-Übersicht zu einspurigen BEV 75

7 Voruntersuchungen und Testmessungen 76
7.1 Testmessungen am Rollenprüfstand im ADAC Technik Zentrum 76
7.1.1 Voruntersuchungen an den verfügbaren Rollenprüfständen 76
7.1.2 Testmessungen mit zweispurigen BEV 80
7.1.3 Testmessungen mit einem einspurigen BEV 88
7.2 Testmessungen am ADAC-Testgelände 89
7.3 Testmessungen während einer Realfahrt in einem zweispurigen BEV 90
7.4 Analyse der Messdaten bezüglich Störbeeinflussungen durch Erschütterungen bei Realfahrten 95

8 Zusammenfassung der optimierten Messprozeduren 98
8.1 Vorgehen bei den Messungen in zweispurigen BEV und PHEV 98
8.2 Messungen an einspurigen BEV 99

9 Magnetfeldmessungen in zweispurigen Fahrzeugen 101
9.1 Messmethoden 101
9.1.1 Messungen am Rollenprüfstand 102
9.1.2 Messungen am Testgelände 104
9.1.3 Messungen im Realverkehr 105
9.2 Unsicherheitsbetrachtungen 106
9.2.1 Eingeschränkte Kontrolle über Hintergrundimmissionen in den Fahrzeugen (u_1) 106
9.2.2 Reproduzierbarkeit der Fahrzustände (u_2) 108
9.2.3 Einfluss der Reifenmagnetisierung (u_3) 108
9.2.4 Aussagekraft der Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte 109
9.2.5 Positionierungsunsicherheit der Messsonden (u_5) 111
9.2.6 Kalibrierung und Isotropie der Messsonden (u_{6a} und u_{6b}) 111
9.2.7 Hintergrund-Störfelder durch den Rollenprüfstand (u_7) 112
9.2.8 Bewegungsartefakte (u_8) 113
9.2.9 Resultierende Gesamtunsicherheit 113
9.2.10 Repräsentativität der untersuchten Messpositionen 117
9.3 Untersuchte Fahrzeuge 118

9.4 Messergebnisse 118
9.4.1 Renault Zoe 120
9.4.2 Tesla Model 3 139
9.4.3 BMW i3 157
9.4.4 Volkswagen ID.3 176
9.4.5 Audi e-tron quattro 193
9.4.6 Peugeot e-208 212
9.4.7 Porsche Taycan 231
9.4.8 Aiways U5 251
9.4.9 Hyundai Ioniq 5 268
9.4.10 Fiat 500e 286
9.4.11 Opel Corsa Electric 303
9.4.12 Volkswagen Passat PHEV 320
9.4.13 Mercedes GLE 350 de PHEV 337
9.4.14 Opel Corsa mit Verbrennungsmotor (CE … Combustion Engine) 355
9.5 Diskussion der Messergebnisse 372
9.5.1 Gemessene magnetische Flussdichtewerte und Expositionsindizes 372
9.5.2 Vergleich mit bisher publizierten Daten 376
9.5.3 Mehrfachexposition durch unterschiedliche Quellen 377
9.5.4 Anmerkung hinsichtlich Gefährdung von Personen mit aktiven Implantaten 377
9.6 Numerische Berechnungen von Expositionssituationen 378
9.6.1 Unsicherheiten der numerischen Berechnungen 381
9.6.2 Porsche Taycan 382
9.6.3 Mercedes GLE 350 de PHEV 384
9.7 Schlussfolgerungen aus den Messungen und numerischen Berechnungen der Magnetfeldexposition in zweispurigen Fahrzeugen 385

10 Magnetfeldmessungen an einspurigen Fahrzeugen 387
10.1 Messmethoden 387
10.1.1 Messungen am Rollenprüfstand 387
10.1.2 Messungen am Testgelände 388
10.2 Unsicherheitsbetrachtungen 390
10.3 Untersuchte Fahrzeuge 390
10.4 Messergebnisse 390
10.4.1 Ray 7.7 391
10.4.2 Zero SR 400
10.4.3 Silence 408
10.4.4 Super Socco 416
10.5 Diskussion der Messergebnisse 423
10.6 Numerische Berechnungen von Expositionssituationen 425
10.6.1 Ray 7.7 425
10.6.2 Zero SR 427
10.7 Schlussfolgerungen aus den Messungen und numerischen Berechnungen der Magnetfeldexposition bei einspurigen BEV 428

11 Messungen in öffentlichen Verkehrsmitteln mit Elektroantrieb 430
11.1 Messmethode 430
11.2 Messergebnisse 431
11.2.1 ICE- und IC-Zug 431

11.2.2 Regionalzug 438
11.2.3 S-Bahn 441
11.2.4 Straßenbahn bzw. U-Bahn (unterirdisch fahrende Straßenbahn) 445
11.3 Diskussion der Messergebnisse 450
11.3.1 Anmerkung hinsichtlich Gefährdung von Personen mit aktiven Implantaten 450

12 Zusammenfassung und Gesamtdiskussion der Ergebnisse 451

13 Literatur 453

14 Anhang – Zulassungszahlen BEV und PHEV 458

Kurzfassung

Dieser Bericht fasst die Ergebnisse umfangreicher systematischer Messungen und numerischer Berechnungen im Hinblick auf die Exposition von Personen durch Magnetfelder im Inneren von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen während des Fahrens zusammen.

Nach einer umfassenden Literaturreche und der Optimierung bzw. Entwicklung geeigneter Messmethoden erfolgten systematische Messungen an einer Auswahl von insgesamt elf rein elektrisch betriebenen (EV) und zwei Plug-In Hybrid-Automobilen (PHEV). Die Auswahl der Fahrzeuge erfolgte sowohl auf Grundlage technischer Spezifikationen als auch auf Basis von Zulassungs- bzw. Bestandszahlen in Deutschland, mit dem Ziel einer möglichst großen Repräsentativität der untersuchten Fahrzeugstichprobe. Zu Vergleichszwecken wurde auch ein konventionelles Fahrzeug mit Verbrennungsmotor betrachtet. Zusätzlich wurden Messungen an vier Zweirädern mit Elektroantrieb (ein Kleinkraftrad, zwei Leichtkrafträder und ein Kraftrad) durchgeführt. Die Messungen erfolgten zunächst unter definierten Fahrbedingungen auf Fahrzeugprüfstanden und auf einer Teststrecke, und anschließend mit allen zweispurigen EV und PHEV zusätzlich auch während einer 90-minütigen Fahrt im Realverkehr.
Ergänzend wurden schließlich auch Messungen der magnetischen Immissionen in Fahrzeugen des öffentlichen Fern- und Nahverkehrs (ICE-, IC- und Regionalzüge, S-Bahn, U-Bahn, Straßenbahn) mit elektrischen Antriebssystemen durchgeführt, um die in den Fahrzeugen für den Individualverkehr auftretenden magnetischen Immissionen mit jenen in öffentlichen Verkehrsmitteln zu vergleichen.

Die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten über 975.000 Einzelmessungen der magnetischen Feldstärke in zweispurigen Fahrzeugen bestätigen bisher in der Literatur berichtete Daten nur insofern, als die in EV und PHEV lokal messbaren Spitzenwerte der magnetischen Feldstärke bei „sanfter“ Fahrweise bis zu knapp über 100 µT betragen und die Ausschöpfung der Referenzwerte der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG im zweistelligen Prozentbereich liegen können, wenngleich angemerkt werden muss, dass ein direkter Vergleich mit den Daten aus der Literatur aufgrund der methodischen Heterogenität in vielen Fällen zumindest schwierig, wenn nicht unmöglich ist. Darüber hinaus konnte jedoch klar gezeigt werden, dass in vielen Fahrzeugen bei „sportlicher“ Fahrweise die Magnetfeldimmissionen deutlich größer sein können und dass lokal eine deutliche Überschreitung der Referenzwerte möglich ist (typischerweise im Fuß- und Unterschenkelbereich). Grund dafür sind zumeist transiente Vorgänge in Zusammenhang mit Brems- und/oder Beschleunigungsmanövern. Dass sich dieser Befund in bisher veröffentlichten Daten in dieser Form nicht wiederfindet, ist mit großer Wahrscheinlich darin begründet, dass die in diesem Forschungsvorhaben angewendete Messmethodik bezüglich Umfang und Systematik als bisher beispiellos angesehen werden muss. Durchgeführte numerische Berechnungen der von diesen lokalen Magnetfeldexpositionen verursachten induzierten elektrischen Feldstärken in den Füßen bzw. im Unterschenkel anatomischer Körpermodelle zeigen bei den untersuchten Fahrzeugen jedoch keine Konflikte mit den Basisgrenzwerten für die im Körper induzierten elektrischen Feldstärken gemäß den ICNIRP Empfehlungen aus 2010.

Ergänzend zu den Ergebnissen bezüglich der Exposition während des Fahrens zeigte sich, dass es in den meisten Fahrzeugen (auch beim untersuchten Fahrzeug mit

Verbrennungsmotor) beim Einschalten lokal zu deutlichen Überschreitungen der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung kommt. Außerdem wirken auch andere elektrische Verbraucher, die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem elektrischen Antriebssystem stehen, als Ursache für Magnetfeldimmissionen, die teils sogar deutlich höher sind, als jene vom elektrischen Antriebssystem stammenden. Es ist davon auszugehen, dass sich diese beiden Expositionsarten beim Fahren in bestimmten Situationen auch expositionserhöhend überlagern.

Die Tatsache, dass die größten Expositionsindizes durch transiente Vorgänge verursacht wurden, lässt die derzeit für Immissionsmessungen in Fahrzeugen entwickelte Norm EN IEC 62764-1 in besonders kritischem Licht erscheinen, da in dieser Norm die Erfassung von transienten Vorgängen, die kürzer als 200 ms sind, nicht vorgesehen ist. Insofern kann diese Norm nicht als ausreichend für eine umfassende strahlenschutztechnische Bewertung der in Fahrzeugen auftretenden magnetischen Felder basierend auf dem aktuellen Bewertungsparadigma der ICNIRP Empfehlungen angesehen werden, demzufolge, im Hinblick auf durch Beeinflussung des Zellenmembranpotenzials vermittelte Effekte, auch kurzzeitig auftretende Spitzenwerte der Magnetfeldimmissionen für die Bewertung heranzuziehen sind.

Die durchgeführten Messungen an den einspurigen Fahrzeugen stellen derzeit die einzigen verfügbaren systematisch erhobenen Messdaten dar und zeigen ebenfalls die Möglichkeit von lokal eingegrenzten (im Fuß- bzw. Unterschenkelbereich) Referenzwertüberschreitungen bei „sportlicher“ Fahrweise. Hier zeigt sich jedoch konsistent, dass die Ursache nicht in transienten Vorgängen liegt, sondern an den erwartbaren, bei zunehmender Last deutlich oberwellenbehafteten Magnetfeldern der Motorströme beim Beschleunigen. Wie auch im Fall der untersuchten zweispurigen Fahrzeuge zeigten durchgeführte numerische Berechnungen, dass die von den lokalen Magnetfeldexpositionen verursachten induzierten elektrischen Feldstärken in den Füßen bzw. im Unterschenkel bei den untersuchten einspurigen Fahrzeugen ebenfalls keine Konflikte mit den Basisgrenzwerten für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 verursachen.

Die zu Vergleichszwecken durchgeführten Messungen in elektrisch betriebenen öffentlichen Verkehrsmitteln mit 15 kV / 16.7 Hz Oberleitungsversorgung zeigten, dass auch dort Ausschöpfungen der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß 1999/519/EG im zweistelligen Prozentbereich möglich, bzw. an einigen Passagierplätzen sogar typisch sind. In den untersuchten Straßenbahnen bzw. U-Bahnen (versorgt über 800 V Gleichstrom-oberleitungen) traten an einzelnen Passagierplätzen sogar Überschreitungen der Referenzwerte gemäß 1999/519/EG auf.

Abstract

This report summarizes the results of comprehensive systematic measurements and numerical calculations regarding the exposure of persons to magnetic fields inside vehicles with electric drive systems while driving.

After an extensive literature review and the optimization and development of suitable measurement methods, systematic measurements were carried out on a selection of eleven all-electric (EV) and two plug-in hybrid electric vehicles (PHEV). The vehicles were selected both on the basis of technical specifications and on the basis of registration in Germany, with the aim of achieving the greatest possible representativeness of the vehicle sample under investigation. For comparison purposes, a conventional vehicle with a combustion engine was also considered. In addition, measurements were taken on four two-wheelers with electric drive (one moped, two light motorcycles, and one motorcycle). The measurements were carried out under defined driving conditions on vehicle test stands and on a test track, as well as during a 90-minute drive in real traffic with all two-lane EV and PHEV.
In addition, measurements of magnetic immissions were also carried out in public long-distance and local transport vehicles (ICE-, IC-, and regional trains, suburban trains, subway trains, streetcars) with electric drive systems in order to compare the magnetic immissions occurring in vehicles for private transport with those in public transport.

The in total over 975.000 individual measurements of the magnetic flux density in two-lane vehicles carried out as part of this project only confirm data previously reported in the literature insofar as the peak values of the magnetic flux density that can be measured locally in EV and PHEV during “gentle” driving can be up to slightly above 100 µT and the exhaustion of the reference values of EU Council Recommendation 1999/519/EG can be in the two-digit percentage range, although it must be noted that a direct comparison with the data from the literature is at least difficult, if not impossible, in many cases due to methodological heterogeneity. In addition, however, it could be clearly shown that in many vehicles the magnetic field immissions can be significantly higher when driving in a “sporty” manner, and that locally the reference values can be significantly exceeded (typically in the foot and lower leg area). The reason for this is usually a transient process in connection with braking and/or acceleration maneuvers. The fact that this finding is not found in this form in previously published data is most probably due to the measurement methodology used in this research project, which must be regarded as unprecedented in terms of comprehensiveness and systematics. However, numerical calculations of the induced electric field strengths in the feet or lower leg of anatomical body models caused by these local magnetic field exposures show no conflicts with the basic restrictions for the electric field strengths induced in the body according to the ICNIRP recommendations from 2010 for the vehicles investigated.
In addition to the results regarding exposure while driving, it was shown that in most vehicles (including the vehicle with combustion engine), the reference values for the general public were significantly exceeded locally when the vehicle was switched on, and that other electrical consumers that were not directly related to the electric drive system could also be the cause of magnetic field immissions significantly higher than those caused by the electric drive system. The fact that the largest exposure indices were caused by transient processes casts a particularly critical light on the EN IEC 62764-1 standard currently used for magnetic field measurements in vehicles, as this standard does not consider the recording of transient processes that are shorter than 200 ms. In this respect, this standard cannot be considered sufficient for a comprehensive radiation protection assessment of the magnetic fields occurring

in vehicles based on the current assessment paradigm of the ICNIRP, which does not provide for any temporal averaging of the magnetic field immissions regarding effects mediated by influencing the cell membrane potential.

The measurements carried out on the two-wheelers are currently the only systematically collected measurement data available and also show the possibility of locally limited (in the foot or lower leg area) reference value exceedances during “sporty” driving. Here, however, it is consistently shown that the cause does not lie in transient processes, but in the magnetic fields of the motor currents during acceleration, which are clearly affected by harmonics as the load increases. As in the case of the two-lane vehicles investigated, numerical calculations showed that the induced electric field strengths in the feet or lower leg caused by the local magnetic field exposures in the two-wheelers investigated did not cause any conflicts with the basic restrictions for the general public according to ICNIRP 2010.

The measurements carried out for comparison purposes in electrically operated public transport vehicles with 15 kV / 16.7 Hz overhead line supply showed that even there, exhaustion of the reference values for the general population according to 1999/519/EG in the double-digit percentage range is possible, or even typical at some passenger seats. In the streetcars and subway trains examined (supplied via 800 V DC overhead lines), the reference values according to 1999/519/EG were even exceeded at individual passenger stations.

1 Einleitung

Die zunehmende Verbreitung von Fahrzeugen mit elektrischen Antriebssystemen für den Individualverkehr führt zu neuartigen Magnetfeld-Expositionsverhältnissen von Personen, die sich innerhalb / auf 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 konventionellen Fahrzeugen vorkommender) Quellen wurden dabei separat erfasst. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden schließlich Daten aus einschlägigen früheren Arbeiten und Immissionsdaten in anderen elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln gegenübergestellt und 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 1 des Ergebnisberichts fasst die Ergebnisse bezüglich der Exposition beim Fahren zusammen. Teil 2 des Ergebnisberichts befasst sich mit der Exposition während des Ladens von Fahrzeugen.

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 individuellen Straßenverkehr

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

„HEV“: zweispurige Personenkraftfahrzeuge für den individuellen 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-Fahrzeuge[1].

„Elektroautos“: Oberbegriff für BEV, PHEV und HEV

„Elektro-Zweiräder“ oder **„einspurige BEV“:** Oberbegriff für Elektro-Roller und Elektro-Motorräder

[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.

„Elektrofahrzeuge“: Oberbegriff für alle nicht-schienengebundenen Fahrzeuge des Individual- und öffentlichen Straßenverkehrs mit elektrischem Antriebssystem, z. B. Elektroautos, Elektro-Busse, Elektro-Nutzfahrzeuge, einspurige BEV etc.

„Elektro-Schienenfahrzeuge“: Oberbegriff für alle schienengebundenen Fahrzeuge des öffentlichen Verkehrs mit elektrischem Antriebssystem, z. B. Bahn, Straßenbahn, U-Bahn etc.

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 mit Elektroantrieb (BEV, HEV und PHEV) befassen. In diesem Abschnitt wird versucht, die relevanten Inhalte der wenigen vorliegenden Dokumente zusammenzufassen und, soweit möglich, systematisch zu vergleichen.

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

Die 26. BImSchV (Bundesimmissionsschutz-Verordnung) (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.

Damit 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, bleibt auch die Frage offen, 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 keine Anwendung finden (SSK, 2019).

2.3 Messvorschriften zur Erfassung und Bewertung der Exposition von Personen beim Fahren

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 und PHEV, sondern umfasst Fahrzeuge unabhängig von deren Antriebstechnik. Einspurige Fahrzeuge befinden sich aber nicht im Anwendungsbereich der Norm. 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). 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[2]) angenommen und 2022 schließlich als gültige Norm publiziert. Das genannte Abstimmungsergebnis erscheint in Fachkreisen 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 Effekte 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, insbesondere weil Messdaten aus der Literatur klar darauf hindeuten, dass die maximalen magnetischen Flussdichten in Kraftfahrzeugen oftmals durch transiente Vorgänge verursacht werden (Details siehe Literaturstudie im Kapitel 4).

Die Messungen können gemäß IEC 62764-1:2022 während des Realbetriebs des Fahrzeuges auf einer Teststrecke oder auf einem Rollenprüfstand durchgeführt werden, der die bei Realfahrten auftretenden Lastverhältnisse beim Fahren, Beschleunigen und Bremsen realistisch nachbilden kann. Bei Realfahrten wird die Steigung der Teststrecke mit einem Bereich von ± 2 % festgelegt.

Die zu untersuchenden Raumbereiche werden in IEC 62764-1:2022 sehr umfangreich gemäß 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 den Körper des/der Fahrerenden und des/der Beifahrenden zugänglichen Bereiche (zusätzlich Volumen G für die Arme), D, E und F jene für Personen auf der Rückbank. Schließlich werden zusätzlich die Volumina H und I für den „Motorraum“ vorne bzw. den Kofferraum festgelegt. Die konkret zu untersuchenden Messpositionen innerhalb der definierten Volumina sollen auf Basis einer Maximumsuche (langsames Abtasten der jeweiligen Volumenbereiche mit der Magnetfeldsonde) festgelegt werden. 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.

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.

[2] Der Grund für die Stimmenthaltung des deutschen nationalen Komitees war der Umstand, dass man sich trotz intensiven Ringens nicht auf eine Zustimmung oder Ablehnung einigen konnte.

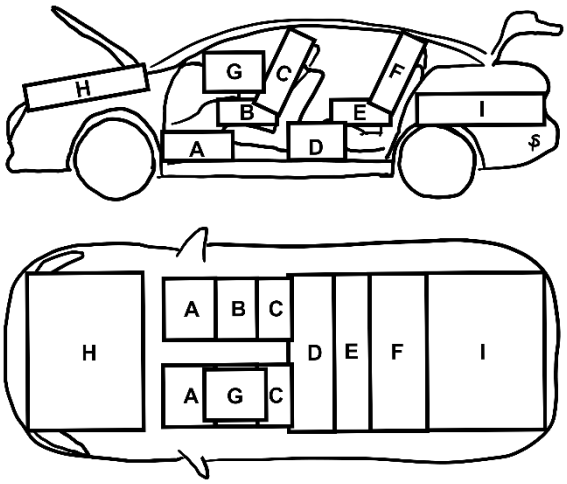


Abbildung 2.1: Beispiele für messtechnisch zu untersuchende Volumina im Inneren von Fahrzeugen gemäß den Festlegungen in IEC 62764-1:2022.

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. Ausnahme sind die Oberflächen der Sitze, bei denen ein Messabstand von 6.5 cm (vom Zentrum des Messaufnehmers) verwendet werden soll, was dem Aufliegen einer 100 cm^2 Messsonde auf der Sitzoberfläche entspricht. Begründet wird diese Festlegung mit der zunehmenden Messunsicherheit, wenn man sich mit dem 100 cm^2 Messaufnehmer einer lokalen Magnetfeldquelle nähert. 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 ein Elektromotor angenommen wird. Berechnet werden die magnetischen Feldstärken H_m 20 cm über dem Fahrzeugboden bzw. in 20 cm Distanz zum Motor und die in einem anatomischen Körpermodell zufolge der genannten Quellen berechneten 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. Basis(grenz)werten 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. Aus wissenschaftlicher Sicht sind dieser Vorgehensweise bzw. Schlussfolgerung 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 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 Basis(grenz)werte sind (Hirtl et al., 2019; Schmid, 2018).

Messungen der magnetischen Feldstärke bzw. Flussdichte sollen gemäß IEC 62764-1:2022 im Stillstand, während gleichmäßigem Fahren bei 40 (± 8) km/h und beim Beschleunigen von 0 auf 90 km/h (mit mindestens 2.5 m/s^2 zwischen 10 und 75 km/h) erfolgen. Auch diese Festlegungen bezüglich Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung zielen offensichtlich nicht darauf ab, die Maximalwerte der magnetischen Flussdichte in den Fahrzeugen zu erfassen, sondern lediglich einfach herstellbare und standardisierte Testbedingungen zu definieren. Erwähnenswert erscheint auch die in Anhang F von IEC 62764-1:2022 getätigte Schlussfolgerung, dass die Beschleunigungsstärke und die Maximalgeschwindigkeit keinen Einfluss auf die maximal messbare magnetische Feldstärke hat (abgeleitet aus Messkurven an zwei Fahrzeugen), was im Widerspruch zu den Ergebnissen des gegenständlichen Vorhabens steht (siehe Kapitel 9).

Bezüglich einer Bewertungsgrundlage (Dokument mit Referenz- und/oder Basis(grenz)werten) 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 62764-1, 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, es sind also keine Messungen während Beschleunigungsvorgängen vorgesehen. 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 cm^2 Messaufnehmers) zu allen Oberflächen des Fahrzeugs spezifiziert.

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). Beim Fahren sollen die Messungen an allen Sitzplätzen durchgeführt werden.

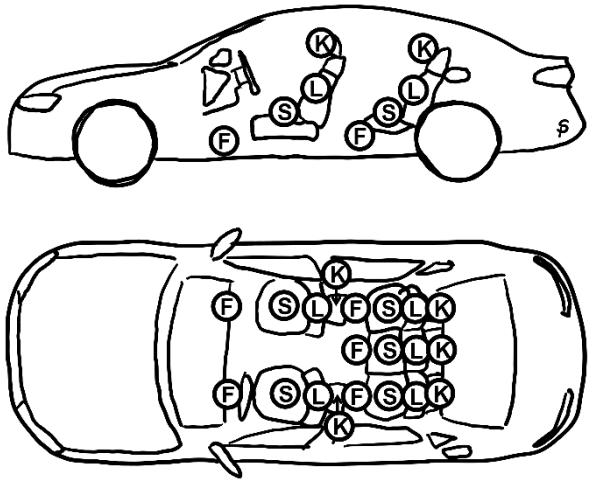


Abbildung 2.2: Zu untersuchende Messpositionen im Fahrzeuginnenraum gemäß den Festlegungen in VDA-Empfehlung 460-100.

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.

Aus den gleichen 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. Insbesondere ist erstaunlich, dass eine Beurteilung der magnetischen Felder während des Beschleunigens nicht berücksichtigt wird, obwohl aus der Literatur deutlich ablesbar und physikalisch unmittelbar plausibel ist, dass die maximalen magnetischen Flussdichten in Elektrofahrzeugen typischerweise während der Beschleunigungsphasen zu erwarten sind (Details siehe auch Literaturstudie in Kapitel 4).

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

transiente Vorgänge von der Erfassung bzw. Bewertung explizit ausgeschlossen. GB/T 37130-2018 legt dafür sogar konkret fest, 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 2.3). 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, M3 und N werden zusätzlich zu den oben genannten Festlegungen für Fahrer- und Beifahrerplatz weitere Messpositionen spezifiziert, auf die hier nicht weiter eingegangen wird.

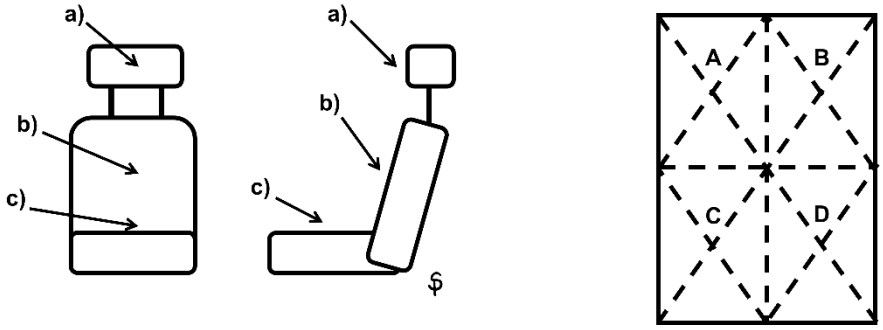


Abbildung 2.3: Definition der Messpositionen a) – c) entlang der Fahrzeugsitze (links) und der Messpositionen A - D im Fußraum (rechts) gemäß den Festlegungen in GB/T 37130-2018.

Für Fahrzeuge der Kategorie L (Krafträder/Kraftfahrzeuge) werden drei zu untersuchende Messpositionen am Fahrerplatz gemäß Abbildung 2.4 definiert.

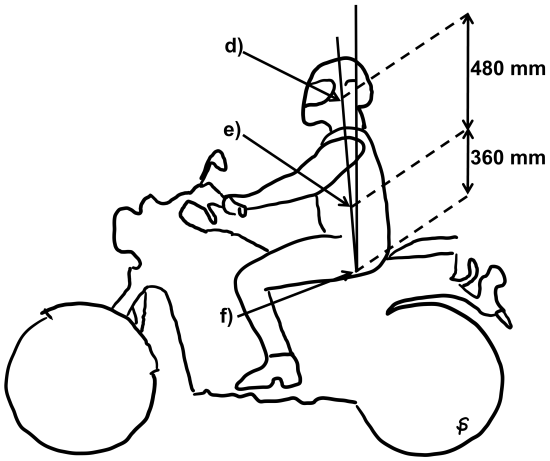


Abbildung 2.4: Definition der Messpositionen d) – f) im Bereich des Fahrerenden eines Fahrzeugs der Kategorie L, gemäß den Festlegungen in GB/T 37130-2018.

Die Spezifikationen hinsichtlich der bei den Magnetfeldmessungen zu betrachtenden Fahrgeschwindigkeit und Beschleunigung sind in GB/T 37130-2018 wieder identisch mit jenen

in IEC 62764-1:2022. Eine Vorgabe bezüglich eines einzuhaltenden Mindestabstandes des Messaufnehmers zu allen Oberflächen des Fahrzeugs findet sich in GB/T 37130-2018 jedoch nicht.

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)

Abbildung 2.5 zeigt einen grafischen Vergleich der Referenzwerte, die in GB/T 37130-2018 als alternative Bewertungsrundlagen 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), 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 Eigenrauschen des bewerteten Messergebnisses (in % vom Referenzwert) führen würden[3].

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, lediglich zum Thema der Exposition beim induktiven Laden (siehe Ergebnisbericht – Teil 2). 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

[3] 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 µV (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.

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.

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 Fahren entstehen, und Abbildung 2.5 zeigt einen grafischen Vergleich der Referenzwerte bzw. ERLs.

Tabelle 2.1: Zusammenfassende Gegenüberstellung der wichtigsten Festlegungen für Magnetfeldmessungen beim Fahren 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 ∅ ≤ 13 cm
Geschwindigkeit beim gleichmäßigen Fahren	40 km/h (± 8 km/h)	40 km/h (± 8 km/h)	40 km/h (± 8 km/h)
Beschleunigung	0 – 90 km/h, ≥ 2.5 m/s^2 im Bereich 10 – 75 km/h	nicht vorgesehen	0 – 90 km/h, ≥ 2.5 m/s^2
Definierte Messpositionen beim Fahren	3 Raumbereiche (Fußraum, Sitzfläche, Rückenlehne, inkl. Kopfstütze) pro Sitzplatz sowie im vorderen und hinteren Stauraum („Motor"- und Kofferraum); Am Fahrerplatz zusätzlich Raumbereich der Arme.	4 Punkte (Fußraum, Sitzfläche, Rückenlehne, Kopf) pro Sitzplatz	7 Punkte (4 x Fußraum, Sitzfläche, Rückenlehne, Kopf) pro Sitzplatz
Mindestabstand 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

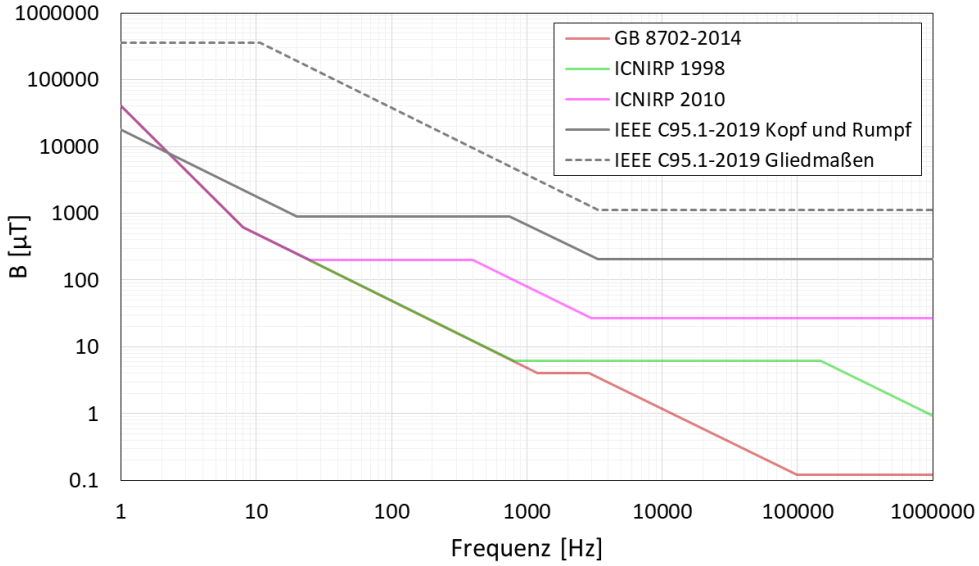


Abbildung 2.5: Vergleich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung für die magnetische Flussdichte gemäß GB 8702-2014, ICNIRP 1998 (entsprechen jenen in 1999/519/EG), ICNIRP 2010 und IEEE C95.1:2019.

3 Prinzipien und relevante Spezifikationen von Messsystemen

3.1 Allgemeines

Aus früheren Messungen in Fahrzeugen mit Elektroantrieb ist bekannt (siehe Kapitel 4.2), dass die Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte in vielen Fällen als Folge transienter Vorgänge auftreten, wie beispielsweise zu Beginn von Beschleunigungsmanövern und/oder beim Umschalten vom Fahrbetrieb auf Rekuperation. Demzufolge sind an Messsysteme und Messgeräte, die für eine vollständige und aussagekräftige Charakterisierung der magnetischen Felder in Fahrzeugen mit Elektroantrieb 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 wesentlichen Kriterien, da die zu erwartenden magnetischen Felder in einem

relativ weiten Frequenzbereich variieren können, in dem die anzuwendenden Referenzwerte deutlich frequenzabhängig sind. Speziell im Hinblick auf die Bewertung von transienten Magnetfeldern sind insbesondere auch Zeitbereichs-Bewertungsverfahren (ICNIRP, 2003; Keller, 2017; Schmid et al., 2019a) als vorteilhaft anzusehen.

3.2 Messprinzipien für niederfrequente Magnetfelder

3.2.1 Unterscheidung nach Sensor-Prinzip

Für die Messung niederfrequenter magnetischer Felder stehen grundsätzlich mehrere physikalische Prinzipien zur Verfügung, es kommen gegenwärtig bezüglich des eingesetzten Sensor-Typs jedoch meist zwei unterschiedliche Messprinzipen zum Einsatz[4]:

- ➔ 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 Konstantstromquelle angespeist 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 Induktionsspulen 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.

[4] 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.

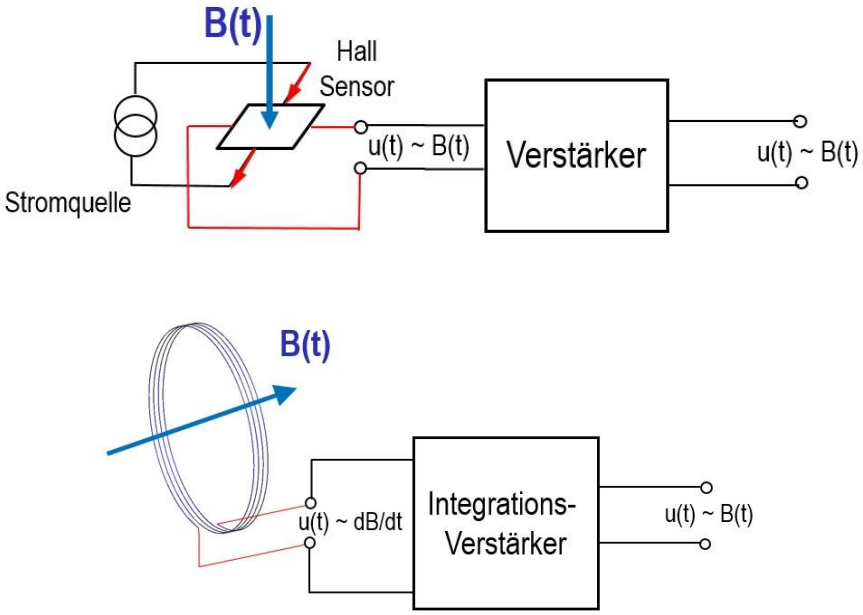


Abbildung 3.1: Prinzip der Magnetfeldmessung mittels Hall-Effekt-Sensoren (oben) und Induktionsspulen (unten).

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, Ergebnissen 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 im bzw. in der Nähe von Elektro- und Hybridfahrzeugen angesehen werden.

3.3.1 Messfrequenzbereich

a) Sehr niederfrequent (DC) bis 400 kHz

b) Idealerweise mit einstellbaren Frequenzgrenzen

3.3.2 Sensitivität und Aussteuergrenze

c) Sensitivität (Breitband) ≤ ~ 1 % vom niedrigsten Referenzwert des Frequenzbereichs

d) Aussteuergrenze ≥ 100 % Referenzwert (Amplitude) über den gesamten Frequenzbereich

Die Anforderung an die Messdynamik ist in der Praxis messgerätetechnisch nicht einfach umzusetzen, insbesondere bei Berücksichtigung der im Fahrbetrieb potenziell auftretenden transienten Vorgänge, die deutlich 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 mehr als einem Faktor 1000, 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 Gesamt-Messdynamik (über mehrere Messbereiche) 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.

3.3.3 Messaufnehmergröße

In der überwiegenden Mehrzahl der Prüfvorschriften für magnetische Felder wird die Verwendung eines Messaufnehmers mit 100 cm^2 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 (~ d^{-x}, mit d als Distanz zur Quelle) ist aufgrund der Mittelungseigenschaften[5] 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 kleiner werdendem 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 cm^2) 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 ≤ Referenzwert auf die Unterschreitung der Basis(grenz)werte 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 cm^2 Messaufnehmer diese Anforderung für Expositionsbeurteilungen auf Basis 1999/519/EG und ICNIRP 2010 erfüllt (Schmid, 2018).

[5] Die Induktionsspannung im Messaufnehmer ist proportional dem Integral der magnetischen Flussdichte über die Messaufnehmerfläche.

Eine wissenschaftliche Publikation als Erweiterung dieser Arbeit mit einer repräsentativen Auswahl anatomischer Körpermodelle und Expositionssituationen wird im Laufe des Jahres 2025 erwartet.

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 (einige hundert Millisekunden), in denen das digitalisierte Messsignal ausgewertet und zur Anzeige (z. B. als RMS- oder Spitzenwert) 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 schnell[6] 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. Im Hinblick auf die in diesem Projekt gegebene Notwendigkeit der Immissionserfassung sowohl auf dem Prüfstand als auch während realer Fahrten ist daher eine Minimierung dieser „Blindzeit“ 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 bei nicht-sinusförmigen Zeitverläufen der Messgröße 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 (z. B. ICNIRP 1998, 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 (ausreichende Abtastrate, ausreichender

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

Unterdrückung von Aliasing-Effekten[7]) 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 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 (z. B. bei Fahrten nahe Energieversorgungs- oder Bahnanlagen etc.).

3.3.6 Simultane Messung an mehreren Positionen

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben, erfordert die Erfassung und Bewertung magnetischer Felder beim Fahren Messungen an einer Vielzahl von Messpunkten bei unterschiedlichen Betriebszuständen. Bei vorgegebenen Grenzen der aufwendbaren Zeit für derartige Messungen wäre daher ein Messsystem, das eine 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 grundsätzlich sehr groß. Setzt man jedoch zunächst nur die in den aktuellen Messvorschriften im Bereich Elektromobilität geforderte obere Messfrequenzbereichsgrenze von 400 kHz als Mindestanforderung voraus, so wird die Anzahl der Geräte, die als tauglich eingestuft werden können, bereits überschaubar[8].

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

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

---

[7] 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.

[8] 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 nur stufenweise. Beispielsweise wird beim Messgerät Narda STS EHP50F ein Frequenzbereich 1 Hz – 400 kHz spezifiziert, es stehen aber tatsächlich nur acht diskrete, wählbare Frequenzbereiche 1 Hz – 100 Hz, 2.4 Hz – 200 Hz, …, 4.8 kHz – 400 kHz zur Verfügung.

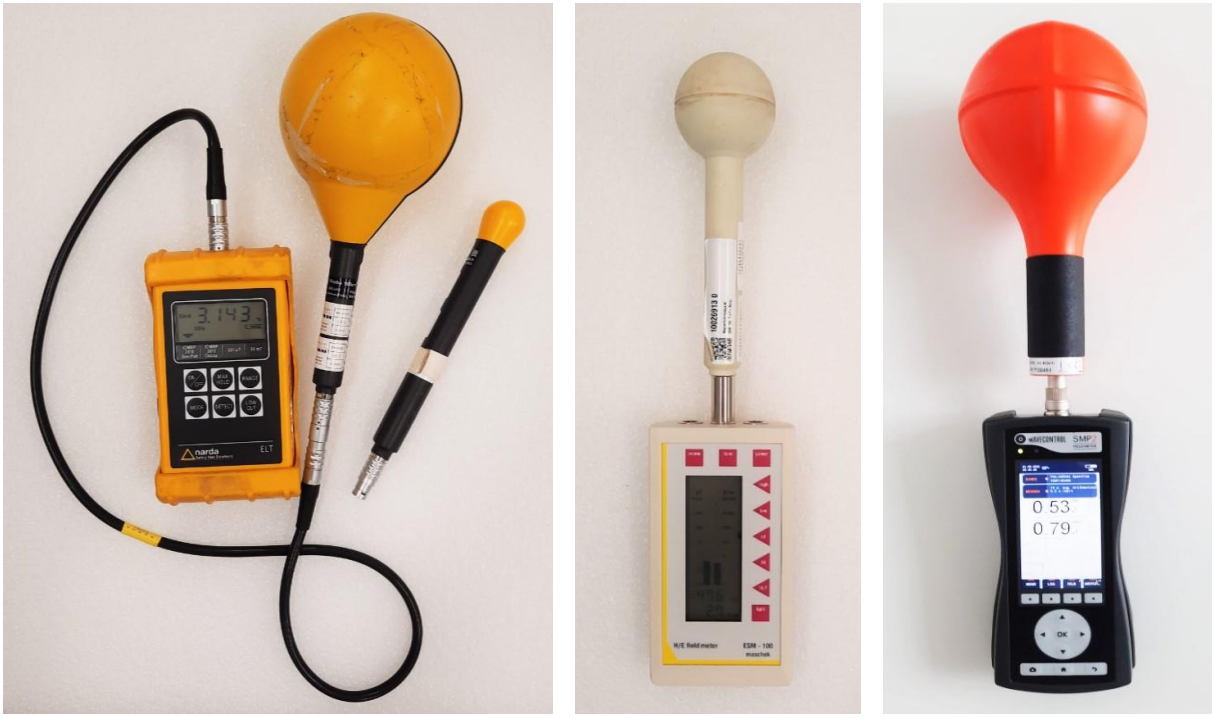


Abbildung 3.2: Drei gegenwärtig weit verbreitete und etablierte Kompaktmessgeräte zur Erfassung von magnetischen Feldern im Frequenzbereich von wenigen Hz bis 400 kHz: ELT-400 (links, abgebildet mit über Verlängerungsleitung angeschlossenem 100 cm^2 Messaufnehmer und ebenfalls abgebildetem 3 cm^2 Messaufnehmer), ESM-100 (Mitte) und SMP2 mit 100 cm^2 Messaufnehmer WP400 (rechts).

Das Gerät ELT-400 (alternativ mit 100 cm^2 und 3 cm^2 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 (je nach zugeschaltetem WPM-Filter) 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 cm^2. 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 Autorange-Funktion potenziell das Problem, dass transiente Vorgänge bei Messfahrten möglicherweise nicht korrekt erfasst werden können. 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 folgt dem Konzept mit einem einzigen Anzeigegerät Feldmessungen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 60 GHz zu ermöglichen, 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 Spulen-basierte 100 cm^2 Messaufnehmer WP400 die sinnvollste Wahl, mit dem der Frequenzbereich von 1 Hz – 400 kHz abgedeckt werden kann und der sowohl für Messungen der elektrischen Feldstärke als auch der magnetischen Flussdichte eingesetzt werden kann. Ein 3 cm^2 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 schnelle 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 Messgröße, 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 Messfahrten nicht korrekt erfasst werden können. 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 (Kompaktgeräte mit jeweils einem isotropen Messkanal, d. h. simultane Verarbeitung von drei orthogonalen Spulensensor-Signalen und daraus 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 – 400 kHz 10 Hz – 400 kHz 25 Hz – 400 kHz 100 Hz – 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 k Hz – 400 kHz)	< 50 nT (10 Hz – 400 kHz) < 200 nT (1 Hz – 400 kHz)
FFT im Gerät implementiert	nein	ja	ja
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 (± 800 mV_{rms}) fix verdrahtet	0 – 600 mV_{rms} 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 Messfrequenzbereiche 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. 12 ms bei einem minimalen einstellbaren Messintervall von 4 Sekunden.

3.4.3 Mehrkanal-Messsysteme

Die Tatsache, dass bei Magnetfeldmessungen in Fahrzeugen mit Elektroantrieb 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 **Sy**stem – MF EASY) entwickelt mit dem Ziel, die in Kapitel 3.3 zusammengefassten Anforderungen bestmöglich zu erfüllen.

Das MF EASY bietet 10 isotrope, 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 (z. B. Phasenspektrum). 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 werden 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.

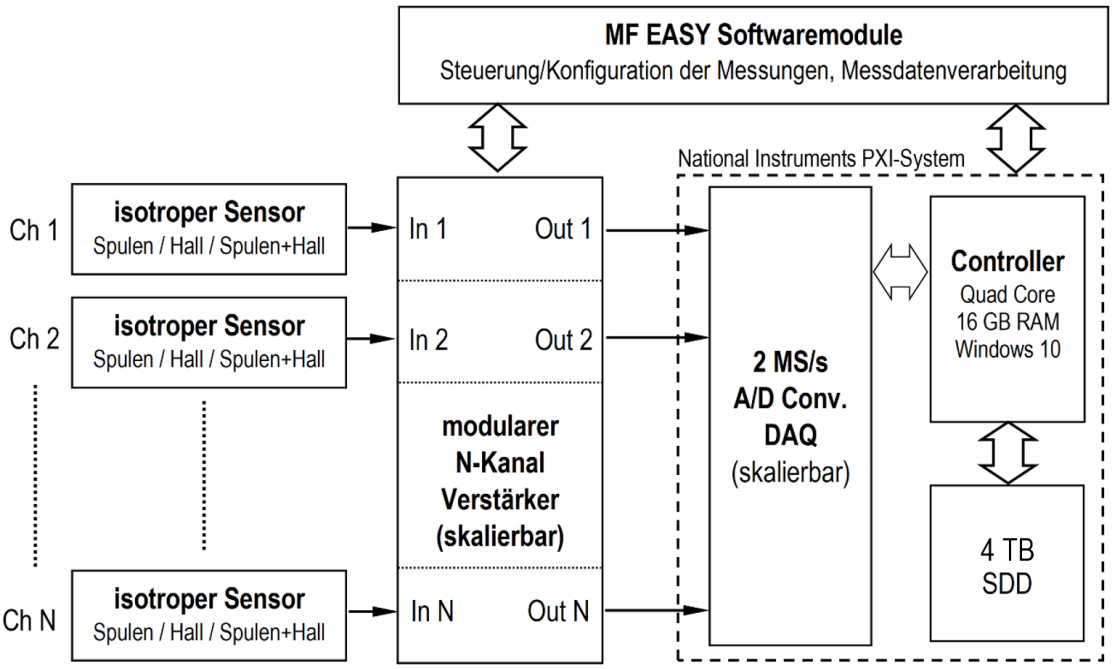


Abbildung 3.3: Vereinfachtes Schema des Systemkonzepts von MF EASY.

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).

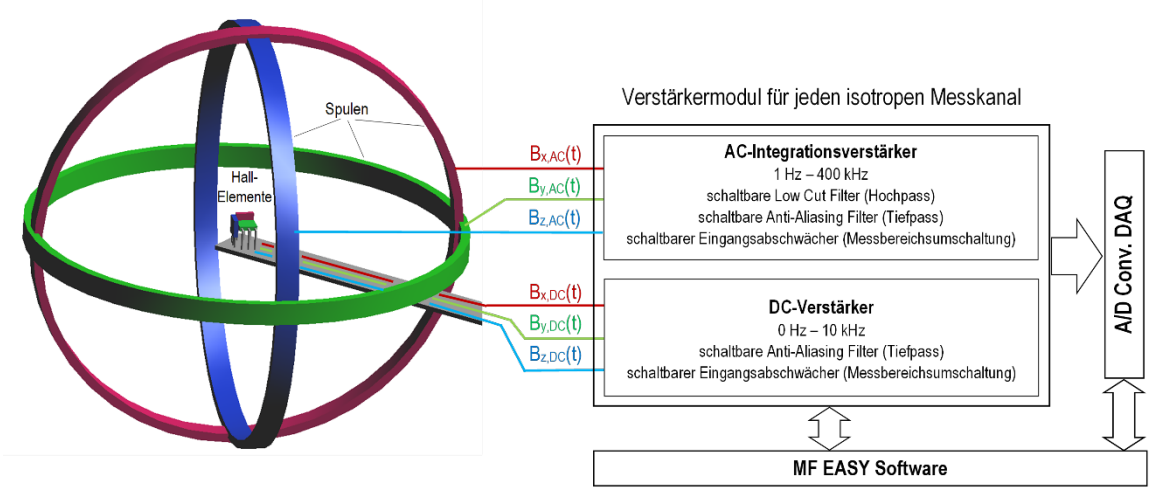


Abbildung 3.4: Schematischer Aufbau des Messaufnehmers (Sonde) eines isotropen MF EASY Messkanals mit isozentrisch angeordneten Spulen- und Hall-Element-Triples.



Abbildung 3.5: Unterschiedliche verfügbare MF EASY Sondengrößen: oben: 100 cm^2 Spulen + Hall; Mitte: 3 cm^2 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 während des Fahrens. Innerhalb der Projektlaufzeit wurde das Messsystem weiterentwickelt und in einem zweiteiligen Case untergebracht, das in Abbildung 3.7 gezeigt wird[9]. Abbildung 3.8 zeigt zehn Sonden des MF EASY, fixiert in ein Schaumstoff-Dummy, entsprechend verteilt über den rechten Platz auf der Rückbank für Messungen während einer Realfahrt.

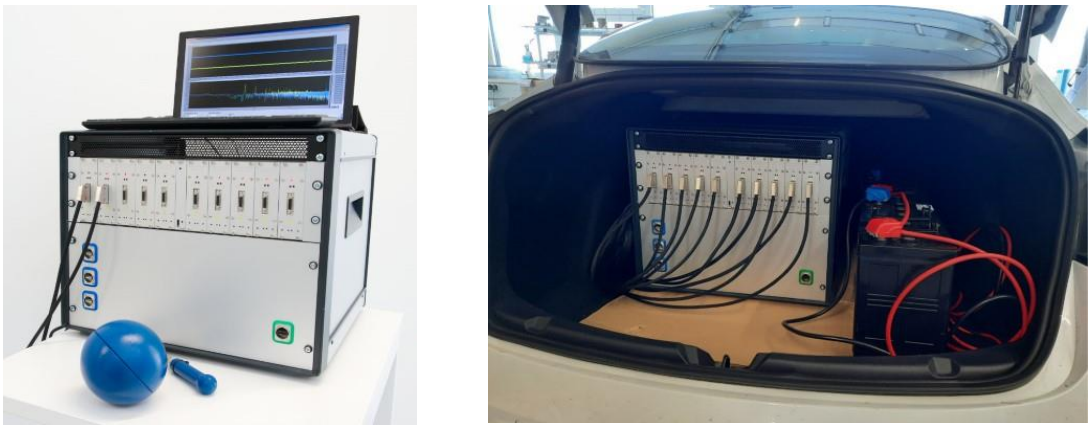


Abbildung 3.6: MF EASY Gesamtansicht mit Sonden (nur zwei Sonden angeschlossen) und Touchscreen (links) und im Kofferraum eines Tesla Model 3, versorgt von einer 12 V-Batterie und mit zehn angeschlossenen Sonden, vorbereitet für eine Messfahrt.



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

[9] 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.

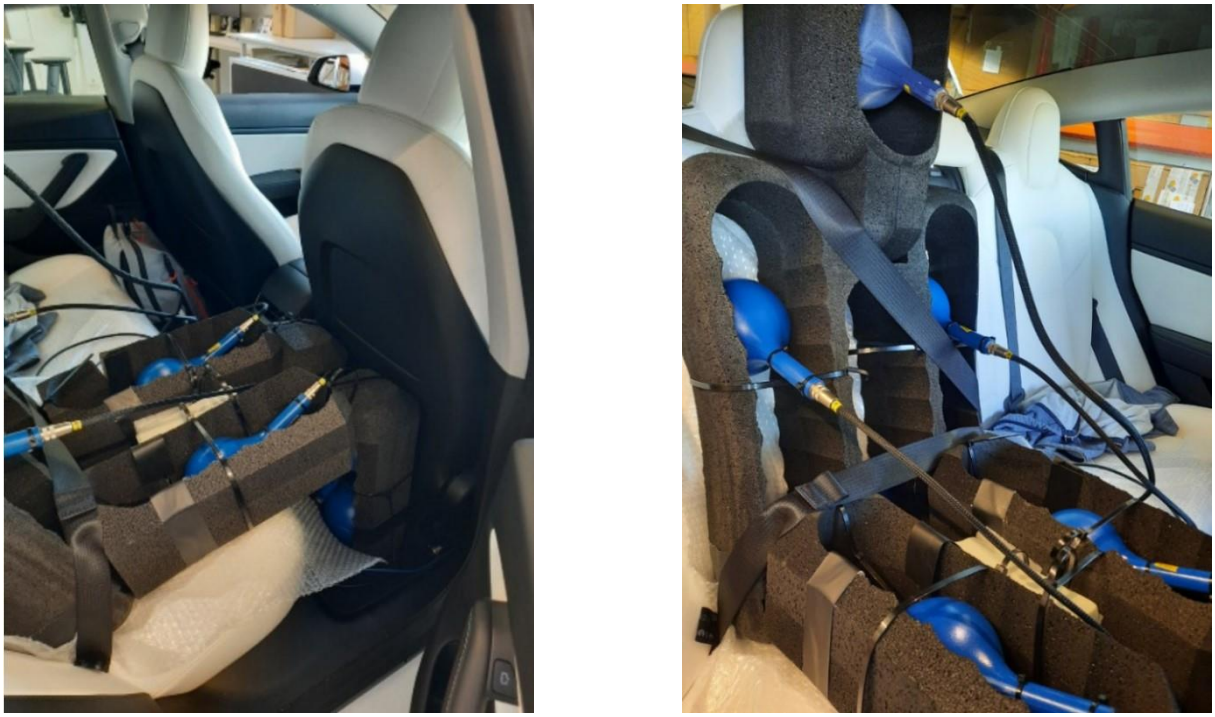


Abbildung 3.8: Sonden des MF EASY, integriert in ein Schaumstoff-Dummy, verteilt über den rechten Platz auf der Rückbank für Messungen während einer Realfahrt.

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. Die Anschaffungskosten liegen, je nach Konfiguration, bei einem fünf- bis sechsstelligen Euro-Betrag.

Tabelle 3.2: Zusammenfassung der wichtigsten technischen Daten des MF EASY.

Messfrequenzbereiche (analog)	Hall-Sensoren: 0 Hz – 10 kHz, 0 Hz – 3 kHz, 0 Hz – 500 Hz Spulensensoren: 1 Hz – 400 kHz, 1 Hz – 100 kHz, 1 Hz – 10 kHz 12 Hz – 400 kHz, 12 Hz – 100 kHz, 12 Hz – 10 kHz 300 Hz – 400 kHz, 300 Hz – 100 kHz, 300 Hz – 10 kHz
Eigenrauschen (Breitband)	Hall-Messkanäle (0 – 10 kHz): < 40 µT 100 cm^2 Spulen-Messkanäle: < 60 nT (12 Hz – 400 kHz) < 150 nT (1 Hz – 400 kHz)
Eigenrauschen (Spektrum nach FFT) bei 400 kHz Messbandbreite	Hall-Messkanäle: < 1 µT @ > 100 Hz, < 2 µT @ 50 Hz 100 cm^2 Spulen-Messkanäle: < 1 nT @ > 100 Hz, < 2 nT @ 50 Hz
Frequenzauflösung (FFT) bei 400 kHz Messbandbreite	0.5 Hz
Aussteuergrenze im empfindlichsten Messbereich	Hall-Messkanäle: 50 mT 100 cm^2 Spulen-Messkanäle (1 Hz – 400 kHz): 500 µT
Autorange-Funktion	nein
Abtastrate zur A/D-Wandlung	Hall-Messkanäle: frei wählbar, max. 50 kS/s Spulen-Messkanäle: frei wählbar, max. 2 MS/s
Messzeitintervall	frei wählbar; max. 5 s bei 2 MS/s, größer bei geringerer Abtastrate
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

4 Literaturstudie betreffend Exposition während des Fahrens durch Fahrzeuge mit elektrischen Antriebssystemen

4.1 Methoden für die Literaturrecherche

Die Recherche nach relevanter deutsch- und englischsprachiger Literatur zu Expositionserhebungen in Zusammenhang mit 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. Insgesamt konnten auf diese Weise 36 relevante Artikel mit Expositionsdaten zu BEV, PHEV und HEV für den Individualverkehr identifiziert werden (Chen et al., 2018; Eberhard et al., 2023; Garvanova et al., 2022; Hakuta et al., 2021; Halgamuge et al., 2010; Hareuveny et al., 2015; Ionescu et al., 2019; Karabetsos et al., 2014, 2013, 2010; Lennerz et al., 2020, 2018; Li et al., 2018; Lin et al., 2018; Low und Ruddle, 2013; Moreno-Torres et al., 2016, 2013; Pääkkönen und Korpinen, 2019; Pinaud et al., 2014; Ptitsyna et al., 2014; Ruddle et al., 2014b, 2014a, 2013; Ruddle und Low, 2014a, 2014b, 2013a, 2013b, 2012; G. Schmid et al., 2009; Tan et al., 2023; Tell et al., 2013; Tell und Kavet, 2016; Tondato et al., 2017; Trentadue et al., 2020; Vassilev et al., 2015; Yang et al., 2019). Davon berichten 18 Arbeiten Ergebnisse von Messungen und 16 Arbeiten von Simulationsergebnissen. Darüber hinaus konnten elf Artikel zu Expositionen durch andere elektrische Verkehrsmittel (z. B. Eisenbahn, S-Bahn) recherchiert werden (Bornkessel et al., 2011; Contessa et al., 2010; Hoffmann M et al., 2020; Kircher et al., 2018; Ptitsyna et al., 2012, 2014; Ptitsyna und Ponzetto, 2012; Sadamitsu et al., 2018; Tian und Lu, 2020; Vassilev et al., 2015; Wang und Wen, 2019). Die Publikationen stammten gemäß Vorgabe der Leistungsbeschreibung aus den Jahren 2009 bis 2023.

4.2 Arbeiten über Messungen an BEV und/oder PHEV und/oder HEV

4.2.1 Eingesetzte Messgeräte, Messmethoden und betrachtete Fahrzeugzustände

Für die Messung der magnetischen Felder im Innenraum der Fahrzeuge wurde in den recherchierten Arbeiten ein breites Spektrum an unterschiedlichen Messgeräten unterschiedlichster Hersteller verwendet. Details dazu sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. In drei der 18 Arbeiten wurden zusätzlich Beschleunigungssensoren und Stromklemmen eingesetzt, um Korrelationen zwischen Beschleunigung, Stromfluss, Kraftfluss und den gemessenen magnetischen Felder während des Fahrbetriebs zu ermitteln.

Messergebnisse für die magnetischen Flussdichten bzw. Feldstärken werden, je nach Publikation unterschiedlich, für den Stillstand des Fahrzeuges und während des Fahrbetriebs mit Beschleunigungs- und Bremsphasen (Rekuperation) sowie bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten entweder auf Teststrecken oder im Straßenverkehr berichtet. Teilweise wurden auch (Vor-)Tests auf Rollenprüfständen (Lennerz et al., 2020, 2018; G. Schmid et al., 2009; Trentadue et al., 2020; Vassilev et al., 2015) und einem Autolift (Tondato et al., 2017) durchgeführt.

Zur Ermittlung der magnetischen Felder im Fahrgastraum während des Fahrbetriebs wurden in der Hälfte der Studien für jeden Sitzplatz bis zu vier Messpositionen (Kopf, Brust, Sitzfläche, Füße) untersucht. In einigen Fällen wurden die Messungen auch auf den Motor- und Kofferraumbereich ausgedehnt (Hareuveny et al., 2015; Lennerz et al., 2020, 2018; Tondato et al., 2017; Vassilev et al., 2015).

Störgrößen wie Reifenmagnetisierung, Erdmagnetfeld, durch andere On-Board-Geräte (Klimaanlage, Ventilatoren, Radio) generierte Magnetfelder oder weitere externe Störgrößen (z. B. aufgrund von Hochspannungsleitungen etc.) wurden in manchen Studien separat untersucht und abgeschätzt, jedoch nicht immer aus den Messdaten entfernt (Hareuveny et al., 2015; Karabetsos et al., 2014, 2013, 2010; Lennerz et al., 2020, 2018; Li et al., 2018; Lin et al., 2018; Pääkkönen und Korpinen, 2019; Tell und Kavet, 2016; Trentadue et al., 2020; Vassilev et al., 2015; Yang et al., 2019).

Störeffekte durch Erschütterungen der Sonden und MF-Emissionen von Rollenprüfständen wurden in keiner Studie berücksichtigt (siehe Kapitel 7.4 und 9.2.8).

Nur wenige Studien berücksichtigten interne Fahrzeugcharakteristika, wie z. B. die Position des Inverters, des Motors, der Kabel und Batterien (Halgamuge et al., 2010; Karabetsos et al., 2014; Tondato et al., 2017; Vassilev et al., 2015).

In einer zwei Jahre andauernden Langzeitstudie (Yang et al., 2019) wurden auch Veränderungen von Messresultaten durch Wartungsarbeiten (nach 5000 – 6000 km) an den Testfahrzeugen untersucht. Fahrzeuge, bei welchen im Zuge von Reparaturen elektrische Bauteile ausgetauscht wurden, zeigten in der Folge sowohl ein verändertes Frequenzspektrum der Magnetfelder als auch höhere Werte auf. Zwei weitere Studien (Li et al., 2018; Lin et al., 2018) befassten sich intensiv mit der Magnetfeldexposition von Kindern auf Rücksitzen.

4.2.2 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten

Tabelle 4.1 fasst die aus den in diesem Abschnitt diskutierten Arbeiten ableitbaren Messergebnisse zusammen. In Tabelle 4.2 finden sich weitere Details zu den Messungen. Im Folgenden werden wesentliche Aspekte der einzelnen Arbeiten konkret beschrieben bzw. diskutiert, insbesondere solche, die im Hinblick auf eine Verwertbarkeit bzw. Vergleichbarkeit der berichteten Ergebnisse relevant sind. Bei Arbeiten, in denen methodische Unklarheiten oder Probleme identifiziert wurden, die eine Interpretation der Ergebnisse erschweren, wurden diese Probleme bzw. Unklarheiten detailliert diskutiert.

In Garvanova et al. (2022) wurden verschiedene Positionen in einem BEV während der Fahrt mit verschiedenen konstanten Geschwindigkeiten sowie auch im Stillstand und bei einem Ladevorgang untersucht und als „Gesamtwerte“ über den Frequenzbereich des Messgeräts angegeben.

Halgamuge et al. (2010) haben gemittelte Minima und Maxima an unterschiedlichen Positionen für PHEV (1 Fahrzeug), Straßenbahnen sowie Zügen (Sample von insgesamt 100 Fahrzeugen) angegeben. Dabei wurden wiederholt Messungen an den in den Ergebnistabellen genannten Positionen durchgeführt und daraus die entsprechenden gemittelten Minima und Maxima berechnet.

In Hareuveny et al. (2015) sind für 3 PHEV jeweils Wertebereiche für 4 Sitzpositionen sowie für Messpositionen auf der Motorhaube und im Kofferraum angeführt.

Karabetsos et al. haben 2 HEV (Lexus RX 400h und Honda Civic IMA Model 2006) in 4 unterschiedlichen Geschwindigkeitsbereichen untersucht. Dabei sind die Messergebnisse jeweils für 4 Sitzpositionen für die Bereiche Kopf, Brust und Füße aufgeschlüsselt. Durch das nur exemplarisch gezeigte Spektrum sowie durch das Fehlen an Informationen bzgl. Reifenmagnetisierung kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass die ermittelten maximalen Werte der magnetischen Flussdichte durch magnetisierte Reifen verursacht wurden. Bei den in der Arbeit angegebenen, bewerteten Messgrößen in Prozent des

Referenzwertes ist nicht eindeutig klar, ob dabei die Referenzwerte ICNIRP 1998 oder ICNIRP 2010 angewendet wurden (Karabetsos et al., 2013, 2010).

Daran anknüpfend erfolgte im Jahr 2014 eine erneute Publikation, diesmal mit je 3 Voll- und Mildhybrid-Fahrzeugen. Hier wird jedoch explizit auf ICNIRP 1998 verwiesen, weshalb man davon ausgehen kann, dass auch bei den vorhergehenden Publikationen ICNIRP 1998 gemeint ist (Karabetsos et al., 2014).

Lennerz et al. haben 4 BEV (BMW i3, Nissan Leaf, Tesla Model 85S und Volkswagen e-up!) untersucht. Die Messwerte sind sowohl in µT als auch 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).

Bei Li et al. (2018) bzw. Lin et al. (2018) handelt es sich um die gleiche Autorengruppe, die beiden Publikationen sind sehr ähnlich. In beiden Publikationen ist zwar eine Vielzahl an Messwerten aufgelistet, dabei handelt es sich jedoch zu großen Teilen um geometrisch gemittelte Werte mit Standardabweichung. Über die Verteilung der einbezogenen Messdaten wird keine Angabe gemacht, wodurch diese angeführten Messwerte nicht sinnvoll für Vergleiche verwendet werden können. Bei den wenigen angeführten Maximalwerten handelt es sich um spektrale Maximalwerte mit jeweils angeführter Frequenz. Diese Information kann ebenso wenig für eine fundierte Expositionsbewertung verwendet werden.

Gleiches gilt für Pääkkönen und Korpinen (2019), wo nach Abgleich der Ergebnistabelle (Tabelle 1) mit der Abbildung 6 in der Publikation deutlich wird, dass es sich bei den angeführten Maximalwerten ebenfalls nur um das spektrale Maximum einer bestimmten Frequenz handelt. Die restlichen Spektralanteile wurden in der Ergebnistabelle offensichtlich nicht berücksichtigt, die in diesem Fall zumindest notwendige Angabe der verwendeten Messbandbreite fehlt ebenfalls.

Im Vorgängerprojekt der Forschung zum vorliegenden Bericht (Schmid et al., 2009) wurden insgesamt 2 BEV, 3 HEV sowie ein Nahverkehrsbus mit Hybridantrieb und je ein Nutzfahrzeug mit reinem Elektro- sowie mit Hybridantrieb untersucht. Im Fall der BEV und HEV fanden die Messungen (Frequenzbereich 0 Hz – 100 kHz) sowohl unter definierten Betriebsbedingungen auf einem Rollenprüfstand als auch während jeweils einer ca. 60 km langen Testfahrt statt. Bei den Messungen am Rollenprüfstand wurde jeweils der gesamte typische Geschwindigkeits- und Lastmomentbereich der Fahrzeuge untersucht. Messungen der magnetischen Flussdichte bei den Untersuchungen am Rollenprüfstand fanden an 12 Messpositionen (verteilt über den Sitz von Kopf- bis Fußbereich) jeweils am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und einem Platz auf der Rückbank statt. Die Messungen während der Messfahrten erfolgten jeweils an der Mitfahrer-Messposition, an der bei den Messungen am Rollenprüfstand die größten Flussdichtewerte gemessen wurden (Fahrerplatz wurde aus Sicherheitsgründen ausgenommen). Die Ergebnisse werden in Form von Maximal-, Mittel- und Minimalwerten der auf den ICNIRP 1998-Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung bezogenen Expositionsindizes für jede untersuchte Messposition berichtet. Zusätzlich werden Zeitsignale und dazugehörige RMS-Werte für die interessantesten Messpositionen sowie Zeitsignale von transienten Vorgängen mit kurzzeitig hohen magnetischen Flussdichten dargestellt.

In Tell et al. (2013) erfolgt die Darstellung der Messergebnisse ausschließlich in Form von statistischen Kenngrößen in Form des geometrischen Mittels und der Standardabweichung. Die Daten stammen dabei aus Testläufen von etwa 30 Minuten Dauer, bei denen jeweils

insgesamt ca. 450 Messdatenpunkte aufgenommen wurden. Die Einordnung der dabei ermittelten zeitlichen Mittelwerte ist insofern schwierig, als bei nicht bekannter Verteilung der Messdaten keine vernünftige Einschätzung über die maximal zu erwartenden magnetischen Feldstärken getroffen werden kann.

Tell und Kavet haben jeweils die maximalen Breitbandwerte für 2 verschiedene Frequenzbereiche angeführt (Tell und Kavet, 2016).

In Tondato et al. (2017) sind wiederum nur die gemittelten maximalen Spektralanteile mit zugehöriger Frequenz angeführt (Tondato et al., 2017).

Trentadue et al. (2020) berichten Ergebnisse von Messungen in Form von magnetischen Flussdichtewerten (unklar ob RMS- oder PEAK-Werte) und in Form von Expositionsindizes, ermittelt mit der Multifrequenzmethode und der WPM im Frequenzbereich (Messbandbreite 25 Hz – 2 kHz) Die resultierende WPM-Bewertung zeigt insbesondere beim Mitsubishi Outlander (PHEV) mit 500 % und mehr teilweise deutliche Überschreitungen der ICNIRP-Referenzwerte. Ob dabei ICNIRP 1998 oder ICNIRP 2010 angewendet wurde, ist ebenso nicht eindeutig kommuniziert wie die Frage, ob die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung oder beruflich exponierte Personen angewendet wurden, da neben der EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG ebenso die EU-Richtlinie 2013/35/EU zitiert wird. Teilweise wird explizit erwähnt, dass der max-hold Wert verwendet wurde, ob dies jedoch auf alle bereitgestellten Messdaten zutrifft ist unklar. Ebenso unklar ist, warum bei einzelnen Ergebnissen keine WPM-Auswertung durchgeführt wurde. Über die Gründe für die sehr hohen Werte der WPM-Auswertung beim Mitsubishi Outlander (PHEV) lässt sich nur mutmaßen. Ganz grundsätzlich zeigen sich hier teilweise Diskrepanzen bei den angeführten Messdaten. Exemplarisch seien die Ergebnisse aus den Tabellen 21 und 22 im Bericht zu vergleichen (Jaguar I-PaceM, BEV), aus denen zu entnehmen ist, dass die WPM-Auswertung teilweise zu deutlich höheren Expositionsindizes führt als die Auswertung nach der Multifrequenzmethode. Durch die Berücksichtigung der Phase der einzelnen Spektralanteile der gemessenen magnetischen Flussdichten bei Anwendung der WPM ist dies schlicht nicht möglich (es sei auch hier auf die entsprechende Literatur verwiesen (ICNIRP, 2003; Keller, 2017; Schmid et al., 2019a)). Zudem passen die in µT angegebenen Messwerte in keiner Weise zu den angegebenen Expositionsindizes. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass es sich bei den angegebenen Expositionsindizes zumindest teilweise um Artefakte oder nicht korrekt ermittelte Werte handelt. Unabhängig davon sind die einzelnen Messergebnisse der unterschiedlichen Fahrzeuge nur bedingt vergleichbar, da die verwendeten Messprotokolle, Betriebszustände etc., nicht immer einheitlich sind. Die Fahrzeuge Nissan Leaf (BEV, 50 kW Ladeleistung, 24 kWh Batterie, 80 kW Motorleistung), VW e-up (BEV, 40 kW Ladeleistung, 18.7 kWh Batterie, 60 kW Motorleistung) und Renault Kangoo (BEV) werden zwar zunächst aufgelistet, Messdaten wurden für diese Fahrzeuge jedoch keine bereitgestellt.

In Vassilev et al. (2015) wurden insgesamt 5 BEV, ein PHEV, ein HEV, ein Fahrzeug mit einer Brennstoffzelle sowie 3 konventionelle Fahrzeuge untersucht. Neben den maximalen Expositionsindizes nach Anwendung der WPM mit den Referenzwerten aus ICNIRP 2010, aufgeschlüsselt auf die einzelnen Fahrzeuge unter Angabe der jeweiligen Position im Auto, wurden ebenso einzelne Fahrzeugkomponenten als Magnetfeldquellen identifiziert.

In Yang et al. (2019) wurden 3 in China beliebte BEV über einen Zeitraum von 2 Jahren untersucht. Die Messdaten werden hier wieder als zeitliche Mittelwerte mit Standardabweichung angeführt, weshalb eine Bewertung im Hinblick auf die dosimetrische Relevanz schwierig ist.

In einer der aktuellsten Arbeiten (Eberhard et al., 2023) erfolgten Messungen in insgesamt fünf BEV, wobei für die Messungen an unterschiedlichen Positionen in den Fahrzeugen platzierte Magnetfeld-Exposimeter (ExpoM-ELF, Fields at Work GmbH, Zürich, Schweiz) zum Einsatz kamen. Gemessen wurde während Fahrten im Realverkehr und die Messergebnisse wurden in Form von Ausschöpfungs-Prozentwerten bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 berichtet (Durchschnittswerte, 50 % Perzentil, 95 % Perzentil und Maximalwert). In den meisten Fällen lagen die Maximalimmissionen unterhalb von 20 % der ICNIRP 2010 Referenzwerte, vereinzelt wurden auch höhere Immissionsmaxima bis zu ca. 50 % der ICNIRP 2010 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung berichtet.

In einigen Publikationen fehlen Informationen, ob es sich bei den angeführten Messwerten um Peak- oder RMS-Werte handelt (Garvanova et al., 2022; Hareuveny et al., 2015; Lennerz et al., 2020, 2018; Trentadue et al., 2020; Vassilev et al., 2015).

4.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Wie aus Kapitel 4.2.1 und 4.2.2 ableitbar, sind die in den einzelnen recherchierten Arbeiten berichteten Messergebnisse sehr heterogen und nur sehr eingeschränkt vergleichbar, da für die jeweilige Erfassung der relevanten Daten nicht nur unterschiedliche Messgeräte mit unterschiedlichen Messfrequenzbereichen bzw. Messbandbreiten und Messzeitintervallen verwendet wurden, sondern die Ergebnisse auch in unterschiedlicher Form (Spitzenwerte, RMS-Werte, Expositionsindizes, räumliche Maximalwerte, räumliche Mittelwerte etc.) berichtet werden. Zudem variieren auch die betrachteten Fahrzeugzustände und die untersuchten Messpositionen deutlich und in einigen Fällen ist die Art der Messwertdarstellung (z. B. ob RMS oder Spitzenwert etc.) nicht eindeutig oder missverständlich kommuniziert. Allein daraus ist der dringende Bedarf an zielführenden standardisierten Messverfahren zur Erfassung und Bewertung von Magnetfeldexpositionen in Fahrzeugen ablesbar.

Die wesentliche und aus allen verwertbaren Arbeiten übereinstimmend ableitbare Erkenntnis ist, dass die maximalen, lokal auftretenden magnetischen Flussdichten im Bereich der Füße (Fahrersitz, Rücksitze), d. h. in der Nähe des Antriebsstranges (Verkabelung zwischen Batterie und Motor) und der Batterie während der Beschleunigungs- und/oder Rekuperationsphasen auftraten (Garvanova et al., 2022; Halgamuge et al., 2010; Karabetsos et al., 2013, 2010; Lennerz et al., 2020, 2018; Schmid et al., 2009; Tell und Kavet, 2016; Trentadue et al., 2020). Das Ausmaß der dabei lokal auftretenden Spitzenwerte lag bei bis zu einigen zehn Prozent der ICNIRP 1998-Referenzwerte und es wurden keine Überschreitungen dieser Referenzwerte zufolge der elektrischen Antriebskomponenten berichtet. Angemerkt wird hierzu allerdings, dass bei den von Eberhard et al. 2023 berichteten, vereinzelt auftretenden Ausschöpfungen der ICNIRP 2010 Referenzwerte von mehr als 20 %, je nach spektraler Zusammensetzung der Immissionen, eine Überschreitung der ICNIRP 1998 Referenzwerte nicht ausgeschlossen werden kann.

4.3 Arbeiten über Simulationen der Exposition in BEV und/oder PHEV

4.3.1 Eingesetzte Methoden

Zusätzlich zu den in Kapitel 4.2 behandelten Studien mit Messdaten, beschäftigten sich einige Autoren auch intensiv mit der Bewertung von magnetischen Feldern innerhalb von Fahrzeugen mithilfe von Computersimulationen. Hierzu wurden numerische Modelle aus einzelnen bzw. zusammengesetzten elektrischen Systemkomponenten untersucht, wie z. B. Batterien, Elektromotoren, unterschiedlichen Kabelkonfigurationen (einphasig, dreiphasig), Fahrzeugchassis und Fahrgastzellen bestehend aus verschiedenen Materialien

unterschiedlicher magnetischer Permeabilität und u. a. Vorschläge zur Minimierung der Magnetfeldexposition erarbeitet (Chen et al., 2018; Hakuta et al., 2021; Ionescu et al., 2019; Low und Ruddle, 2013; Moreno-Torres et al., 2016, 2013; Pinaud et al., 2014; Ruddle et al., 2014b, 2014a, 2013; Ruddle und Low, 2014a, 2014b, 2013a, 2013b, 2012; Tan et al., 2023). Für die Erstellung der 3D-Simulationen wurden u. a. die folgenden Softwarepakete verwendet: Ansoft Maxwell 3D, Maccon Flux 3D, SEMCAD X, FEMM, Altair HyperWorks.

4.3.2 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten

Tabelle 4.3 fasst die aus den in diesem Abschnitt diskutierten Arbeiten ableitbaren Ergebnisse zusammen. In Tabelle 4.4 finden sich weitere Details zu den Arbeiten.

Viele der gefundenen Publikationen befassen sich ausschließlich mit der numerischen Überprüfung von zuvor gemessenen Magnetfeldern, um z. B. in der Folge Möglichkeiten zu eruieren, die magnetischen Felder durch geeignete Maßnahmen zu reduzieren (Chen et al., 2018; Ionescu et al., 2019; Low und Ruddle, 2013; Moreno-Torres et al., 2016, 2013; Pinaud et al., 2014; Ruddle et al., 2014b, 2013; Ruddle und Low, 2013b, 2013a, 2012; Tan et al., 2023). Hier konnte teilweise eine gute Übereinstimmung von Messung und Simulation gezeigt werden, diese Daten werden aber nicht weiter in Tabelle 4.3 behandelt, da diese im Wesentlichen in Tabelle 4.1 berücksichtigt sind. Tabelle 4.3 hingegen behandelt ausschließlich jene Publikationen, die Daten zu den Zielgrößen induzierte elektrische Feldstärke E_i bzw. Stromdichte J im Gewebe mit Hilfe numerischer Simulationen mit anatomischen Körpermodellen liefern, welche direkt durch das Fahrzeug beim Fahren verursacht werden.

Das Ziel in Hakuta et al. (2021) war es, Induktionsfaktoren für die Expositionssituation eines/einer Fahrenden in einem PHEV abzuleiten, um damit später die Expositionsbewertung zu vereinfachen. Die Ergebnisse werden für den Frequenzbereich 0.3 – 400 kHz angegeben, wurden aber nur bei einer Frequenz tatsächlich berechnet und entsprechend skaliert. Es wird richtigerweise argumentiert, dass bei lokaler Magnetfeldexposition die Anwendung des 99 % Perzentils der induzierten elektrischen Feldstärke E_i zur Expositionsbewertung nicht geeignet ist, da diese tendenziell zur Unterschätzung der tatsächlichen Exposition führt. Anstatt aber den Maximalwert des über ein Volumen von 2 x 2 x 2 mm³ gemittelten E_i zu verwenden, wurde das 99.9 % Perzentil verwendet. Die Ergebnisse wurden auf einen Gleichtaktstrom von 1 A der Zu- und Ableitung (vermutlich zwischen Batterie/Inverter und Motor), die direkt unter dem Fahrersitz verlaufen, skaliert. Mit Verweis auf eine Publikation in japanischer Sprache, die nicht auffindbar ist, wird dies als realistischer Wert argumentiert.

In Li et al. (2018) bzw. Lin et al. (2018) fehlen wichtige Angaben zu den verwendeten Simulationsmethoden (es findet sich in beiden Publikationen lediglich jeweils ein einziger Satz dazu), so dass die wenigen angegebenen Werte für die induzierte elektrische Feldstärke E_i nicht vernünftig eingeordnet werden können. Klar scheint in jedem Fall zu sein, dass das 99 % Perzentil der induzierten elektrischen Feldstärke verwendet wurde. Ob jedoch zuvor der Volumenmittelwert über 2 x 2 x 2 mm³ gebildet wurde, wie in ICNIRP 2010 gefordert, ist nicht bekannt.

Ruddle und Kollegen haben in insgesamt drei Publikationen jeweils immer die gleichen Ergebnisse für die induzierte elektrische Feldstärke E_i bzw. Stromdichte J angegeben. Diese sind jeweils in Form von Expositionsindizes über ein Zeitintervall von 45 Sekunden bezüglich der Basisgrenzwerte aus ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 aufgetragen, wobei hier der über diesen Zeitraum aufgezeichnete Inverterstrom für die entsprechende Skalierung verwendet wurde. Zur Berechnung der Expositionsindizes wurden jeweils die Maximalwerte und nicht das 99 % Perzentil von E_i und J verwendet (Ruddle et al., 2014a; Ruddle und Low, 2014a, 2014b).

4.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Simulationen zeigten u. a., dass eine im Boden eines Fahrzeuges mit Stahlkarosserie lokalisierte Batterie nicht nur erhöhte magnetische Felder im Fußbereich erzeugt, sondern deren Felder auch durch die Karosserie in diesem Bereich verstärkt werden. Mit zunehmender Entfernung zur Batterie zeigte die Stahlkarosserie innerhalb der Fahrgastzelle des Fahrzeugs jedoch eine leicht abschirmende Wirkung. Des Weiteren führte der Einbau einer 2 mm-dicken batterieabdeckenden Stahlplatte zu einer Reduktion der magnetischen Flussdichte im Fahrgastraum um einen Faktor 7. Eine zusätzliche Minderung um einen Faktor von 20 wurde durch eine Verkleinerung der Stromschleifen (Stromkreisläufe aufgrund der Verkabelung zwischen Batterie, Inverter und E-Motor) erzielt (Low und Ruddle, 2013; Pinaud et al., 2014; Ruddle et al., 2013; Ruddle und Low, 2013b). Außerdem ergaben Simulationen von Batteriemodulen (Moreno-Torres et al., 2016) einen Einfluss der unterschiedlichen Umschaltfrequenzen (Ripple im Signal) der angeschlossenen Leistungselektronik auf die Bewertung der Magnetfeldexpositionen. Diese Umschaltfrequenzen veränderten die harmonischen Beiträge des Stromfrequenzspektrums, welche dann im Hinblick auf die festgelegten Grenzwerte eine unterschiedliche Gewichtung in der Bewertung der Expositionssituation erfuhren. Weitere feldreduzierende Maßnahmen an den Leitungen des Antriebsstrangs, z. B. durch Verdrillung der Kabel (destruktive Interferenz) (Ruddle et al., 2014b), zeigten erst bei größeren Abständen zum Antriebsstrang eine Wirkung innerhalb der Fahrgastzelle. Insgesamt waren die Magnetfelder im Fahrzeuginnern signifikant abhängig von den verwendeten Materialen für die Karosserie und deren geometrischer Form bzw. den lokal installierten Abschirmungen (Ionescu et al., 2019; Low und Ruddle, 2013; Moreno-Torres et al., 2013; Pinaud et al., 2014; Ruddle et al., 2014b, 2014a, 2013; Ruddle und Low, 2014a, 2014b, 2013a, 2013b, 2012).

4.4 Arbeiten betreffend Magnetfeldexposition in elektrisch betriebenen öffentlichen Verkehrsmitteln

4.4.1 Eingesetzte Methoden

Die Arbeiten, die von Messungen in öffentlichen Verkehrsmitteln berichten, umfassen eine Vielzahl von Fahrzeugen, u. a. Straßenbahnen, Metros, E-Loks, elektr. Busse, Hochgeschwindigkeitszüge und Magnetschwebebahnen (MagLev). Hierbei wurden hauptsächlich tragbare MF-Messgeräte, wie EMDEX II (Halgamuge et al., 2010), EMDEX und MICRORAD HT-300 (Contessa et al., 2010) verwendet. Nur in wenigen Studien (Contessa et al., 2010; Halgamuge et al., 2010; Kircher et al., 2018; Sadamitsu et al., 2018) wurden mehrere Messpositionen (Sitze, Boden, Pantograph etc.) innerhalb der Fahrzeuge untersucht. In zwei Publikationen wurde mithilfe von Simulationen die Magnetfeldexposition von Passagieren innerhalb eines MagLeV (Wang und Wen, 2019) und eines Hochgeschwindigkeitszugwaggons (Tian und Lu, 2020) untersucht.

4.4.2 Relevante Details der einzelnen recherchierten Arbeiten

Tabelle 4.5 fasst die aus den in diesem Abschnitt diskutierten Arbeiten ableitbaren Messergebnisse zusammen. In Tabelle 4.6 finden sich weitere Details zu den Arbeiten.

In Contessa et al. (2010) wurden insgesamt 7 unterschiedliche Züge messtechnisch untersucht, wobei 2 Züge einen DC-Antrieb hatten und die restlichen 5 einen AC-Antrieb. Es

wurde an unterschiedlichen Positionen gemessen und jeweils, neben Mittelwert, Median und Standardabweichung, das Maximum angegeben.

Wie bereits in Kapitel 4.2 erwähnt, werden in Halgamuge et al. (2010) gemittelte Minima und Maxima an unterschiedlichen Positionen für PHEV (1 Fahrzeug), Straßenbahnen sowie Zügen (Sample von insgesamt 100 Fahrzeugen) angegeben. Dabei wurden wiederholt Messungen an den in den Ergebnistabellen genannten Positionen durchgeführt und daraus die entsprechenden gemittelten Minima und Maxima berechnet.

In Kircher et al. (2018) sind sehr viele technische Details zu den drei unterschiedlichen untersuchten Zügen angeführt, bzgl. der Methodik der Messungen fehlen jedoch sämtliche Angaben. Da selbst die verwendeten Messgeräte nicht erwähnt wurden, lassen die wenigen angegebenen Messwerte keine Beurteilung zu.

In Sadamitsu et al. (2018) werden ICNIRP-Referenzwerte mit Grenzwerten aus der Normenreihe EN 50121 verglichen, welche die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) bei Bahnanwendung behandelt. Die Autoren argumentieren, dass aufgrund der um etwa 40 dB niedrigeren Grenzwerte in der Normenreihe gegenüber den ICNIRP-Referenzwerten die Exposition von Menschen durch EMF von Bahnanwendungen generell als nicht problematisch angesehen werden kann. Aus physikalischer Sicht ist diese Argumentation allerdings als nicht valide einzustufen, da die genannten Limits für EMV-Störaussendungen für eine Messdistanz von 10 m festgelegt und daher völlig ungeeignet sind, um daraus Schlussfolgerungen über die Feldverhältnisse in unmittelbarer Nähe zu den Feldquellen zu ziehen. Zusätzlich wurden auch hier wieder nur einzelne Spitzenwerte (PEAK-Werte) aus dem Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte angeführt. Da hier jedoch zumindest mehrere relevante PEAK-Werte angeführt sind, wurden diese Daten in Tabelle 4.5 mitaufgenommen. Grundsätzlich sind aber auch diese Daten für eine Expositionsbewertung nicht ausreichend dokumentiert.

Außerdem fehlen in zwei Publikationen die jeweiligen Informationen, ob es sich bei den angeführten Messwerten um PEAK- oder RMS-Werte handelt (Kircher et al., 2018; Sadamitsu et al., 2018).

In keiner der untersuchten Publikationen erfolgte eine Abschätzung der Unsicherheit zufolge von Erschütterungen der Messsonden während der Testfahrt.

Die aus den Arbeiten mit Expositionserfassung auf Basis von Simulationsrechnungen ableitbaren Ergebnisse sind in Tabelle 4.7 zusammengefasst. In Tabelle 4.8 finden sich weitere Details zu den Arbeiten.

Eine der beiden gefundenen Publikationen, die sich mit der Expositionsbewertung in öffentlichen Verkehrsmitteln auf Basis von Simulationsrechnungen befassen, berichtet ausschließlich externe Magnetfeldwerte (d. h. keine intrakorporalen Feldgrößen). Diese Studie wird hier daher nicht weiter behandelt (Wang und Wen, 2019).

In der anderen Arbeit, Tian und Lu (2020), wurden insgesamt 84 sitzende Passagiere, modelliert als generische Körpermodelle mit insgesamt 4 unterschiedlichen Gewebearten, in einem Eisenbahnwaggon eines chinesischen Hochgeschwindigkeitszugs betrachtet. Allem Anschein nach wurden die angegebenen Maximalwerte der induzierten elektrischen Feldstärke nicht über ein Volumen von 2 x 2 x 2 mm³ gemittelt.

4.4.3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Auch in dieser Kategorie waren die recherchierten Artikel sowohl in ihrem Detailgrad der berichteten Messdaten als auch in ihrer Qualität sehr heterogen und damit schlecht

vergleichbar. Ähnlich wie im Fall der BEV und PHEV (Kapitel 4.2) deuten die Literaturdaten jedoch nicht darauf hin, dass in der Praxis Konflikte mit den ICNIRP-Empfehlungen bestehen.

4.5 Tabellen mit Mess- und Berechnungsergebnissen sowie weiteren Informationen aus den in den Kapiteln 4.2 – 4.4 angeführten Literaturstellen

Nachfolgend sind für Fahrzeuge des Individualverkehrs bzw. öffentlichen Verkehrs, aufgeschlüsselt nach Messdaten und Ergebnisdaten aus Simulationsrechnungen, je zwei Tabellen angeführt. Die Aufschlüsselung auf jeweils zwei Tabellen erfolgte dabei aus Gründen der Übersichtlichkeit. Die jeweils erste Tabelle enthält dabei die Messdaten bzw. Ergebnisse aus Simulationsrechnungen mit den notwendigen Informationen, um die einzelnen Daten entsprechend einordnen zu können (z. B. Frequenz, Position, Darstellung, konkretes Fahrzeug oder Betriebszustand etc.), die jeweils zweite Tabelle enthält dann weitere umfangreiche und allgemeinere Informationen zur Publikation, die grundsätzlich alle in der ersten Tabelle angeführten Daten betreffen (z. B. verwendete Messgeräte, Berücksichtigung von Fahrbetrieb, untersuchte Sitzpositionen und/oder Messpositionen etc.).

Die nachfolgende Liste soll einen Überblick über die Tabellen liefern:

1. Messungen an Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs
    a. Messdaten: Tabelle 4.1 auf Seite 48ff
    b. Weitere Informationen: Tabelle 4.2 auf Seite 55ff
2. Simulationen von Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs
    a. Ergebnisdaten: Tabelle 4.3 auf Seite 60f
    b. Weitere Informationen: Tabelle 4.4 auf Seite 62f
3. Messungen an Elektrofahrzeugen des öffentlichen Verkehrs
    a. Messdaten: Tabelle 4.5 auf Seite 64f
    b. Weitere Informationen: Tabelle 4.6 auf Seite 66
4. Simulationen von Elektrofahrzeugen des öffentlichen Verkehrs
    a. Ergebnisdaten: Tabelle 4.7 auf Seite 67
    b. Weitere Informationen: Tabelle 4.8 auf Seite 67

In den Ergebnistabellen zu den Messergebnissen (Tabelle 4.1 und Tabelle 4.5) wird, sofern in den Publikationen angegeben, jeweils in der Spalte „Darstellung“ angeführt, ob es sich beim angegebenen Wert um einen Spitzenwert (Peak) oder RMS-Wert handelt. Wie sich gezeigt hat, fehlt diese wichtige Information bei vielen der angeführten Publikationen. Wenn gewisse Informationen nicht in der Publikation angeführt sind, werden diese als nicht definiert („n. d.“) gekennzeichnet. Sollten Mess- oder Ergebnisdaten einer Publikation als Ganzes als ungeeignet eingestuft worden sein, sind diese mit einem „-" gekennzeichnet. Über die Gründe der Nichtberücksichtigung von Daten einzelner Publikationen sei auf die jeweiligen Detailbeschreibungen und die Kapitel 4.2 – 4.4 verwiesen.

Wenn nicht anders vermerkt, handelt es sich bei Werteangaben in Prozent um Expositionsindizes bei Anwendung der WPM mit den für die Allgemeinbevölkerung gültigen Referenzwerten bzw. Basisgrenzwerten aus ICNIRP 1998 als Grundlage.

In den Ergebnistabellen (Tabelle 4.1, Tabelle 4.3, Tabelle 4.5 und Tabelle 4.7) handelt es sich ausschließlich um Maximalwerte, die entweder an einzelnen Messpositionen bei

unterschiedlichen Betriebssituationen oder bei gleichen Betriebssituationen an unterschiedlichen Messpositionen gemessen wurden, oder aber eine Kombination von beiden. Dies schließt auch Maximalwerte aus Messungen an mehreren Fahrzeugen mit ein. Die dazu vorhandenen Informationen sind jeweils in der letzten Spalte „Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände“ zu finden. Diese Vorgehensweise ist der sehr heterogenen Zusammensetzung der erhobenen Daten aus den unterschiedlichen Publikationen geschuldet. Etwaige Mittelwerte, sei es aus Messdaten über einen längeren Zeitraum oder aber von unterschiedlichen Messpositionen, wurden hingegen nicht berücksichtigt.

Tabelle 4.1: Messwerte aus Messungen an Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs, wie BEV, PHEV und Elektro-Zweiräder. Detailinformationen zu den einzelnen Publikationen sind noch in Tabelle 4.2 auf Seite 55ff zusammengefasst. Vereinzelt nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d." gekennzeichnet, wenn die Daten einer gesamten Publikation nicht berücksichtigt werden, wird dies mit „-" gekennzeichnet. *) vorhandene Messdaten in magnetische Flussdichte B in µT umgerechnet. **) Vorgängerprojekt.

Publikation	Messwert B [µT] ([%])	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
Eberhard et al. (2023)	< 3 %	0 – 100 kHz	Fußbereich	% ICNIRP 2010, Durchschnitt	Fahren im Realverkehr
	< 2 %	0 – 100 kHz	Fußbereich	% ICNIRP 2010, 50. Perzentil	Fahren im Realverkehr
	< 9 %	0 – 100 kHz	Fußbereich	% ICNIRP 2010, 95. Perzentil	Fahren im Realverkehr
	< 50 %	0 – 100 kHz	Fußbereich	% ICNIRP 2010, Maximalwert	Fahren im Realverkehr
Garvanova et al. (2022)	0.014	16 - 100k	Fahrersitz	„totales Signal"	Zündung
	0.072	16 - 100k	Fahrersitz	„totales Signal"	Fahrzeug gestartet
	0.016	16 - 100k	Beifahrersitz	„totales Signal"	Zündung
	0.078	16 - 100k	Beifahrersitz	„totales Signal"	Fahrzeug gestartet
	0.009	16 - 100k	Rückbank	„totales Signal"	Zündung
	0.028	16 - 100k	Rückbank	„totales Signal"	Fahrzeug gestartet
	0.095	16 - 100k	Fahrersitz	„totales Signal"	50 km/h
	0.200	16 - 100k	Fahrersitz	„totales Signal"	80 km/h
	0.265	16 - 100k	Fahrersitz	„totales Signal"	100 km/h
	0.09	16 - 100k	Beifahrersitz	„totales Signal"	50 km/h
	0.205	16 - 100k	Beifahrersitz	„totales Signal"	80 km/h
	0.270	16 - 100k	Beifahrersitz	„totales Signal"	100 km/h
	0.060	16 - 100k	Rückbank	„totales Signal"	50 km/h
	0.180	16 - 100k	Rückbank	„totales Signal"	80 km/h
	0.285	16 - 100k	Rückbank	„totales Signal"	100 km/h
Halgamuge et al. (2010)	1.32 *)	5 - 100k	linker Rücksitz	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	1.43 *)	5 - 100k	hinten rechts Boden	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	0.84 *)	5 - 100k	rechter Rücksitz	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	0.56 *)	5 - 100k	Kopf des Fahrers	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	0.75 *)	5 - 100k	vorne links Boden	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	2.39 *)	5 - 100k	linker Vordersitz	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf

Publikation	Messwert B [µT] ([%])	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
	1.31 *)	5 - 100k	vorne rechts Boden	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	1.79 *)	5 - 100k	rechter Vordersitz	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	0.43 *)	5 - 100k	hinten rechts Boden, Leerlauf	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
	0.4 *)	5 - 100k	linker Vordersitz, Leerlauf	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	PHEV, unterschiedliche Beschleunigungs- und Bremsphasen sowie konstante Geschwindigkeit und Leerlauf
Hareuveny et al. (2015)	0.90	40 - 800	linker Vordersitz	räumlicher Maximalwert	PHEV (3 Fahrzeuge)
	0.33	40 - 800	rechter Vordersitz	räumlicher Maximalwert	PHEV (3 Fahrzeuge)
	0.52	40 - 800	linker Rücksitz	räumlicher Maximalwert	PHEV (3 Fahrzeuge)
	1.86	40 - 800	rechter Rücksitz	räumlicher Maximalwert	PHEV (3 Fahrzeuge)
	0.87	40 - 800	Motorhaube	räumlicher Maximalwert	PHEV (3 Fahrzeuge)
	0.46	40 - 800	Kofferraum	räumlicher Maximalwert	PHEV (3 Fahrzeuge)
	bis 1.9	40 - 800	n. d.	räumlicher Maximalwert	PHEV (3 Fahrzeuge)
Karabetsos et al. (2010, 2013)	0.338	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, Leerlauf, 0 km/h
	0.285	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, Leerlauf, 0 km/h
	0.382	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, Leerlauf, 0 km/h
	0.181	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, Leerlauf, 0 km/h
	0.548	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, Leerlauf, 0 km/h
	1.46	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, Leerlauf, 0 km/h
	0.334	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, 30 - 40 km/h
	0.579	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, 30 - 40 km/h
	1.52	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, 30 - 40 km/h

Publikation	Messwert B [µT] ([%])	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
	0.344	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, 30 - 40 km/h
	0.615	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, 30 - 40 km/h
	1.71	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, 30 - 40 km/h
	0.514	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, 80 - 100 km/h
	0.747	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, 80 - 100 km/h
	1.28	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, 80 - 100 km/h
	0.631	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, 80 - 100 km/h
	1.09	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, 80 - 100 km/h
	1.73	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, 80 - 100 km/h
	0.379	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, Hochgeschwindigkeit (> 180 km/h)
	3.901	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, Hochgeschwindigkeit (> 180 km/h)
	8.438	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Lexus RX 400h, Hochgeschwindigkeit (> 180 km/h)
	0.754	DC, 5 - 32k	Kopf	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, Hochgeschwindigkeit (> 140 km/h)
	1.03	DC, 5 - 32k	Brust	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, Hochgeschwindigkeit (> 140 km/h)
	1.54	DC, 5 - 32k	Füße	Maximalwert im jeweiligen Körperbereich an allen 4 Sitzpositionen, Peak	HEV, Honda Civic IMA, Hochgeschwindigkeit (> 140 km/h)
	78.8 %	DC, 5 - 32k	Rücksitz Fußbereich	räumlicher Maximalwert nach WPM-Auswertung	HEV, Honda Civic IMA, Bremsen
	6.64 %	DC, 5 - 32k	in der Nähe der Batterie	räumlicher Maximalwert nach WPM-Auswertung	HEV, Lexus RX 400h, Starten
	48.0 %	DC, 5 - 32k	in der Nähe der Batterie	räumlicher Maximalwert nach WPM-Auswertung	HEV, Honda Civic IMA, Starten

Publikation	Messwert B [µT] ([%])	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
Karabetsos et al. (2014)	78.8 %	5 - 2k	mittlerer Fußbereich	räumlicher Maximalwert nach WPM-Auswertung	HEV (Mild Hybrid), beim Bremsen
Lennerz et al. (2018, 2020)	103 (62.1 %)	1 - 400k	außerhalb des Fahrzeugs	Maximalwert der 4 Messpunkte außerhalb des Fahrzeugs nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, BMW i3, Beschleunigung 0 - 120 km/h
	2.0 (5.1 %)	1 - 400k	Vordersitz	räumliches Maximum nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, BMW i3, Beschleunigung 0 - 120 km/h
	98.1 (47.5 %)	1 - 400k	außerhalb des Fahrzeugs	Maximalwert der 4 Messpunkte außerhalb des Fahrzeugs nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, Nissan Leaf, Beschleunigung 0 - 120 km/h
	2.1 (5.6 %)	1 - 400k	Vordersitz	räumliches Maximum nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, Nissan Leaf, Beschleunigung 0 - 120 km/h
	49.2 (20.2 %)	1 - 400k	außerhalb des Fahrzeugs	Maximalwert der 4 Messpunkte außerhalb des Fahrzeugs nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, Tesla 85S, Beschleunigung 0 - 120 km/h
	2.1 (5.2 %)	1 - 400k	Vordersitz	räumliches Maximum nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, Tesla 85S, Beschleunigung 0 - 120 km/h
	86.8 (43.3 %)	1 - 400k	außerhalb des Fahrzeugs	Maximalwert der 4 Messpunkte außerhalb des Fahrzeugs nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, VW e-up, Beschleunigung 0 - 120 km/h
	3.6 (6 %)	1 - 400k	Vordersitz	räumliches Maximum nach WPM-Auswertung und in µT	BEV, VW e-up, Beschleunigung 0 - 120 km/h
Li et al. (2018), Lin et al. (2018)	-	-	-	Daten nur in Form von geometrischem Mittel verfügbar	-
Pääkkönen et al. (2019)	-	-	-	-	-
Schmid et al. (2009) **)	2.8 %	0 - 100k	Fahrersitz, Fuß links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	BEV, Panda Electric, Beschleunigung
	3.2 %	0 - 100k	Beifahrersitz, Fuß links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	BEV, Panda Electric, Beschleunigung
	1.2 %	0 - 100k	Rückbank Mitte, Unterleib	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	BEV, Panda Electric, Bremsen
	8.0 %	0 - 100k	Fahrersitz, Fuß links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	BEV, Doblo Electric, Beschleunigung
	2.5 %	0 - 100k	Beifahrersitz, Fuß links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	BEV, Doblo Electric, Beschleunigung
	25.0 %	0 - 100k	Rückbank links, Unterleib	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	BEV, Doblo Electric, Beschleunigung
	33.5 %	0 - 100k	Fahrersitz, Fuß rechts	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Honda Civic IMA 2006, Beschleunigung

Publikation	Messwert B [µT] ([%])	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
	35.0 %	0 - 100k	Beifahrersitz, Fuß links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Honda Civic IMA 2006, Beschleunigung
	23.0 %	0 - 100k	Rückbank rechts, Fuß rechts	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Honda Civic IMA 2006, Beschleunigung
	8.5 %	0 - 100k	Fahrersitz, Fuß rechts	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Toyota Prius, Beschleunigung
	5.5 %	0 - 100k	Beifahrersitz, Fuß links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Toyota Prius, Beschleunigung
	29.0 %	0 - 100k	Rückbank Mitte, Unterschenkel links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Toyota Prius, Beschleunigung
	22.0 %	0 - 100k	Fahrersitz, Fuß rechts	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Lexus GS450h, Bremsen
	21.0 %	0 - 100k	Beifahrersitz, Fuß links	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Lexus GS450h, Bremsen
	34.0 %	0 - 100k	Rückbank rechts, Fuß links bzw. Unterleib	Maximalwert über alle Betriebszustände am jeweiligen Sitzplatz nach WPM-Auswertung	HEV, Lexus GS450h, Bremsen
Tell et al. (2013)	-	-	-	Daten nur in Form von geometrischem Mittel verfügbar	-
Tell & Kavet (2016)	18.7	120 - 10k	n. d.	Maximalwert, Peak	BEV, Kompaktwagen Sedan, Baujahr 2010, Betriebszustand n. d.
	2.6	1.2k - 100k	n. d.	Maximalwert, Peak	PHEV, Kompaktwagen Sedan, Baujahr 2010, Betriebszustand n. d.
Tondato et al. (2016)	-	-	-	-	-
Trentadue et al. (2020)	0.72 (34.2 %)	25 - 2k	vorne Brust zentral	Maximalwert aller Positionen in Fahrzeug 1 und 2 nach WPM-Auswertung	BEV, Aixam L6-BPs, Fahrzeug 2, Beschleunigung 0 - 50 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	1.64 (1.85 %)	25 - 2k	hinten Füße rechts	Maximalwert aller Positionen in Fahrzeug 1 und 2 in µT	BEV, Aixam L6-BPs, Fahrzeug 1, Beschleunigung 0 - 50 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	15.5 (13.9 %)	25 - 2k	Motor	-	BEV, Aixam L6-BPs, Fahrzeug 1, Beschleunigung 0 - 50 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	18.1	25 - 2k	Motor	-	BEV, Aixam L6-BPs, Fahrzeug 2, Beschleunigung 0 - 50 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	1.66 (184.4 %)	25 - 2k	vorne Füße rechts	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen nach WPM-Auswertung, max-hold	PHEV, Hyundai Ioniq, Beschleunigung 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen, voll aufgeladen
	4.08 (181.3 %)	25 - 2k	hinten Füße rechts	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen in µT, max-hold	PHEV, Hyundai Ioniq, Beschleunigung 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen, weniger als 50 % Restkapazität

Publikation	Messwert B [µT] ([%])	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
	3.82 (377.9 %)	25 - 2k	hinten Brust rechts	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen nach WPM-Auswertung	PHEV, Mitsubishi Outlander, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen, Messort VeLA 8
	3.47 (417.4 %)	25 - 2k	hinten Brust rechts	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen nach WPM-Auswertung und in µT	PHEV, Mitsubishi Outlander, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen, Messort VeLA 9
	1.37 (521.3 %)	25 - 2k	vorne Brust zentral	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen in µT	PHEV, Mitsubishi Outlander, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen, Messort VeLA 8
	0.25 (14.1 %)	25 - 2k	hinten Füße links	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen nach WPM-Auswertung	BEV, Hyundai Ioniq, 70 kW Ladeleistung, 38.3 kWh Batterie, 88 kW Motorleistung, Beschleunigung 0 - 50 km/h, 0 - 90 km/h, 0 - 130 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	0.56 (10.3 %)	25 - 2k	vorne Brust zentral	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen in µT	BEV, Hyundai Ioniq, 70 kW Ladeleistung, 38.3 kWh Batterie, 88 kW Motorleistung, Beschleunigung 0 - 50 km/h, 0 - 90 km/h, 0 - 130 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	0.92 (16.9 %)	25 - 2k	hinten Füße links	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen nach WPM-Auswertung	BEV, VW e-Golf, 50 kW Ladeleistung, 35.8 kWh Batterie, 100 kW Motorleistung, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 115 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	3.74 (7.1 %)	25 - 2k	hinten Brust links	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen in µT	BEV, VW e-Golf, 50 kW Ladeleistung, 35.8 kWh Batterie, 100 kW Motorleistung, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 115 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	2.18 (15.0 %)	25 - 2k	Kofferraum links	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen nach Anwendung der Multifrequenzmethode	BEV, Jaguar I-PaceM, 83 kW Ladeleistung, 90 kWh Batterie, 294 kW Motorleistung, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	77.0 %	25 - 2k	Kofferraum rechts	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen nach WPM-Auswertung	BEV, Jaguar I-PaceM, 83 kW Ladeleistung, 90 kWh Batterie, 294 kW Motorleistung, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
	2.95 (4.6 %)	25 - 2k	Kofferraum links	Maximalwert aus unterschiedlichen Positionen in µT	BEV, Jaguar I-PaceM, 83 kW Ladeleistung, 90 kWh Batterie, 294 kW Motorleistung, Beschleunigung 0 - 40 km/h, 0 - 80 km/h, 0 - 120 km/h, konstante Geschwindigkeit, Bremsen
Vassilev et al. (2015)	14.3 %	0 - 10M	Beifahrersitz Fuß	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#1 (BEV)
	17.8 %	0 - 10M	Oberhalb der hinteren Batterie	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#2 (PHEV)
	7.9 %	0 - 10M	Oberhalb der hinteren Batterie	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#3 (HEV)

Publikation	Messwert B [µT] ([%])	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
	5.9 %	0 - 10M	hinten Fuß	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#4 (BEV)
	4.0 %	0 - 10M	Beifahrersitz	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#5 (BEV)
	3.2 %	0 - 10M	Beifahrersitz	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#6 (BEV)
	2.1 %	0 - 10M	Beifahrersitz	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#7 (BEV mit Brennstoffzelle)
	2.7 %	0 - 10M	Beifahrersitz Fuß	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	#8 (BEV)
	2.7 %	0 - 10M	Beifahrersitz	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	konventionelles Fahrzeug #1
	9.0 %	0 - 10M	linker Rücksitz	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	konventionelles Fahrzeug #2
	10.0 %	0 - 10M	linker Rücksitz	Maximalwert nach WPM-Auswertung (ICNIRP 2010)	konventionelles Fahrzeug #3
	300	0 - 10k	Antrieb	Maximalwert der betrachteten Fahrzeuge	alle acht Elektroautos
	2.0	0 - 20	Räder	Maximalwert der betrachteten Fahrzeuge	alle acht Elektroautos und alle drei konventionellen Fahrzeuge
	0.15	0 - 200	Verbrennungsmotor	Maximalwert der betrachteten Fahrzeuge	#2 (PHEV) und alle drei konventionellen Fahrzeuge
	~ 1.0	0.5 - 1k	Servopumpe	räumliches Maximum	#1 (BEV)
	~ 1.0	0 - 400	Nutzbremse	räumliches Maximum	#2 (PHEV)
	~ 0.5	0 - 600	elektrische Kopplung zwischen unterschiedlichen Geräten im Fahrzeug und Elektromotor	räumliches Maximum	#3 (HEV)
	~ 0.020	7 - 9k	Inverter	räumliches Maximum	#1 - #4
	~ 0.060	0.2 - 10M	Inverter	räumliches Maximum	#1 - #4
Yang et al. (2019)	-	-	-	-	-

Tabelle 4.2: Zusätzliche Informationen zu den in Tabelle 4.1 auf Seite 48ff zusammengefassten Immissionsdaten von Messungen an Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs wie BEV, PHEV und Elektro-Zweiräder. Nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d." gekennzeichnet. „zb" Zeitbereich, „fs" frequenzselektiv, „bb" Breitband. „j" ja, wurde berücksichtigt. „n" nein, wurde nicht berücksichtigt.

Publikation	Fahrbetrieb	Messgeräte	Sitz-positionen	Messposition (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Mess-methode	identische Fahrzeugzustände bei hintereinander erfolgten Messungen	Störgrößen identifiziert bzw. eliminiert	Rand-bedingungen	Sonstiges
Eberhard et al. (2023)	j	ExpoM-ELF	Fahrersitz, Beifahrersitz, Rückbank	1	je ein Messgerät im Fußbereich der vorderen und hinteren Sitzreihe, jeweils links und rechts. Ein zusätzliches Messgerät hinter Frontscheibe	zb + fs	n.d.	nein	Fahrt im Realverkehr	Zusätzlich zu Messungen mit fix positionierten Messgeräten erfolgten im Fußbereich auch Messungen, bei denen die Messgeräte entlang eines Messpunkgitters bewegt wurden.
Garvanova et al. (2022)	j	Gigaherz ME 3830B Analyzer (16 Hz - 100 kHz, 1 - 1999 nT, 1 - 1999 V/m)	Fahrersitz, Beifahrersitz, Rückbank	n. d.	n. d.	bb	n. d.	nein	Stadtverkehr, Autobahn	Messgerät wurde zwischen Fahrer- und Beifahrersitz positioniert, Messwerte aber für die beiden Sitze angegeben
Halgamuge et al. (2010)	j	EMDEX II (AC, 40 - 800 Hz, Samplingzeit 3 s) Narda EHP-50 (5 Hz - 100 kHz, Samplingzeit 30 s)	n. d.	3	n. d.	fs + bb	n. d.	nein	Straße	Publikation enthält Daten von weiteren Untersuchungen von Straßenbahnen und Zügen

Publikation	Fahrbetrieb	Messgeräte	Sitz-positionen	Messposition (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Mess-methode	identische Fahrzeugzustände bei hintereinander erfolgten Messungen	Störgrößen identifiziert bzw. eliminiert	Rand-bedingungen	Sonstiges
Hareuveny et al. (2015)	j	EMDEX-II ELF MF (Samplingzeit 1.5 s)	4 Sitze, Motorhaube, Kofferraum; kontinuierliche Messungen	verschiedene Höhen, 1 Messgerät pro Sitz nahe am Oberkörper	n. d.	bb	viele Messungen, 2-mal pro Tag; gleiche konstante Geschwindigkeiten Vergleich des geom. Mittels	Hochspann-ungsleitung mit 0.01 µT	Straße (1.3 km)	Vergleich mit Benzin- und Dieselfahrzeugen; Licht war eingeschaltet, Klimaanlage und Radio ausgeschaltet
Karabetsos et al. (2010, 2013)	j	Narda EFA-300 (LF, 5 Hz - 32 kHz), Metrolab Instr. SA ETM-1 (DC)	li. Vordersitz, re. Vordersitz, li. Rücksitz, re. Rücksitz	3 (Füße (10 cm über dem Fahrzeugboden), Brust, Kopf	n. d.	fs + bb	n. d.	nein	Straße	Klimaanlage und Lüftung ausgeschaltet
Karabetsos et al. (2014)	j	Narda EFA-300 Metrolab Instruments SA ETM-1 (5 Hz - 32 kHz)	alle vier Sitze	3 (Füße, Brust, Kopf)	n. d.	fs + bb	n. d.	Felder durch magnetisierte Reifen	Straße, untersch. Orte & Fahrer	Jeweils 3 Voll- und Mildhybridfahrzeuge; Klimaanlage + Ventilatoren ausgeschaltet;
Lennerz et al. (2018, 2020)	j	Narda ELT-400 mit 100 cm² Sonde	Vordersitz (nicht näher definiert)	1 auf der Höhe des Implantates	n. d.	bb	n. d.	Beitrag durch magnetisierte Reifen erkannt, jedoch nicht eliminiert	Rollenprüfstand; weitere Tests im Straßenverkehr	Studien befassen sich mit kardialen implantierbaren elektrischen Geräten
Li et al. (2018), Lin et al. (2018)	j	SEM-600 Safetytech Beschleunigungssensor LIS3LV02DL STMicroelectronics (Samplingzeit 1s)	Rücksitze	4 (Kopf (Erwachsene), Kopf (Kind), Becken, Knöchel)	im Hinblick auf Kleinkinder auf dem Rücksitz	fs	60 s-Messung unterteilt in 4 Messszenarien	keine Hoch-spannungs-leitungen; Magnetfeld von magnetisierten Reifen nicht eliminiert;	1.5 km Stadt-Teststrecke, 5 m Höhen-unterschied, relative Feuchtigkeit 45 - 75 %, Temperatur 31 – 34 °C;	10 BEV, welche am chinesischen Markt beliebt sind; Untersuchung von Rücksitzen mit Fokus auf Kinder; vor der Testfahrt wurden alle elektrischen Geräte 5 Minuten lang eingeschaltet;

Publikation	Fahrbetrieb	Messgeräte	Sitz-positionen	Messposition (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Mess-methode	identische Fahrzeugzustände bei hintereinander erfolgten Messungen	Störgrößen identifiziert bzw. eliminiert	Rand-bedingungen	Sonstiges
Pääkkönen et al. (2019)	j	Combinova MFM3300 Enviromentor ML-1 (Magnetfeldlogger)	Nur Passagiersitze	3 (Kopf, Sitzfläche, Füße)	n. d.	fs	n. d.	Hintergrund Magnetfeld < 0.02 µT	5 km lange Stadtschleife	Vergleich von 7 Autos: 4 BEV, 1 PHEV, 2 Benzinfahrzeuge
Schmid et al. (2009)	j	Chauvin Arnoux C.A42 + MF05 (0 Hz - 500 Hz) Narda ELT-400 mit 100 cm² Sonde (10 Hz - 400 kHz) ARC-NIFSPEC (Multikanal Messsystem auf Basis von National Instruments PXI System Hardware) Stromzange PR2000	Fahrersitz und weitere 2 - 4 Sitzplätze	12 (1x Kopf, 5x Brust, 3x je Bein)	Überblicks-messungen bei typischem Belastungs-zustand	fs	auf Rollenprüfstand mit konstanten Kombinationen aus Geschwindigkeit und Lastmomenten, auf der Test-strecke mittels Beschleunigungs-sensors und Abgleich der einzelnen Messdurchläufe	Reifen-magnetisierung und Rollenprüf-stand bei allen unterschied-lichen Last-zuständen	Rollenprüfstand und 60 km Teststrecke	2 BEV, 3 HEV sowie Nahverkehrsbus mit Hybridantrieb und je ein Nutzfahrzeug mit reinem Elektro- sowie mit Hybridantrieb; Vergleich der Messwerte mit konventionellen Fahrzeugen;
Tell et al. (2013)	j	Sechs EMDEX Lite broadband meter (40 - 1000 Hz, Sampling alle 4 s) Statistik mit JMP statistical Software	alle Sitze	Fahrer-Fußboden, Rück-sitze-Fußboden (zentral), Vordersitz (Passagier), beide Rücksitze	n. d.	bb	30 min-Messungen	nein	16.3 km lange rechteckige Teststrecke mit Höhenunterschied von 105 m 4.7 km Hochgeschwind-igkeitsstrecke 1 Zwischenstopp für 4 - 5 min	Vergleich von 14 Autos zwischen 2000 und 2009: 2 BEV, 1 PHEV, 5 HEV, 6 Benzinfahrzeuge
Tell & Kavet (2016)	j	Narda EHP-50C (120 Hz - 10 kHz) Narda EHP-50D (1.2 - 100 kHz) EMDEX Lite (40 - 1000 Hz)	Rücksitz	n. d.	Bewegung des Sensors vom Rücksitz aus durch den Anwender	fs + bb	mind. 2 Wiederholungen	Radio aus; Hintergrund-Messung bei Fahrzeug AUS (Sensor auf dem Boden im Rücksitz-bereich)	Straßen (Stadt), Autobahnen v = 0 - 60 mph Dauer der Messungen: 5 - 7 min über mehrere Monate	Vergleich von 13 Autos: 9 BEV / (P)HEV, 4 Benzinfahrzeuge

Publikation	Fahrbetrieb	Messgeräte	Sitz-positionen	Messposition (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Mess-methode	identische Fahrzeugzustände bei hintereinander erfolgten Messungen	Störgrößen identifiziert bzw. eliminiert	Rand-bedingungen	Sonstiges
Tondato et al. (2016)	n	Narda EHP-50C	linker Vordersitz, rechter Vordersitz, linker Rücksitz	1	n. d.	fs	n. d.	nein	Test auf einem Autolift (Räder 15 cm über dem Boden)	Untersuchung eines PHEV (ToyotaPrius®2012); direkter Einfluss auf ICDs bei 30 Patienten
Trentadue et al. (2020)	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	Erfassung via Steuergerät + eigene Software für 3 versch. Geschwindigkeiten mit Beschleunigungs- und Bremsphasen; WPM-Bewertung;	Hintergrund-MF mit ein- und ausgeschaltetem Auto geprüft	VeLA 8 Klimaprüf-kammer (-30 bis 50 ° C); VeLA 9 semi-reflexionsarme Kammer;	aktuelle Autos;
Vassilev et al. (2015)	j	Bartington MAG-03 (NF, 0 - 3 kHz) Sensys FGM 3-D/100 (NF, 0 - 1.2 kHz) Narda EHP-50D (HF, 5 Hz - 100kHz) Spectran NF-5035 (HF, 1 Hz - 10MHz) Stromzange Fluke i310s (I, 0 - 300 A, 0 - 20 kHz) Beschleunigungssensor STMicroelectronics LIS3LV02DL Erfassungssystem OROS OR36 mit 2 kHz LP-Filter und 5.12 kHz Samplingrate	Beifahrer, Kofferraum	Mannequin mit 3 NF und 3 HF-Sensoren im Kopf-, Sitz- und Fußbereich; LF über Batterie im Kofferraum; Strom via Batteriekabel	inspiriert durch Dietrich et al. (1999) und Brecher et al. (2002)	fs	Korrelation zw. I und vertikalem MF über der Batterie	On-Board-Geräte-Labortests mit Sensoren unter dem Auto; sich wieder-holende Signale in Spektrogramm (z. B. 50 Hz Hochspann-ungsleitung); Rädermagne-tisierung	Labortest auf dem Lift, einführende Tests auf Teststrecke (Identifikation von Störgrößen); Test auf flachen Straßen (0 - 60km/h); Steigungen, Autobahn führten zu keinen neuen Erkenntnissen	Tests von BEV, PHEV, HEV und konventionellen Fahrzeugen

Publikation	Fahrbetrieb	Messgeräte	Sitz-positionen	Messposition (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Mess-methode	identische Fahrzeugzustände bei hintereinander erfolgten Messungen	Störgrößen identifiziert bzw. eliminiert	Rand-bedingungen	Sonstiges
Yang et al. (2019)	j	SEM-600, Safetytech LF-01, Safetytech-Sonde (1 - 100 kHz) Beschleunigungssensor LIS3LV02DL, STMicroelectronics (Samplingzeit 1 s)	rechter Vorder- und Rücksitz (Sitzfläche)	1	n. d.	fs	30 s-Messungen unterteilt in 2 Messszenarien, jeweils 10-mal	keine Hoch-spannungs-leitungen	1.5 km Stadt-Teststrecke, 5m Höhenunter-schied, Feuchtigkeit 30 - 60 %, Temperatur 32 - 36 °C; Messungen am 1.8.17, 4.8.18 und 25.7.19	3 beliebte BEV in China; Langzeitüberwach-ung von Magnet-feldern bei 3 BEV (2 Jahre); übliche Wartung nach 5000 - 6000 km;

Tabelle 4.3: Ergebnisdaten aus Simulationen von Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs, wie BEV, PHEV und Elektro-Zweiräder. Detailinformationen zu den einzelnen Publikationen sind noch in Tabelle 4.4 auf Seite 62f zusammengefasst. Vereinzelt nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d." gekennzeichnet, wenn die Daten einer gesamten Publikation nicht berücksichtigt werden, wird dies mit „-" gekennzeichnet.

Publikation	Expositionswert Ei (V/m) bzw. J (A/m²), ExpInd [%]	Frequenz [Hz]	Position des Körpermodells bzw. Teilkörperbereich	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
Chen et al. (2018)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Hakuta et al. (2021)	0.79 V/m @ 400 kHz	0.3 - 400k	Fahrersitz, linker Fuß	99.9 % Perzentilwert	PHEV, vereinfachte Autokarosserie mit Kabel unter dem Fahrersitz, normiert auf I = 1 A
	0.62 V/m @ 400 kHz	0.3 - 400k	Fahrersitz, Oberkörper	99.9 % Perzentilwert	PHEV, vereinfachte Autokarosserie mit Kabel unter dem Fahrersitz, normiert auf I = 1 A
Ionescu et al. (2019)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Li et al. (2018), Lin et al. (2018)	0.73 mV/m	n. d.	Kind, Kopf	99 % Perzentilwert	BEV
	1.45 mV/m	n. d.	Kind, Körper	99 % Perzentilwert	BEV
	1.08 mV/m	n. d.	Erwachsener, Kopf	99 % Perzentilwert	BEV
	2.30 mV/m	n. d.	Erwachsener, Körper	99 % Perzentilwert	BEV
Moreno-Torres et al. (2013)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Moreno-Torres et al. (2016)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Pinaud et al. (2014)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Ruddle and Low (2012)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Low and Ruddle (2013) & Ruddle et al. (2013) & Ruddle and Low (2013b)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Ruddle and Low (2013a)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-

Publikation	Expositionswert Ei (V/m) bzw. J (A/m²), ExpInd [%]	Frequenz [Hz]	Position des Körpermodells bzw. Teilkörperbereich	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
Ruddle and Low (2014a, b), Ruddle et al. (2014a)	62.4 %, ICNIRP 1998, GenPub	0 - 3k	Fahrersitz, Bauch	Maximalwert	BEV und PHEV, einphasiges Hochspannungskabel, normiert auf I = 1 A
	26.5 %, ICNIRP 2010, GenPub	0 - 3k	Fahrersitz, Bauch	Maximalwert	BEV und PHEV, einphasiges Hochspannungskabel, normiert auf I = 1 A
	32.7 %, ICNIRP 1998, GenPub	0 - 3k	Fahrersitz, Bauch	Maximalwert	BEV, kompletter Antriebsstrang bestehend aus einphasigem Hochspannungskabel, Batterie, 2 Motoren und 2 Invertern, normiert auf I = 1 A
	6.64 %, ICNIRP 2010, GenPub	0 - 3k	Fahrersitz, Bauch	Maximalwert	BEV, kompletter Antriebsstrang bestehend aus einphasigem Hochspannungskabel, Batterie, 2 Motoren und 2 Invertern, normiert auf I = 1 A
Ruddle et al. (2014b)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-
Tan et al. (2023)	0.01 mV/m	680	Fahrer- und Beifahrersitz	Maximalwert	Vereinfachte Autokarosserie mit Kabel unter dem Fahrersitz, 40 A RMS
	0.02 mV/m	680	Rückbank	Maximalwert	Vereinfachte Autokarosserie mit Kabel unter dem Fahrersitz, 40 A RMS
	1.64×10^{-8} A/m²	680	Fahrersitz	Maximalwert	Vereinfachte Autokarosserie mit Kabel unter dem Fahrersitz, 40 A RMS

Tabelle 4.4: Zusätzliche Informationen zu den in Tabelle 4.3 auf Seite 60f zusammengefassten Ergebnisdaten aus Simulationen von Elektrofahrzeugen des Individualverkehrs wie BEV, PHEV und Elektro-Zweiräder. Nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d.“ gekennzeichnet.

Publikation	Fahrbetrieb	Simulationssoftware / Messgeräte	Untersuchte Sitzpositionen	Untersuchte Positionen (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Rand-bedingungen	Sonstiges
Chen et al. (2018)	n	Altair HyperWorks (früher CEDRAT)	n. d.	n. d.	n. d.	-	Simulation der Magnetfelder bei Batterien
Hakuta et al. (2021)	n	ANSYS HFSS, Körpermodell TARO	Fahrersitz	mehrere	n. d.	-	1 PHEV, vereinfachte Autokarosserie mit Kabel unter dem Fahrersitz; aus den Simulationen abgeleitete Kopplungsfaktoren
Ionescu et al. (2019)	n	FEMM	n. d.	n. d.	n. d.	I = 100 A	1 BEV, Querschnitt der frontalen Karosserie eines BMW i3; Simulation von Hochspannungskabel mit Elektromotor und Inverter;
Li et al. (2018), Lin et al. (2018)	j	SEMCAD X v14.8	Rücksitze	4 (Kopf (Erwachsene), Kopf (Kind), Becken, Knöchel)	im Hinblick auf Kleinkinder auf dem Rücksitz	-	10 BEV, welche am chinesischen Markt beliebt sind
Moreno-Torres et al. (2013)	n	F.W. Bell 5170 (DC) Combinova MFM10 (AC)	n. d.	20 cm zum Inverter (Realbedingung im BEV); andere Abstände wurden auch untersucht	maximales Magnetfeld entlang der Normalen	-	Vorschläge für ferromagnetische Abschirmungen etc.; 3D Model basiert auf SEMIKRON SKS 60F B6CI 35 V12
Moreno-Torres et al. (2016)	n	F.W. Bell 5170 (DC) Combinova MFM10 (AC) FEM Sim	n. d.	unter den Sitzen	n. d.	I bis zu 300 A	Vergleich Messung - Simulation eines Batteriemoduls
Pinaud et al. (2014)	n	Flux 3D sowie eigene Software (Locapi) Bartington(LF, 0 - 3 kHz) Narda (5 Hz - 100 kHz) Spectran (1 Hz - 1 MHz) Mannequin	Beifahrersitz	Kopf, Brust, Bauch, Sitzfläche, Füße	n. d.	I = 100 A	3-türiges Fahrzeug aus den späten 90er Jahren, hauptsächlich aus ferromagnetischen Materialien; 2 Batterien (vorne & hinten) verbunden durch 2 verschiedene Kabelanordnungen;
Ruddle and Low (2012)	n	Flux 3D	Vordersitze	Knöchel, Sitzfläche, Oberkörper, Kopf	n. d.	I = 1 A	vereinfachtes Modell einer Karosserie (unterschiedliche Metalle); Kabel im Mittelsteg des Fahrzeugs;

Publikation	Fahrbetrieb	Simulationssoftware / Messgeräte	Untersuchte Sitzpositionen	Untersuchte Positionen (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Rand-bedingungen	Sonstiges
Low and Ruddle (2013) Ruddle et al. (2013) & Ruddle and Low (2013b)	j	Flux 3D	Fahrersitz	Fußbereich, Kopfbereich, Kofferraum	n. d.	I = 1 A	Karosseriematerial: Kupfer, Alu, Stahl, nicht-ferromagnetischer Stahl; unterschiedliche Varianten der Karosserie (mit oder ohne Türen etc.); Vorschläge zur Minimierung der Magnetfeldexposition; Batterie-Ströme aus echtem Inverter gemessen beim Beschl. und Bremsen;
Ruddle and Low (2013a)	n	Flux 3D	n. d.	1	Nähe zum Antriebsstrang	-	Kabel des Antriebsstrangs
Ruddle and Low (2014a, b), Ruddle et al. (2014a)	j	SEMCAD X ELF Solver, Körpermodell Duke (Virtual Family), Flux 3D	Fahrersitz	Knöchel, Brust, Kopf, Sitz	n. d.	Inverterstrom einer 45 s-Fahrt für die Simulation verwendet	2 Karosserien: aus ferromagnetischem (relative Permeabilität = 500) und nicht-ferromagnetischem Stahl; Labormessungen an einem 70 kW Antriebsstrang (Kabel, Inverter, Elektromotoren) bei unterschiedlichen Betriebszuständen;
Ruddle et al. (2014b)	n	Flux 3D	n. d.	1	n. d.	-	70 kW Antriebsstrang
Tan et al. (2023)	j	Finite Elemente Methode	Alle Sitzpositionen	Ganzer Körper	n. d.	I = 40 A	Vereinfachtes Modell einer Karosserie, Kabel des Antriebsstrangs

Tabelle 4.5: Messdaten aus Messungen an Elektrofahrzeugen des öffentlichen Verkehrs (Elektro-Schienenfahrzeuge). Detailinformationen zu den einzelnen Publikationen sind noch in Tabelle 4.6 auf Seite 66 zusammengefasst. Vereinzelt nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d." gekennzeichnet, wenn die Daten einer gesamten Publikation nicht berücksichtigt werden, wird dies mit „-" gekennzeichnet. *) vorhandene Messdaten in magnetische Flussdichte B in µT umgerechnet.

Publikation	B [µT]	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeug, Charakteristika, Betriebszustände
Contessa et al. (2010)	300	DC	Fahrersitz	Maximalwert, RMS	7 unterschiedliche Züge
	270	DC	Kabine	Maximalwert, RMS	7 unterschiedliche Züge
	19.7	40 - 1k	n. d.	Maximalwert, RMS	7 unterschiedliche Züge
	20.0	5 - 30k	n. d.	Maximalwert, peak	7 unterschiedliche Züge
Halgamuge et al. (2010)	7.60 *)	5 - 100k	Boden (Mitte)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	1.10 *)	5 - 100k	Sitz (Mitte)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	1.40 *)	5 - 100k	Boden (hinten)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	1.70 *)	5 - 100k	Sitz (hinten)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	5.50 *)	5 - 100k	Boden (vorne)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	0.94 *)	5 - 100k	Sitz (vorne)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	3.45 *)	5 - 100k	Boden (außerhalb)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	1.85 *)	5 - 100k	Pantograph	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Straßenbahn
	0.36 *)	5 - 100k	Boden (hinten)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Zug
	8.70 *)	5 - 100k	Boden (vorne)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Zug
	0.83 *)	5 - 100k	Boden (Mitte)	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Zug
	0.47 *)	5 - 100k	Fahrersitz	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Zug
	0.48 *)	5 - 100k	außerhalb	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Zug
	0.55 *)	5 - 100k	Pantograph	gemittelte Maximalwerte aller betrachteten Fahrzeuge und Betriebszustände, RMS	Zug

Publikation	B [µT]	Frequenz [Hz]	Messposition	Darstellung	Fahrzeug, Charakteristika, Betriebszustände
Kircher et al. (2018)	595	n. d.	Sitzhöhe	Maximalwert	Zug, ICE3
	14	n. d.	Sitzhöhe	Maximalwert	Zug, TR09
	96	n. d.	Sitzhöhe	Maximalwert	Zug, JR MagLev (ohne Abschirmung)
	64	n. d.	Sitzhöhe	Maximalwert	Zug, JR MagLev (mit Abschirmung)
Sadamitsu et al. (2018)	5.37 @ 20 Hz	15 - 30	in der Mitte des Zugwaggons	Maximalwert	n. d.
	2.38 @ 54 Hz	45 - 65	in der Mitte des Zugwaggons	Maximalwert	n. d.
	0.03 @ 295 Hz	90 - 500	in der Mitte des Zugwaggons	Maximalwert	n. d.
	0.3 @ 680 Hz	500 - 2k	in der Mitte des Zugwaggons	Maximalwert	n. d.
	0.74 @ 2 kHz	2k - 400k	in der Mitte des Zugwaggons	Maximalwert	n. d.

Tabelle 4.6: Zusätzliche Informationen zu den in Tabelle 4.5 auf Seite 64f zusammengefassten Messdaten von Messungen an Elektrofahrzeugen des öffentlichen Verkehrs (Elektro-Schienenfahrzeuge). Nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d." gekennzeichnet. „fs" frequenzselektiv, „bb" Breitband.

Publikation	Messgeräte	Sitz-positionen	Messposition (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der Messpositionen	Mess-methode	identische Fahrzeugzustände bei hintereinander erfolgten Messungen	Störgrößen identifiziert bzw. eliminiert	Sonstiges
Contessa et al. (2010)	Metrolab ETM-1 (Hallsensor) Wandel & Goltermann EFA-1 (5 Hz - 30 kHz) Wandel & Goltermann EFA-3 (5 Hz - 30 kHz) EMDEX Lite (40 Hz - 1 kHz) MICRORAD HT-300 (40 Hz - 1 kHz)	n. d.	Fahrerkabine sowie alle durch die Fahrer zugänglichen Orte (z. B. Korridor etc.); 1 Messgerät fix bei der Motorsteuerung, welche sich 50 cm vom Fahrer entfernt befindet	n. d.	fs + bb	kontinuierliche Messung über lange Strecken	nein	7 Züge (2 DC, 5 AC)
Halgamuge et al. (2010)	EMDEX II (AC, 40 - 800 Hz, Samplingzeit 3 s) Narda EHP-50 (5 Hz - 100 kHz, Samplingzeit 30 s)	n. d.	3	n. d.	fs + bb	n. d.	nein	Stichprobe aus 100 Zügen und Straßenbahnen; Publikation enthält Daten von weiteren Unter-suchungen von PHEV;
Kircher et al. (2018)	n. d.	n. d.	unterschiedliche Positionen in den Zügen	n. d.	n. d.	n. d.	nein	Vergleich zwischen ICE3, Transrapid 09, JR MagLev (mit & ohne Abschirmung); enthält viele technische Details zu den Zügen;
Sadamitsu et al. (2018)	n. d.	in der Mitte des Zugwaggons	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	nein	-

Tabelle 4.7: Ergebnisdaten aus Simulationen von Elektrofahrzeugen des öffentlichen Verkehrs (Elektro-Schienenfahrzeuge). Detailinformationen zu den einzelnen Publikationen sind noch in Tabelle 4.8 zusammengefasst. Vereinzelt nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d." gekennzeichnet, wenn die Daten einer gesamten Publikation nicht berücksichtigt werden, wird dies mit „-" gekennzeichnet.

Publikation	Expositionswert Ei (V/m) bzw. J (A/m²) ExpInd [%]	Frequenz [Hz]	Position des Körpermodells bzw. Teilkörperbereich	Darstellung	Fahrzeuge, Charakteristika, Betriebszustände
Tian & Lu (2020)	96.3 mV/m	60	Kopf	Maximalwert ohne Volumenmittelung	n. d.
Wang & Wen (2019)	keine intrakorporalen Größen berechnet	-	-	-	-

Tabelle 4.8: Zusätzliche Informationen zu den in Tabelle 4.7 zusammengefassten Ergebnisdaten aus Simulationen von Elektrofahrzeugen des öffentlichen Verkehrs (Elektro-Schienenfahrzeuge). Nicht definierte oder fehlende Daten sind mit „n. d." gekennzeichnet.

Publikation	Simulationssoftware / Messgeräte	Untersuchte Sitzpositionen	Untersuchte Positionen (Anzahl) pro Sitz	Vorgehen bei Auswahl der untersuchten Positionen	Randbedingungen	Sonstiges
Tian & Lu (2020)	COMSOL Multiphysics Software 5.4, generisches Körpermodell mit 3 verschiedenen Geweben im Kopf (Kopfhaut, Schädelknochen und Gehirn) sowie dem restlichen Körper als homogenes Gewebe	Sitzhöhe = 1.304 m	84 sitzende Passagiere	n. d.	I = 211 A (3-phasig)	Eisenbahnwaggon basierend auf dem chinesischen Hochgeschwindigkeitszug CRH5; Stromkabel, die die Motoren und Inverter verbinden, verlaufen unter dem Waggon;
Wang & Wen (2019)	n. d.	n. d.	9 Messpunkte verteilt auf 3 Höhen: 0.3 m, 0.9 m, 1.5 m	n. d.	I = 25.7 A (DC) I = 1800 A (AC), 3 Phasen	Maglev

5 Markt- und Technik-Übersicht zu Elektroautos

Die durchgeführte Recherche über die am Markt verfügbaren, ausschließlich mit Batterie betriebenen Elektrofahrzeuge (BEV) und Plug-In-Hybride (PHEV) sowie deren relevante technische Daten basiert auf der ADAC-Autodatenbank (ADAC, 2021). Diese Datenbank wurde im Rahmen der Recherche systematisch ausgewertet und war zum Stichtag der Auswertung mit über 138 000 Modellen, davon 12 000 aktuelle Fahrzeuge, die vermutlich größte Autodatenbank in Deutschland. Sie umfasst umfassende technische Daten für Motor, Antrieb, Abmessungen, Gewicht, Karosserie, Fahrwerk und Messwerte der Hersteller für zahlreiche Modellgenerationen jeweils für verschiedene Motor- und Ausstattungsvarianten. Für Elektrofahrzeuge sind dort auch speziell die relevanten Angaben von Batteriekapazität, Ladetechnologien, Ladeleistung und Ladedauer abrufbar.

Zusätzlich wurden die Zulassungszahlen von BEV und PHEV in Deutschland seit 2016 erhoben. Mit Stichtag der Datenbankauswertung (30.04.2021) boten in Deutschland 33 Fahrzeughersteller insgesamt 78 rein elektrische Fahrzeuge (BEV) an, davon waren 10 Modelle bereits wieder ausgelaufen oder durch Nachfolgemodelle ersetzt. Bei PHEV boten 31 Hersteller 152 Modelle an, von denen bereits 41 Modelle wieder ausgelaufen waren oder durch Nachfolgemodelle ersetzt wurden.

Es ist zu beachten, dass der Markt an BEV- und PHEV-Fahrzeugen immer noch sehr dynamisch ist und es im Jahr 2021 eine Vielzahl von Neuankündigungen und Markteinführungen gab, so dass die vorhergehenden Zahlen lediglich als Momentaufnahme der Datenauswertung Ende April 2021 zu verstehen sind und sich bis zum Jahres- bzw. Projektende schon signifikant verändert hatten.

5.1 Karosserieformen

Bei Elektroautos (BEV) dominieren zwei Karosserieformen: Zum einen gibt es diverse Schrägheck-Modelle, meist Klein- oder Kompaktwagen, wie die Bestseller Renault Zoe oder VW ID.3. Zum anderen hat die SUV-Welle auch die Elektroautos erfasst und zahlreiche neue Elektroautos sind dem SUV-Segment vom Kompakt-SUV bis hin zum Oberklasse-SUV zuzuordnen. Klassische Limousinen oder Kombis sind bei E-Autos bisher selten. Wenn, dann findest man 4-türige Coupé-Limousinen, wie Tesla Model S und Model 3, Porsche Taycan oder Audi e-tron GT.

Als weitere Karosserieform gibt es noch ein überschaubares Modellangebot im Bus-, bzw. Hochdachkombi-Segment[10], vor allem die Vertreter des PSA-Konzernes, wie Peugeot E-Traveller, Citroen e-Spacetourer und Opel Zafira-e. Auch der betagtere Nissan eNV 200 oder Renault Kangoo Z.E. gehörten bzw. gehören zu dieser Gattung, diese spielten aber bei den Neuzulassungen im Recherchezeitraum keine relevante Rolle.Als elektrische Cabrios waren bisher einzig die Kleinstwagen Smart EQ und Fiat 500e erhältlich, welche jedoch eher Faltdachvarianten sind als klassische Cabrios.

Bei den Plug-In-Hybriden (PHEV) war bzw. ist die Vielfalt an verfügbaren Karosserieformen deutlich größer als bei den BEV. Hier boten bzw. bieten die Hersteller für die meisten

[10] Die Fahrzeugkategorie „Bus“ umfasst Karosserieformen wie beispielsweise jene des Mercedes Vito/V-Klasse, des Ford Tourneo oder der Stellantis-Fahrzeuge Opel Zafira, Peugeot Traveller und Citroen Spacetourer, während als „Hochdachkombis“ kleinere Versionen dieser Karosserieformen bezeichnet werden, wie z. B. VW Caddy, Renault Kangoo oder Opel Combo. Diese beiden Karosserieformen gibt es typischerweise sowohl als Nutzfahrzeuge als auch als Fahrzeuge mit Sitzplätzen für Familien.

Modellvarianten auch ein PHEV-Modell an. Vorzugsweise werden PHEV aufgrund ihrer Komplexität und Kostenintensität primär in den oberen Fahrzeugsegmenten Oberklasse und Mittelklasse, vereinzelt auch bei Kompaktwagen angeboten. Kleinwagen-PHEV gab es nicht auf dem Markt.

5.2 Sitzplätze

Der Großteil der BEV bietet klassisch 5 Sitzplätze für die Insassen an. Einige Kleinstwagen und Sportwagen-Coupés sind nur als 4-Sitzer zugelassen und den Smart EQ gab es traditionell als 2-Sitzer. Im Bus-Segment werden, wie bei den Verbrennerversionen auch, diverse Sitzkonfigurationen von 5- bis hin zu 9-sitzigen Varianten angeboten.

Bei den Elektroautos bietet lediglich Tesla den Kunden im Model X, S und Y gegen Aufpreis eine 7-sitzige Variante, wie es traditionell bei Familien für VANs[11] gerne gewählt wird.

Bei den PHEV haben diese meist 5 Sitzplätze zur Verfügung, da diese eher in den mittleren und oberen Fahrzeugklassen angeboten werden. 7-Sitzer sucht man bei den PHEV allerdings vergebens, da bei PHEV die Hochvoltbatterie den Platz unter dem Kofferraumboden benötigt, wo sonst die dritte Sitzreihe versenkt werden kann.

5.3 Antriebstechnologie

Die Antriebsleistung der recherchierten Fahrzeuge variiert je nach Fahrzeugmodell und Preisklasse in einer Spanne von 33 kW bis über 750 kW. Dabei gibt es verschiedene Antriebskonzepte wie Frontantrieb, Heckantrieb oder Allradantrieb. Einige Elektroautos sind standardmäßig als zweiradgetriebene Varianten und gegen Aufpreis – oft die Topmodelle – als Allradmodelle erhältlich. Die Allradmodelle haben dabei meist je einen Elektromotor an der Vorder- und einen an der Hinterachse. Nur bei den leistungsstärksten Modellen wie Audi RS e-tron GT oder Tesla Model S Plaid sind an der Hinterachse sogar zwei E-Motoren eingebaut.

In Elektroautos können grundsätzlich drei Arten von Elektromotoren verbaut werden: Asynchronmotoren sowie permanenterregte und fremderregte Synchronmotoren. Alle drei Typen haben individuelle Vor- und Nachteile. Welche E-Motorvariante sich langfristig etablieren wird, bleibt offen. Gegenwärtig wird der permanenterregte Synchronmotor am häufigsten in Elektroautos verbaut, denn er hat den besten Wirkungsgrad und kann somit die größten Reichweiten aus einem Batteriepack erzielen. Zudem ist er sehr kompakt und kann gut gekühlt werden. Allerdings benötigt man für die Permanentmagneten die kritischen seltenen Erden. Der fremderregte Synchronmotor benötigt diese nicht, ist jedoch im Wirkungsgrad etwas schlechter. Der Asynchronmotor ist der technisch einfachste, robusteste und günstigste Motortyp, hat jedoch den schlechtesten Wirkungsgrad. Bei einigen Allradmodellen sind an Vorder- und Hinterachse unterschiedliche Motortypen verbaut. In PHEV kommen im Regelfall permanenterregte Synchronmaschinen zum Einsatz, die meist im Getriebe integriert sind. Manche PHEV haben den Elektromotor aber auch an der Hinterachse verbaut.

Bei BEV hängt die Antriebsleistung im Gegensatz zum Verbrenner jedoch nicht allein vom Motor ab, sondern auch von der Fähigkeit der Hochvoltbatterie, die benötigte Leistung zur Verfügung zu stellen. Aus diesem Grund war zu erwarten, dass bei Fahrzeugen mit unterschiedlichen Batterievarianten die Ausführung mit der leistungsstärksten Batterie und

[11] Unter VAN wird hier jene Fahrzeugkategorie verstanden, die beispielsweise durch die Fahrzeugtypen VW Touran, VW Sharan und Ford Galaxy/S-Max repräsentiert wird. Diese sind im Allgemeinen als Familienfahrzeuge konzipiert und nicht als Nutzfahrzeuge erhältlich.

Motorisierung im Hinblick auf die magnetischen Felder am relevantesten sind (unter der Voraussetzung sonst gleicher Verbauart der elektrischen Komponenten). Für die Messungen wurde daher angestrebt, von den ausgewählten Fahrzeugtypen jeweils die Fahrzeugvariante mit der leistungsstärksten Batterie zu untersuchen.

5.4 Position der elektrischen Komponenten

Die Hauptkomponenten, durch die sich ein Elektroauto vom Auto mit Verbrennungsmotor unterscheiden, sind die Hochvoltbatterie, die Hochvoltverkabelung, das Bordladegerät und die Leistungselektronik (Inverter).

Die Hochvoltbatterie ist bei BEV-Fahrzeugplattformen aus Platz-, Crash-, und Gewichtsverteilungsgründen stets im Fahrzeugboden zwischen den Achsen untergebracht. Bei umgebauten Verbrennerplattformen wurde bzw. wird die Hochvoltbatterie in den Räumen unter der Rücksitzbank und im Mitteltunnel, die durch entfallende Komponenten wie Tank oder Abgasanlage frei werden, integriert. Bei PHEV war die (kleinere) Hochvoltbatterie entweder unter der Rücksitzbank oder unter dem Kofferraumboden untergebracht, je nachdem wo Tank und Abgasanlage diese Bauräume belegen.

Die Position des Elektromotors hängt von verschiedenen Faktoren ab. Bei Plattformen, die rein für BEV konzipiert sind, ist der Motor üblicherweise in der Hinterachse verbaut bzw. als Allradversion wird noch ein weiterer Motor in der Vorderachse verbaut. BEVs, die auf Verbrennerplattformen basieren, haben den Elektromotor im Regelfall im Motorraum vorne verbaut, wo sonst der Verbrennungsmotor und das Getriebe eingebaut sind. Dementsprechend besitzen diese Fahrzeuge meist Frontantrieb.

Eine Regel für die Anordnung von Komponenten wie Ladeanschluss, Bordladegerät oder Leistungselektronik gibt es nicht. Diese hängt zum einen von den Platzverhältnissen, aber auch von der Integration mit anderen Komponenten sowie der Plattformstrategie ab. So ließen sich Ladeanschlüsse vorne, seitlich hinter dem Vorderrad im Kotflügel oder auch hinten links oder rechts und bei den sogenannten „Nasenladern“ vorne in der Front finden. Bei umgebauten Verbrennerplattformen sind die Komponenten meist im vorderen Motorraum, bei BEV-Plattformen möglichst platzsparend in der Nähe zu den Elektromotoren und Hochvoltbatterie angeordnet. Die Hochvoltverkabelung zwischen Ladeanschluss, Batterie, Elektromotoren und den Komponenten ergibt sich letztlich aus der Position der anderen genannten Komponenten. Jedoch ist davon auszugehen, dass die Autohersteller aus Kosten- ,Montage- und technischen Gründen versuchen, diese so optimal wie möglich zu positionieren und Kabellängen kurz zu halten.

Bei der Auswahl der messtechnisch zu untersuchenden Fahrzeuge wurde der Anordnung der Komponenten Bedeutung im Hinblick auf die resultierenden magnetischen Felder beigemessen. Allerdings gaben bzw. geben die Hersteller die Position der Komponenten üblicherweise nur für die Elektromotoren und die Hochvoltbatterie an. Auch die Ladeanschlussposition war einfach festzustellen. Die Positionen anderer relevanter Komponenten wie Bordladegerät, Leistungselektronik und Hochvoltverkabelung hätten eine sehr aufwändige Recherche erfordert, die auch nicht für jedes Fahrzeug in der Datenbank vorab mit angemessenem Aufwand durchführbar war. Jedoch konnten diesbezüglich weitere Informationen zumindest teilweise aus den für jede Fahrzeugtype verfügbaren Rettungskarten gewonnen werden.

Bei den PHEV war die Situation grundsätzlich ähnlich, jedoch waren bzw. sind die Variationsmöglichkeiten geringer, da nach wie vor der Verbrennungsmotor samt erforderlicher Peripheriekomponenten vorhanden ist. Die Batterie befindet sich bei PHEV entweder

unterhalb des Kofferraumbodens oder unterhalb der Sitzbank, selten auch im Unterboden. Der E-Motor ist in den meisten Fällen im Getriebe integriert. Die Leistungselektronik und das Bordladegerät werden im Regelfall aus Platzgründen im Motorraum vorne untergebracht.

5.5 Analyse der Marktdaten

Zur Erfassung der Marktrelevanz von Elektrofahrzeugen wurden die Zulassungszahlen von 2016 bis April 2021 ausgewertet und nach Anzahl der Gesamtzulassungen sortiert. Es ist zu beachten, dass die Zulassungszahlen nicht mit Bestandszahlen zu verwechseln sind, die erfahrungsgemäß aufgrund von Auslandsexporten oder Totalschäden etwas geringer ausfallen.

Bis 2019 war der Markt an Elektroautos recht überschaubar und die Zulassungszahlen begrenzt. Dieses änderte sich 2020 signifikant, einerseits durch die deutlich erhöhte finanzielle Förderung und andererseits kam eine Vielzahl neuer E-Fahrzeugmodelle auf den Markt. Seitdem ist der Markt sehr dynamisch und es kommen kontinuierlich weitere neue Elektroautos hinzu.

Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2 fassen die erhobenen Zulassungszahlen und die wichtigsten technischen Daten, jeweils für die Top 30 BEV und PHEV (jeweils gemessen an der Gesamtzahl der Zulassungen seit 2016) zusammen. Längere Listen mit Zulassungszahlen für BEV und PHEV sind im Anhang zusammengestellt.

5.6 Auswahlkriterien für die zu untersuchenden BEV und PHEV

Aufgrund der Vielzahl der bereits am Markt befindlichen Elektroautos war es naturgemäß schwierig, bei der im Rahmen des Vorhaben bearbeitbarer und beschränkter Stichprobengröße eine aus strahlenschutztechnischer Sicht repräsentative Auswahl für die Situation in Deutschland zu treffen. Neben den Zulassungszahlen wurden dazu auch besondere technologische Aspekte, wie z. B. besonders hohe Ladeströme, Allradantrieb, hohe Antriebsleistungen, Karosserieform, Position der elektrischen Komponenten in Relation zu den Fahrer- und Passagierplätzen in die Auswahlkriterien aufgenommen.

Im Hinblick auf die Tatsache, dass Beschlüsse auf politischer Ebene zum Zeitpunkt der Durchführung des Vorhabens dem Verbrennungsmotor im Individualverkehr keine langfristige Zukunft attestierten, wurde der Anteil von PHEV an der Gesamtstichprobe bewusst gering (im Bereich 10-20 %) gehalten.

Innerhalb der Kategorien BEV und PHEV wurde bei der Auswahl der messtechnisch zu untersuchenden Fahrzeuge versucht, einen Kompromiss unter Einbeziehung der folgenden Aspekte zu finden:

a) Marktrelevanz der Fahrzeuge (gegenwärtig und innerhalb der nächsten 3 – 5 Jahre)
b) Technikrelevanz der Fahrzeuge (gegenwärtig und innerhalb der nächsten 3 – 5 Jahre)
c) Einschluss von Fahrzeugen der unteren, mittleren und oberen (Preis-)Klasse
d) Vergleich von Fahrzeugen unterschiedlicher Hersteller innerhalb derselben Klasse
e) Vergleich von Fahrzeugen unterschiedlicher Konzeption (adaptierte Verbrenner-Plattformen vs. reine Elektro-Plattformen)
f) Abdeckung des gesamten Spektrums verbauter elektrischer Antriebsleistung
g) Abdeckung des gesamten Spektrums von Batteriespannungen

Auf dieser Grundlage wurden schließlich elf BEV, zwei PHEV und zusätzlich ein Fahrzeugmodell mit Verbrennungsmotor, von dem es auch ein baugleiches BEV-Modell in der Stichprobe gibt, ausgewählt. Details zu den ausgewählten Fahrzeugen sind in Kapitel 9.3 beschrieben.

Tabelle 5.1: Zulassungszahlen in Deutschland und technische Daten BEV (vo: vorne, hi: hinten, re: rechts, li: links, KF: Kotflügel, UB: Unterboden, AR: Allrad).

#	Modell	Zulassungszahlen							Karosserie	Motor-leistung [kW]	Sitz-plätze	Batterie kapazität [kWh]	Position von				Ladeleistung	
		Gesamt	2021	2020	2019	2018	2017	2016					Motor	Batt.	Lade-buchse	Bord-ladeger.	AC [kW]	DC [kW]
1	Renault ZOE	63935	10642	30376	9431	6360	4322	2804	Schrägheck	65 – 100	5	22 / 41 / 52	vo	UB	vo	vo	22	50
2	Tesla Model 3	38421	14208	15202	9011				Schrägheck	225 – 377	5	58 / 75	hi / AR	UB	li hi	hi	11	250
3	Volkswagen e-Golf	35509	1544	17438	6898	5743	3026	860	Schrägheck	85 – 100	5	24	vo	UB	re hi	hi	3.7 – 7.4	40
4	smart fortwo electric drive	33710	9609	11544	5287	4204	2987	79	Schrägheck	55 – 60	2	18	hi	UB	re hi	hi	4.6 – 22	-
5	BMW i3 BEV	32262	6412	8629	9117	3792	2791	1521	Schrägheck	125 – 135	4	21 – 42	hi	UB	re hi	hi	3.7 – 11	50
6	Volkswagen e-up!	32020	18027	10839	465	1019	1078	592	Schrägheck	60	4	18.7 – 32.3	vo	UB	re hi	vo	3.7 – 7.4	40
7	Volkswagen ID.3	29588	15095	14493					Schrägheck	107 – 150	5 (4)	48 – 82	hi	UB	re hi	hi	7.2 – 11	50 – 125
8	Hyundai Kona Elektro	29123	11226	14008	3521	368			SUV	100 – 150	5	39.2 – 64	vo	UB	vo	vo	7.2 – 11	77
9	Audi e-tron quattro	16388	4675	8135	3578				SUV	230 – 370	5	71 – 95	AR	UB	li KF	vo	11 – 22	150
10	smart forfour electric drive	14068	3905	4491	2362	2552	758		Schrägheck	55 – 60	2	18	hi	UB	re hi	hi	4.6 – 22	-
11	Kia Soul EV	12852	1288	2364	1591	3292	2933	1384	SUV	81 – 150	5	27 – 64	vo	UB	vo	vo	7.2 – 11	40 – 77
12	Nissan Leaf	12695	2125	3607	2620	2381	841	1121	Schrägheck	80 – 150	5	24 – 62	vo	UB	vo	vo	3.7 – 6.6	50
13	Opel Corsa-e	11468	6245	5223					Schrägheck	100	5	50	vo	UB	li hi	vo	7.2 – 11	100
14	Mini Cooper SE Elektro	10120	5431	4365	324				Schrägheck	124	4	32.6	vo	UB	re hi	vo	11	50
15	Volkswagen ID.4	9242	6914	2328					SUV	109 – 220	5	55 – 82	hi / AR	UB	re hi	hi	11	100 – 125
16	Hyundai IONIQ Elektro	7527	1429	1915	1527	1695	881	80	Schrägheck	88 – 100	5	28 – 38.3	vo	UB	li hi	vo	7.2	40 – 70
17	Kia Niro EV	7333	3310	3543	450	30			SUV	100 – 150	5	39.2 – 64	vo	UB	vo	vo	7.2 – 11	40 – 77
18	Peugeot e-208	7151	4520	2631					Schrägheck	100	5	50	vo	UB	li hi	vo	11	100
19	Skoda Citigo e	6863	2117	4746					Schrägheck	60	4	32.3	vo	UB	re hi	vo	7.4	40
20	Tesla Model S	6735	14	777	981	1248	2241	1474	Schrägheck	225 – 750	5 (7)	60 – 100	hi / AR	UB	li hi	hi	11 – 22	150
21	Fiat 500	5866	5866						Schrägheck	70 – 87	4	23.8 – 42	vo	UB	re hi	vo	3.7 – 11	85
22	Mercedes EQC	5569	2414	3155					SVU	300	5	85	AR	UB	re hi	hi	7.2 – 11	110
23	Porsche Taycan	5547	2344	3203					Coupe	300 – 560	4	79.2 – 93.4	AR	UB	re KF	vo	11 – 22	270
24	Skoda ENYAQ	5312	5312						SUV	109 – 195	5	55 – 82	vo / AR	UB	re hi	hi	7.2 – 11	50 – 125
25	Seat Mii electric	5207	3058	2149					Schrägheck	60	4	32.3	vo	UB	re hi	vo	7.4	40
26	Mazda MX-30	5186	1465	3721					SUV	107	5	35.5	vo	UB	re hi	hi	6.6	40
27	Renault Twingo Electric	4419	3318	1101					Schrägheck	60	4	22	vo	UB	re hi	hi	22	-
28	Tesla Model X	3637	35	714	716	652	1090	430	SUV	245 – 750	5 (7)	60 – 100	hi / AR	UB	li hi	hi	16.5	150
29	Peugeot e-2008	3414	2217	1197					Schrägheck	100	5	50	vo	UB	li hi	vo	11	100
30	Opel Mokka-e	2953	2935	18					Schrägheck	100	5	50	vo	UB	li hi	vo	7.2 – 11	100

Tabelle 5.2: Zulassungszahlen in Deutschland und technische Daten PHEV (vo: vorne, hi: hinten, re: rechts, li: links, KF: Kotflügel, UB: Unterboden, SF: Stoßfänger, uKR: unter Kofferraum, uRB: unter Rückbank, uBF: unter Beifahrer-Fußraum).

#	Modell	Zulassungszahlen							Karosserie	Motor-leistung [kW]	Sitz-plätze	Batterie kapazität [kWh]	Position von				Ladeleistung	
		Gesamt	2021	2020	2019	2018	2017	2016					Motor	Batt.	Lade-buchse	Bord-ladeger.	AC [kW]	DC [kW]
1	Volkswagen Passat PHEV	31268	9549	14920	1181	2137	2234	1247	Lim/Kombi	160	5	9.9 – 13	vo	uRB	vo	vo	3.7	-
2	Mercedes E-Klasse PHEV	26501	5451	11307	6231	1636	1579	297	Lim/Kombi	220 – 235	5	6.6 – 13.5	vo	uKR	hi SF	hi	7.4	-
3	Volkswagen Golf PHEV	25526	12224	7859	215	1978	1935	1315	Schrägheck	150 – 180	5	8.7 – 12.8	vo	uRB	vo li KF	vo	3.7	-
4	Audi A3 PHEV	25413	7781	8365	1516	1682	4454	1615	Schrägheck	150 – 180	5	8.8 – 12.8	vo	uRB	vo li KF	vo	3.7	-
5	Mitsubishi Outlander PHEV	24833	3116	8255	7593	2198	2234	1437	SUV	120 – 165	5	12 – 13.8	hi	UB	re hi	hi	3.7	50
6	Mercedes GLC PHEV	23959	8197	12102	2180	1480			SUV	225 – 235	5	6.4 – 13.5	vo	uKR	hi SF	hi	7.4	-
7	Mercedes A-Klasse PHEV	18129	6344	11680	105				Lim/SchrH	160	5	15.6	vo	uRB	re	hi	7.4	24
8	BMW 2er PHEV	17953	563	2648	4981	4878	3680	1203	VAN	162-164	5	5.8 – 8.8	hi	uKR	hi SF	hi	4	-
9	BMW 3er PHEV	15565	6803	6216	1636	336	574		Lim/Kombi	150 – 215	5	5.7 – 12	vo	uRB / uKR	vo li KF	vo / uRB	3.7	-
10	Ford Kuga PHEV	14292	10252	4040					SUV	165	5	14	vo	UB	vo li KF	uBF	3.7	-
11	Audi A6 PHEV	13719	5215	8504					Lim/Kombi	220 – 270	5	17.9	vo	uKR	li hi	hi	7.4	-
12	Mercedes C-Klasse PHEV	13569	3257	8328	1984				Lim/Kombi	205 – 235	5	6.4 – 13.5	vo	uKR	hi SF	hi	3.7 – 7.4	-
13	Seat Leon PHEV	12643	9425	3218					Schrägheck	150	5	12.8	vo	uRB	Li KF	vo	3.7	-
14	Audi Q5 PHEV	12300	2293	9695	312				SUV	220 – 270	5	14.1 – 17.9	vo	uKR	li hi	hi	7.4	-
15	BMW 5er PHEV	12210	3513	2784	4025	1888			Lim/Kombi	150 – 215	5	9.2 – 12	vo	uRB	li KF	vo	3.7	-
16	Mercedes GLE PHEV	9878	4167	3775	1753	183			SUV	235 – 325	5	8.8 – 31.2	vo	uKR	li hi	hi	3.7 – 7.2	60
17	BMW X1 PHEV	9758	5462	4296					SUV	162	5	10	hi	uRB	li KF	hi	3.7	-
18	Skoda Superb PHEV	9589	2964	6625					Lim/Kombi	160	5	13	vo	uRB	vo	vo	3.7	-
19	Mini Cooper PHEV	9399	2074	3386	2447	1492			SUV	162 – 164	5	7.6 – 10	hi	uRB	li KF	hi	3.7	-
20	BMW X5 PHEV	9030	3646	4216	335	177	296	360	SUV	230 – 290	5	6.8 – 21.6	vo	uRB	li KF	vo	3.7	-
21	Kia Ceed PHEV	8460	4122	4338					Lim/Kombi	160	5	9.9 – 13	vo	uRB	vo	vo	3.7	-
22	Volvo XC40 PHEV	8009	3671	4338					Lim/Kombi	220 – 235	5	6.6 – 13.5	vo	uKR	hi SF	hi	7.4	-
23	Volvo S60/V60 PHEV	7979	2170	4307	405	176	639	282	Schrägheck	150 – 180	5	8.7 – 12.8	vo	uRB	vo li KF	vo	3.7	-
24	Mercedes CLA PHEV	7869	4017	3852					Schrägheck	150 – 180	5	8.8 – 12.8	vo	uRB	vo li KF	vo	3.7	-
25	Volvo XC90 PHEV	7840	2013	2979	1048	531	580	689	SUV	120 – 165	5	12 – 13.8	hi	UB	re hi	hi	3.7	50
26	BMW X3 PHEV	7839	3994	3845					SUV	225 – 235	5	6.4 – 13.5	vo	uKR	hi SF	hi	7.4	-
27	Opel Grandland X PHEV	7712	3917	3795					Lim/SchrH	160	5	15.6	vo	uRB	re	hi	7.4	24
28	Skoda Octavia PHEV	7181	5575	1606					VAN	162 – 164	5	5.8 – 8.8	hi	uKR	hi SF	hi	4	-
29	Volvo XC60 PHEV	6632	2172	2581	1130	749			Lim/Kombi	150 – 215	5	5.7 – 12	vo	uRB / uKR	li KF	vo / uRB	3.7	-
30	Porsche Cayenne S PHEV	6395	1578	2074	1353	718	309	363	SUV	165	5	14	vo	UB	li KF	uBF	3.7	-

6 Markt- und Technik-Übersicht zu einspurigen BEV

Der Markt für einspurige BEV gliedert sich in die Klassen der

- **Kleinkrafträder (E-Roller):** zweirädrige Kraftfahrzeuge mit einer bauartbedingten Höchst-geschwindigkeit von nicht mehr als 45 km/h und einem Elektromotor, dessen maximale Nenndauerleistung nicht mehr als 4 kW beträgt;
- **Leichtkrafträder**: Krafträder mit einer Nennleistung von nicht mehr als 11 kW;
- **Krafträder**: zweirädrige Kraftfahrzeuge mit einer bauartbedingten Höchstgeschwindigkeit von mehr als 45 km/h und ohne Leistungsbegrenzung.

Der Markt für Elektrozweiräder war im Zeitraum der Erstrecherche (April 2021) noch sehr überschaubar. Im Segment der Klein- oder Leichtkrafträder gab es bereits ein etwas breiteres Angebot von bislang eher noch unbekannten Herstellern und Importeuren. Aber auch der Marktführer Vespa bot nur ein Kleinkraftrad an. Bei den Motorrädern (Krafträdern) hielten sich die etablierten Motorradhersteller allerdings fast ausnahmslos zurück und überließen den Markt für elektrische Motorräder (noch) den Newcomern auf dem Motorradmarkt wie Zero oder Energetica. Einzig Harley Davidson hatte bereits mit der „Livewire“ ein E-Motorrad im Angebot, das bisher jedoch noch keine Marktrelevanz in Deutschland entfalten konnte. Um Marktentwicklungen im Projektzeitraum bestmöglich berücksichtigen zu können erfolgte daher eine weitere Recherche Mitte 2022 auf Grundlage deren Ergebnis schließlich ein Kleinkraftrad, zwei Leichtkrafträder und ein Kraftrad für die Messungen ausgewählt wurden.

Details zu den ausgewählten Fahrzeugen sind in Kapitel 10.3 beschrieben.

7 Voruntersuchungen und Testmessungen

7.1 Testmessungen am Rollenprüfstand im ADAC Technik Zentrum

7.1.1 Voruntersuchungen an den verfügbaren Rollenprüfständen

Im ADAC Technik Zentrum stehen grundsätzlich zwei Fahrzeugprüfstände zur Verfügung:

Der **Leistungsprüfstand MAHA LPS 3000** (Abbildung 7.9) erlaubt die Aufprägung unterschiedlicher Lastmomente auf die Antriebsachse mittels Wirbelstrombremsen.

Der wesentlich modernere **Rollenprüfstand Horiba Vulcan II** (siehe z.B. Abbildung 9.79) bietet zusätzlich die Möglichkeit der Aufprägung von Antriebsmomenten, sodass auch die Fahrzeugdynamik (Trägheit) simuliert werden kann, was vor allem im Hinblick auf die Verhältnisse im Rekuperationsbetrieb als vorteilhaft für die gegenständlichen Fragestellungen angesehen werden muss. Zusätzlich ist es bei diesem Prüfstand auch routinemäßig möglich, nicht nur konstante Lastmomente bzw. Lasteinstellungen vorzugeben, sondern diese automatisch und dynamisch durch den Prüfstand berechnen und aufprägen zu lassen. Als Eingangsgrößen werden dazu am Prüfstand die relevanten Fahrzeugdaten (Masse, cw-Wert) sowie die betrachtete Fahrbahnsteigung hinterlegt. Das entsprechende Lastmoment (beim Fahren bzw. Beschleunigen) bzw. Antriebsmoment (beim Bremsen) wird dann vom Prüfstand automatisch, in Anhängigkeit von der Geschwindigkeit berechnet und aufgeprägt. Sowohl die Antriebs- als auch Bremsmomente der Rollen werden dabei durch die Synchronmotor-Rollenantriebe erzeugt, d. h. für die Bremsmomente werden keine Wirbelstrombremsen eingesetzt.

Im Zuge einer Begehung im ADAC Technik Zentrum vom 19. bis 21.07.2021 wurden im Bereich beider Prüfstände Messungen der Hintergrundstörfeldstärken durchgeführt sowie mögliche Störfelder zufolge der Wirbelstrombremsen bzw. der Rollenantriebe analysiert. Da bereits in einer sehr frühen Phase dieser Voruntersuchungen beschlossen wurde, alle Prüfstand-Messungen am Rollenprüfstand **Horiba Vulcan II** durchzuführen, beschränken sich die folgenden Ausführungen auf die Ergebnisse der Voruntersuchungen auf diesem Prüfstand.

Die magnetischen Hintergrundstörfeldstärken wurden bei üblicher Beleuchtung, abgeschalteten Rollen und auf maximaler Leistung laufendem Fahrtwindgebläse gemessen. Die dabei im Fahrzeuginneren maximal messbaren magnetischen Hintergrundflussdichten (bis 400 kHz) lagen bei weniger als 0.2 µT (Spitzenwert) bzw. bei maximal 0.6 % des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 (WPM[12]-bewerteter Expositionsindex, $ExpInd_{WPM,1998}$). Dieser Wert liegt ca. 0.1 Prozentpunkte (%pkte) über der Nachweisgrenze für den $ExpInd_{WPM,1998}$ des für die Messungen eingesetzten Messgerätes (ELT-400 mit 100 cm^2 Sensor, Aufzeichnung der Analogausgänge mit Speicheroszilloskop, WPM-Bewertung im Postprocessing).

Störfelder zufolge der Rollenantriebe wurden durch Messungen während des Fahrens bei konstanter Geschwindigkeit gegen unterschiedliche Lastmomente (bis Einstellung „3000 N“ am Prüfstand[13]) mit einem konventionellen Fahrzeug mit Verbrennungsmotor (Audi 80) durchgeführt. Der Messaufnehmer (100 cm^2 Sensor, ELT-400, LowCut 1 Hz) wurde im Fußbereich des Beifahrers möglichst nahe beim rechten Vorderrad positioniert. Zusätzlich wurden Vergleichsmessungen für jeden Betriebszustand mit dem Messaufnehmer außerhalb

[12] WPM: Weighted Peak Methode (Methode der gewichteten Spitzenwerte).
[13] Am Prüfstand wird die Last in Newton (N) eingestellt. Daher werden im weiteren Text teilweise, insbesondere in Zusammenhang mit Zahlenwertangaben, anstatt des Begriffs „Lastmoment“, die Begriffe „Last“ oder „Lastzustand“ verwendet.

des Fahrzeuges in ca. 15 cm Distanz[14] zu den Rollen bzw. zum rechten Vorderrad durchgeführt. Durch diese Vergleichsmessungen wurde überprüft, ob die im Fahrzeuginneren gemessenen Störfelder tatsächlich von „außen“ (von den Rollen) kommen und nicht vom Fahrzeug selbst verursacht wurden.

Bei allen Messungen wurden jeweils die Analogausgänge des Messgerätes ELT-400 mittels Oszilloskops aufgezeichnet und im Hinblick auf Effektivwerte, Spitzenwerte und $ExpInd_{WPM,1998}$ analysiert.

In allen Fällen waren die außen nahe der Rolle bzw. nahe dem Rad gemessenen Felder bezüglich des Spitzenwertes der magnetischen Flussdichte und bezüglich des $ExpInd_{WPM,1998}$ um ca. einen Faktor 2 – 3 höher als im Fahrzeuginneren, was den Schluss zulässt, dass die Störhintergrundmessungen in keinem relevanten Ausmaß vom Versuchsfahrzeug beeinflusst wurden.

Tabelle 7.1 fasst die Ergebnisse der Messungen im Fahrzeuginneren zusammen.

Daraus wird zunächst ersichtlich, dass die im Fußbereich des Fahrzeuginneren messbaren Störfelder in nur sehr geringem Ausmaß vom aufgeprägten Lastmoment abhängen. Die durch die Rollenantriebe beobachteten Auswirkungen auf den $ExpInd_{WPM,1998}$ waren jedenfalls sehr gering (0.1 – 0.2 %pkte Beitrag zum $ExpInd_{WPM,1998}$ bis 50 km/h, < 0.4 %pkte bei 100 km/h[15]).

Tabelle 7.1: Zusammenfassung der Messergebnisse der Störfeldstärkemessungen am Rollenprüfstand.

v [km/h]	Rollen / Last	Fahrtwind-Gebläse	$ExpInd_{WPM,1998}$ (1 Hz – 400 kHz)	$ExpInd_{WPM,1998}$ (1 – 100 Hz)
0	AUS	AUS	0.5 %	0.1 %
0	AUS	MAX	0.6 %	0.2 %
0	EIN / Standby	AUS	0.7 %	0.1 – 0.2 %
25	EIN / MIN	EIN*)	0.7 %	0.2 %
25	EIN / MAX	EIN*)	0.7 – 0.8 %	0.2 – 0.3 %
50	EIN / MIN	EIN*)	0.8 %	0.4 %
50	EIN / MAX	EIN*)	0.8 – 0.9 %	0.4 – 0.5 %
100	EIN / MAX	EIN*)	2.2 %	1.2 %

*) geregelt entsprechend der jeweiligen Fahrtgeschwindigkeit

Die aus den Daten in Tabelle 7.1 ablesbare Abhängigkeit des $ExpInd_{WPM,1998}$ von der Geschwindigkeit muss als ein Störfeldstärkebeitrag zufolge einer Magnetisierung der Räder/Reifen und/oder der Rollen interpretiert werden (im Ausmaß von bis zu 1.5 %pkte für den $ExpInd_{WPM,1998}$). Auf Basis einer detaillierten Analyse der aufgezeichneten Messsignale wurde die Magnetisierung der Reifen eindeutig als Ursache identifiziert. Die Frequenzen der jeweiligen Grundwelle der Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte bei 25 km/h, 50 km/h und 100 km/h lagen bei ca. 3.7 Hz, ca. 7.4 Hz und ca. 14.8 Hz (Abbildung 7.1), was der

[14] Geringere Distanzen konnten aus Sicherheitsgründen nicht betrachtet werden.

[15] Die Angabe „< 0.4 % bei 100 km/h“ ergibt sich aus einer konservativen Abschätzung aus den Messergebnissen in Tabelle 7.1, unter Berücksichtigung der Frequenzabhängigkeit der Referenzwerte (ca. 4 µT Amplitude der Grundschwingung, hauptsächlich zufolge der Reifenmagnetisierung).

jeweiligen Rotationsfrequenz des Autorades (Abrollumfang beim hier untersuchten Fahrzeug ca. 1.90 m) bei den betrachteten Geschwindigkeiten entspricht. Störfeldstärkebeiträge zufolge einer möglicherweise vorhandenen Magnetisierung der Rollen erwiesen sich dagegen als vernachlässigbar, da sich deren Rotationsfrequenzen kaum merkbar im Frequenzspektrum der aufgezeichneten Messdaten widerspiegelten (Abrollumfang 3.83 m, d. h. Rotationsfrequenzen von ca. 1.8 Hz, ca. 3.6 Hz und ca. 7.2 Hz bei den betrachteten Geschwindigkeiten). Abbildung 7.2 zeigt die im Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte deutlich erkennbaren Beiträge der Reifenmagnetisierung (15 Hz plus Harmonische) sowie eine vernachlässigbare Spektralkomponente, offensichtlich verursacht durch eine geringere Magnetisierung der Rollen (7.2 Hz), bei konstanter Geschwindigkeit von ca. 100 km/h.

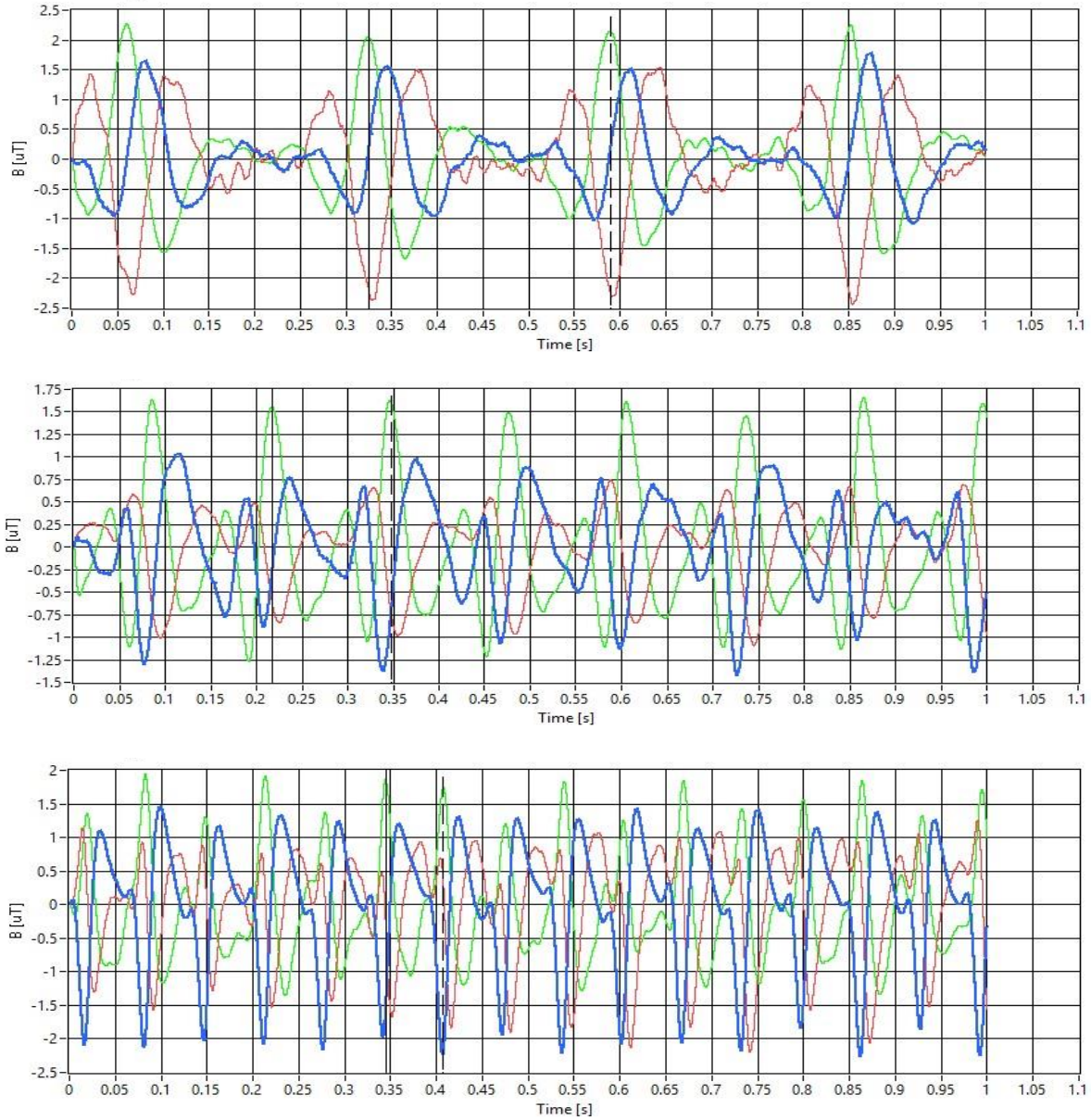


Abbildung 7.1: Aufgezeichnete Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte (nach Filterung mit 100 Hz Tiefpass-Filter) im betrachteten Messpunkt (Beifahrer-Fußbereich, nahe rechtem Vorderrad) im Audi 80 bei 25 km/h (oben), 50 km/h (Mitte) und 100 km/h (unten). Die drei unterschiedlich gefärbten Kurven entsprechen jeweils der magnetischen Flussdichte in den drei orthogonalen Messachsen.

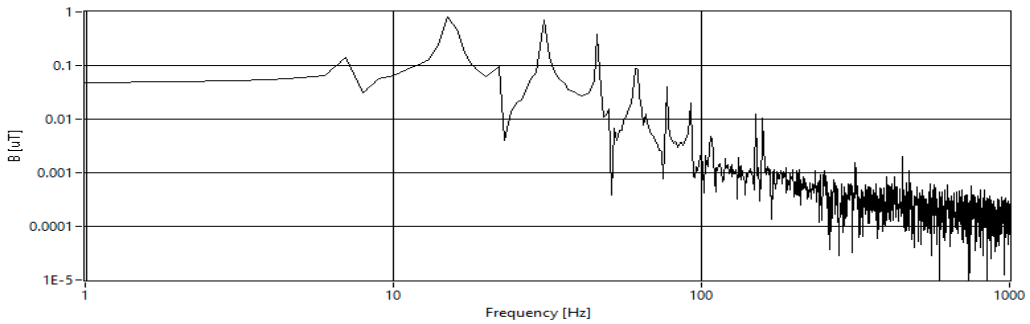


Abbildung 7.2: Frequenzspektrum (Betrag) im betrachteten Messpunkt (Beifahrer-Fußbereich, nahe rechtem Vorderrad) bei 100 km/h konstanter Geschwindigkeit im Audi 80. Die Grundwelle (ca. 15 Hz) und zugehörige Harmonische der Störfeldstärke zufolge Reifenmagnetisierung sowie ein geringer, auf eine Rollenmagnetisierung zurückzuführender Beitrag (7.2 Hz) sind deutlich sichtbar.

Erkenntnisse aus den durchgeführten Voruntersuchungen am Rollenprüfstand :

- Störeinflüsse zufolge der Rollenbremsen[16] und des allgemeinen elektromagnetischen Hintergrundes, verursacht durch andere elektrische Anlagen und Geräte in der Umgebung des Rollenprüfstandes, können als sehr gering angenommen werden. Die dadurch erwarteten Beiträge zum $ExpInd_{WPM,1998}$ sind kaum größer als 0.2 – 0.3 %ptke (Nachweisgrenze für $ExpInd_{WPM,1998}$ bei Messfrequenzbereich 1 Hz – 400 kHz: ca. 0.5 %). Um dennoch etwaige Abhängigkeiten dieser Störeinflüsse vom untersuchten Fahrzeug (z. B. Abschirmwirkung durch die Karosserie) nicht zu vernachlässigen, wurde beschlossen, vor den Messungen mit jedem zu untersuchenden Fahrzeug separat entsprechende Messungen des elektromagnetischen Hintergrundes und der Störfelder zufolge der Rollenantriebe bzw. Rollenbremsen durchzuführen.
- Eine gegebenenfalls vorhandene Magnetisierung der Reifen kann sich merklich auf das Bewertungsergebnis in Messpositionen im reifennahen Fußbereich nahe den Rädern auswirken. Das Ausmaß der Beiträge zum $ExpInd_{WPM,1998}$ kann dabei offensichtlich im Bereich einiger %pkte liegen. Eine Quantifizierung des Beitrages der Reifenmagnetisierung, individuell für jedes untersuchte Fahrzeug mit einer dabei gleichzeitig stattfindenden Erfassung einer etwaigen (unerwarteten) relevanten Magnetisierung der Rollen wurde daher als unbedingt erforderlich erachtet.

Berücksichtigung der Erkenntnisse im angewendeten Messprotokoll:

- Nach jeder Positionierung der Messsonden und vor den eigentlichen Immissionsmessungen wurden jeweils folgende Schritte durchgeführt (Details, siehe Kapitel 8.1):
  - BEV/PHEV ausgeschaltet, Rollenprüfstand im Standby, Messung des stationären Störhintergrundes
  - Auslaufversuch zur Quantifizierung der Beiträge von Reifen- und/oder Rollenmagnetisierung: Rollenprüfstand im Leerlauf, BEV/PHEV beschleunigt auf 100 km/h, dann BEV/PHEV in Leerlauf („N“) schalten, kontinuierliche Messung während des Ausrollens bis zum Stillstand. Wiederholung mir kleinem Lastmoment.

[16] Da am Rollenprüfstand sowohl das Bremsen als auch das Antreiben jeder Rolle durch jeweils ein und denselben Synchronmotor erfolgt, ist davon auszugehen, dass sich die im Zuge der Testmessungen beim Aufprägen von Lastmomenten (= „Bremsen“ der Rollen) ermittelten Daten bezüglich auftretender Störfelder auch auf den Fall des Antreibens der Rollen übertragen lassen.

- Vormessungen zur Dokumentation evtl. Hintergrundfelder durch Rollenantriebe: zwei konstante Geschwindigkeiten und zwei konstante Lastmomente, jeweils Beschleunigung vom Stillstand bis 100 km/h und Bremsen von 100 km/h bis zum Stillstand.

7.1.2 Testmessungen mit zweispurigen BEV

Aus dem in Kapitel 3 zusammengefassten Vergleich von Spezifikationen mehrerer Messgeräte bzw. Systeme erwies sich das in Kapitel 3.4.3 näher beschriebene Messsystem MF EASY (Seibersdorf Labor GmbH) als das für die Aufgabenstellung in diesem Vorhaben am besten geeignete. Es ist hinsichtlich der erreichbaren Sensitivität (Eigenrauschen) mit anderen von etablierten Herstellern gegenwärtig am Markt angebotenen Messgeräten vergleichbar, bietet jedoch zusätzlich einen erweiterten Messfrequenzbereich von 0 Hz – 400 kHz, größere Flexibilität hinsichtlich der Einstellung unterschiedlicher Messparameter und die Möglichkeit der simultanen Messung und Aufzeichnung der Messsignale von zehn isotropen Messaufnehmern.

Mit diesem Messsystem wurden am 19. und 21.07.2021 Testmessungen mit zwei unterschiedlichen BEV (VW e-Up und VW ID.3) am Rollenprüfstand im ADAC Technik Zentrum durchgeführt.

Vormessungen und Maximumsuche im Inneren des Fahrzeugs:

Zur Eruierung der Feldmaxima im Fahrzeuginneren wurden die zehn Messaufnehmer des MF EASY Messsystems in den jeweils betrachteten Raumbereichen im VW e-Up positioniert[17] und es wurden während konstanter Geschwindigkeit des BEV und bei konstanter Last sowie während Beschleunigung Messungen durchgeführt (Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4).

Aufgrund der simultanen Messung an zehn unterschiedlichen Positionen waren nur maximal fünf Mess-Wiederholungen erforderlich, um alle relevanten Bereiche im Fahrzeug (repräsentiert durch 40 – 50 unterschiedliche Messpositionen) in die Suche einzuschließen. Die Messergebnisse wurden in der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) des Messsystems unmittelbar in Form von Effektiv- und Spitzenwerten sowie in Form des $ExpInd_{WPM,1998}$ für jede einzelne Messaufnehmerposition angezeigt. Zusätzlich wurden Zeitverlauf und bei Bedarf auch das Frequenzspektrum aller Messsignale in der GUI dargestellt, um etwaige Auffälligkeiten, wie z. B. unvorhergesehene Transiente oder Störungen, sofort aufzuzeigen. Auf Basis der Ergebnisse konnten die für die weiteren Messungen im Detail zu untersuchenden Sitzplätze festgelegt werden.

Im konkreten Fall des im Rahmen dieser Testmessungen untersuchten VW e-Up ergaben sich folgende Schlussfolgerungen aus der Maximumsuche:

- Relevante Störfelder zufolge Reifen- und/oder Rollenmagnetisierung wurden nicht festgestellt.
- Im Fahrbetrieb, beim Beschleunigen und beim Rekuperieren trat das Maximum des $ExpInd_{WPM,1998}$ in der hinteren Sitzreihe im Fußbereich weit links und direkt hinter dem Fahrersitz auf. Das Maximum am Beifahrerplatz wurde ebenfalls im linken Fußbereich festgestellt.

[17] Im Zuge der hier beschriebenen Testmessungen wurde die Maximumsuche auf die Rückbank und auf den Beifahrerplatz beschränkt.

- Die absolut höchsten, während der Testmessungen festgestellten Werte des $ExpInd_{WPM,1998}$ traten jedoch nicht während des Fahrens, Beschleunigens oder Rekuperierens auf, sondern im Stillstand (in der hinteren Sitzreihe im Fußbereich weit links und direkt hinter dem Fahrersitz). Soweit dies im Zuge der Testmessungen eruiert werden konnte, steht das Auftreten dieses Magnetfeldanteils mit dem Betätigen des Bremspedals in Zusammenhang. Dieses unerwartete Feldmaximum wurde unmittelbar vor Beschleunigungsmanövern „zufällig“ identifiziert (Abbildung 7.5 und Abbildung 7.6). Mit Loslassen des Bremspedals im Stillstand verschwand dieser Feldanteil.



Abbildung 7.3: Messaufnehmerpositionen für die Immissionsmaximumsuche im Bereich der hinteren Sitzreihe im VW e-Up. Messaufnehmeranordnung entlang der Sitzfläche (links) und im Fußbereich (rechts); Jeweils nur acht der insgesamt zehn Messaufnehmer werden in den Bildern dargestellt (P9 und P10 wurden im Kofferraum platziert).

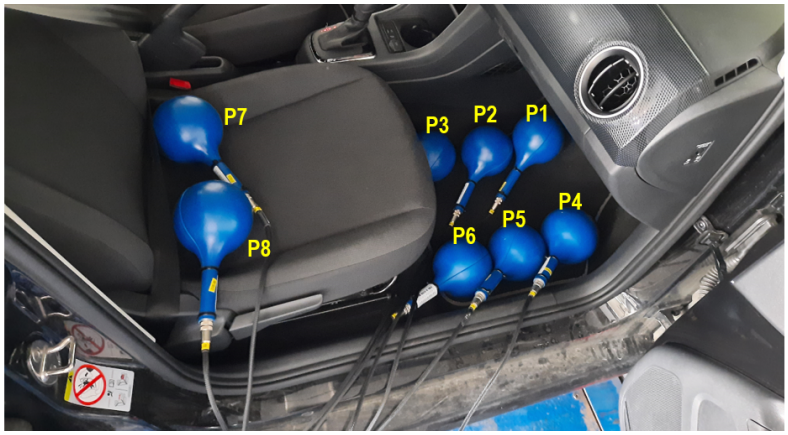


Abbildung 7.4: Messaufnehmerpositionen für die Immissionsmaximumsuche am Beifahrerplatz im VW e-Up. Nur acht der insgesamt zehn Messaufnehmer sind dargestellt (P9 und P10 wurden im Kofferraum platziert).

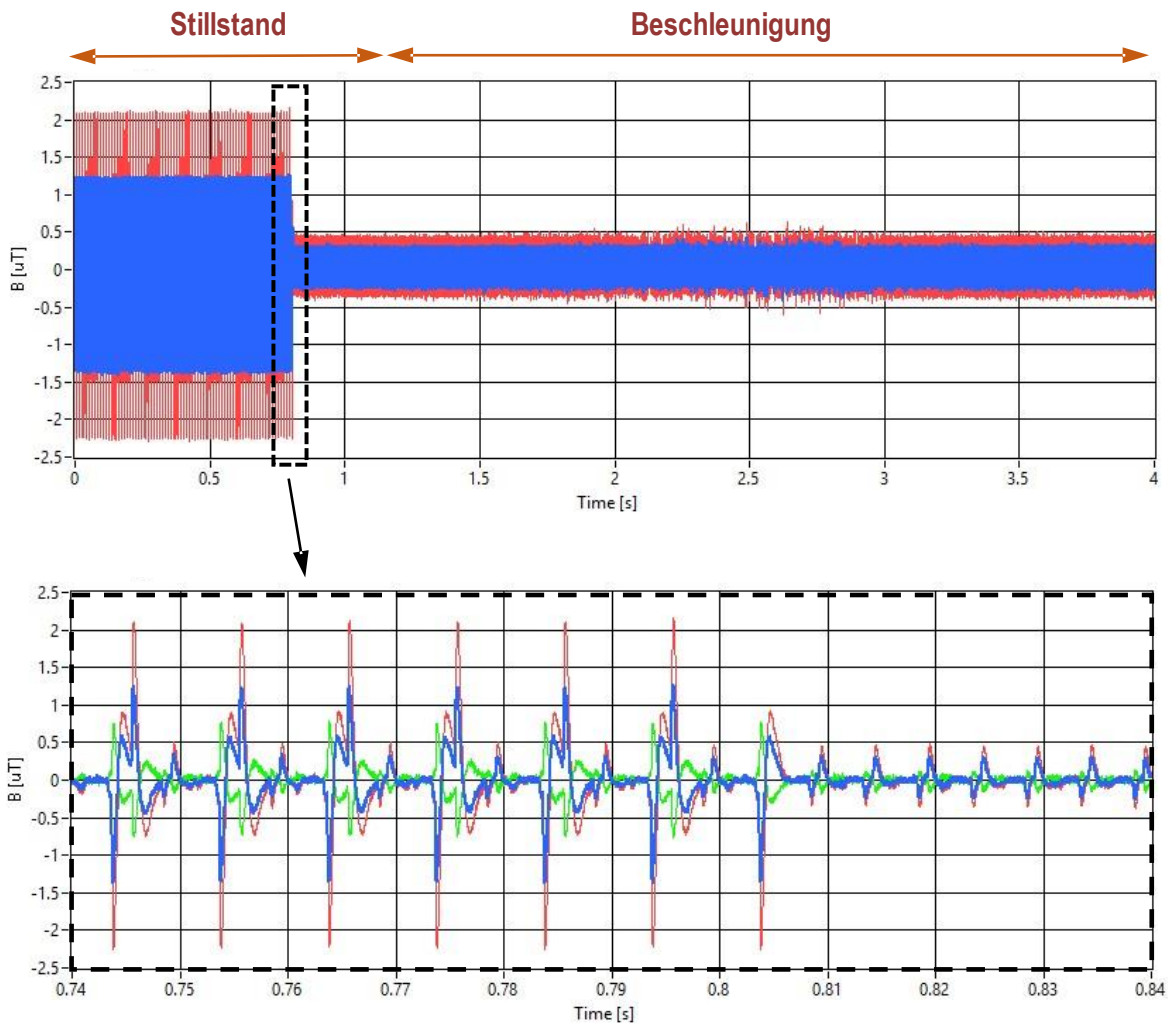


Abbildung 7.5: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte im Fußbereich der Rückbank weit links (Position P1, Abbildung 7.3, rechts) während eines Beschleunigungsversuchs aus dem Stillstand. Der für die Immissionen (im Verhältnis zu den Referenzwerten) besonders relevante Zeitbereich ist jener zu Beginn der Aufzeichnung (vor dem Loslassen des Bremspedals). Die drei unterschiedlich gefärbten Kurven entsprechen jeweils der magnetischen Flussdichte in den drei orthogonalen Messachsen.

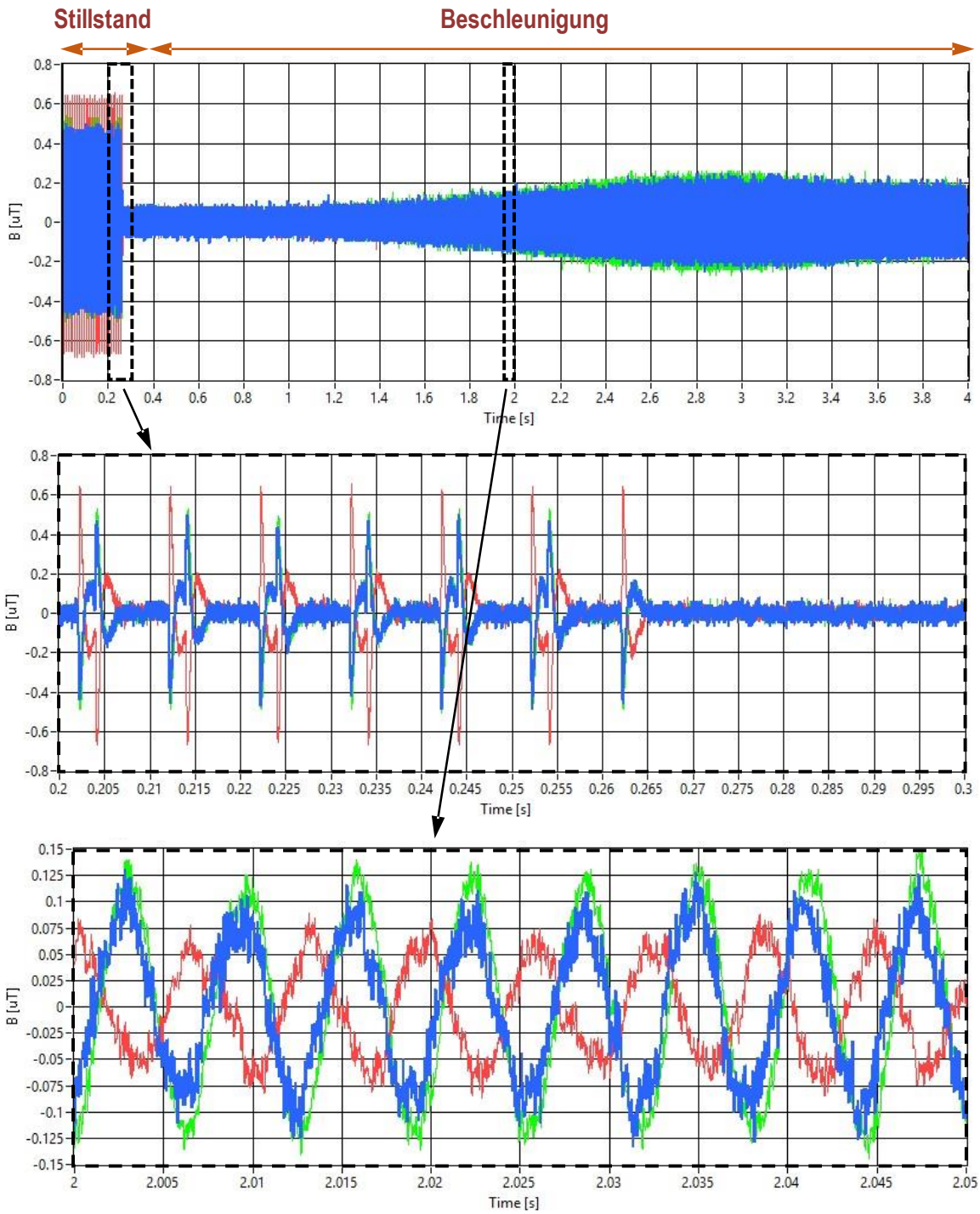


Abbildung 7.6: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte im linken Fußbereich des Beifahrerplatzes (Position P2, Abbildung 7.4), während eines Beschleunigungsvorgangs aus dem Stillstand. Der für die Immissionen (im Verhältnis zu den Referenzwerten) besonders relevante Zeitbereich ist jener zu Beginn der Aufzeichnung (vor dem Loslassen des Bremspedals). Die drei unterschiedlich gefärbten Kurven entsprechen jeweils der magnetischen Flussdichte in den drei orthogonalen Messachsen.

Tabelle 7.2 bis Tabelle 7.4 fassen die wichtigsten Messergebnisse für die Maximumsuche zusammen.

Tabelle 7.2: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Maximumsuche auf der Rücksitzbank (für Messaufnehmerpositionen P1 – P8, siehe Abbildung 7.3, links).

Position	v=50 km/h, M=800 N		Beschleunigung aus Stillstand bis ca. 100 km/h, M=800 N, OHNE Immissionsbeitrag durch Bremsen / Bremspedal		Beschleunigung aus Stillstand bis ca. 100 km/h, M=800 N, MIT Immissionsbeitrag durch Bremsen / Bremspedal	
	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]
P1	0.16	1.1	0.31	1.7	0.74	4.6
P2	0.22	1.2	0.29	1.3	0.32	1.9
P3	0.24	1.4	0.32	1.4	0.33	1.8
P4	0.22	1.2	0.29	1.2	0.35	2.2
P5	0.26	1.4	0.35	1.7	0.37	2.5
P6	0.35	2.2	0.42	2.3	0.50	3.0
P7	0.30	1.6	0.39	2.4	0.44	2.6
P8	0.19	1.0	0.23	1.2	0.31	2.3

Tabelle 7.3: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Maximumsuche im Fußbereich der Rückbank (für Messaufnehmerpositionen P1 – P8, siehe Abbildung 7.3, rechts).

Position	v=50 km/h, M=800 N		Beschleunigung aus Stillstand bis ca. 100 km/h, M=800 N, OHNE Immissionsbeitrag durch Bremsen / Bremspedal		Beschleunigung aus Stillstand bis ca. 100 km/h, M=800 N, MIT Immissionsbeitrag durch Bremsen / Bremspedal	
	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]
P1	0.57	3.8	0.76	5.0	2.80	19.3
P2	0.19	0.9	0.24	1.1	0.80	5.0
P3	0.12	0.4	0.16	0.8	0.37	2.2
P4	0.24	1.5	0.60	3.1	0.60	3.1
P5	0.16	1.1	0.42	2.4	0.42	2.4
P6	0.10	0.5	0.20	0.9	0.20	0.9
P7	0.08	0.5	0.16	0.5	0.16	0.5
P8	0.10	0.5	0.17	0.5	0.17	0.5

Tabelle 7.4: Zusammenfassung der Ergebnisse für die Maximumsuche am Beifahrerplatz (für Messaufnehmerpositionen P1 – P8, siehe Abbildung 7.4).

Position	v=50 km/h, M=800 N		Beschleunigung aus Stillstand bis ca. 100 km/h, M=800 N, OHNE Immissionsbeitrag durch Bremsen / Bremspedal		Beschleunigung aus Stillstand bis ca. 100 km/h, M=800 N, MIT Immissionsbeitrag durch Bremsen / Bremspedal	
	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]	B_{Peak} [µT]	$ExpInd_{WPM,1998}$ [%]
P1	0.56	2.0	0.55	2.1	0.56	3.2
P2	0.31	1.1	0.32	1.1	0.95	6.9
P3	0.30	0.8	0.30	1.1	0.43	3.0
P4	0.28	1.3	0.29	1.3	0.43	2.8
P5	0.19	0.6	0.21	0.7	0.36	2.5
P6	0.23	0.9	0.24	1.1	0.26	1.8
P7	0.10	0.5	0.11	0.5	0.11	0.5
P8	0.09	0.5	0.13	0.6	0.13	0.6

Systematische Immissionsmessungen an ausgewählten Sitzpositionen:

Gemäß Leistungsbeschreibung des Vorhabens waren systematische Immissionsmessungen in den untersuchten Fahrzeugen jeweils am Fahrerplatz und an zwei weiteren Sitzplätzen im Fahrzeug durchzuführen. Auf Basis der Ergebnisse der oben beschriebenen Maximumsuche würden im konkreten Fall systematische Immissionsmessungen am Rollenprüfstand am Fahrerplatz (wird immer untersucht), am Beifahrerplatz ($ExpInd_{WPM,1998}$ bis zu 6.9 %) und am linken Sitzplatz der Rückbank ($ExpInd_{WPM,1998}$ bis zu 19.3 %) erfolgen. Die zehn Messaufnehmer würden dabei jeweils mithilfe eines Hartschaum-Dummys an den betrachteten Sitzplätzen positioniert. Im Zuge der Testmessungen wurde dies stellvertretend nur am Beifahrerplatz durchgeführt.

Zur stabilen Fixierung der Messaufnehmer wurde ein aus Hartschaum gefertigtes Dummy verwendet, das die Positionierung von 100 cm^2 Messaufnehmern entlang einer Matrix (im Oberkörperbereich) bzw. entlang von Linien (in den Bereichen des Kopfes und der unteren Gliedmaßen) erlaubt (Abbildung 7.7). Dieses Hartschaum-Dummy kann am jeweiligen Sitzplatz angegurtet und einzelne Bereiche davon ggf. zusätzlich mit Kabelbindern positioniert werden. Auf diese Weise werden die Messaufnehmer stabil an den vorgesehenen Positionen gehalten und das Risiko von Artefakten durch Verrutschen ober Vibration der Messaufnehmer minimiert (siehe auch Kapitel 7.4).

Dieses Dummy wurde für die Testmessungen am Beifahrerplatz des VW e-Up platziert, wobei die zehn Messaufnehmer an folgenden Positionen (Körperregionen) montiert wurden (Abbildung 7.8): linker Fuß, rechter Fuß, linker Unterschenkel, rechter Unterschenkel, linker Oberschenkel, rechter Oberschenkel, Unterleib (Mitte), linker Brustkorb, rechter Brustkorb, Kopf.



Abbildung 7.7: Eigens angefertigtes Hartschaum-Dummy zur Fixierung der Messaufnehmer (Messaufnehmer aus Gründen der Übersichtlichkeit ohne Kabel dargestellt).



Abbildung 7.8: Hartschaum-Dummy am Beifahrerplatz des VW e-Up (aufgrund der Platzverhältnisse sind auf den Bildern nicht alle Messaufnehmer sichtbar).

In dieser Konfiguration wurden zunächst Immissionsmessungen bei unterschiedlichen Kombinationen von Geschwindigkeit (30, 50, 80, 120 km/h) und Lastzustand (400, 800, 1200, 1800 N) durchgeführt. Anschließend fanden Beschleunigungs- und Rekuperationsmanöver

mit konstanter und dynamischer Last[18] statt. Die Messungen liefen plangemäß, ohne Probleme und zeiteffizient ab, sodass die Kombinationen aus 3 – 4 Geschwindigkeiten und 3 – 4 Lastzuständen (insgesamt also 9 – 16 Fahrzeugzustände) problemlos im vorgesehenen Zeitrahmen untersucht werden konnten. Grundsätzlich zeigen sich erwartungsgemäß nahe der Antriebskomponenten mit steigender Last und steigender Geschwindigkeit auch (deutlich unterproportional) steigende $ExpInd_{WPM,1998}$ (z. B. im Bereich des linken Fußes am Beifahrerplatz 0.7 % vs. 2.8 % bei 30 km/h, 400 N vs. 120 km/h, 1800 N), was die Frage nach den maximal zu untersuchenden Geschwindigkeiten und Lastzuständen aufwirft (siehe Kapitel 8). Auch die Messungen während Beschleunigungsmanövern und Rekuperation (jeweils „moderat“ und „maximal“, jeweils von 0-120 km/h bzw. 120-0 km/h gegen unterschiedliche Last bzw. Bremsmomente) konnten problemlos durchgeführt werden. Bei „moderater“ Beschleunigung bzw. Bremsung waren mehrere unmittelbar hintereinander aufgenommene 5-Sekunden Messzeitintervalle erforderlich, um den gesamten Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgang aufzuzeichnen, während „maximales“ Beschleunigen bzw. Bremsen innerhalb eines 5-Sekunden Messintervalls vollständig abgebildet werden konnten.

Zusätzlich zu den Messungen am Rollenprüfstand mit einem VW e-Up erfolgten auch Testmessungen in einem VW ID.3 mit dem Hartschaum-Dummy am Beifahrerplatz (Messaufnehmerpositionen wie oben beschrieben) bei konstanter Geschwindigkeit und Beschleunigungsmanövern vom Stillstand bis 120 km/h bei 1800 N und 3000 N Last. Diese Messungen sollten als Vergleichsgrundlage für die Testfahrten am ADAC-Testgelände und im Realverkehr mit dem VW ID.3 dienen (siehe Kapitel 7.2 und 7.3).

Erkenntnisse aus den durchgeführten Voruntersuchungen am Rollenprüfstand:

- Die Maximumsuche bei konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigung und Rekuperation war teilweise nicht ausreichend, um den Ort des Immissionsmaximums zu identifizieren. Es wurden daher auch weitere Fahrzeugzustände (Einschalten des Fahrzeugs, Betätigung des Bremspedals im Stillstand) untersucht.
- Zur schnelleren Identifikation des Immissionsmaximums über alle betrachteten Fahrzeugzustände wurde eine Erweiterung der GUI der Messsoftware des Messsystems MF EASY vorgenommen.
- Im Hinblick auf die Minimierung der Fehlerwahrscheinlichkeiten und Steigerung der Effizienz des Messablaufs zur Maximumsuche wurde eine deutliche, aus allen Blickwinkeln sichtbare Kennzeichnung (Nummerierung) aller Messaufnehmer vorgenommen.
- Bezüglich der zu betrachtenden Geschwindigkeiten und Lastzustände wurde ein sinnvoller Kompromiss für die maximale Last, abhängig vom jeweils untersuchten Fahrzeugmodell, gefunden.
- Sofern die Bedienung des Fahrzeuges vom Beifahrersitz aus nicht möglich war, wurde für die Messungen am Fahrerplatz ein Kompromiss hinsichtlich der Positionierung der Messaufnehmer getroffen.

[18] „Dynamische Last“ bedeutet, dass der Prüfstand die Fahrzeugdynamik (Masse, Luftwiderstand) nachbildet und das auf die Antriebsachsen wirkende Momentan-Lastmoment dynamisch (während der Beschleunigung) anpasst.

Berücksichtigung der Erkenntnisse im angewendeten Messprotokoll:

- Im Zuge der Maximumsuche werden neben konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigung und Rekuperation auch das EIN/AUS-Schalten des Fahrzeuges und die Betätigung des Bremspedals im Stillstand als zusätzliche Fahrzeugzustände betrachtet.
- Bezüglich der zu betrachtenden Fahrzeugzustände im Zuge der systematischen Messungen an den drei zu untersuchenden Sitzplätzen wird folgender Kompromiss als sinnvoll angesehen: Messungen bei 30, 50, 80 und 120 km/h und bei 400, 800 und 1200 N sowie einem zusätzlichen höheren Lastzustand F_{max}, der bei 120 km/h vom jeweils betrachteten Fahrzeug im Rahmen des üblichen Gebrauchs als realistisch anzusehen ist. Zusätzlich werden zwei Beschleunigungsmanöver (aus dem Stillstand bis 120 km/h) bei 400 N und bei F_{max} sowie zwei Bremsmanöver („mäßig“ und „maximal“) mit Rekuperation von 120 km/h bis zum Stillstand mit dynamischer Last durchgeführt. Außerdem erfolgen Messungen während des EIN/AUS-Schaltens des Fahrzeuges sowie, sofern dies die Ergebnisse aus der Maximumsuche indizieren, während der Betätigung des Bremspedals im Stillstand.
- Zusätzlich zu den Messungen bei den oben genannten Fahrzeugzuständen werden kontinuierliche Immissionsmessungen (Messdatenstreaming) an einer ausgewählten Sitzposition während des Fahrens eines WLTC Fahrzyklus am Rollenprüfstand durchgeführt. Unter „kontinuierlichen“ Messungen werden dabei automatisch zyklisch wiederholte Messungen von jeweils einer Sekunde Länge während des gesamten WLTC Fahrzyklus verstanden, um „Lücken“ in der Signalaufzeichnung durch manuelles Starten der Messungen und Speichern der Messdaten zu minimieren.
- Festlegung der Messaufnehmerpositionen für die Messungen am Fahrerplatz: Die Messaufnehmer für Unterleib, Brust und Kopf können hinter dem/der Fahrenden entlang der Sitzoberfläche befestigt werden. Im Fuß und Unterschenkelbereich ist eine Befestigung der Messaufnehmer direkt am Körper des/der Fahrenden möglich. Im Oberschenkelbereich sind Messaufnehmerpositionierungen seitlich außen an den Oberschenkeln oder zwischen den Oberschenkeln des/der Fahrenden denkbar (Festlegung der Position erfolgt auf Basis der Ergebnisse aus den Vormessungen bzw. der Maximumsuche).

7.1.3 Testmessungen mit einem einspurigen BEV

Die Möglichkeiten für Messungen an einspurigen BEV wurden anhand des E-Rollers Silence S01 getestet. Dazu wurde eine (manuelle) Immissionsmaximumsuche auf dem Leistungsprüfstand MAHA LPS 3000 im ADAC Technik Zentrum durchgeführt (Abbildung 7.9). Relevante Immissionsbeiträge zufolge Reifen- und/oder Rollenmagnetisierung konnten bei den Testmessungen nicht festgestellt werden.



Abbildung 7.9: Suche des Immissionsmaximums entlang des E-Rollers Silence S01 am Leistungsprüfstand MAHA LPS 3000.

Erkenntnisse aus den durchgeführten Voruntersuchungen am Leistungsprüfstand:

- Bei einspurigen Fahrzeugen ist die Maximumsuche vergleichsweise einfach und schnell, auch manuell mit einem Handgerät (ELT-400) durchführbar.
- Für die systematischen Messungen am Prüfstand kann das Hartschaum-Dummy zur Sondenfixierung problemlos am einspurigen BEV befestigt werden.
- Die konkret zu untersuchenden Geschwindigkeiten und Lastzustände werden im Zuge der Vormessungen bzw. Maximumsuche festgelegt, sodass einerseits typische und maximale Expositionswerte für jedes Fahrzeug erfasst werden und andererseits auch Vergleiche zwischen den unterschiedlichen Fahrzeugen möglich sind. Als Geschwindigkeiten erscheinen 30 und 50 km/h plus die Maximalgeschwindigkeit (max. 120 km/h) sinnvoll.

7.2 Testmessungen am ADAC-Testgelände

Nach Besichtigung des Testgeländes am ehemaligen Fliegerhorst Penzing wurden Testmessungen mit einem VW ID.3 durchgeführt. Die zehn Messaufnehmer des Messsystems MF EASY wurden am Beifahrerplatz des Fahrzeugs mithilfe des oben beschriebenen Hartschaum-Dummys fixiert und es wurden damit einige Einzelmessungen bei konstanter Geschwindigkeit sowie bei Beschleunigungs- und Bremsmanövern durchgeführt. Abschließend erfolgte eine kontinuierliche Messung (Messdatenstreaming) während einer ca. fünfminütigen Rundfahrt am Testgelände.

Die Positionen der einzelnen Messaufnehmer waren identisch wie im Fall der Messungen im VW e-Up auf dem Prüfstand: linker Fuß, rechter Fuß, linker Unterschenkel, rechter Unterschenkel, linker Oberschenkel, rechter Oberschenkel, Unterleib (Mitte), linker Brustkorb, rechter Brustkorb und Kopf.

Die während der Fahrten am Testgelände ermittelten maximalen Immissionen lagen durchwegs unterhalb jener Werte, die am Prüfstand unter maximalen Lastbedingungen ermittelt wurden, wobei identische Trends erkennbar waren, wie z. B. das Auftreten der maximalen $ExpInd_{WPM,1998}$ Werte im Fußbereich beim Beschleunigen. Zudem war der Differenz

zwischen den am Prüfstand unter maximalen Lastbedingungen gemessenen Höchstwerten und jenen während der Testfahrt am Testgelände ermittelten maximalen Messwerten deutlich größer als dies durch etwaige Störhintergrundfelder des Prüfstandes erklärbar wäre. Dies ist einerseits als Indiz zu sehen, dass die Messungen am Prüfstand (bei Abdeckung eines realistischen Geschwindigkeits- und Lastbereiches) die Verhältnisse in der Realität nicht unterschätzen und andererseits, dass keine signifikanten Artefakte zufolge von Erschütterungen bzw. Vibration der Messaufnehmer aufgetreten sind (trotz des auffallend unruhigen, aus Betonfeldern bestehenden Straßenbelags am Testgelände, näheres dazu in Kapitel 7.4). Hintergrundstörfelder zufolge anderer Niederfrequenzquellen konnten am gesamten Testgelände nicht festgestellt werden.

Erkenntnisse aus den Voruntersuchungen am Testgelände:

- Das Testgelände eignet sich gut zur Plausibilisierung der Messungen am Prüfstand (starke Beschleunigungs- und Bremsmanöver sowie Fahrten mit konstanter Geschwindigkeit).
- Insbesondere sind am Testgelände, zumindest in begrenztem Umfang, auch Validierungsmessungen am Fahrerplatz während des Fahrens möglich (im Realverkehr aus Sicherheitsgründen nicht möglich).

Berücksichtigung der Erkenntnisse im angewendeten Messprotokoll:

- Im Zuge der Messungen am Testgelände (jeweils zehn Messpositionen an drei Sitzplätzen) werden zumindest folgende Fahrzeugzustände betrachtet:
  - 2 x Beschleunigung vom Stillstand bis 120 km/h (mäßig und maximal)
  - 2 x Bremsen von 120 km/h bis zum Stillstand (mäßig und maximal)
  - Messung während des Fahrens mit konstanten Geschwindigkeiten (30, 50, 80 und 120 km/h)
- Zusätzlich erfolgen Messungen der Immissionen zufolge anderer, nicht zum elektrischen Antriebssystem gehörender Quellen (z. B. Lüfter, Sitzheizung, Fensterheber, Beleuchtung, Fensterheber).

7.3 Testmessungen während einer Realfahrt in einem zweispurigen BEV

Mit dem bereits in Kapitel 7.2 genannten VW ID.3 wurde auch eine Messung während einer ca. 90-minütigen Rundfahrt im Raum Landsberg am Lech durchgeführt. Die Immissionen an den zehn Positionen am Beifahrerplatz wurden dabei während der gesamten Fahrt kontinuierlich gemessen (Messdatenstreaming in Intervallen von 1 s). Zusätzlich wurden während der Fahrt auch die GPS-Koordinaten des Fahrzeugs aufgezeichnet, um später gegebenenfalls Auffälligkeiten in den Messdaten nachvollziehen zu können (z. B. Immissionen verursacht durch externe Feldquellen in der Umgebung wie Hochspannungs- oder Bahnoberleitungen). Die gewählte Route wird seitens des ADAC regelmäßig für standardisierte Testfahrten genutzt und enthält einen typischen Mix aus innerstädtischem, Landstraßen- und Autobahnverkehr (Abbildung 7.10).

Abbildung 7.11 zeigt den zeitlichen Verlauf des während der Fahrt gemessenen $ExpInd_{WPM,1998}$. Grundsätzlich traten auch während der Fahrt im Realverkehr an keinem der Messpunkte

Immissionen zutage, deren $ExpInd_{WPM,1998}$ mehr als 15 % höher lagen als die am Prüfstand bereits beobachtbaren. Abweichungen in diesem Ausmaß sind durch die beschränkte Reproduzierbarkeit der Sondenpositionen zu erwarten. Einen interessanten Spezialfall stellt der gegen Ende der Fahrt gemessene hohe Immissionswert mit ca. 20 % Ausschöpfung der Referenzwerte im Bereich des linken Unterschenkels dar (oberes Diagramm in Abbildung 7.11). Dieser wird durch ein Burst-artig auftretendes Signal mit 25 kHz Grundwelle verursacht (Abbildung 7.12), das bereits im Zuge eines Beschleunigungsmanövers am Rollenprüfstand beobachtet wurde (Abbildung 7.13). Da dieses ca. 4 – 5 ms lange Signal offensichtlich nur selten auftritt, war im Zuge des Testmessungen nicht feststellbar, ob es von Komponenten des elektrischen Antriebssystems oder von einer anderen elektronischen Komponente verursacht wird. Dies unterstreicht jedenfalls die Bedeutung des Einsatzes einer Messmethode, die es erlaubt, auch relativ selten auftretende transiente Immissionen zu erfassen.

Im mittleren Diagramm in Abbildung 7.11 ist die Ordinatenachse vergrößert, um die Details des Immissionsverlaufes in den einzelnen Positionen besser zu erkennen. Deutlich sichtbar ist, dass die auf die Referenzwerte bezogenen Immissionswerte erwartungsgemäß im Fußbereich am höchsten sind, insbesondere im linken Fußbereich wird eine Korrelation der Immissionswerte mit Last- bzw. Geschwindigkeitswechsel sichtbar.



Abbildung 7.10: Gefahrene Testroute im Realverkehr (rote Linie).

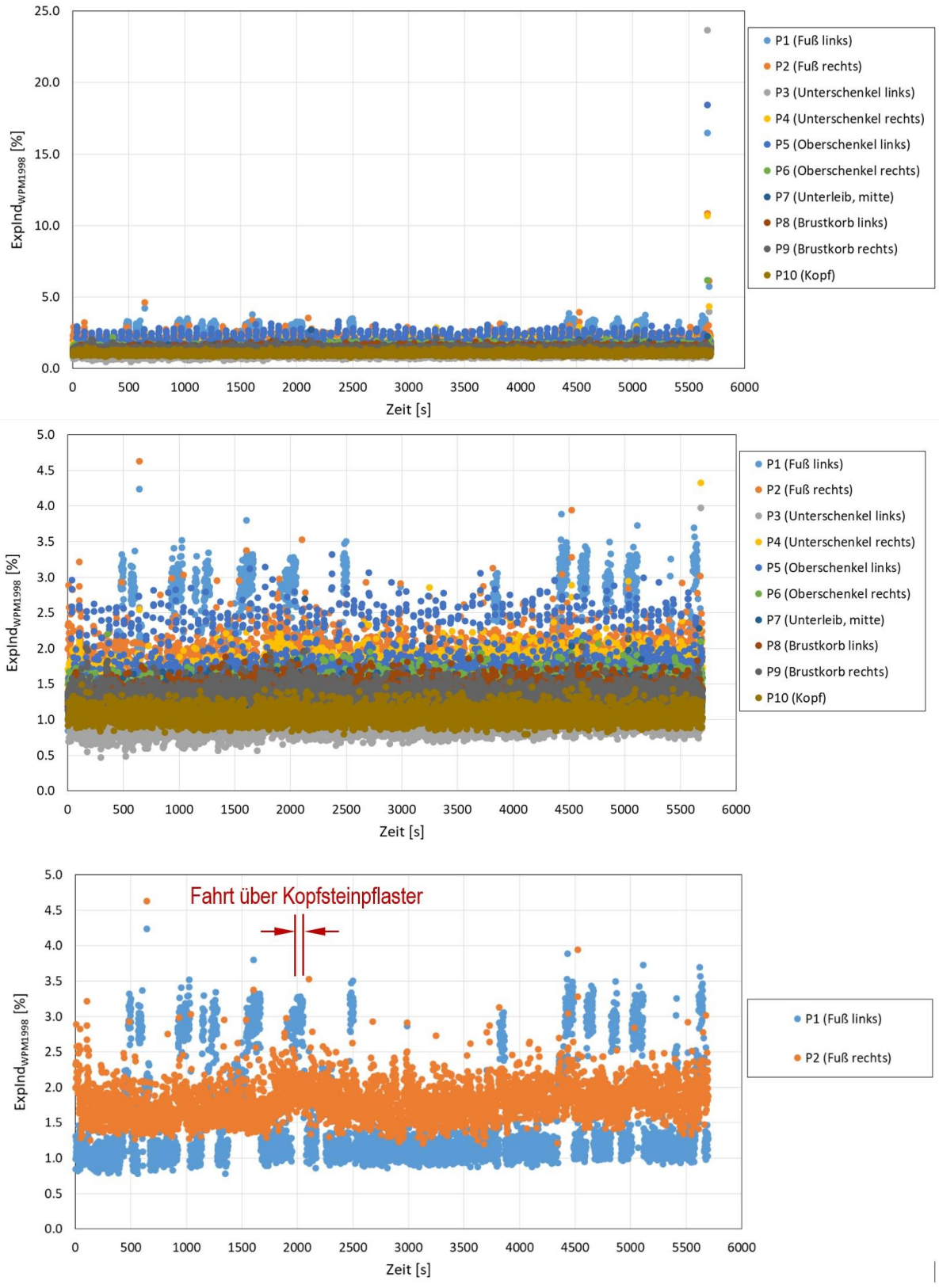


Abbildung 7.11: Verlauf des ExpInd$_{WPM,1998}$ über die Zeit während der Messfahrt mit dem VW ID.3 im Realverkehr. Hartschaum-Dummy am Beifahrerplatz. Oben: Ordinatenskala-Maximum 25 %, um maximal aufgetretenen Immissionswert (bei Sekunde 5683) noch darstellen zu können; Mitte: Ordinatenskala-Zoom auf Maximum 5 %; Unten: wie Mitte, nur Messpositionen P1 und P2 dargestellt.

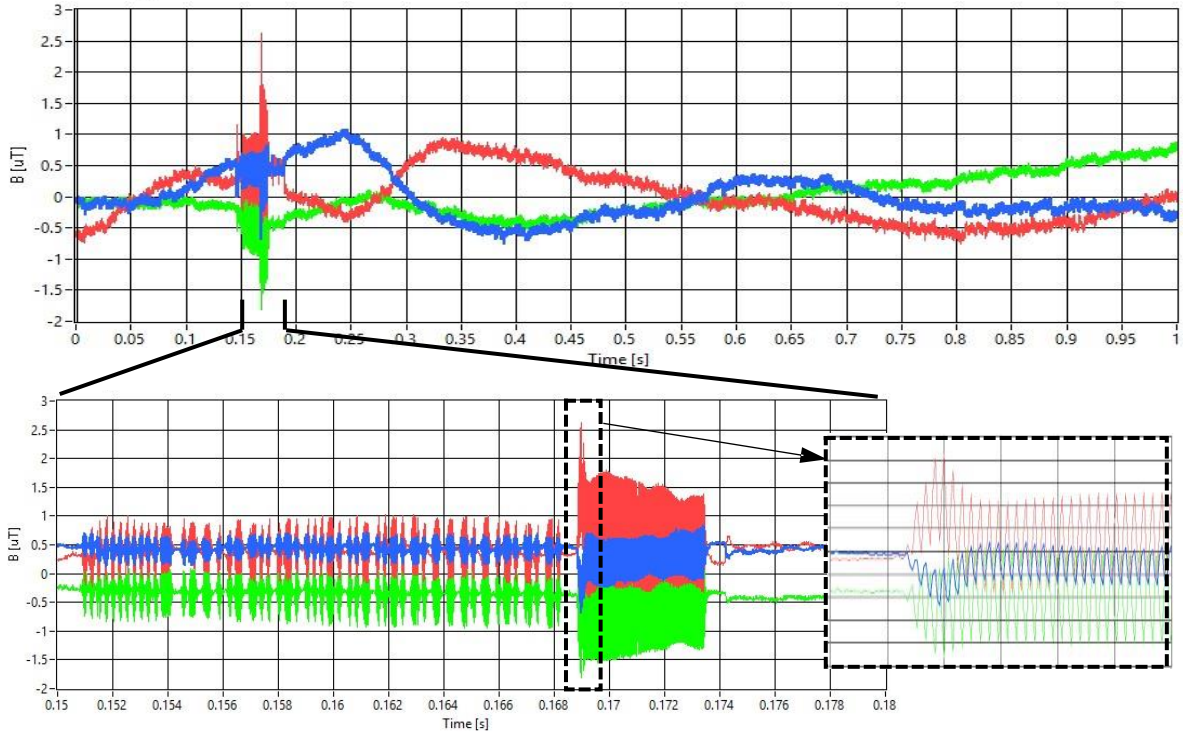


Abbildung 7.12: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte im Bereich des linken Unterschenkels am Beifahrerplatz im VW ID.3 als Ursache für den gegen Ende der Testfahrt im Realverkehr auftretenden Maximalwert des $ExpInd_{WPM,1998}$.

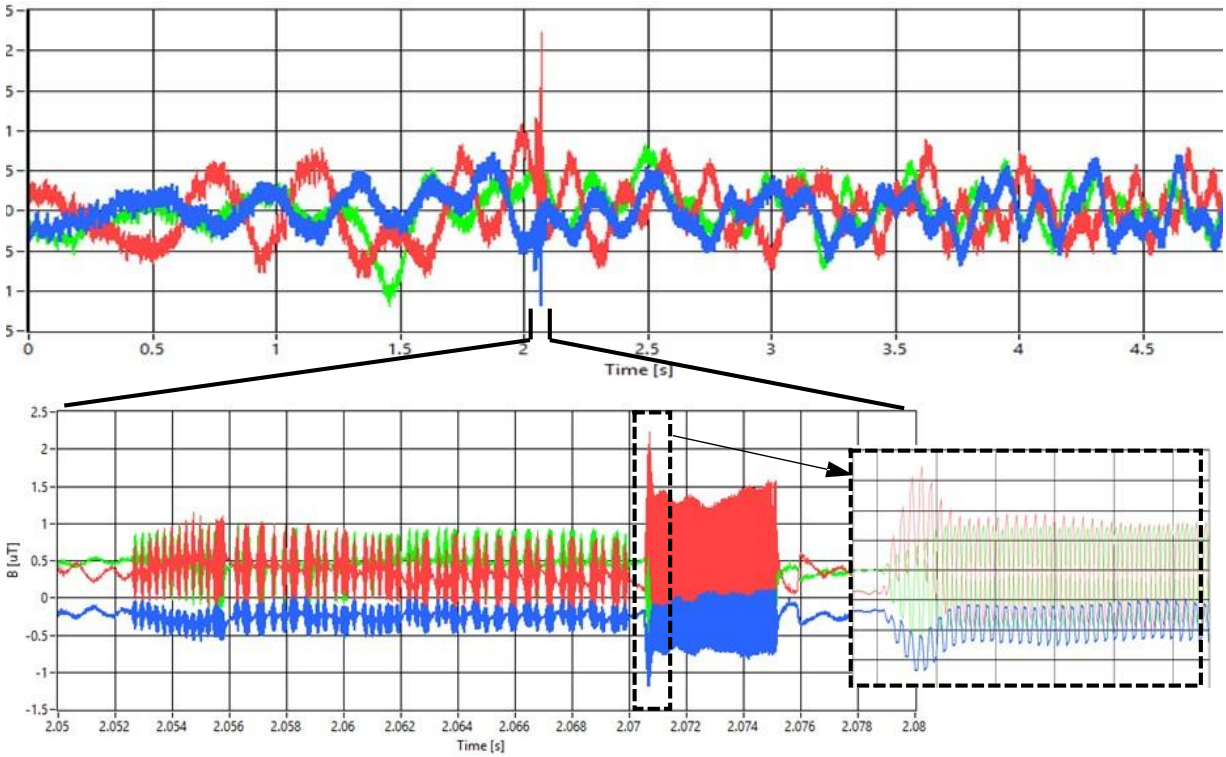


Abbildung 7.13: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte im Bereich des linken Unterschenkels am Beifahrerplatz im VW ID.3 während eines Beschleunigungsversuchs am Rollenprüfstand. Die drei unterschiedlich gefärbten Kurven entsprechen jeweils der magnetischen Flussdichte in den drei orthogonalen Messachsen.

Bei genauer Betrachtung des oberen und mittleren Teilbildes von Abbildung 7.11 ist das regelmäßige Auftreten von auffällig über dem mittleren Niveau liegenden magnetischen Feldern (im Ausmaß von $ExpInd_{WPM,1998}$ ca. 2.5 – 3 %) im Bereich des linken Oberschenkels am Beifahrerplatz erkennbar. Zur besseren Identifikation zeigt Abbildung 7.14 einen Zoom des mittleren Teilbildes von Abbildung 7.11 auf das Zeitintervall 0 – 500 s. Eine Detailanalyse der aufgezeichneten Zeitsignale bestätigte, dass es sich dabei um eine Burst-artig, periodisch alle ca. 66 s auftretende und einige Sekunden andauernde Schwingung mit ca. 10 kHz im Bereich der Mittelkonsole handelt. Das Maximum des Burst-RMS-Wertes im Bereich der Messposition „Oberschenkel links“ liegt bei ca. 150 - 180 nT (ca. 2.5 – 3 % ICNIRP 1998). Die Ursache dieses Magnetfeldes konnte nicht eruiert werden. Aufgrund der offensichtlichen Unabhängigkeit vom Fahrzeugzustand erscheint das elektrische Antriebssystem des Fahrzeuges als Ursprung dieses Feldanteils als unwahrscheinlich. Er war in entsprechend abgeschwächter Form ebenfalls in allen anderen Positionen auf dem Beifahrerplatz (außer in den Messpositionen „Brust rechts“ und „Kopf“) nachweisbar.

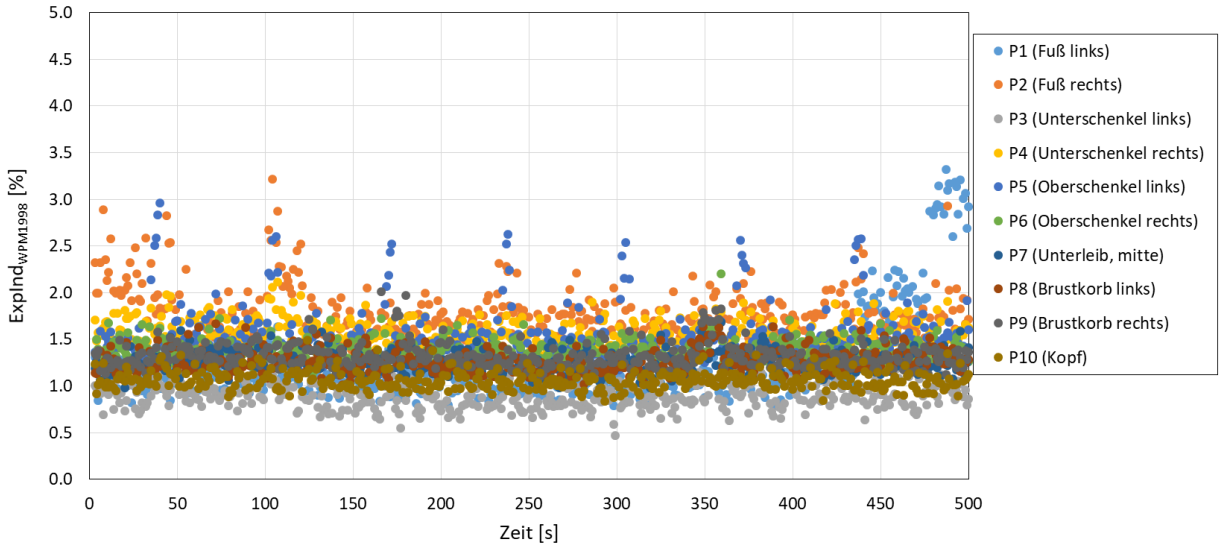


Abbildung 7.14: Verlauf des $ExpInd_{WPM,1998}$ über die Zeit während der Messfahrt mit dem VW ID.3 im Realverkehr. Hartschaum-Dummy am Beifahrerplatz. Zoom auf die ersten 500 Sekunden der Zeitachse zur leichteren Identifikation der regelmäßig, im Abstand von ca. 66 s auftretenden, auffällig über dem mittleren Niveau liegenden magnetischen Felder im Bereich des linken Oberschenkels (P5, dunkelblaue Punkte).

Erkenntnisse aus der Testfahrt im Realverkehr:

- Die Testfahrt im Realverkehr kann als wertvolle Ergänzung zu den systematischen Messungen am Rollenprüfstand und am Testgelände gesehen werden, um die Repräsentativität der am Rollenprüfstand und am Testgelände erhobenen Daten im Hinblick auf die alltägliche Exposition in BEV und PHEV besser zu beurteilen.
- Durch die lange Beobachtungszeit unter realen Bedingungen verringert die Testfahrt im Realverkehr das Risiko, dass selten auftretende transiente Immissionen unentdeckt bleiben.
- Das Messsystem MF EASY und das mit den Messaufnehmern bestückte Hartschaum-Dummy haben sich für die kontinuierlichen Messungen während der Fahrt bewährt.

Berücksichtigung der Erkenntnisse im angewendeten Messprotokoll:

Mit jedem der zu untersuchenden zweispurigen Fahrzeuge wird die oben beschriebene Testfahrt im Realverkehr durchgeführt. Das mit den Messaufnehmern bestückte Hartschaum-Dummy wird dafür an einem, auf Basis der Ergebnisse vom Rollenprüfstand ausgewählten Sitzplatz (ausgenommen Fahrerplatz) montiert. Es wird jener Sitzplatz ausgewählt, an dem lokal die höchsten Werte des $ExpInd_{WPM,1998}$ bei den Messungen am Prüfstand aufgetreten sind, wobei Magnetfeldanteile zufolge von Reifenmagnetisierung nicht berücksichtigt werden.

7.4 Analyse der Messdaten bezüglich Störbeeinflussungen durch Erschütterungen bei Realfahrten

Eine aus früheren Immissionsmessungen in Elektrofahrzeugen bekannte Fehlerquelle sind Erschütterungen bzw. Vibrationen der Messaufnehmer während Testfahrten. In starken Gradientenfeldern kann dies zu deutlichen Artefakten in den gemessenen Signalen führen, da die Bewegung der induktiven Messaufnehmer in den Feldern zu zusätzlichen Bewegungs-korrelierten Signalanteilen führt, die nichts mit den tatsächlichen Immissionen zu tun haben (z. B. Vibrationsfrequenz überlagert den eigentlichen Signalverlauf der Immissionen). Der stabilen Fixierung der Messaufnehmer, speziell in Bereichen, in welchen starke Feldgradienten erwartet werden, kommt daher eine große Bedeutung zu. Das eingesetzte Hartschaum-Dummy soll diese Art von Störeffekten minimieren. Auf Basis der Testfahrt im Realverkehr wurden die Auswirkungen der verbleibenden Vibrationen auf die Messergebnisse analysiert. Im unteren Teilbild von Abbildung 7.11 ist der Zeitverlauf des $ExpInd_{WPM,1998}$ im linken und rechten Fußbereich dargestellt. Der darin markierte Abszissenabschnitt zwischen Sekunde 1956 und Sekunde 2055 entspricht einer Fahrt über sehr grobes Kopfsteinpflaster in der Innenstadt von Landsberg am Lech. In Abbildung 7.15 sind die Messdaten in Form des $ExpInd_{WPM,1998}$ aller Messpositionen im Zeitintervall von 95 Sekunden vor bis 60 Sekunden nach der Kopfsteinpflasterfahrt noch einmal separat dargestellt.

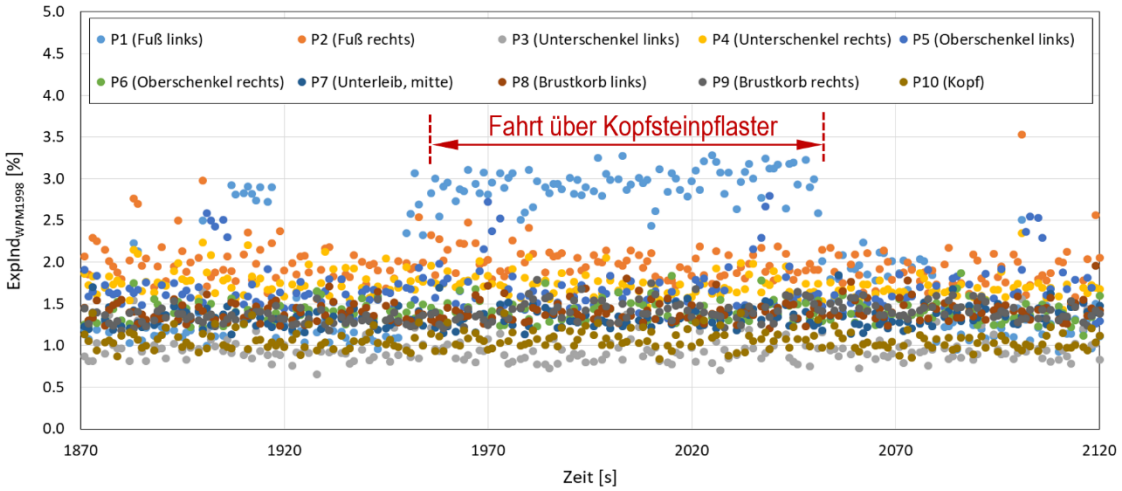


Abbildung 7.15: Verlauf des $ExpInd_{WPM,1998}$ über die Zeit während der Messfahrt mit dem VW ID.3 im Realverkehr. Zoom der Zeitachse auf das Zeitintervall von Sekunde 1870 bis 2120 und Markierung des Zeitintervalls der Fahrt über grobes Kopfsteinpflaster in der Innenstadt von Landsberg.

Eine Gegenüberstellung der Mittelwerte des $ExpInd_{WPM,1998}$ innerhalb des Zeitintervalls [1856 s – 1955 s] unmittelbar vor der Fahrt über das Kopfsteinpflaster und innerhalb des Zeitintervalls [1956 s – 2055 s] während der Fahrt über das Kopfsteinpflaster liefert keinen Hinweis auf eine relevante Beeinflussung des $ExpInd_{WPM,1998}$ durch die Vibrationen der Messaufnehmer (Abbildung 7.16). Der deutliche Unterschied des $ExpInd_{WPM,1998}$ in Messposition P1 ist auf eine tatsächliche Veränderung des magnetischen Feldes in dieser Position zurückzuführen, die bereits kurz vor dem Erreichen des Kopfsteinpflasters messbar wurde. Derartige Veränderungen des $ExpInd_{WPM,1998}$ in Messposition P1 traten vielfach während der Testfahrt auf (siehe Abbildung 7.11, mittleres und unteres Teilbild) und sind möglicherweise mit Phasen sehr langsamen Fahrens korreliert. Spektralanalysen in diesen Phasen zeigen Frequenzanteile bei knapp über 154 Hz, 308 Hz, 462 Hz und 616 Hz, die in anderen Phasen (mit $ExpInd_{WPM,1998}$ < 2.5 % in P1) nicht feststellbar sind (siehe auch Abbildung 7.17)

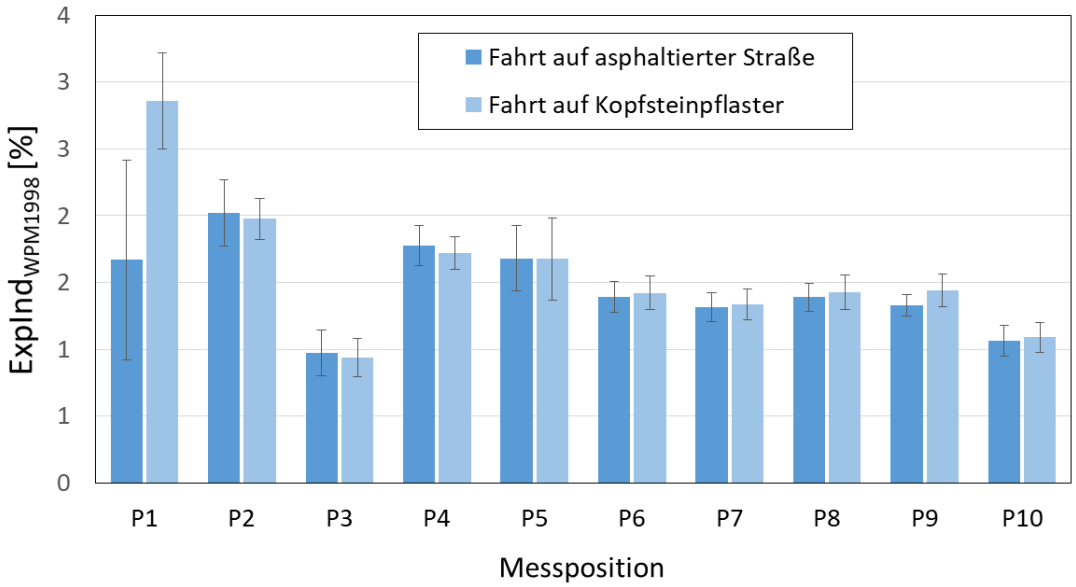


Abbildung 7.16: Gegenüberstellung der Mittelwerte (± Standardabweichung) des Expositionsindexes vor und während der Fahrt über das Kopfsteinpflaster in der Innenstadt von Landsberg am Lech.

Wenngleich der $ExpInd_{WPM,1998}$ offensichtlich in keinem relevanten Ausmaß durch die Vibrationen beeinflusst wird, so sind Vibrations-korrelierte Signalanteile durchaus identifizierbar, wie die in Abbildung 7.17 dargestellten Spektrogramme zeigen. Während der Fahrt über das Kopfsteinpflaster sind zusätzliche Frequenzanteile, vor allem im Bereich unter 40 Hz mit Amplituden von bis zu ca. 1 µT erkennbar, die als Folge der Vibration der Messaufnehmer zu interpretieren sind. Derartige Vibrations-korrelierte Signalanteile sind in den Signalen aller Messaufnehmern eindeutig nachweisbar, interessanterweise jedoch am stärksten in Position P9 („Brust rechts“). Dies ist möglicherweise eine Folge des in diesem Bereich relativ großen Feldgradienten zufolge der Verzerrung des geomagnetischen Feldes durch die Fahrzeugkarosserie. Die Messposition P9 befindet sich näher als jede andere an einer Öffnung (Unterkante des Fensters der Beifahrertür) in der das Erdmagnetfeld teilweise abschirmenden Stahlkarosserie, wodurch dort relativ große Feldgradienten zu erwarten sind. Die andere mögliche Erklärung, dass ausgerechnet die in Messposition P9 befindliche Sonde mit deutlich höherer Amplitude vibriert hat als die anderen Sonden, erscheint bei Berücksichtigung der Montageweise der Sonden im Hartschaum-Dummy als unwahrscheinlich.

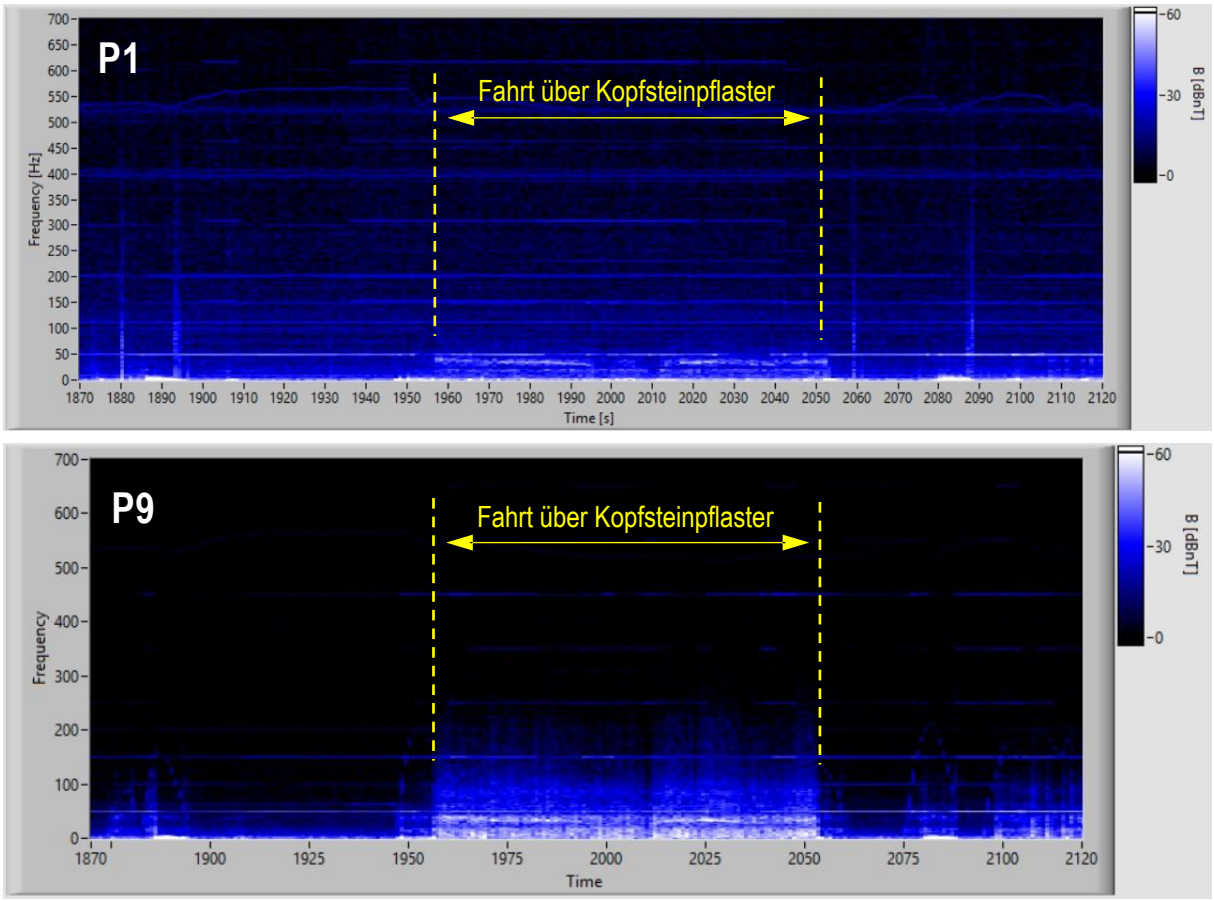


Abbildung 7.17: Spektrogramm der Messdaten in Position P1 („Fuß links“, oberes Bild) und P9 („Brust rechts“, unteres Bild) im Zeitintervall von ca. 86 Sekunden vor (Sekunde 1870) bis ca. 65 Sekunden nach (Sekunde 2120) der ca. 95 Sekunden langen Fahrt über Kopfsteinpflaster durch die Innenstadt von Landsberg am Lech. Während der Fahrt über das Kopfsteinpflaster sind zusätzliche Frequenzanteile, vor allem im Frequenzbereich bis ca. 40 Hz mit Amplituden bis zu ca. 1 µT erkennbar, die als Folge der Vibration der Messaufnehmer zu interpretieren sind.

Im Hinblick auf die Tauglichkeit der Messprozedur (Fixierung der Messaufnehmer im Hartschaum-Dummy) wird dieser Befund jedoch nicht als einschränkend angesehen. Vielmehr handelt es sich dabei um die messtechnische Dokumentation bzw. Bestätigung unvermeidlicher Induktionsphänomene in der Praxis, die in ähnlicher Weise wie in den Messaufnehmern auch im bewegten (vibrierenden) Körper von Personen auftreten. Eine Überprüfung der Messdaten aus den Realfahrten und auf dem Testgelände im Hinblick auf Vibrations- oder Stoß-korrelierte Artefakte (insbesondere bei Bodenwellen oder Schlaglöchern) mit relevantem Einfluss auf das Bewertungsergebnis wird aber ebenfalls durchgeführt. Dies erfolgt durch den Abgleich der Magnetfeld-Messdaten mit bei den Fahrten mitgeführten Videoaufnahmen und Beschleunigungssensor-Messdaten.

8 Zusammenfassung der optimierten Messprozeduren

Basierend auf den in den in Kapitel 7 beschriebenen Ergebnissen und Erkenntnissen wurden einige Aspekte der Messmethode verfeinert bzw. optimiert. In Abstimmung mit den Prüfstandtechnikern des ADAC Technik Zentrums wurden die Geschwindigkeit und die Fahrbahnneigung (Steigung, anstelle des Lastmoments) als Parameter zur Herstellung vergleichbarer Testbedingungen festgelegt. Bei Verwendung des Lastmoments wären die Messdaten zwischen den Fahrzeugen und auch mit den Realfahrten nicht vergleichbar, da das auf die Antriebsachse(n) wirkende Lastmoment stark vom Fahrzeug selbst abhängt (Gewicht, Luftwiderstand etc.). Die Verwendung von Geschwindigkeit und Fahrbahnsteigung (in %) hingegen erlaubt einen objektiven realitätsbezogenen Vergleich und entspricht auch der im Zuge von Fahrzeugprüfungen üblichen Vorgehensweise. Auf Grundlage der Fahrzeugdaten und einer speziellen Kalibrierung („Einmessung“) des jeweiligen Fahrzeuges zu Beginn der Messungen werden vom Prüfstand die der jeweils gewählten Fahrbahnsteigung entsprechenden Gegenkräfte auf die Antriebsachse(n) aufgeprägt. Als realistischer Bereich der zu betrachtenden Fahrbahnsteigungen wurden 0 % bis 10 % festgelegt.

8.1 Vorgehen bei den Messungen in zweispurigen BEV und PHEV

Für die Messungen im Inneren der zu untersuchenden zweispurigen BEV und PHEV kommt das folgende optimierte Messkonzept zur Anwendung (gleiches Prozedere für alle Fahrzeuge):

1. Hintergrundstörfeldstärkemessung am Rollenprüfstand (Fahrzeug AUS + Rollen AUS, Fahrzeug AUS + Rollen in Standby);
2. Ausrollversuch (Reifen- u. Rollenmagnetisierung): Beschleunigung bis 100 km/h und Ausrollen im Leerlauf bis zum Stillstand während Immissionsmessung mit Messaufnehmern im Fahrzeuginneren, im jeweils nächstgelegenen Punkt zu den Rädern; Diese Ausrollversuche erfolgen sowohl mit leerlaufenden Rollen als auch mit Rollenwiderständen entsprechend 0 % und 10 % Steigung.
3. Vormessungen zur Dokumentation evtl. Hintergrundfelder durch Rollenantriebe: Vier Messaufnehmer außerhalb des Fahrzeuges, jeweils in unmittelbarer Nähe der Räder bzw. Rollen; Jeweils ein Messaufnehmer im Fußbereich von Fahrer- und Beifahrersitz sowie Rückbank links und Rückbank rechts, jeweils möglichst nahe zum jeweils nächstgelegenen Rad bzw. Rolle; Jeweils ein Messaufnehmer auf der Sitzfläche der Rücksitzbank, jeweils möglichst nahe zum jeweils nächstgelegenen Rad bzw. Rolle; Folgende Fahrzeugzustände werden betrachtet (alle manuell kontrollierbaren Verbraucher ausgeschaltet): konstante Geschwindigkeiten (30 und 100 km/h) und konstante Steigungen (0 % und 10 %), Beschleunigung vom Stillstand bis 100 km/h und Bremsen von 100 km/h bis zum Stillstand bei unterschiedlichen Steigungen.
4. Vormessungen und Maximumsuche: Messaufnehmer in den jeweiligen Bereichen (Sitzflächen, Fußbereiche, vgl. Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4) verteilen und Messungen während folgender Fahrzeugzustände (alle nicht genannten und manuell kontrollierbaren Verbraucher ausgeschaltet): Einschalten des Fahrzeugs, Ausschalten des Fahrzeugs, Betätigung des Bremspedals, konstante Geschwindigkeiten (30 und 100 km/h) und Steigungen (0 % und 10 %), Beschleunigung vom Stillstand bis 100 km/h, Rekuperation von 100 km/h bis zum Stillstand;
5. Analyse der Vormessungen und Festlegung der zu untersuchenden Sitzplätze für die systematischen Untersuchungen am Rollenprüfstand;

6. Systematische Untersuchungen am Rollenprüfstand am Fahrerplatz und an zwei weiteren Sitzplätzen, an welchen bei den Vormessungen die höchste Exposition gemessen wurde: Jeweils zehn Messaufnehmer verteilt über den Sitzplatz mittels Hartschaum-Dummy positioniert/fixiert; alle nicht genannten und manuell steuerbaren Verbraucher ausgeschaltet; Messungen während folgender Fahrzeugzustände: Einschalten des Fahrzeugs, Ausschalten des Fahrzeugs, Betätigung des Bremspedals, konstante Geschwindigkeiten (30, 50, 80 und 120 km/h) und Fahrbahnsteigungen (0 %, 5 % und 10 %), zwei Beschleunigungsmanöver („mäßig“ und „maximal“) vom Stillstand bis 120 km/h, jeweils bei 0 % und 10 %, zwei Bremsmanöver („mäßig“ und „maximal“) von 120 km/h bis zum Stillstand mit dynamischer Last;
7. Kontinuierliche Immissionsmessungen (Messdatenstreaming) während des Fahrens eines WLTC Fahrzyklus am Rollenprüfstand mit den im Hartschaum-Dummy positionierten Messaufnehmern an jenem Sitzplatz (ausgenommen Fahrerplatz), an dem bei den vorangegangenen systematischen Messungen der höchste $ExpInd_{WPM,1998}$ aufgetreten ist;
8. Messungen während Fahrten am Testgelände mit Messaufnehmern an den auch bei den systematischen Messungen am Rollenprüfstand betrachteten Sitzplätzen; Folgende Fahrzeugzustände werden betrachtet: konstante Geschwindigkeiten (30, 50, 80 und 120 km/h), zwei Beschleunigungsmanöver („mäßig“ und „maximal“) vom Stillstand bis 120 km/h, zwei Bremsmanöver („mäßig“ und „maximal“) von 120 km/h bis zum Stillstand. Zusätzlich erfolgen Messungen im Stillstand bei Aktivierung unterschiedlicher anderer Verbraucher, z. B. Lüfter, Sitzheizung, Lenkradheizung, Beleuchtung.
9. Kontinuierliche Immissionsmessung (Messdatenstreaming) während einer Fahrt im Realverkehr auf einer Standard-Testroute (Abbildung 7.10) des ADAC Technik Zentrums mit den im Hartschaum-Dummy positionierten Messaufnehmern an jenem Sitzplatz (ausgenommen Fahrerplatz), an dem bei den vorangegangenen systematischen Messungen der höchste $ExpInd_{WPM,1998}$ aufgetreten ist.

8.2 Messungen an einspurigen BEV

Für die Messungen an den zu untersuchenden einspurigen BEV kommt das folgende optimierte Messkonzept zur Anwendung (gleiches Prozedere für alle Fahrzeuge):

1. Hintergrundstörfeldstärkemessung am Rollenprüfstand (Fahrzeug AUS + Rollen AUS, Fahrzeug AUS + Rollen in Standby);
2. Ausrollversuch (Reifen u. Rollenmagnetisierung): Beschleunigung bis Maximalgeschwindigkeit (oder max. 100 km/h) und Ausrollen im Leerlauf bis zum Stillstand während Immissionsmessung mit Messaufnehmern am jeweils nächstgelegenen Punkt zu den Rädern;
3. Vormessungen zur Dokumentation evtl. Hintergrundfelder durch Rollenantriebe: Jeweils zwei Messaufnehmer pro Rad/Rolle in unterschiedlicher Distanz zur Rolle; Folgende Fahrzeugzustände werden betrachtet (alle manuell kontrollierbaren Verbraucher ausgeschaltet): konstante Geschwindigkeiten (30 und 100 km/h) und konstante Steigungen (0 % und 10 %).
4. Vormessungen und Maximumsuche: Manuelle Messung in zugängigen Bereichen (Sitzfläche, Fußbereiche) während folgender Fahrzeugzustände (alle nicht genannten

und manuell steuerbaren Verbraucher ausgeschaltet): Einschalten des Fahrzeugs, Ausschalten des Fahrzeugs, Betätigung der Bremsen, konstante Geschwindigkeiten (30 und 100 km/h bzw. v_{max}) und konstante Steigungen (0 %, 5 % und 10 %[19]), Beschleunigung vom Stillstand bis 100 km/h (oder v_{max}), Rekuperation von 100 km/h bis zum Stillstand;

5. Analyse der Vormessungen und Festlegung der zu untersuchenden Messpositionen für die systematischen Untersuchungen am Rollenprüfstand;
6. Systematische Untersuchungen am Rollenprüfstand: Hartschaum-Dummy mit zehn Messaufnehmern am Fahrzeug befestigt (ein Messaufnehmer am Ort des festgestellten Feldmaximums); Alle nicht genannten und manuell kontrollierbaren Verbraucher ausgeschaltet; Messungen während folgender Fahrzeugzustände: Einschalten des Fahrzeugs, Ausschalten des Fahrzeugs, Betätigung der Bremsen, konstante Geschwindigkeiten (30, 50, 100 km/h oder v_{max}) und konstante Steigungen (0 %, 5 % und 10 %), zwei Beschleunigungsmanöver („mäßig“ und „maximal“) vom Stillstand bis 100 km/h (oder v_{max}) jeweils gegen 0 % und 5 % bzw. 10 %[19], zwei Bremsmanöver („mäßig“ und „maximal“) von 100 km/h (oder v_{max}) bis zum Stillstand mit dynamischer Last.
7. Messungen während Fahrten am Testgelände mit reduzierter Anzahl von Messaufnehmern (montiert am Fahrzeug oder der Kleidung des/der Fahrenden)[20]; Folgende Fahrzeugzustände werden betrachtet: konstante Geschwindigkeiten (30, 50, 100 km/h oder v_{max}), zwei Beschleunigungsmanöver („mäßig“ und „maximal“) vom Stillstand bis 100 km/h (oder v_{max}), zwei Bremsmanöver („mäßig“ und „maximal“) von 100 km/h (oder v_{max}) bis zum Stillstand. Zusätzlich erfolgen Messungen im Stillstand bei Aktivierung unterschiedlicher anderer Verbraucher, z. B. Beleuchtung.

[19] Sollte das betrachtete Fahrzeug bei 10 % Steigung die Geschwindigkeiten 100 km/h bzw. v_{max} nicht mehr erreichen können entfallen die Messungen bei 10 % Steigung mit 100 km/h bzw. v_{max}.

[20] Falls sich diese Messungen aus Gründen der Sicherheit und/oder Praktikabilität nicht mit Komponenten des MF EASY Messsystems realisieren lassen, erfolgen die Messungen mit zumindest einem ELT400 Gerät und Aufzeichnung der Echtzeit-Analogausgänge mittels tragbarem Mehrkanal-Oszilloskop (gesteuert von Laptop). Diese Komponenten können jedenfalls ohne Probleme in einem Rucksack untergebracht werden.

9 Magnetfeldmessungen in zweispurigen Fahrzeugen

9.1 Messmethoden

Alle Messungen erfolgten mit dem Mehrkanal-Messsystem MF EASY (Seibersdorf Labor GmbH), das Zeitbereichsmessungen der magnetischen Flussdichte mit zehn simultanen isotropen Magnetfeld-Messkanälen ermöglicht (Abbildung 9.1, weitere Details, siehe auch Kapitel 3.4.3). 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 cm^2 Sondenquerschnitt (Spulen-Messaufnehmer) durchgeführt. Durch die isozentrische Kombination von Hall- und Spulensensoren bietet das MF EASY grundsätzlich einen Messfrequenzbereich von 0 Hz bis 400 kHz. Alle verwendeten Messaufnehmer waren kalibriert und wurden während der Messungen regelmäßigen Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Die Erfahrung während der Messungen zeigte jedoch, dass Frequenzanteile unterhalb von 1 Hz in keinem strahlenschutztechnisch relevanten Ausmaß[21] vorhanden waren, sodass für die Auswertung ausschließlich die Messsignale der Spulensensoren herangezogen wurden. Sofern initiale Messungen mit voller Messbandbreite zuverlässig keine relevanten Spektralanteile im oberen Frequenzbereich zeigten, wurde die Messbandbreite entsprechend eingeschränkt, um die Messempfindlichkeit zu erhöhen (Reduzierung des Eigenrauschens). Wurden während der Messungen relevante transiente Vorgänge identifiziert, wurde mittels Spektralanalyse verifiziert, ob die verwendete Messbandbreite ausreicht, um den transienten Vorgang vollständig zu erfassen. War dies nicht der Fall, wurden die jeweils betroffenen Messungen mit erhöhter Messbandbreite wiederholt. Ergänzend zu den Detailmessungen mit dem Messsystem MF EASY erfolgten im Fahrzeuginneren auch Überblicks-Magnetfeldmessungen im Frequenzbereich 9 kHz – 10 MHz mittels des Messgerätes SRM3006 mit zugehöriger isotroper Magnetfeldsonde (Narda STS). Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass keine relevanten Immissionsanteile oberhalb des Messfrequenzbereiches des MF EASY vorlagen.

[21] Unter magnetischen Feldern in „strahlenschutztechnisch relevantem Ausmaß“ im Frequenzbereich unterhalb von 1 Hz wurden an dieser Stelle räumliche Maximalwerte von zumindest einigen zehn Mikrotesla verstanden. Die Exposition gegenüber geringeren magnetischen Flussdichten mit ähnlichen zeitlichen Änderungsraten ist in der Praxis aufgrund von lokalen Verzerrungen des geomagnetischen Feldes unvermeidlich. Beispielsweise sind bereits beim Einsteigen in ein Fahrzeug mit Stahlkarosserie aufgrund der Bewegung in dem durch die Stahlkarosserie lokal stark verzerrten Erdmagnetfeld lokal ähnliche oder sogar größere dB/dt Werte im Frequenzbereich 0 - 1 Hz zu erwarten als dies durch die elektrischen Komponenten des Fahrzeuges oder die Reifenmagnetisierung in diesem Frequenzbereich verursacht wird.



Abbildung 9.1: Verwendetes Magnetfeld-Messsystem MF EASY

In den nachfolgenden Kapiteln 9.1.1 – 9.1.3 ist der Ablauf der Messungen am Rollenprüfstand, am Testgelände und im Realverkehr zusammengefasst.

9.1.1 Messungen am Rollenprüfstand

1. Vorbereiten und Montage des Fahrzeugs am Rollenprüfstand (Horiba Vulcan II) im ADAC Technik Zentrum in Landsberg am Lech sowie Einspielung der relevanten Fahrzeugdaten in die Software des Rollenprüfstandes;
2. Vormessungen mit Messsonden nahe den Rollen und Fahrzeugrädern (im Fahrzeuginneren und außen), um ggf. vorhandene Störfelder durch Rollen und Räder zu ermitteln (Abbildung 9.2);
3. Maximumsuche im Fahrzeuginneren, zur Identifikation der Sitzplätze mit den höchsten Immissionswerten (siehe Kapitel 7.1.2);
4. Systematische Messungen am Fahrerplatz und an zwei weiteren ausgewählten Sitzplätzen (mit den höchsten Immissionswerten) bei unterschiedlichen Lastmomenten und Fahrzeugzuständen (Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigung, Bremsen; siehe Kapitel 8.1; zehn Messaufnehmer verteilt über den Körperbereich, fixiert mittels Hartschaum-Dummy (Abbildung 9.3, Abbildung 9.4); für die Messungen am Fahrerplatz erfolgte die Bedienung von Brems- und Gaspedal vom Beifahrerplatz aus. Der Messaufnehmer Nr. 2 (rechter Fuß) wurde dazu so nahe wie möglich am Gaspedal fixiert.
5. Messungen während eines WLTC (Worldwide harmonized Light duty vehicle Test Cycle) am Rollenprüfstand mit Hartschaum-Dummy (inkl. Messaufnehmer) am Sitzplatz mit den lokal höchsten Immissionen aus den vorangegangenen systematischen Messungen.



Abbildung 9.2: Anordnung der Messaufnehmer bei den Vormessungen zur Ermittlung möglicher Störeinflüsse von Rollen und Rädern. Messaufnehmer wurden außerhalb des Fahrzeugs in unmittelbarer Nähe aller vier Räder bzw. über den Rollen des Prüfstandes sowie im Inneren des Fahrzeugs positioniert.

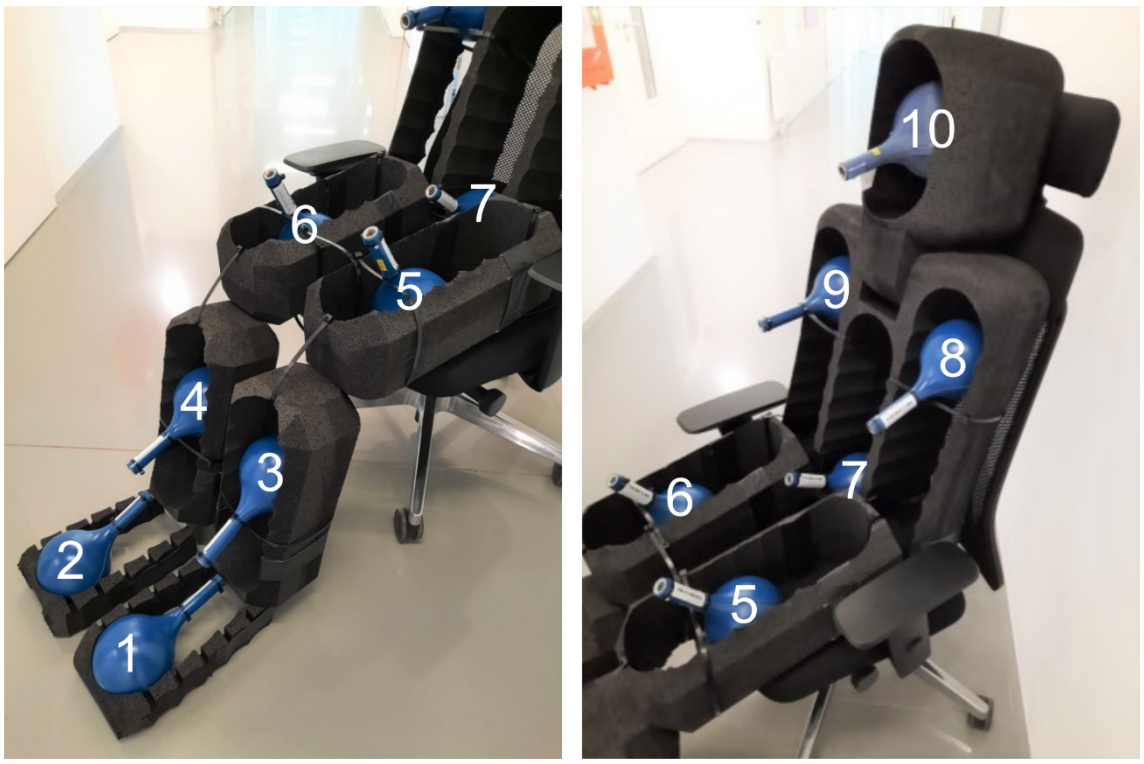


Abbildung 9.3: Hartschaum-Dummy zur Fixierung der Messaufnehmer (Messaufnehmer aus Gründen der Übersichtlichkeit ohne Kabel dargestellt).



Abbildung 9.4: Hartschaum-Dummy mit Messaufnehmern auf der Rückbank eines Fahrzeugs.

9.1.2 Messungen am Testgelände

1. Vorbereitung des Fahrzeugs (Installation von Kameras, Beschleunigungssensoren und GPS-Tracker, Installation des MF EASY inklusive 12 V Spannungsversorgung im Kofferraum des Fahrzeugs).
2. Magnetfeldmessungen während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit, während der Beschleunigung und während des Bremsens, mit Hartschaum-Dummy (inkl. Messaufnehmer) an jenen Sitzplätzen, die auch am Rollenprüfstand untersucht wurden; für die Messungen am Fahrerplatz wurden die Messaufnehmer so weit wie möglich an jene Position gebracht (mit Klebeband am Testfahrer befestigt), die den Messaufnehmerpositionen im Hartschaum-Dummy entsprechen (Abbildung 9.5).
3. Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, die nicht unmittelbar vom Antriebssystem verursacht werden (z. B. Ein- und Ausschalten des Fahrzeugs, Lüftung, Sitzheizung, Beleuchtung, Türverriegelung)[22].

[22] In einigen Fällen erfolgten diese Messungen zumindest teilweise bereits im Zuge der Messungen am Rollenprüfstand.



Abbildung 9.5: Positionierung der Messaufnehmer am Fahrerplatz beim Fahren auf der Teststrecke. Auf die Messpunkte im Brustbereich wurde verzichtet.

9.1.3 Messungen im Realverkehr

1. Vorbereitung des Fahrzeugs (Installation von Kameras, Beschleunigungssensoren und GPS-Tracker, Installation des MF EASY inklusive 12 V Spannungsversorgung im Kofferraum des Fahrzeugs).
2. Magnetfeldmessungen während der ca. 88- bis 100-minütigen Fahrt (abhängig vom aktuellen Verkehrsaufkommen) im Realverkehr entlang einer festgelegten Route (Abbildung 9.6) mit Hartschaum-Dummy (inkl. Messaufnehmer) am Sitzplatz mit den lokal höchsten Immissionen aus den systematischen Messungen am Rollenprüfstand; in jenen Fällen, in denen die höchsten Immissionen aus den systematischen Messungen am Rollenprüfstand am Fahrerplatz festgestellt wurden, erfolgten die Messungen während der Realfahrt am Sitzplatz mit den zweithöchsten Immissionen aus den systematischen Messungen am Rollenprüfstand.



Abbildung 9.6: Testroute im Realverkehr (rote Linie).

Insgesamt wurden im Rahmen der Messungen an den insgesamt 14 untersuchten zweispurigen Fahrzeugen mehr als 975.000 Einzelmessungen[23] durchgeführt und ausgewertet.

9.2 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.

9.2.1 Eingeschränkte Kontrolle über Hintergrundimmissionen in den Fahrzeugen (u_1)

Vorauszuschicken ist, dass eine der Voraussetzungen für die Durchführung dieses Projektes war, alle Messungen unabhängig von Fahrzeugherstellern durchzuführen. Dies bedingte eine ausschließlich „manuelle“ Bedienung der Fahrzeuge auf „Benutzer-Niveau“, d.h. ohne jegliche

[23] Unter „Einzelmessung“ ist dabei eine Aufzeichnung des isotropen Magnetfeld-Zeitverlaufs (d.h. 3 Kanäle) über ein Zeitintervall (Länge zwischen 0.5 und 5 Sekunden) an einer Position zu verstehen.

automatische Steuerung der Fahrzeuge und ohne spezielle Kontrollmöglichkeiten über die unterschiedlichen elektrischen Systemkomponenten der Fahrzeuge während der Messungen. Für moderne Fahrzeuge mit einer Vielzahl von unterschiedlichen elektrischen Komponenten und Systemen bedeutet dies eine relevante Einschränkung im Hinblick auf die anzustrebende Minimierung der Gesamtunsicherheit, weil die meisten dieser nicht unmittelbar mit dem elektrischen Antriebssystem in Zusammenhang stehenden Systeme (z. B. Lüfter für Kühlung von Batterie, Motor und Inverter, induktive Schlüsselortung etc.) in manchen Fahrzeugen deutlich messbare Immissionsbeiträge verursachen, die, je nach Fahrzeug stark unterschiedlich, in den Fußbereichen von Fahrer und Beifahrer bereits Immissionsbeiträge bis in den unteren einstelligen Prozentbereich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 verursachen können. Nicht alle diese Systeme unterliegen vollständig der Kontrolle des Fahrzeugnutzers, sondern werden häufig vom Fahrzeug automatisch kontrolliert (z.B. Lüfter zur Kühlung von Systemkomponenten). Das Bemühen die Immissionsbeiträge durch das elektrische Antriebssystem von anderen Immissionsbeiträgen bestmöglich zu isolieren, stößt unter den gegebenen Voraussetzungen daher an harte Grenzen. Dies führt vor allem in Fahrzeugen, deren elektrische Antriebssysteme relativ geringe Immissionsbeiträge verursachen, zu großen Unsicherheiten der Messergebnisse, wobei dieser Zusammenhang in quantitativer Form nur empirisch ermittelt werden kann. Die im Rahmen der Testmessungen (Kapitel 7) und der systematischen Messungen (Kapitel 9) erhobenen umfangreichen Messdaten lassen eine stark vereinfachte aber konservative Beschreibung dieses Zusammenhangs, wie in Abbildung 9.7 dargestellt, sinnvoll erscheinen. Bei sehr kleinen Messwerten bzw. Expositionsindizes sind demnach Unsicherheiten von bis zu einem Faktor 10 anzusetzen, die umgekehrt proportional mit der Bewertungsgröße abnehmen, wobei näherungsweise von rechteckförmiger Verteilung dieses Unsicherheitsbeitrages ausgegangen wird. Da dieser Unsicherheitsbeitrag mit hoher Wahrscheinlichkeit in Richtung einer Überschätzung der Immissionen wirkt, wird er bei der Berechnung der Gesamtunsicherheit (9.2.9) nur mit positivem Vorzeichen berücksichtigt.

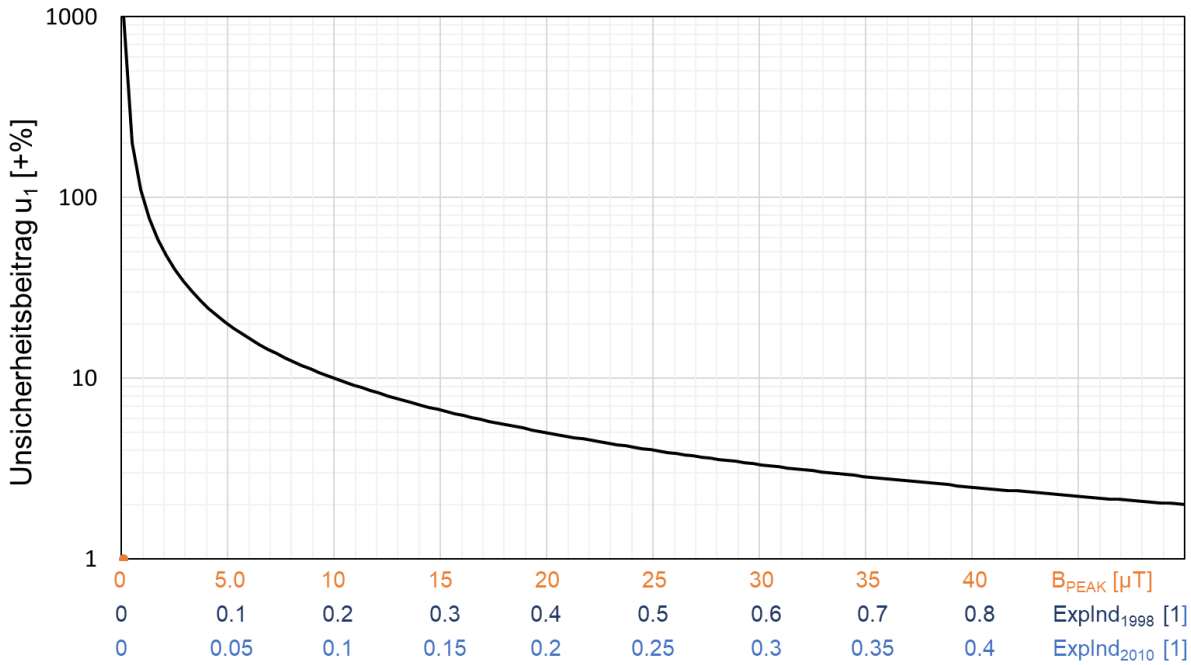


Abbildung 9.7: Vereinfachter, empirisch abgeleiteter Zusammenhang zwischen Unsicherheitsbeitrag u_1 und Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$, $ExpInd_{2010}$ bzw. Messwert B_{PEAK} (näherungsweise identisch für alle drei Bewertungsgrößen angenommen).

9.2.2 Reproduzierbarkeit der Fahrzustände (u_2)

Aus den oben genannten Gründen mussten für die durchgeführten Messungen auch die Fahrzustände „manuell“, d.h. ohne automatische Steuerung der Fahrzeuge hergestellt werden. Beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit kann erwartungsgemäß die beste Reproduzierbarkeit erreicht werden, wobei auch dafür, vor allem bei hohen Lastmomenten, entsprechendes Gefühl erforderlich ist[24]. Beim Beschleunigen und Bremsen ist dies gänzlich anders, und eine gute Reproduzierbarkeit der Bedingungen „moderat“ und „maximal“ ist entsprechend schwierig zu erreichen. Eine limitierte Reproduzierbarkeit der Bedingung „moderat“ ist mangels besserer Definition erwartbar, jedoch ergibt sich aus praktischen Gründen auch eine Limitierung der Bedingung „maximal“, da vor allem bei leistungsstarken Fahrzeugen eine Beschleunigung mit „Kick Down“ am Prüfstand aus Sicherheitsgründen und im Hinblick auf die mechanische Beanspruchung des Prüfstandes (insbesondere der Sicherheitsgestänge) nicht möglich ist. Gleiches gilt auch für das Bremsen. Aus umfangreichen systematischen Messungen lässt sich dieser Unsicherheitsbeitrag mit ca. ± 15 % eingrenzen (normalverteilt)[25].

9.2.3 Einfluss der Reifenmagnetisierung (u_3)

Das Phänomen der Reifenmagnetisierung ist bekannt und wurde bereits in Kapitel 7 diskutiert. Je nach magnetischem Zustand der Reifen bzw. Räder kann die Reifenmagnetisierung im Fahrzeuginneren nahe den Rädern (vor allem in den Fußbereichen von Fahrer und Beifahrer, aber teilweise auch im Unterleibsbereich rechts oder links auf der Rückbank) zu Flussdichteamplituden bis in den unteren zweistelligen Mikrotesla-Bereich führen. Durch die Rotation der Räder führt dies zu merkbaren magnetischen Wechselfeldern mit Grundfrequenzen zwischen ca. 3.7 Hz (30 km/h mit Reifen von 72 cm Durchmesser) und ca. 18 Hz (120 km/h mit Reifen von 60 cm Durchmesser). Da die Magnetisierung der Reifen bzw. Räder keinen Dipolcharakter hat, sondern offensichtlich entlang des Umfangs in nicht vorhersehbarer Weise variiert, sind die entstehenden magnetischen Wechselfelder zumeist stark oberwellenbehaftet mit relevanten Frequenzanteilen bis zu ca. 150 Hz. In einem Fahrzeug wurde beispielsweise auf der Rückbank noch ein Immissionsanteil im Ausmaß von ca. 3.5 % des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 festgestellt (bewertet mit der Methode der gewichteten Spitzenwerte WPM im Zeitbereich[26]). Messungen der magnetischen Flussdichte außerhalb des Fahrzeuges in ca. 15 cm Distanz zum Rad zeigten Amplituden von mehr als 50 µT. Typischerweise lag der Immissionsanteil zufolge Reifenmagnetisierung auch in den Messpositionen im Fahrzeuginneren nahe den Rädern jedoch unterhalb von 2 % des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Interessanterweise konnte festgestellt werden, dass der Anteil der Reifenmagnetisierung am Prüfstand und am Testgelände bei gleichen Fahrmanövern nicht identisch ist (ohne erkennbare Tendenz). Grund dafür dürfte entweder der Einfluss der

---

[24] Aus diesem Grund wurden bei den Messungen am Prüfstand die Fahrzeuge von erfahrenen ADAC-Mitarbeitern gesteuert.

[25] Während der Messungen mit dem Dummy am Fahrerplatz wurden Brems- und Gaspedal vom Beifahrersitz aus mittels eines Holzstabes betätigt, was die Reproduzierbarkeit bei Brems- und Beschleunigungsmanövern erschwerte. In diesem Fall erfolgten mehrere Wiederholungen der Versuchsbedingungen, solange bis zumindest zwei Messergebnisse innerhalb von ±15% lagen (bezüglich B_{PEAK} und ExpInd).

[26] „Methode der gewichteten Spitzenwerte“ ist die gebräuchliche deutsche Übersetzung des Bewertungsschemas, das unter dem Namen „Weighted Peak Method“ (WPM) bekannt ist. Die Verwendung des Begriffs „Spitzenwert“ in Zusammenhang mit der WPM ist streng zu unterscheiden vom Begriff des Spitzenwertes der magnetischen Flussdichte B_{PEAK}.

Stahlrollen des Prüfstandes auf das resultierende magnetische Moment der Räder sein oder eine Veränderung der Magnetisierung durch die Prüfstandrollen. Dieser Unsicherheitsbeitrag ist im Hinblick auf seine Auswirkung auf die Gesamtunsicherheit sehr ähnlicher Natur wie Unsicherheitsbeitrag u_1, was es sinnvoll erscheinen lässt, auch für den Unsicherheitsbeitrag zufolge der Reifenmagnetisierung (u_3) die in Abbildung 9.7 dargestellten Zusammenhänge anzunehmen (Rechteckverteilung).

9.2.4 Aussagekraft der Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte

Bei den in den nächsten Kapiteln zusammengefassten Ergebnissen werden auch die gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte B_{PEAK} präsentiert. Im Hinblick auf deren Aussagkraft, Reproduzierbarkeit und Interpretation sind folgende Punkte anzumerken:

- In Messpositionen nahe den Rädern während des Fahrens teilweise messbare (und vergleichsweise hohen) B_{PEAK} Werte sind häufig von der Reifenmagnetisierung bestimmt, liefern aufgrund der relativ niedrigen Frequenzen zumeist aber keinen bedeutsamen Beitrag zur bewerteten Gesamtimmission (siehe Kapitel 9.2.3).
- Während Lastwechsel, wie insbesondere zu Beginn von Bremsvorgängen (aber auch bei nicht gleichmäßigem Fahren, z.B. vom Gaspedal gehen) wurden typischerweise überlagerte niederfrequente Anteile mit hoher Amplitude gemessen, offensichtlich verursacht durch die Lastwechsel-assoziierten Schwankungen des Antriebsstromes (Abbildung 9.8). Diese überlagerten niederfrequenten Anteile sind auch mit der Nähe zu den verursachenden Quellen assoziiert, haben jedoch wegen der relativ geringen Frequenzen typischerweise nur geringen Einfluss auf die resultierende bewertete Gesamtimmission (Expositionsindex, relativ zum anzuwendenden Referenzwert).
- Bei Fahrten im Realverkehr treten beim Durchfahren von Inhomogenitäten des geomagnetischen Feldes große zeitliche Schwankungen der gemessenen magnetischen Flussdichte auf, die, je nach Fahrgeschwindigkeit und Gradient des geomagnetischen Feldes, Frequenzanteile bis deutlich oberhalb von 10 Hz besitzen können (Abbildung 9.9). Ursache für derartige Verzerrungen des geomagnetischen Feldes sind vor allem Stahlbetonbauwerke (z.B. Autobahnbrücken). Es ist dabei zu beachten, dass diese Immissionsanteile in keiner Weise mit den Positionen der Magnetfeldquellen des Fahrzeuges assoziiert sind und daher, vor allem in Positionen mit vom Fahrzeug erzeugten geringeren Immissionen, einen merkbaren Anteil an der bewerteten Gesamtimmission haben können. Eine Amplitude der magnetischen Flussdichte von mehreren 10 µT bei ca. 10 Hz (Abbildung 9.9) würde schon einem Immissionsbeitrag im einstelligen Prozentbereich des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 entsprechen. Im Rahmen der Fahrten im Realverkehr liefert dieses Phänomen einen Unsicherheitsbeitrag u_4, der näherungsweise gemäß Abbildung 9.10 quantifiziert werden kann und für den näherungsweise eine Rechteckverteilung angenommen wird. Für die Messungen am Rollenprüfstand wird dieser Unsicherheitsbeitrag nicht berücksichtigt.

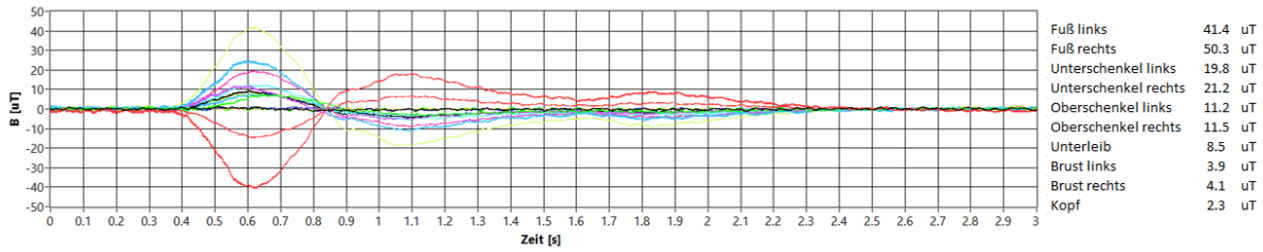


Abbildung 9.8: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte während eines Lastwechsels (Bremsen), gemessen auf der Rückbank im BMW i3. Es sind die Zeitverläufe aller 10 x 3 Messkanäle dargestellt. Rechts neben der Abbildung sind die maximalen Spitzenwerte (Beträge der Vektoren) der magnetischen Flussdichte angeführt.

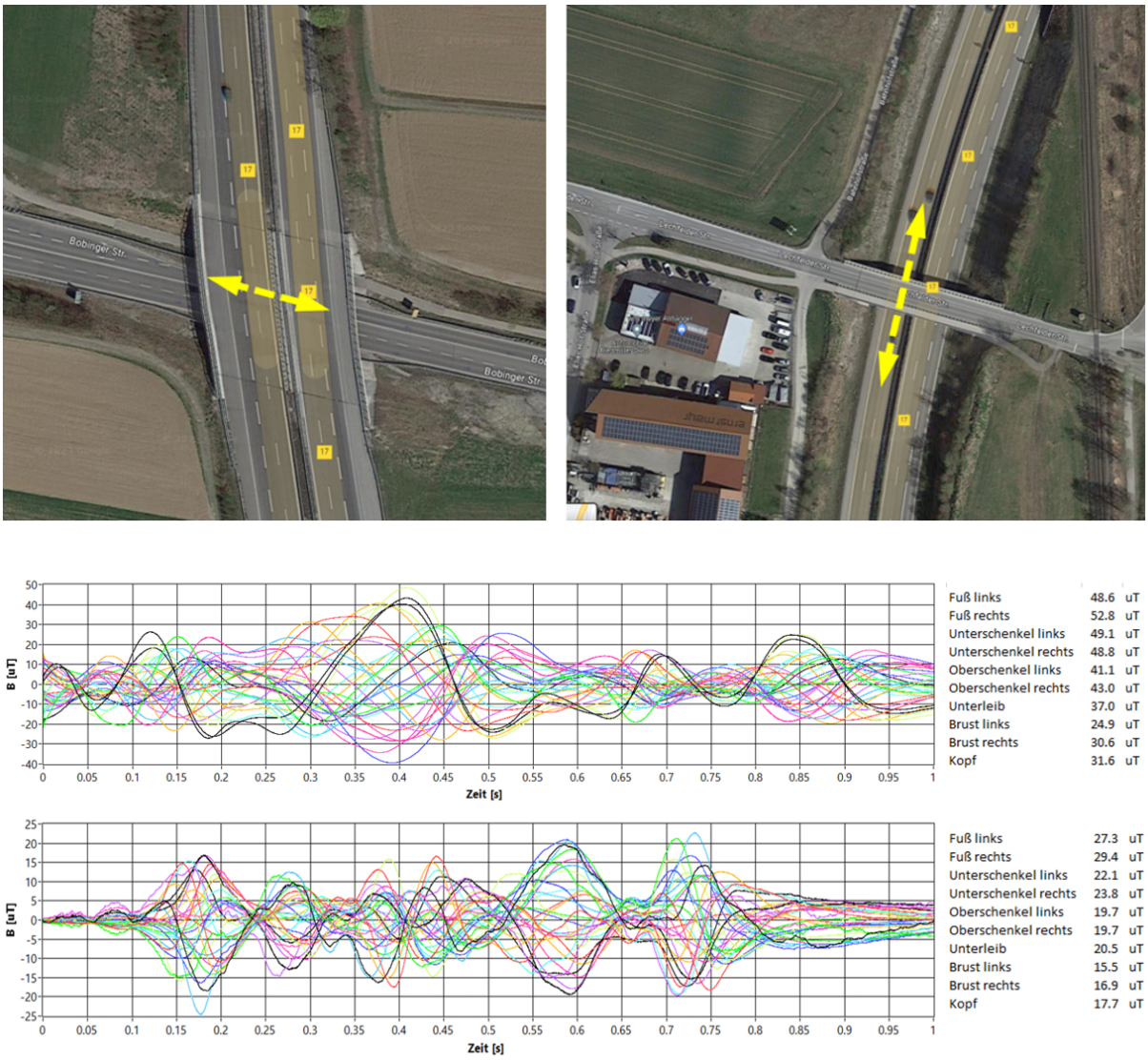


Abbildung 9.9: Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte bei der Durchfahrt unter Straßenbrücken (oben). Mittleres Teilbild: Durchfahrt unter Autobahnbrücke (oben links) mit Renault ZOE; unteres Teilbild: Durchfahrt unter einfacher Straßenbrücke (oben rechts) mit VW ID.3. In den Zeitdiagrammen sind jeweils die Zeitverläufe aller 10 x 3 Messkanäle dargestellt. Rechts neben den Abbildungen sind die maximalen Spitzenwerte (Beträge der Vektoren) der magnetischen Flussdichte angeführt. Die gelben Pfeile in den oberen Bildern stellen die während der gezeigten Zeitintervalle durchfahrene Strecke dar.

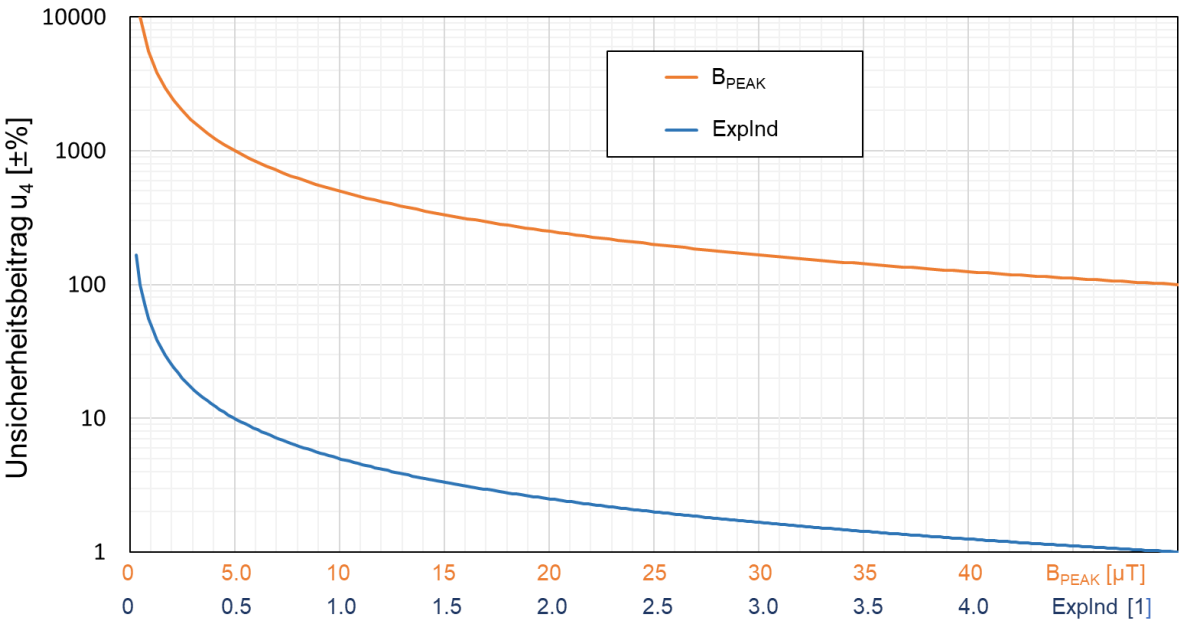


Abbildung 9.10: Vereinfachter, empirisch abgeleiteter Zusammenhang zwischen Unsicherheitsbeitrag u4 und Expositionsindizes ExpInd bzw. Messwert B_{PEAK}. Aufgrund der Tatsache, dass die Störgröße auf einen Frequenzbereich beschränkt ist, in dem die Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 identisch sind, ist es in diesem Fall nicht erforderlich zwischen $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zu unterscheiden.

9.2.5 Positionierungsunsicherheit der Messsonden (u_5)

Bei allen Messungen außer denen am Fahrerplatz auf dem Testgelände wurden die Messsonden durch das oben beschriebene Hartschaum-Dummy in den Fahrzeugen fixiert. Dies ermöglichte weitgehend reproduzierbare Messpositionen entlang des Körpers einer durchschnittlich großen erwachsenen Person. 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 (normalverteilten) Unsicherheitsbeitrag zufolge der Positionierung der Messonden von ± 30 % im Fuß- und Unterschenkelbereich, ± 10 % im Oberschenkel- und Unterleibsbereich und ± 5 % in höheren Körperregionen.[27]

Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der Messergebnisse zwischen Messungen am Prüfstand und auf dem Testgelände am Fahrerplatz ist anzumerken, dass aus praktischen Gründen die Positionen der Messsonden leicht unterschiedlich sein mussten (vgl. Kapitel 9.1.1 und 9.1.2).

9.2.6 Kalibrierung und Isotropie der Messsonden (u_{6a} und u_{6b})

Die Kalibrierunsicherheit der verwendeten Messsonden im Frequenzbereich bis 400 kHz liegt (normalverteilt) bei u_{6a} = ± 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

[27] Für die Messungen am Testgelände wurden am Fahrerplatz eine Auswahl der Messonden direkt am Körper des Fahrers fixiert. Es kann daher von ähnlichen Unsicherheiten, wie im Fall der Fixierung durch das Dummy ausgegangen werden. Einzige Ausnahme stellt die Position „Fuß rechts“ am Fahrerplatz dar, da sich diese Position durch die Betätigung des Brems bzw. Gaspedals dynamisch ändert. Demzufolge sind für diese Messposition deutlich höhere Unsicherheitsbeiträge, als die oben angegebenen anzunehmen.

Messsonden (100 cm^2 Querschnitt) können in starken Gradientenfeldern vergleichsweise große Unsicherheiten zufolge unterschiedlicher Sondenausrichtung (relativ zum Feldgradienten) auftreten. Eine Verwendung kleinerer Messsonden (z.B. mit 3 cm^2 Querschnitt) wäre zur Reduzierung des Problems zwar grundsätzlich denkbar, ist aber aufgrund der deutlich geringeren Empfindlichkeit (bei gleicher Frequenzbandbreite) nicht sinnvoll. Testmessungen zur Bestimmung der Unsicherheit zufolge unterschiedlicher Sondenausrichtung in Gradientenfeldern, wie sie in den Fahrzeugen vorgefunden wurden, führten zu Werten von u_{6b} ca. ± 15 % im Fuß- und Unterschenkelbereich, ± 5 % im Oberschenkel- und Unterleibsbereich und ± 3 % in höheren Körperregionen (Normalverteilung).

9.2.7 Hintergrund-Störfelder durch den Rollenprüfstand (u_7)

Die Hintergrund-Störfelder am Rollenprüfstand wurden bereits in Kapitel 7.1 diskutiert, so weit wie möglich durch wiederholte Messungen im Zuge der Messkampagnen kontrolliert und lagen im Frequenzbereich 5 Hz – 400 kHz in den relevanten Messpositionen bei weniger als 0.15 µT (B_{PEAK}) bzw. weniger als 0.4 % des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 (bewertet mit WPM im Zeitbereich). Abbildung 9.11 zeigt die zugehörigen empirisch ermittelten Unsicherheitsbeiträge als Funktion der Bewertungsgrößen, wobei näherungsweise eine Rechteckverteilung angenommen wird. Da dieser Unsicherheitsbeitrag mit hoher Wahrscheinlichkeit in Richtung einer Überschätzung der Immissionen wirkt, wird er bei der Berechnung der Gesamtunsicherheit (9.2.9) nur mit positivem Vorzeichen berücksichtigt.

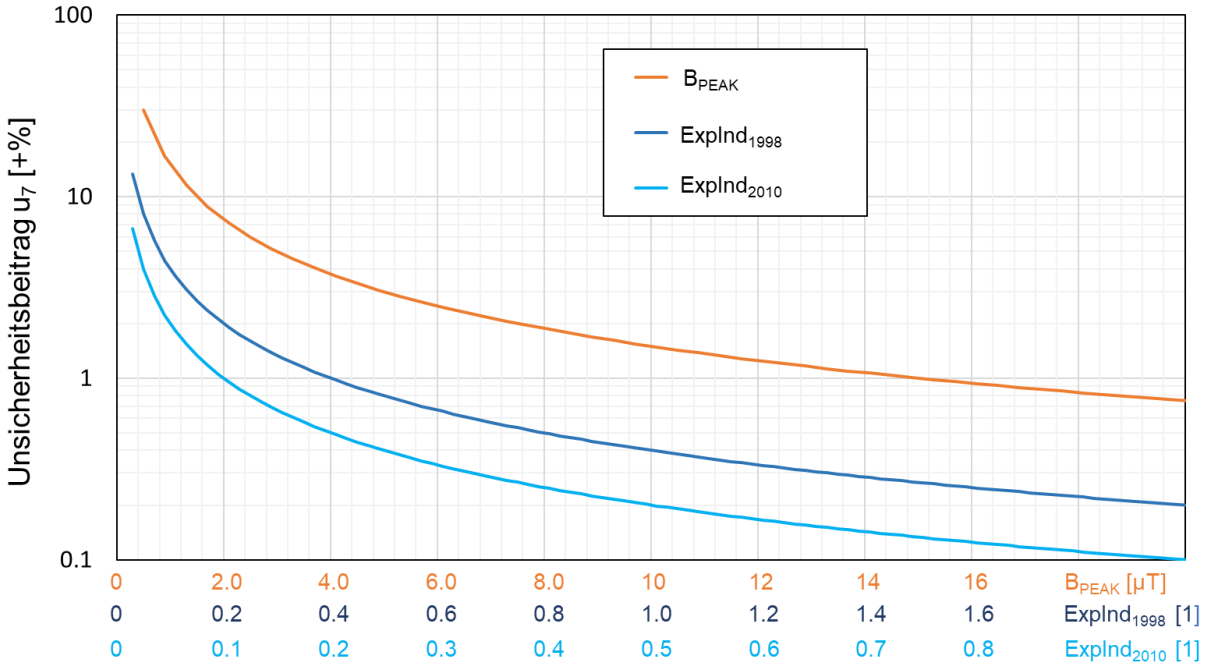


Abbildung 9.11: Vereinfachter, empirisch abgeleiteter Zusammenhang zwischen Unsicherheitsbeitrag u_7 und Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$, $ExpInd_{2010}$ bzw. Messwert B_{PEAK}.

9.2.8 Bewegungsartefakte (u_8)

Die Unsicherheit zufolge von Bewegungsartefakten (Stöße durch Bodenwellen, Kraftwirkung durch Beschleunigung und Bremsmanöver) wurde sowohl auf Basis von Laborexperimenten[28] als auch auf Basis theoretischer Abschätzungen bestimmt und ist im Wesentlichen auf die kurzfristige Verschiebung (Schwingung mit Auslenkung im Bereich < 1.5 cm) der Messsonde aus ihrer Sollposition zurückzuführen; sie kann mit ± 10 % im Fuß- und Unterschenkelbereich, ± 5 % im Oberschenkel- und Unterleibsbereich und ± 3 % in höheren Körperregionen eingegrenzt werden (normalverteilt).

9.2.9 Resultierende Gesamtunsicherheit

Aufgrund der in den vorigen Abschnitten beschriebenen Charakteristika der unterschiedlichen Unsicherheitsbeiträge ist unmittelbar einsichtig, dass die einzelnen Unsicherheitsbeiträge für die betrachteten Bewertungsgrößen „magnetische Flussdichte“ und „Expositionsindex“ nicht zwingend in gleicher Weise wirksam sind. Beispielsweise ist zu erwarten, dass sich einzelne Unsicherheitsbeiträge, zufolge der Frequenzabhängigkeit der zugrunde gelegten Referenzwerte unterschiedlich stark auf Unsicherheit der Expositionsindizes und der Spitzenwerte B_{PEAK} der magnetischen Flussdichte auswirken.

Auch ist zu beachten, dass die relative Unsicherheit durch Hintergrundstörfelder bei geringen Immissionswerten naturgemäß größer als bei hohen Immissionswerten ist und damit in wesentlichem Maße von der jeweiligen Messposition abhängt (typischerweise große relative Unsicherheit im Brust- und Kopfbereich, geringe relative Unsicherheit im Fuß- und Unterschenkelbereich). Schließlich hängen die Unsicherheitsbeiträge zufolge begrenzter Isotropie der Messaufnehmer, aufgrund von Ungenauigkeiten der Messaufnehmerpositionierung und wegen Bewegungsartefakten stark vom vorherrschenden Feldgradienten und damit ebenfalls von der Messposition ab (typischerweise höherer Unsicherheitsbeitrag im Fuß- und Unterschenkelbereich als im Brust- und Kopfbereich). Abbildung 9.12 bis Abbildung 9.14 fassen die resultierenden Gesamtunsicherheiten für den Spitzenwert der magnetischen Flussdichte und die Expositionsindizes, jeweils für die Messungen unter kontrollierten Bedingungen und die Fahrt im Realverkehr zusammen.

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.

$$u_{ges} = \sqrt{\left(\frac{u_1}{1.73}\right)^2 + \left(\frac{u_2}{1}\right)^2 + \left(\frac{u_3}{1.73}\right)^2 + \left(\frac{u_4}{1.73}\right)^2 + \left(\frac{u_5}{1}\right)^2 + \left(\frac{u_{6a}}{1}\right)^2 + \left(\frac{u_{6b}}{1}\right)^2 + \left(\frac{u_7}{1.73}\right)^2 + \left(\frac{u_8}{1}\right)^2}$$

Aufgrund der Tatsache, dass nicht alle Unsicherheitsbeiträge als symmetrisch zu Null angenommen werden können, sondern teilweise nur in Richtung einer Überschätzung wirken, werden positiver und negativer Unsicherheitsbereich getrennt berechnet und je nach Messbedingungen (Prüfstand und Teststrecke bzw. Realfahrt) werden jeweils nicht alle Unsicherheitsbeiträge bei der Ermittlung der Gesamtunsicherheit berücksichtigt (Tabelle 9.1).

[28] Dazu wurden die verwendeten Feldsonden in unterschiedlichen Gradientenfeldern (in unterschiedlichen Distanzen zu stromdurchflossenen Einzelleiter- Doppelleiter- und Spulenanordnungen) positioniert, und während Aufzeichnung des Zeitsignals durch Schläge/Stöße unterschiedlicher Auslenkung (bis ± 1.5 cm) und Kraft (Beschleunigung) bewegt.

Tabelle 9.1: Zusammensetzung der Gesamtunsicherheit bei den Messungen am Prüfstand und auf der Teststrecke einerseits und bei den Messungen während der Fahrten im Realverkehr.

Berücksichtigte Unsicherheitsbeiträge für			
Messungen Prüfstand und Teststrecke		Messungen im Realverkehr	
positiv	negativ	positiv	negativ
u_1	-	u_1	-
u_2	u_2	u_2	u_2
u_3	-	u_3	-
-	-	u_4	u_4
u_5	u_5	u_5	u_5
u_{6a}	u_{6a}	u_{6a}	u_{6a}
u_{6b}	u_{6b}	u_{6b}	u_{6b}
u_7	u_7	-	-
u_8	u_8	u_8	u_8

Die Abhängigkeiten der Gesamtunsicherheit von den Bewertungsgrößen selbst beschränkt sich auf den Bereich geringer Immissionen. Für Expositionsindizes größer als ca. 0.3 bleiben die Gesamtunsicherheiten konstant bei ± 38 % (Fuß- und Unterschenkelbereich), ± 24 % (Oberschenkel- und Unterleibsbereich) und ± 22 % (Brust- und Kopfbereich). Gleiches gilt auch für die Gesamtunsicherheit für den Spitzenwert der magnetischen Flussdichte für Werte B_{PEAK} > ca. 15 µT unter kontrollierten Bedingungen (Prüfstand und Teststrecke). Für die Fahrten im Realverkehr ergeben sich für die Gesamtunsicherheit bezüglich B_{PEAK} deutlich größere Unsicherheitswerte, bedingt durch die Dominanz des Unsicherheitsbeitrages u_4 (siehe Kapitel 9.2.4).

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

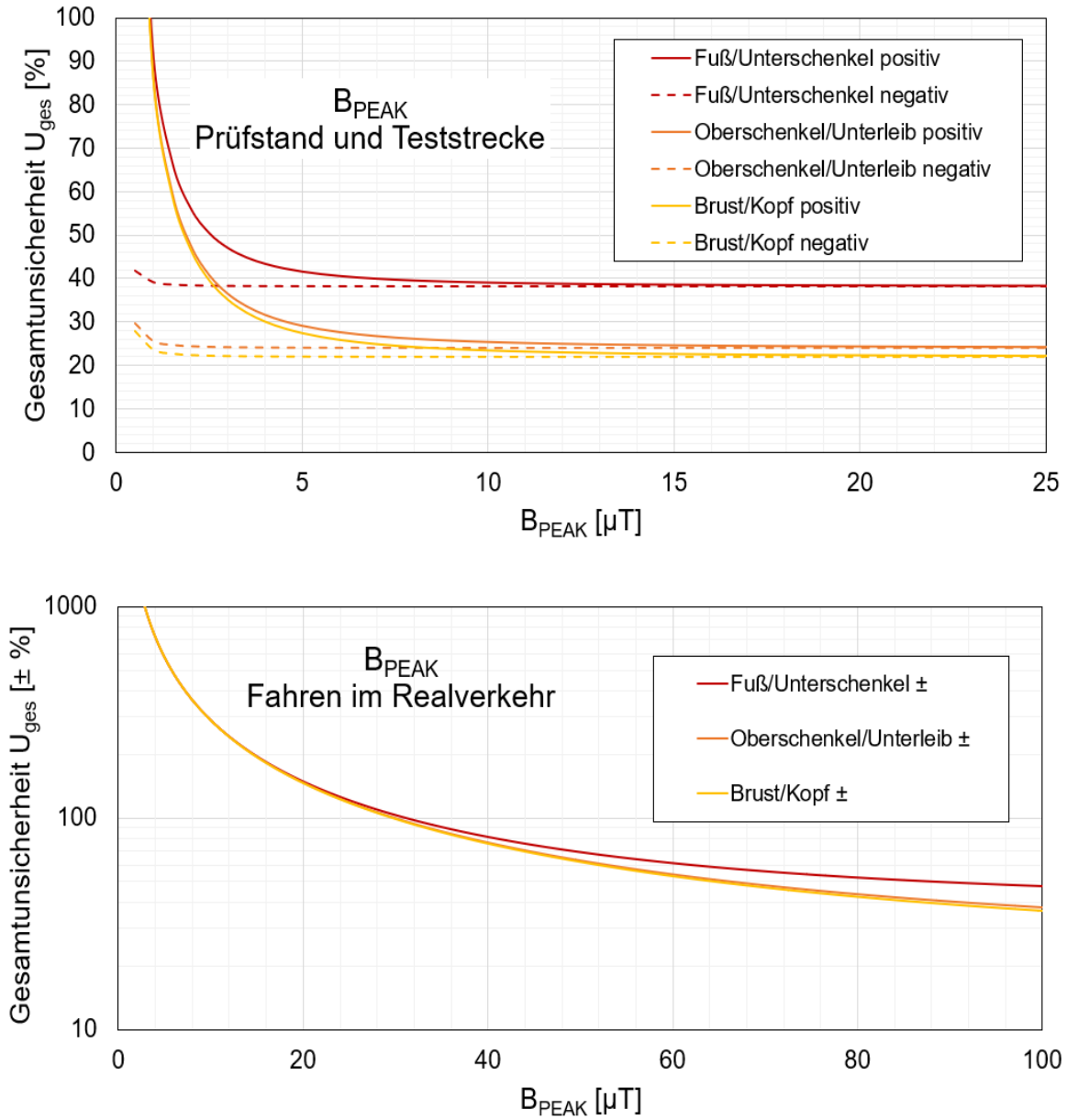


Abbildung 9.12: Resultierende Gesamtunsicherheit (k = 1) für den Spitzenwert der magnetischen Flussdichte B_{PEAK} für die Messungen unter kontrollierten Bedingungen (oben) und bei Fahrten im Realverkehr (unten). Die Graphen zeigen jeweils die untere („negativ“) und die obere („positiv“) Grenze des Unsicherheitsintervalls. Im Fall der Fahrten im Realverkehr sind diese näherungsweise über den gesamten Wertebereich identisch (d.h. das Unsicherheitsintervall ist symmetrisch zu Null) und daher nicht getrennt dargestellt („±“).

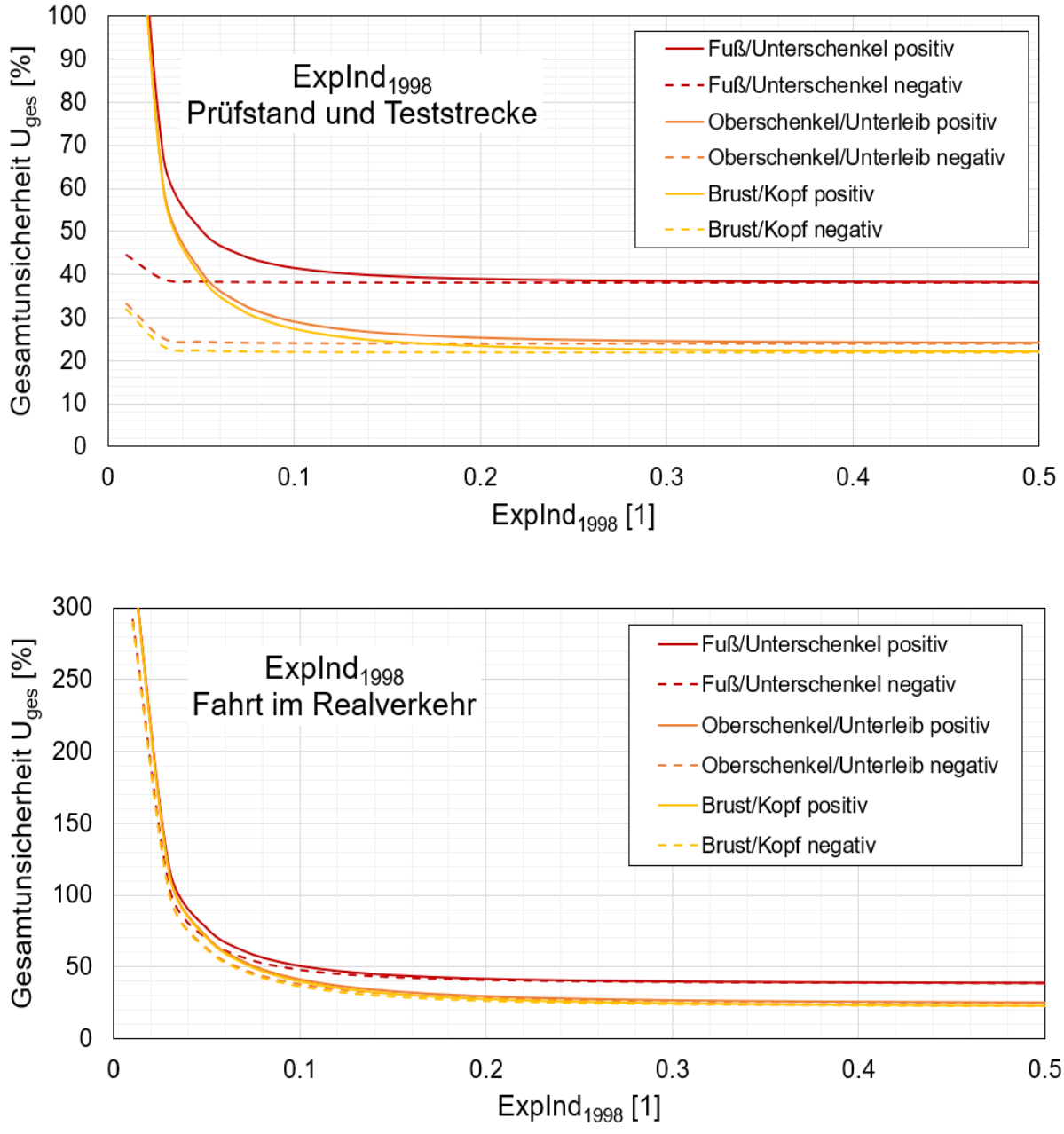


Abbildung 9.13: Resultierende Gesamtunsicherheit (k = 1) für den $ExpInd_{1998}$ für die Messungen unter kontrollierten Bedingungen (oben) und bei Fahrten im Realverkehr (unten). Die Graphen zeigen jeweils die untere („negativ“) und die obere („positiv“) Grenze des Unsicherheitsintervalls.

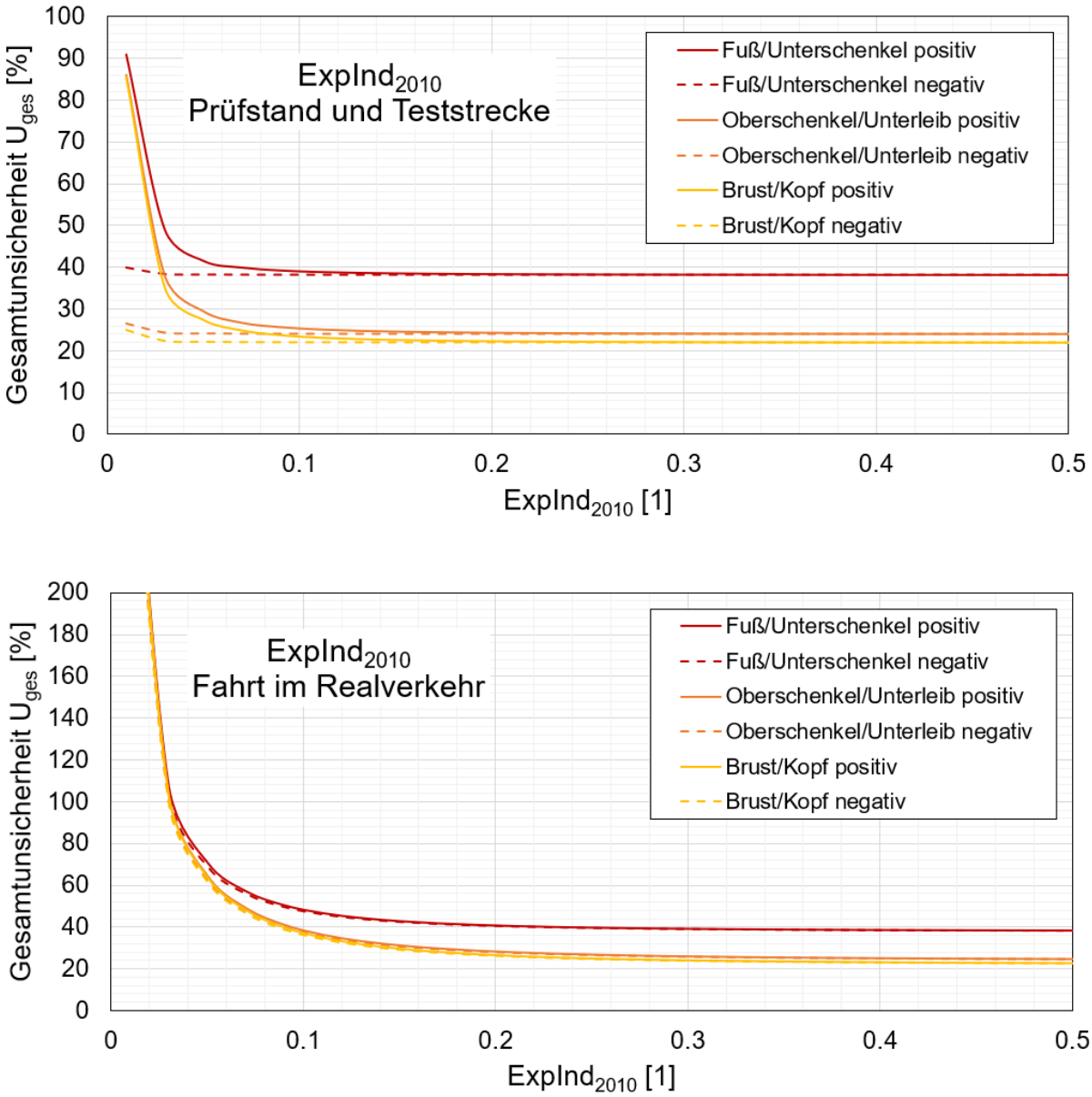


Abbildung 9.14: Resultierende Gesamtunsicherheit (k = 1) für den $ExpInd_{2010}$ für die Messungen unter kontrollierten Bedingungen (oben) und bei Fahrten im Realverkehr (unten). Die Graphen zeigen jeweils die untere („negativ“) und die obere („positiv“) Grenze des Unsicherheitsintervalls.

9.2.10 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 typischerweise herrschenden großen Feldgradienten kann daher nicht ausgeschlossen werden, dass an diesen Extrempositionen höhere Immissionswerte auftreten als im vorliegenden Bericht präsentiert.

9.3 Untersuchte Fahrzeuge

Tabelle 9.2 gibt einen Überblick über die untersuchten zweispurigen Fahrzeuge. Weitere Details zu den Fahrzeugdaten finden sich in den jeweiligen Unterkapiteln 9.4.1 bis 9.4.14 mit den Messergebnissen. Die Messungen mit dem Opel Corsa mit Verbrennungsmotor sollen einem direkten Vergleich von Magnetfeldimmissionen in einem Fahrzeug dienen, das sowohl mit Elektroantrieb als auch mit Verbrennungsmotor verfügbar ist.

Die untersuchten Fahrzeuge standen entweder beim ADAC als Testfahrzeuge zur Verfügung oder wurden von Auto-Vermietungsunternehmen ausgeliehen. Alle Messungen fanden ohne Wissen und Mitwirkung der Fahrzeughersteller statt.

Tabelle 9.2: Untersuchte zweispurige BEV und PHEV.

#	Modell	Bestand[29] am 1.1.2023	Baujahr	Karosserie	Sitz-plätze	Leistung [kW]	Antrieb	Inverterposition
1	Renault ZOE	85.622	2019	Schrägheck	5	100	Front	vorne
2	Tesla Model 3	72.244	2021	Schrägheck	5	377	Allrad	vorne und hinten
3	BMW i3 BEV	41.788	2020	Schrägheck	4	135	Heck	hinten
4	Volkswagen ID.3	60.035	2021	Schrägheck	5	150	Heck	hinten
5	Audi e-tron quattro	14.444	2021	SUV	5	300	Allrad	vorne und hinten
6	Peugeot e-208	17.958	2020	Schrägheck	5	100	Front	vorne
7	Porsche Taycan	8.729	2021	Coupe	4	300	Heck	hinten
8	Aiways U5	n. b	2021	SUV	5	150	Front	vorne
9	Hyundai Ioniq 5	19.135	2021	SUV	5	225	Heck	hinten
10	Fiat 500e	40.631	2021	Schrägheck	4	87	Front	vorne
11	Opel Corsa Electric	28.899	2021	Schrägheck	5	100	Front	vorne
12	Volkswagen Passat PHEV	35.740	2021	Kombi	5	85 (el.)	Front	vorne
13	Mercedes GLE 350 de PHEV	15.408	2021	SUV	5	100 (el.)	Allrad	vorne
14	Opel Corsa (Verbrennungsmotor)	96.610	2021	Schrägheck	5	74	Front	-

9.4 Messergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Magnetfeldmessungen für jedes betrachtete Fahrzeug separat dargestellt. Eine vergleichende Diskussion erfolgt in Kapitel 9.5.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt jeweils anhand der gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte sowie anhand der Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 ($ExpInd_{1998}$)[30] und ICNIRP 2010 ($ExpInd_{2010}$), ermittelt mittels der Methode der gewichteten Spitzenwerte im Zeitbereich (ICNIRP, 2003; Keller, 2017). Mit den beiden letztgenannten Kenngrößen ist eine strahlenschutztechnische Bewertung der Immissionen hinsichtlich der etablierten (akuten) über Änderungen des Zellmembranpotenzials vermittelten Wirkungen möglich. Es wird darauf hingewiesen, dass die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998

[29] Der „Bestand“ entspricht der Anzahl der Fahrzeuge auf Deutschlands Straßen und reflektiert damit besser den aktuellen Zustand in Deutschland als Zulassungszahlen, die auch inzwischen wieder außer Betrieb gesetzte oder exportierte Fahrzeuge beinhalten würden.

[30] Der $ExpInd_{1998}$ entspricht einer Bewertung auf Grundlage der Referenzwerte nach Ratsempfehlung 1999/519/EG, d. h. „$ExpInd_{1998}$“ kann auch als „$ExpInd_{1999/519/EG}$“ gelesen werden.

identisch sind mit den Referenzwerten der Ratsempfehlung 1999/519/EG. D.h. $ExpInd_{1998}$ ist als Synonym für $ExpInd_{1999/519/EG}$ aufzufassen.

Im Hinblick auf hypothetische (wissenschaftlich nicht gesicherte) Wirkungen von Langzeit-Magnetfeldexposition existiert naturgemäß keine etablierte Bewertungsgröße. Dennoch werden für die Messungen während des WLTC und für die Messungen während der Fahrten im Realverkehr auch über Körperdimensionen gemittelte Langzeit-Effektivwerte (Langzeit-RMS-Werte) der Immissionen angeführt[31]. Dazu wurden zunächst aus den n einzelnen, jeweils eine Sekunde langen Zeitsignal-Intervallen in allen zehn Messpositionen die n RMS-Werte der magnetischen Flussdichte $B_{RMS,i}$ ermittelt und anschließend für alle links und rechts angeordneten Messpositionen (Füße, Unterschenkel, Oberschenkel, Brust) jeweils ein (arithmetischer) Mittelwert gebildet, sodass für jedes Zeitintervall i insgesamt sechs B_{RMS}-Werte für Fuß-, Unterschenkel-, Oberschenkel-, Unterleibs-, Brust- und Kopfbereich verbleiben (Links/rechts-Raummittelwerte, Tabelle 9.3). Anschließend wurde für jede der sechs Körperregionen der Langzeit-Effektivwert berechnet und die sechs Langzeit-Effektivwerte schließlich räumlich (arithmetisch) gemittelt (Tabelle 9.3).

Tabelle 9.3: Ermittlung der über Körperdimensionen räumlich gemittelten Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte $B_{RMS,mittel}$.

	Links/rechts-Raummittelwert	**Langzeit-Effektivwert**	**räumlich gemittelter Langzeit-Effektivwert**
F_L (Fuß links)	$B_{RMS_i,F} = \frac{B_{RMS_i,F_L} + B_{RMS_i,F_R}}{2}$	$B_{RMS,F} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(B_{RMS_i,F})^2}{n}}$	$B_{RMS,mittel} = \frac{B_{RMS,F}+B_{RMS,U}+B_{RMS,O}+B_{RMS,UL}+B_{RMS,B}+B_{RMS,K}}{6}$
F_R (Fuß rechts)			
U_L (Unterschenkel links)	$B_{RMS_i,U} = \frac{B_{RMS_i,U_L} + B_{RMS_i,U_R}}{2}$	$B_{RMS,U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(B_{RMS_i,U})^2}{n}}$	
U_R (Unterschenkel rechts)			
O_L (Oberschenkel links)	$B_{RMS_i,O} = \frac{B_{RMS_i,O_L} + B_{RMS_i,O_R}}{2}$	$B_{RMS,O} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(B_{RMS_i,O})^2}{n}}$	
O_R (Oberschenkel rechts)			
UL (Unterleib)	$B_{RMS_i,UL}$	$B_{RMS,UL} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(B_{RMS_i,UL})^2}{n}}$	
B_L (Brust links)	$B_{RMS_i,B} = \frac{B_{RMS_i,B_L} + B_{RMS_i,B_R}}{2}$	$B_{RMS,B} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(B_{RMS_i,B})^2}{n}}$	
B_R (Brust rechts)			
K (Kopf)	$B_{RMS_i,K}$	$B_{RMS,K} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(B_{RMS_i,K})^2}{n}}$	

[31] Diese Raummittelwerte können als repräsentativ für Erwachsene mit durchschnittlicher Körpergröße an den jeweils untersuchten Sitzpositionen angesehen werden. Für sehr kleine Personen und insbesondere Kinder, sind die angegebenen Raummittelwerte naturgemäß nicht zwingend repräsentativ. Aufgrund der in den untersuchten Fahrzeugen gefundenen räumlichen Feldverteilungen erscheint es jedoch sehr wahrscheinlich, dass am Beifahrerplatz der Raummittelwert für kleine Personen geringer ist, als der Raummittelwert für große Personen. Für Sitzplätze auf der Rückbank trifft dies möglicherweise nicht auf alle Fahrzeuge zu (vgl. räumliche Feldverteilung am rechten Sitzplatz der Rückbank im Porsche Taycan, Abbildung 9.146).

9.4.1 Renault Zoe



Abbildung 9.15: Untersuchter Renault Zoe auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.1.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Renault Zoe EV50 135 Hp

Baujahr: 2019

Motorleistung: 100 kW

Batteriekapazität: 52 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.15 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.16).

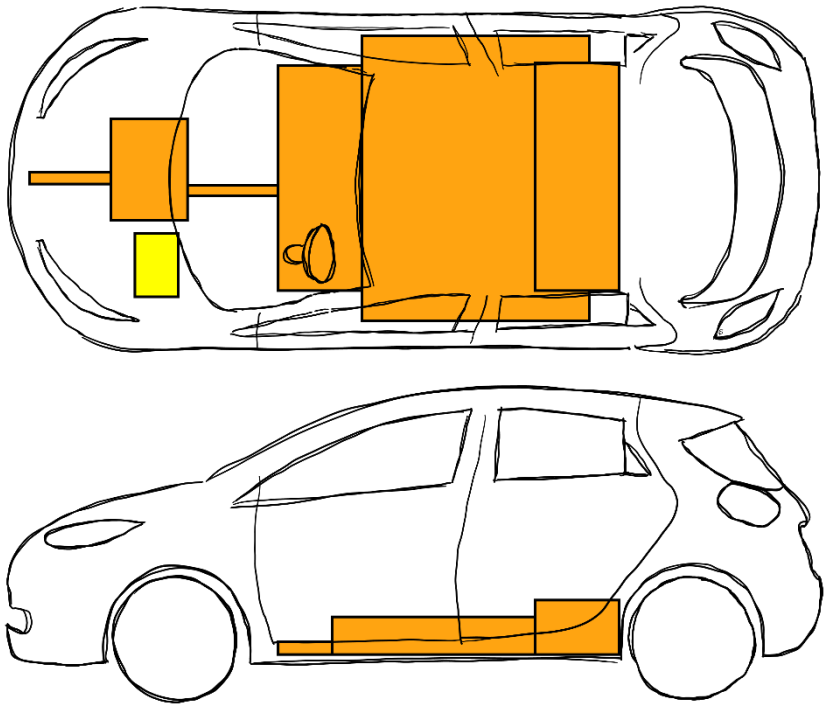


Abbildung 9.16: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Renault Zoe (modifiziert nach https://rettungskarten-service.de/wp-content/uploads/Renault-Zoe-Z.E.-Typ-AG-Baujahr-ab-2013.pdf) .

9.4.1.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.17 bis Abbildung 9.22 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (30 km/h, 50 km/h, 80 km/h, 120 km/h) bei unterschiedlichen Steigungen (0 %, 10 %) und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen (moderat, maximal). Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.17 bis Abbildung 9.19) zeigten sich an allen untersuchten Plätzen nur sehr geringe Magnetfeldimmissionen. Die größten Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$ bis ca. 0.06, bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, traten im linken Fußbereich des Fahrerplatzes auf, wobei ein Anteil von ca. 0.006 bis 0.01 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen ist. In Raumbereichen außerhalb des Fußraumes (ab Oberschenkel aufwärts) lagen die Expositionsindizes bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 durchwegs unterhalb von 0.01 (entsprechend weniger als 1 % des genannten Referenzwertes), teilweise sogar unterhalb oder nahe der Nachweisgrenze ($ExpInd_{1998}$ 0.006) des verwendeten Messsystems.

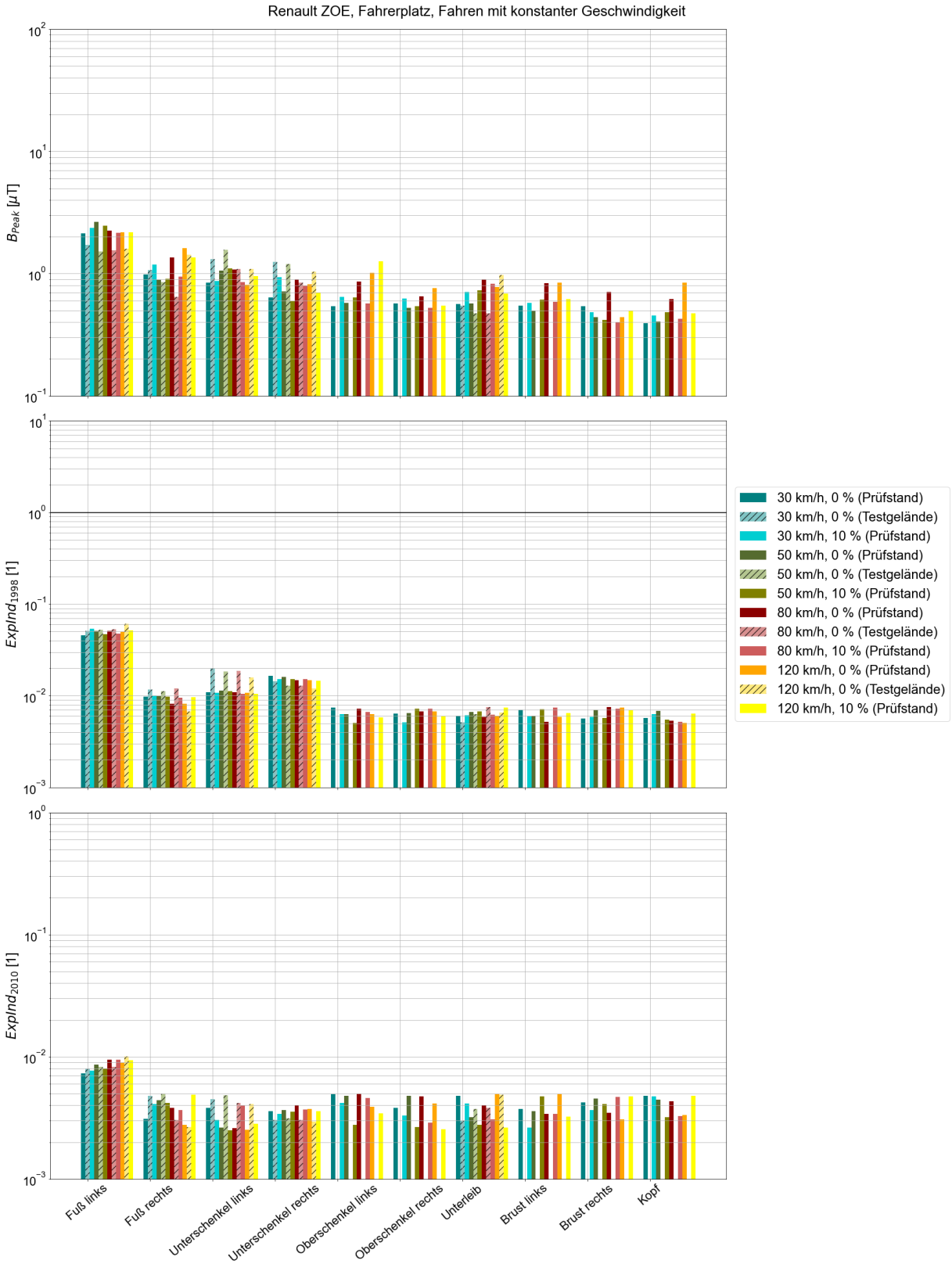


Abbildung 9.17: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

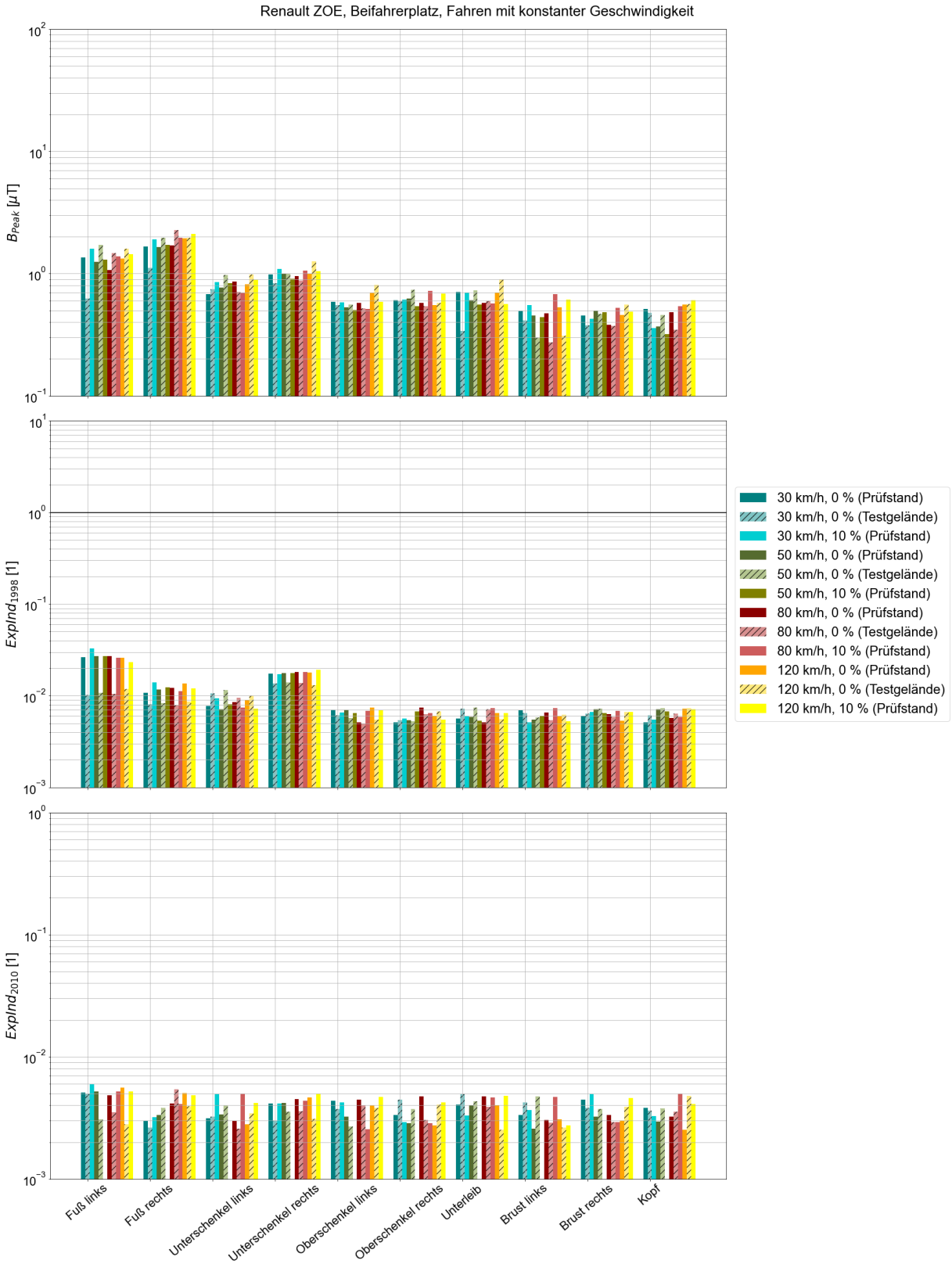


Abbildung 9.18: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

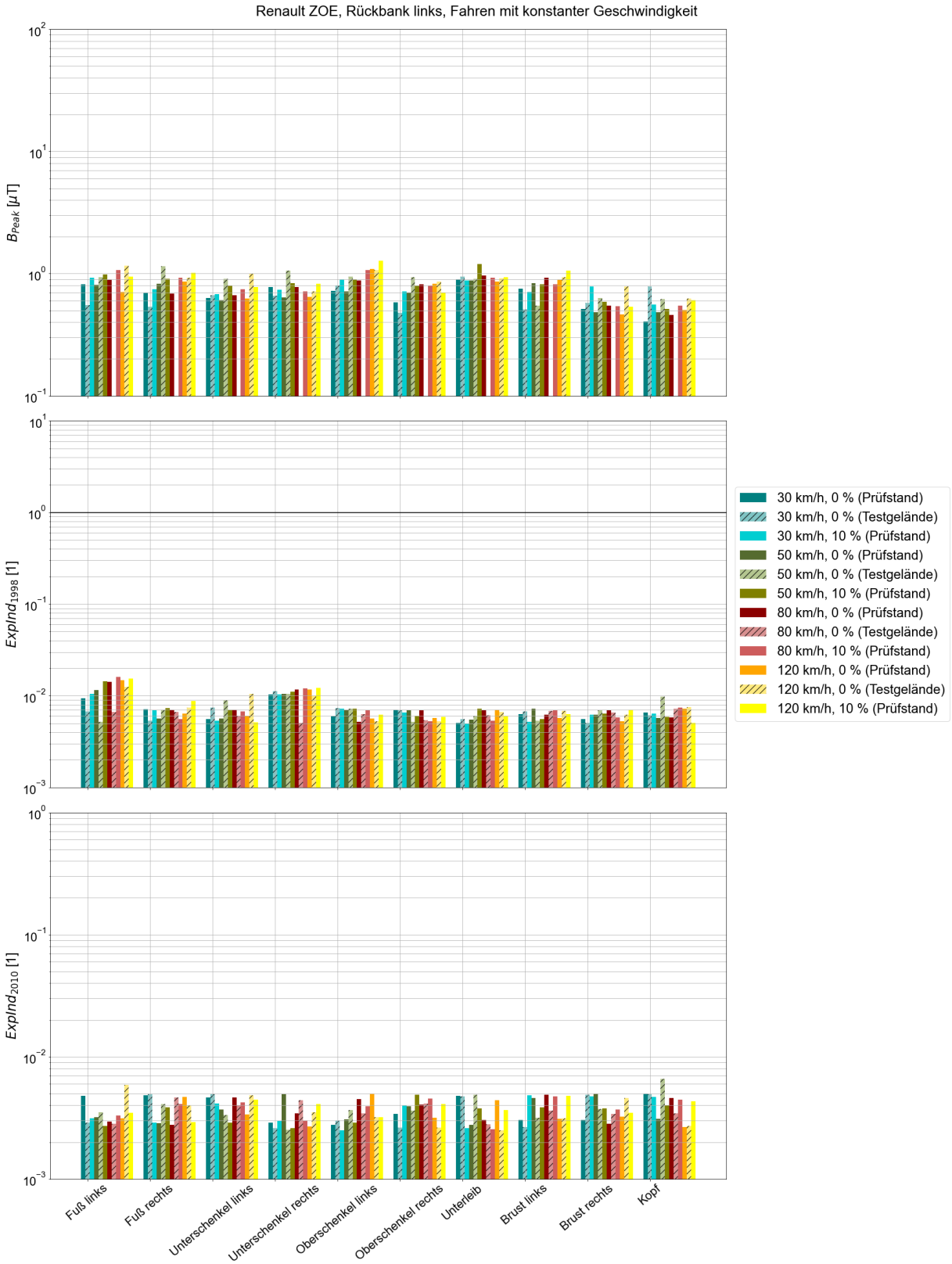


Abbildung 9.19: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

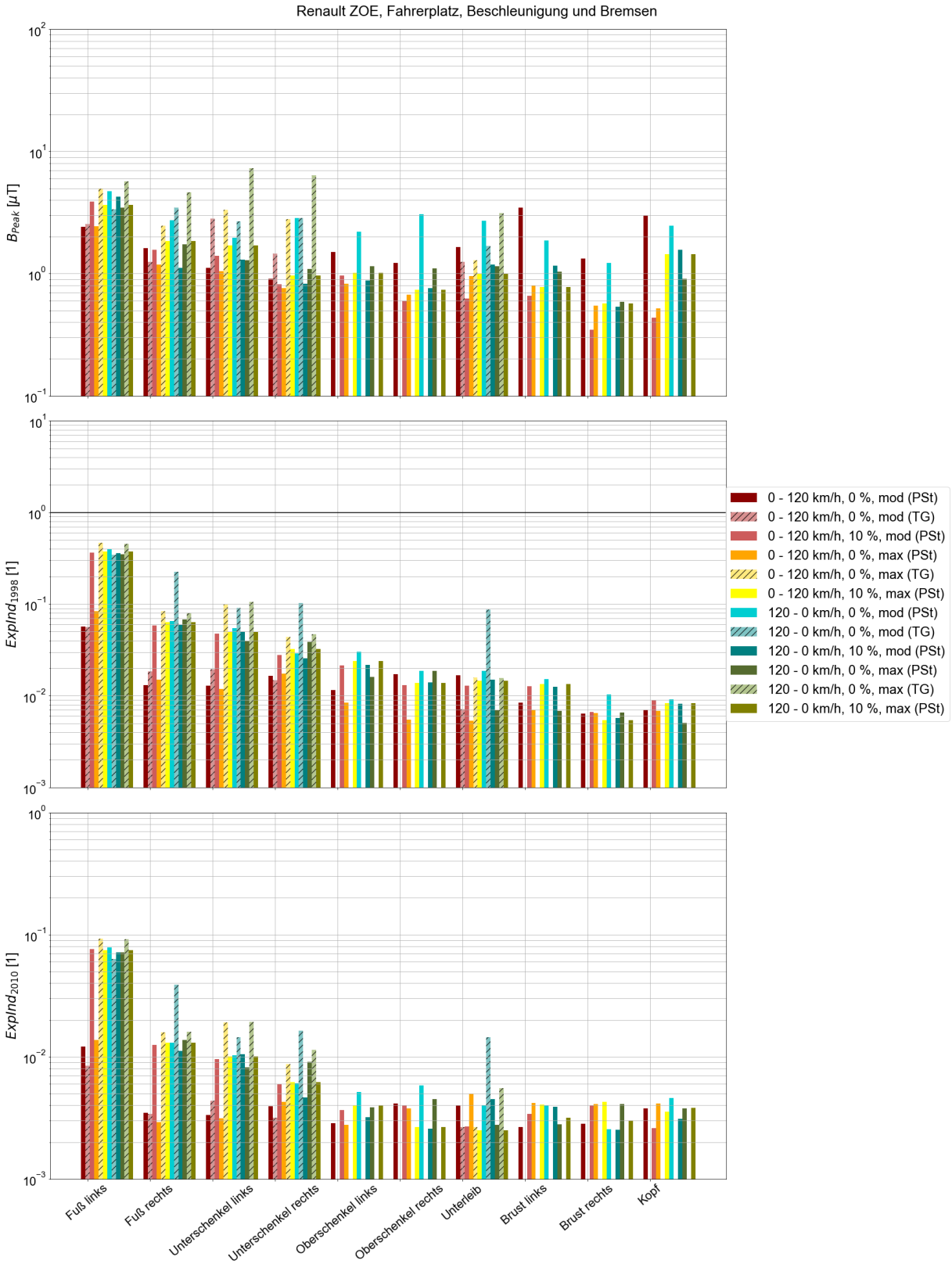


Abbildung 9.20: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

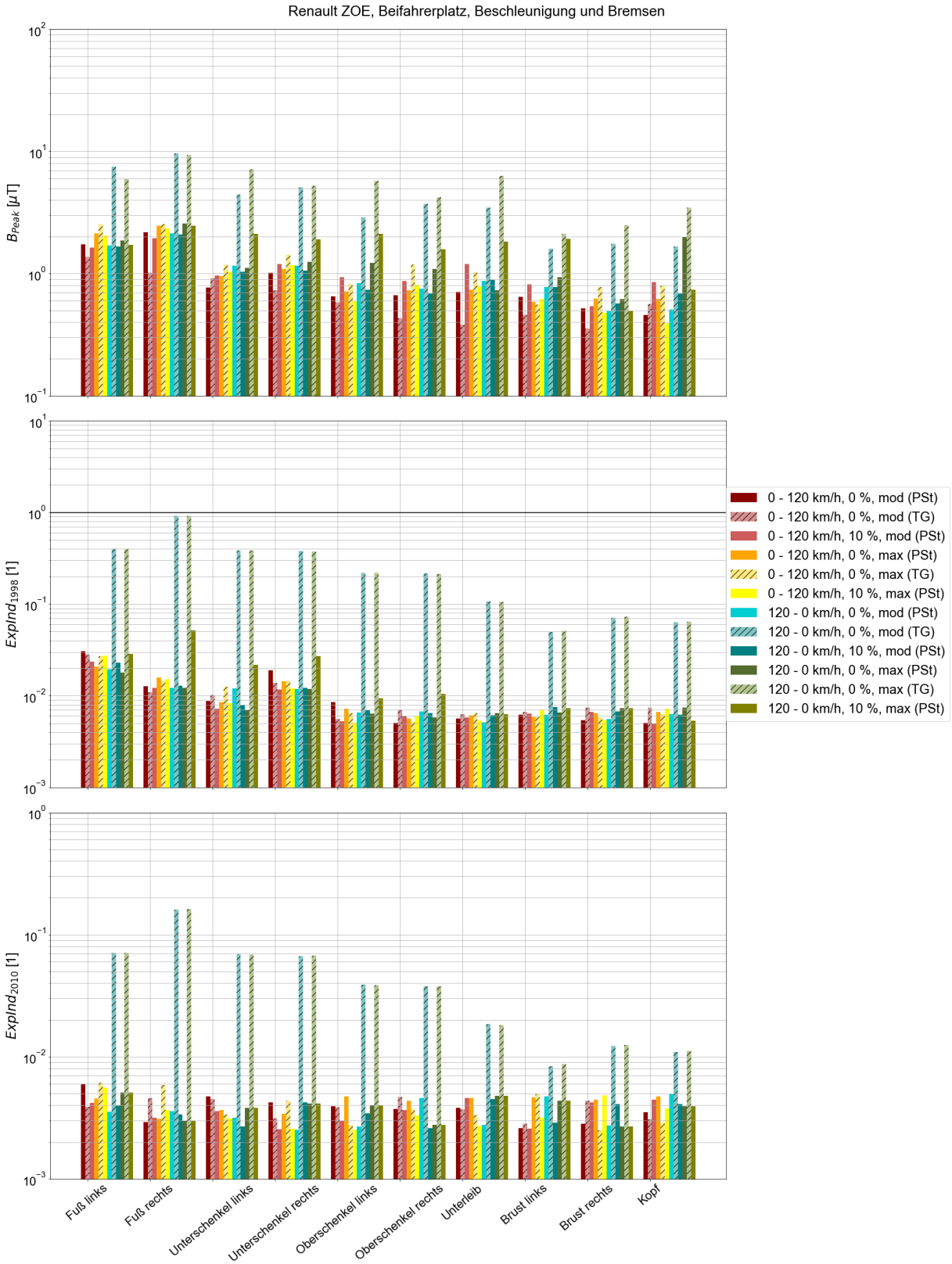


Abbildung 9.21: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

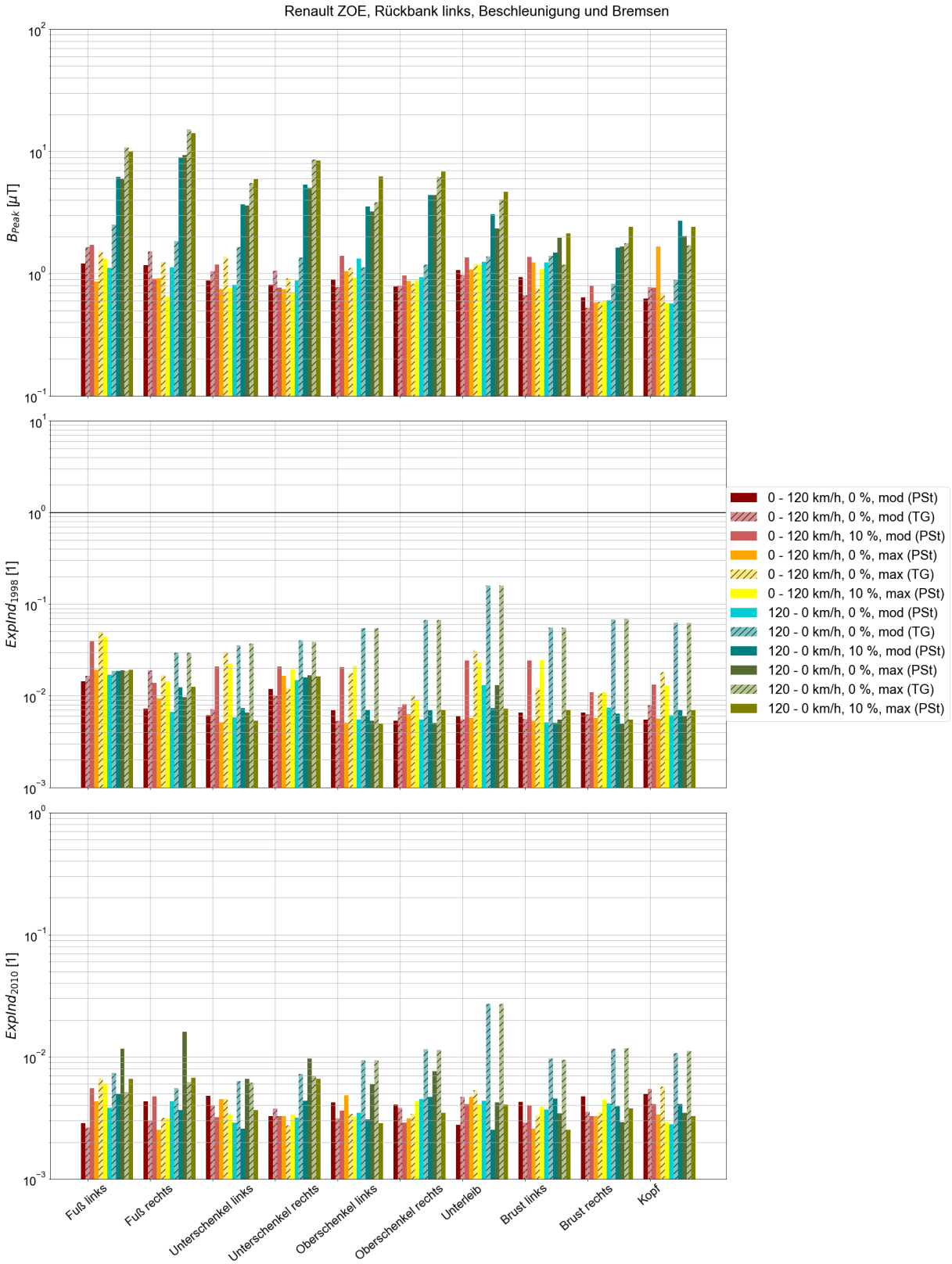


Abbildung 9.22: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120 – 0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.20 bis Abbildung 9.22) ergaben sich teilweise deutlich größere Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte und Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, hervorgerufen durch einen, möglicherweise in Zusammenhang mit Bremsmanövern stehenden, steilflankigen transienten Vorgang, der allerdings nicht über alle Messungen hinweg reproduziert werden konnte. Der Trend deutete darauf hin, dass dieser transiente Vorgang gehäuft bei starken Bremsmanövern (aber auch bei starken Beschleunigungsmanövern) auftritt, eine Systematik kristallisierte sich allerdings erst bei den Messungen auf dem Testgelände und somit nach Abschluss der Messungen auf dem Prüfstand heraus. Die durch diesen Vorgang verursachten maximalen $ExpInd_{1998}$ waren im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz ($ExpInd_{1998}$ bis zu 0.45) und im Bereich des rechten Fußes am Beifahrerplatz ($ExpInd_{1998}$ bis zu 0.91) lokalisiert. Am linken Sitzplatz der Rückbank lag der dadurch verursachte maximale $ExpInd_{1998}$ bei ca. 0.16 und trat im Bereich des Unterleibs auf. Die Lage der Maxima bei den drei untersuchten Sitzplätzen deutet darauf hin, dass die Quelle des genannten transienten Vorgangs jeweils in der Nähe der Räder lag. Abbildung 9.23 zeigt den transienten Vorgang im Zeitbereich.

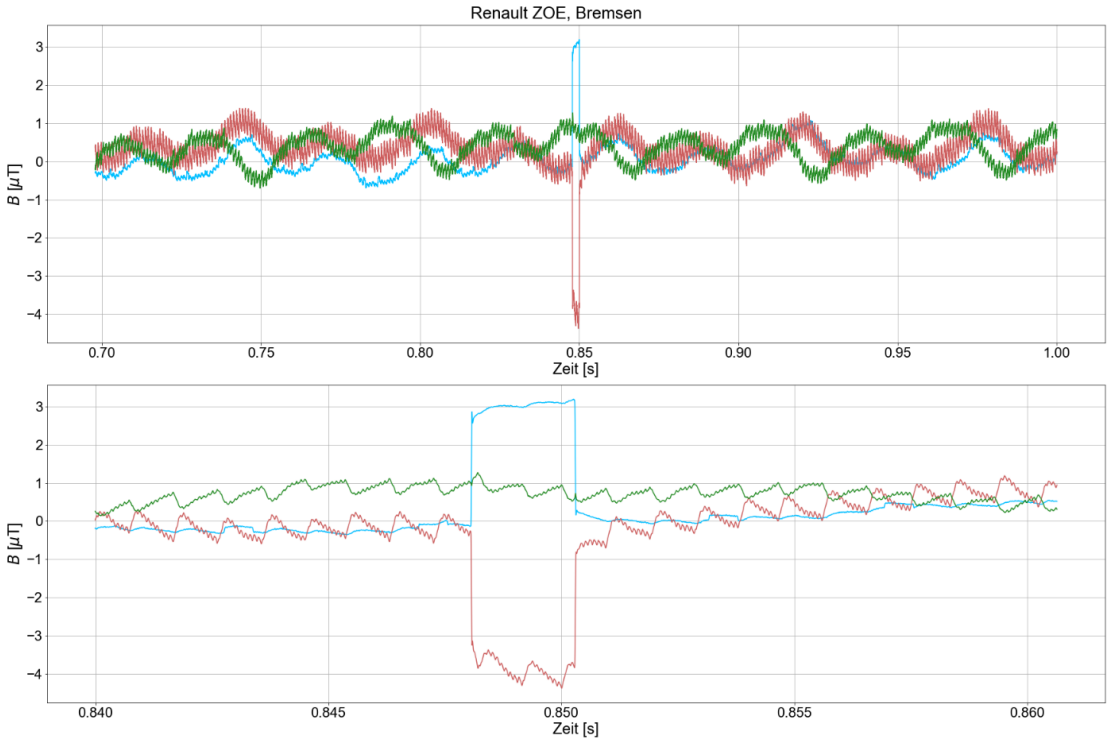


Abbildung 9.23: Transienter Vorgang in Zusammenhang mit einem Bremsmanöver in zwei unterschiedlichen Zeitachsenauflösungen (trat in ähnlicher Form auch bei starken Beschleunigungsmanövern auf) .

9.4.1.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.24 und Abbildung 9.26 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz in Abhängigkeit von der Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer. Zusätzlich zeigt Abbildung 9.25 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

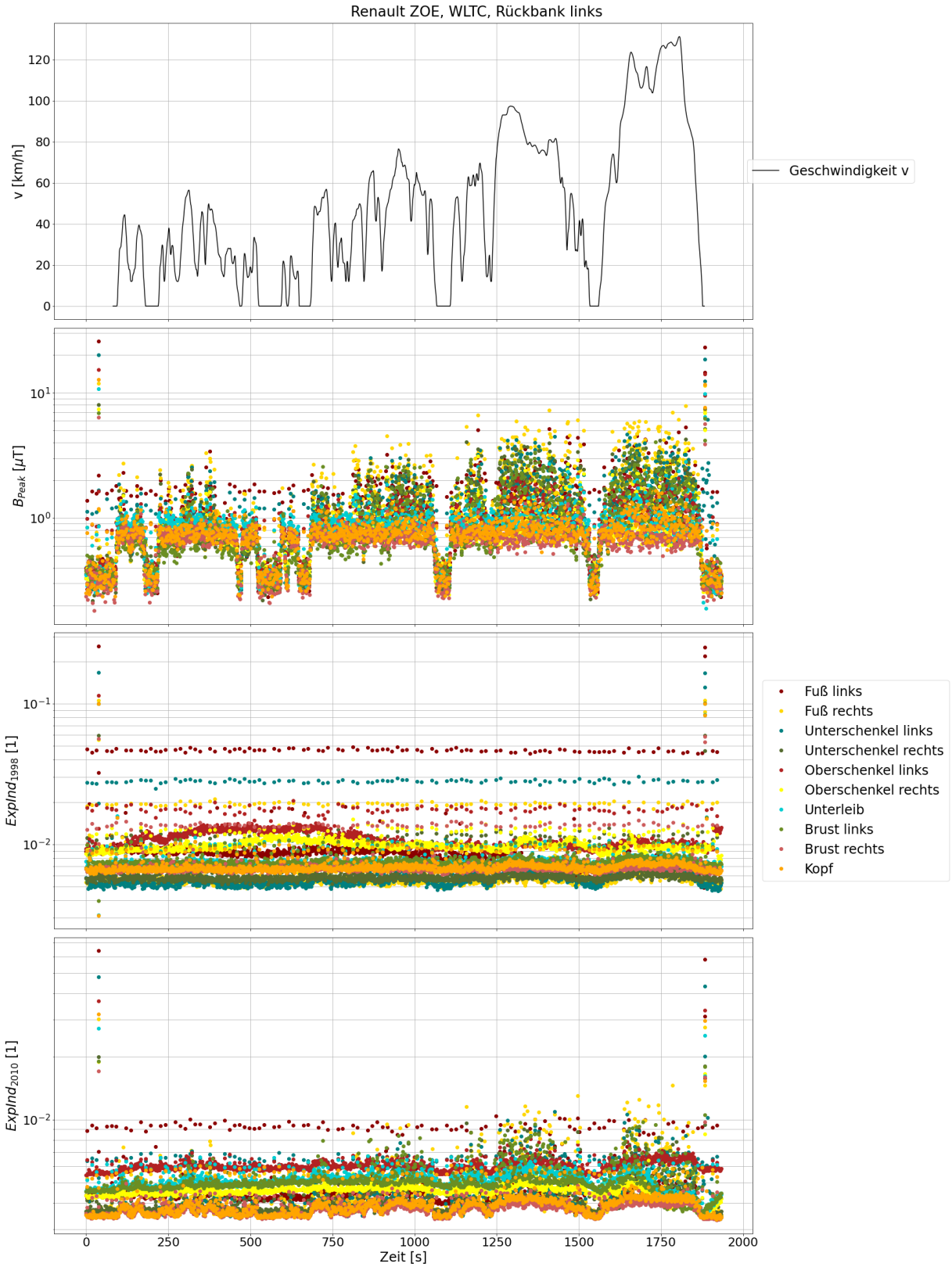


Abbildung 9.24: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010. Die auffällig hohen Werte unmittelbar vor Beginn und Ende des Fahrens wurden durch das Lösen bzw. Einschalten der Feststellbremse verursacht.

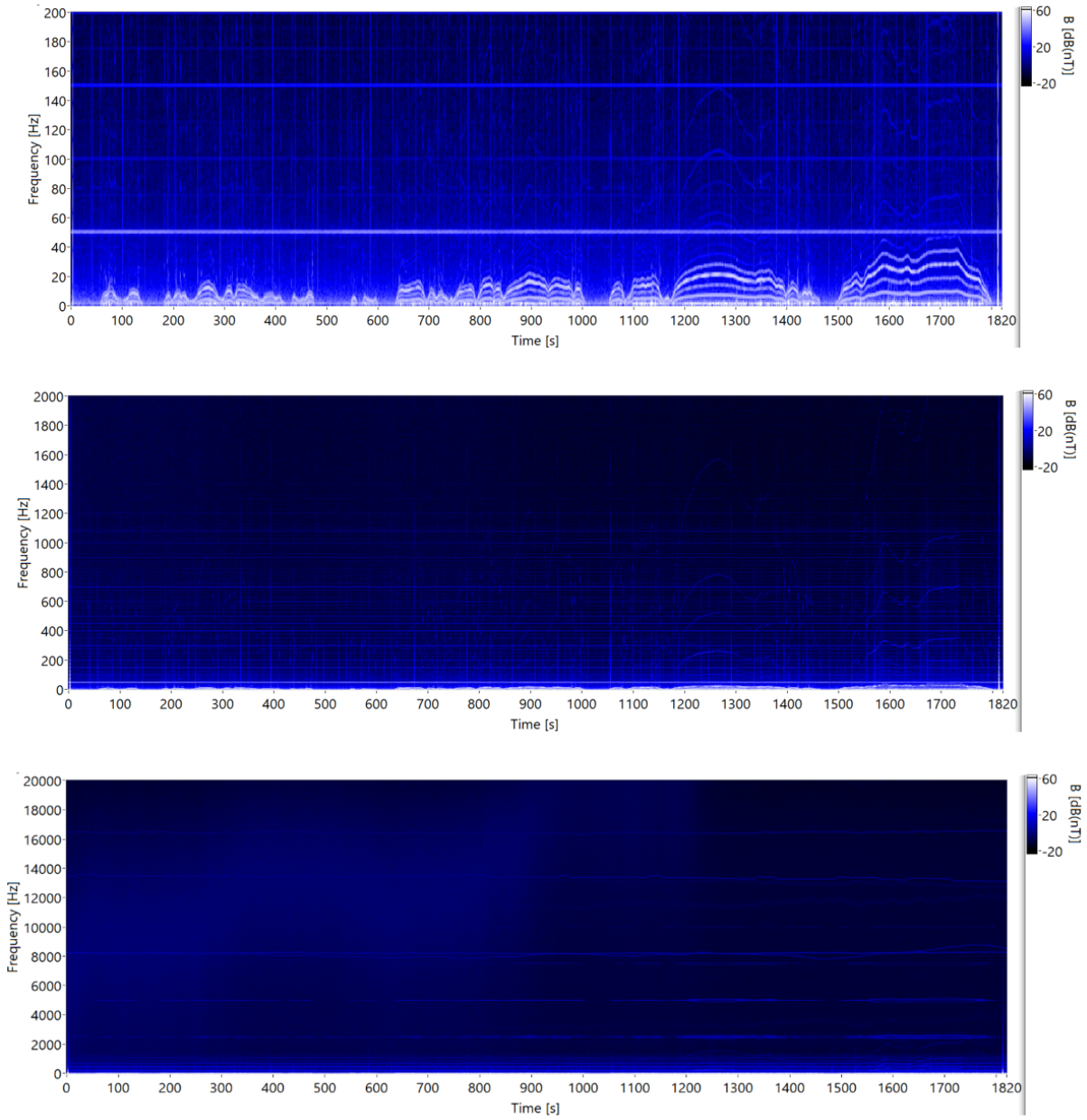


Abbildung 9.25: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Renault Zoe am linken Sitzplatz der Rückbank in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

Abbildung 9.27 und Abbildung 9.28 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.29 zeigt die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

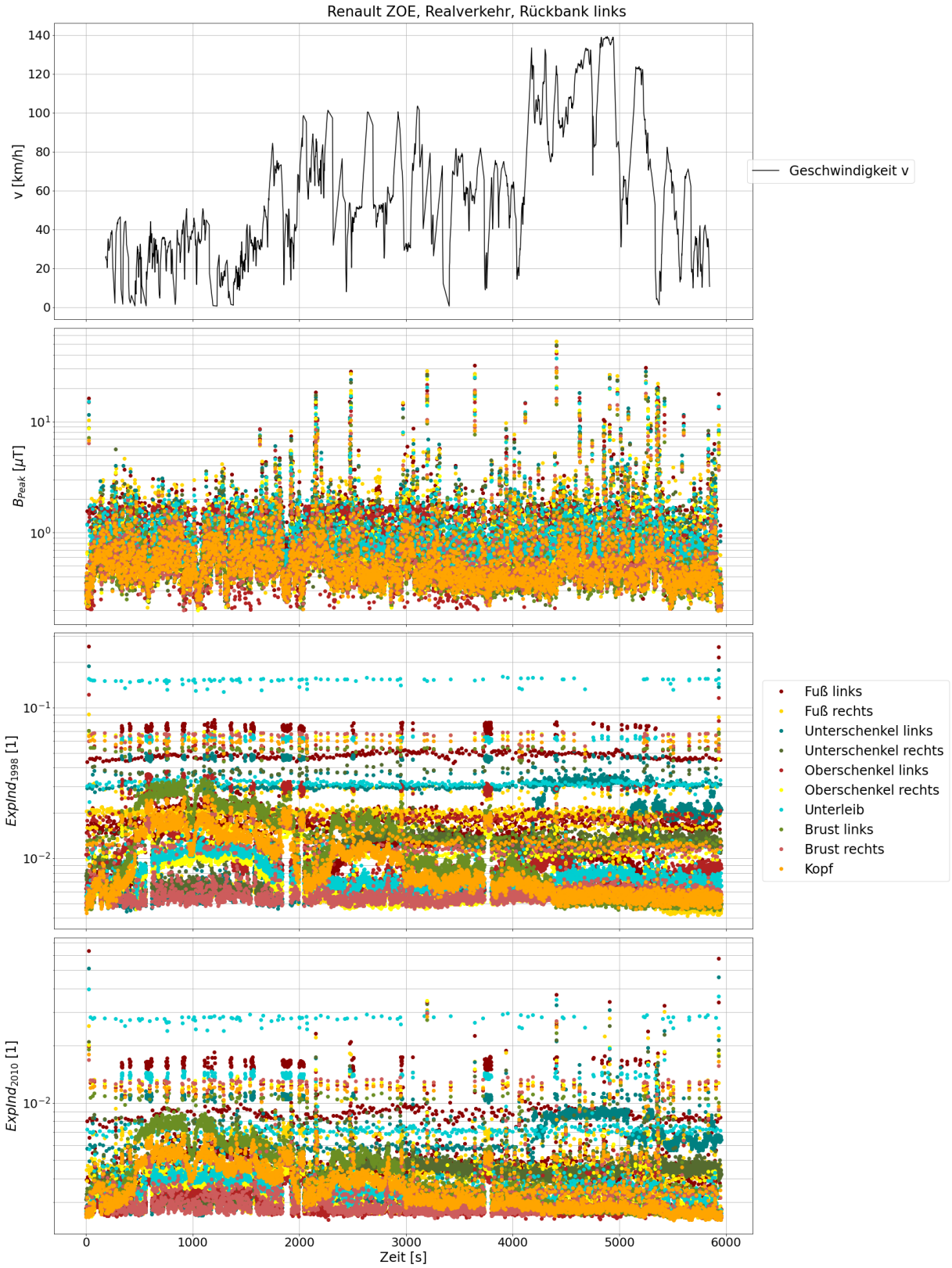


Abbildung 9.26: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010. Die auffällig hohen Werte vor und nach der Fahrt wurden durch das Ein- und Ausschalten des Fahrzeugs verursacht. Der Geschwindigkeitsgraph wurde mittels eines GPS-Datenloggers aufgezeichnet und enthält teilweise Lücken, die im Graphen durch lineare Interpolation ersetzt sind.

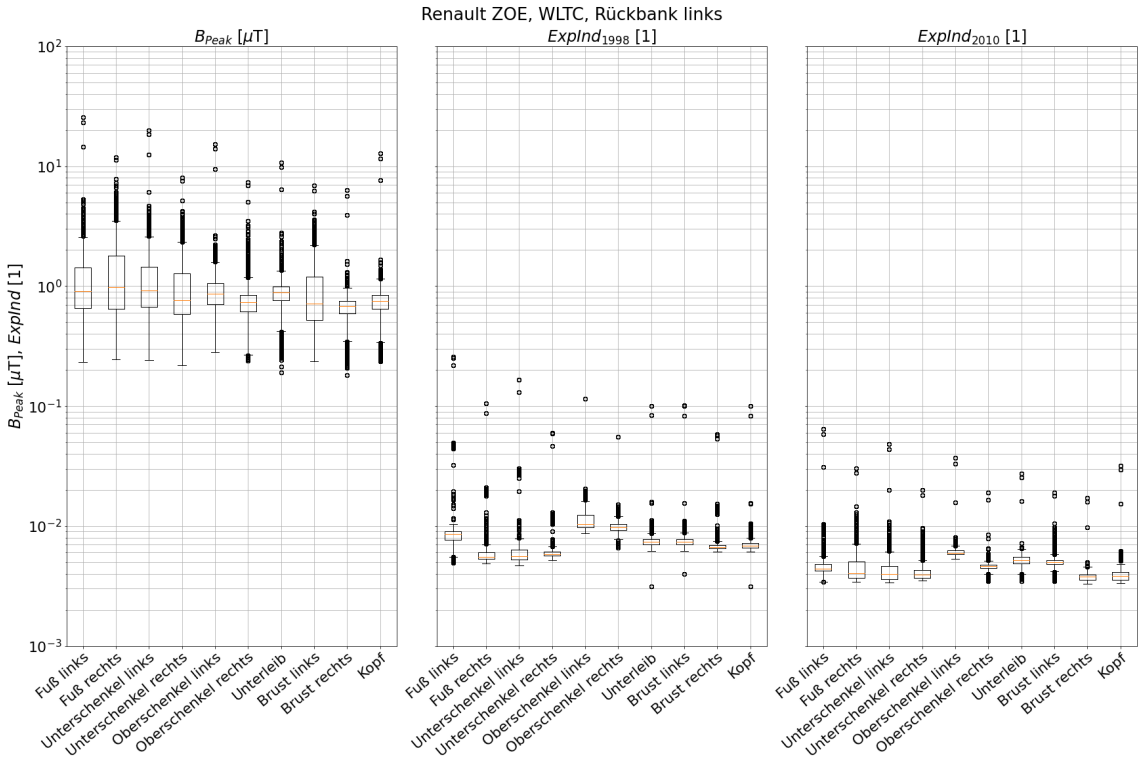


Abbildung 9.27: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand (inkl. Ein- und Ausschalten des Fahrzeugs) in einem Boxplot. (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

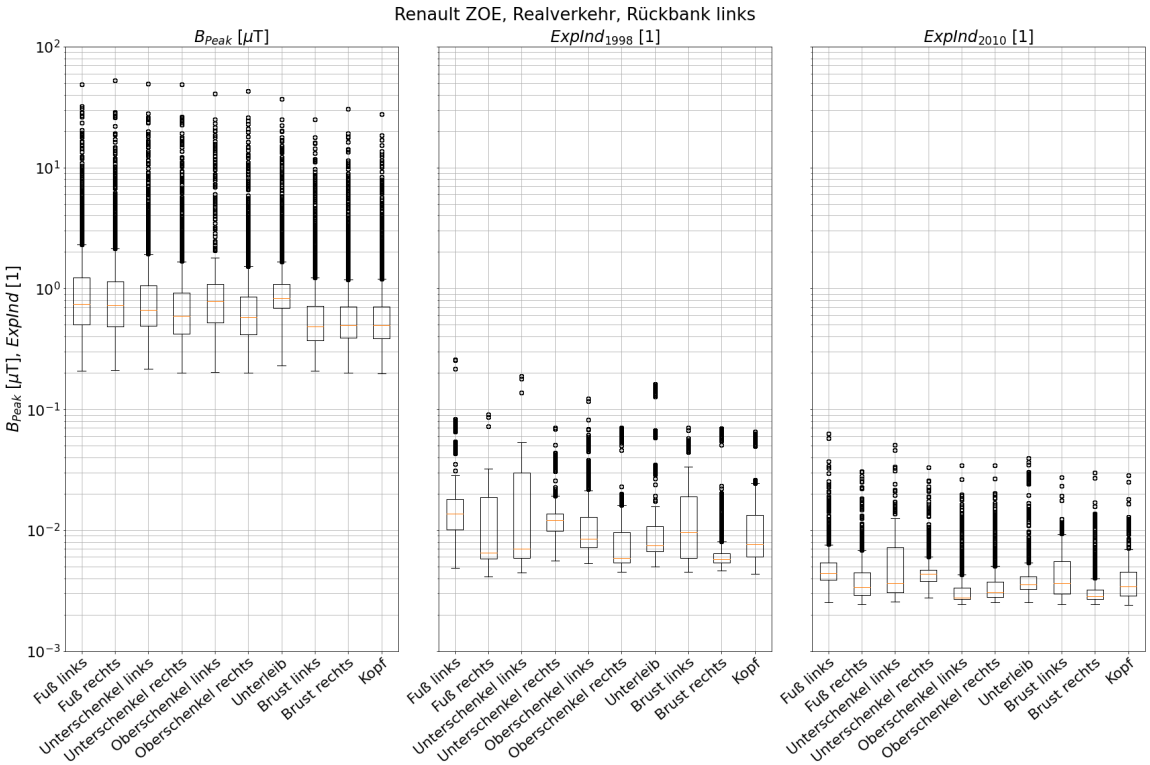


Abbildung 9.28: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr (inkl. Ein- und Ausschalten des Fahrzeugs) in einem Boxplot. (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

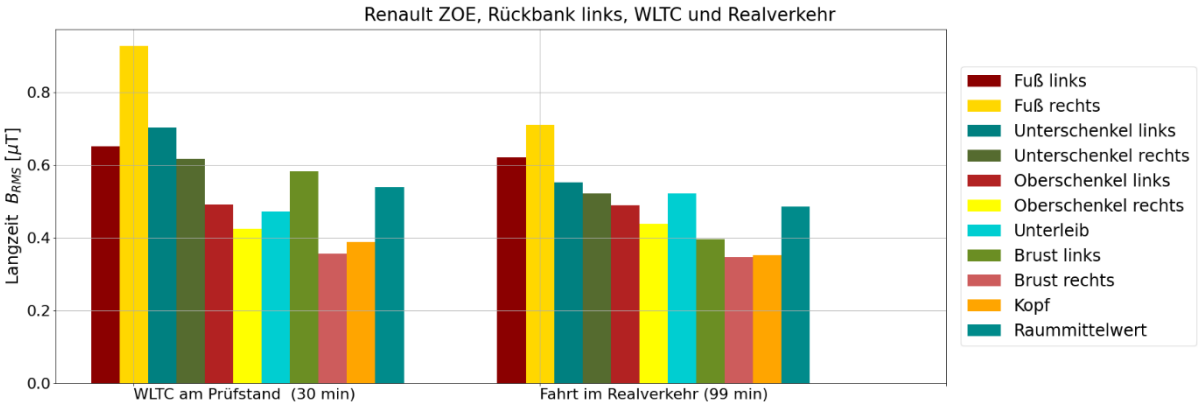


Abbildung 9.29: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.1.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ wurden dabei von der Sitzheizung und der (Warn-)Blinkanlage verursacht. Die Sitzheizung führt im Unterleibsbereich zu einem $ExpInd_{1998}$ von ca. 0.45 und im Bereich des linken Fußes des Fahrerplatzes sogar auf einen $ExpInd_{1998}$ von ca. 1.10 (entsprechend einer zehnprozentigen Überschreitung des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998). Grund dafür war vermutlich eine Leitung des mittels steilflankigem Schaltregler implementierten Sitzheizungssystems (Abbildung 9.30).

In ähnlicher Weise führten auch die Schaltspiele der Blinkanlage im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer zu $ExpInd_{1998}$ von bis zu 0.78 (Zeitverlauf der Magnetfeldimmissionen verursacht durch die Blinkanlage, siehe Abbildung 9.31).

Weiters erzeugte auch das Ein- und Ausschalten des Fahrzeuges lokal Magnetfeldamplituden in der Größenordnung von mehreren zehn Mikrotesla und führt zu Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$ bis zu 0.25 (gemessen im Fußbereich der Rückbank links, Zeitverlauf der Magnetfeldimmissionen verursacht durch das Einschalten, siehe Abbildung 9.32).

Die Magnetfeldimpulse (Bursts mit ca. 125 kHz Schwingungspaketen, siehe Abbildung 9.33) zur Lokalisation des Fahrzeugschlüssels bzw. zur Kommunikation mit diesem führten zu $ExpInd_{1998}$ von bis zu 0.14 (Magnetfeldamplituden bis ca. 1.5 µT) im Bereich des linken Unterschenkels (gemessen am Beifahrerplatz).

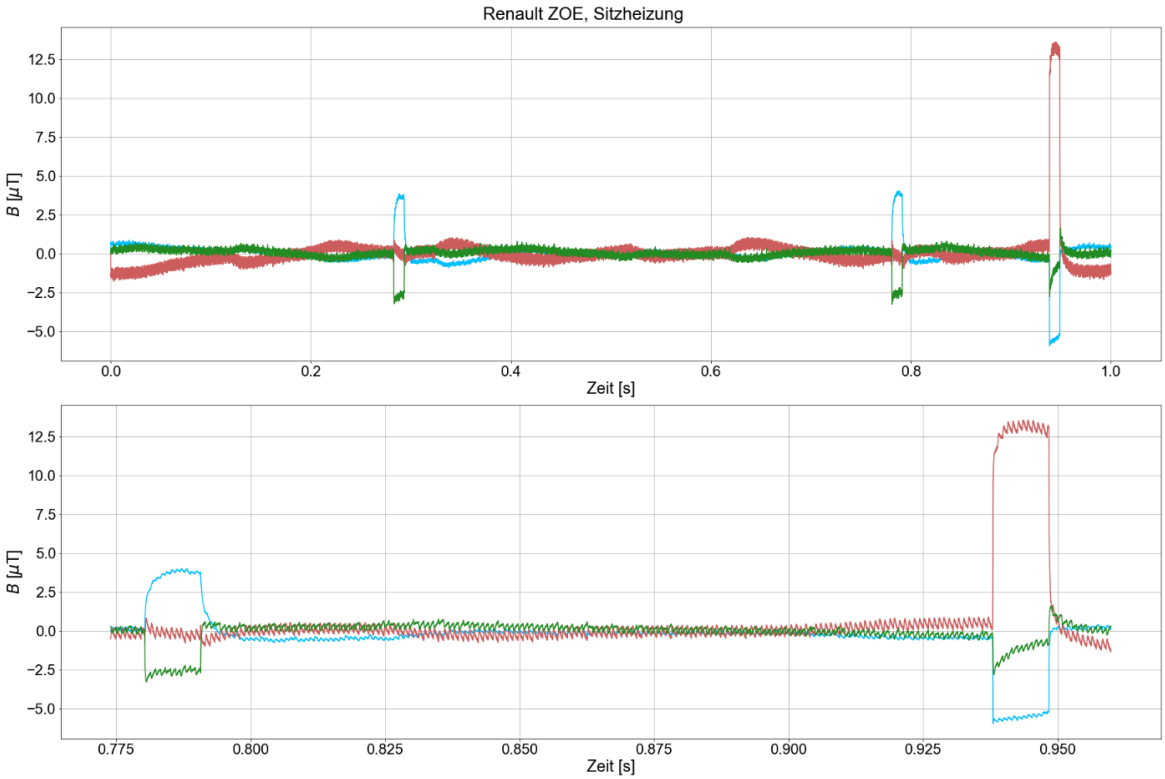


Abbildung 9.30: Schaltspiele der Sitzheizung mit steilen Flanken (und Amplituden bis zu ca. 15 µT im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz) in zwei unterschiedlichen Zeitachsenauflösungen.

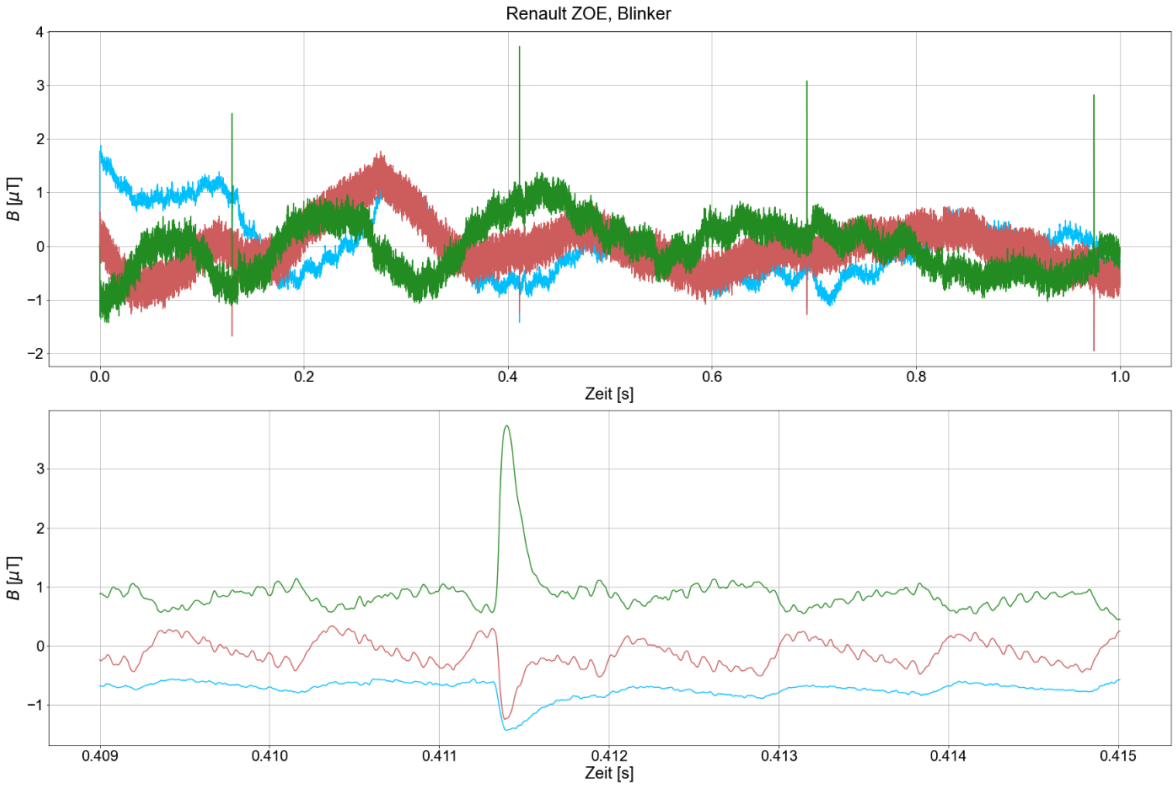


Abbildung 9.31: Schaltspiele der Blinkanlage mit steilen Flanken in zwei unterschiedlichen Zeitachsenauflösungen.

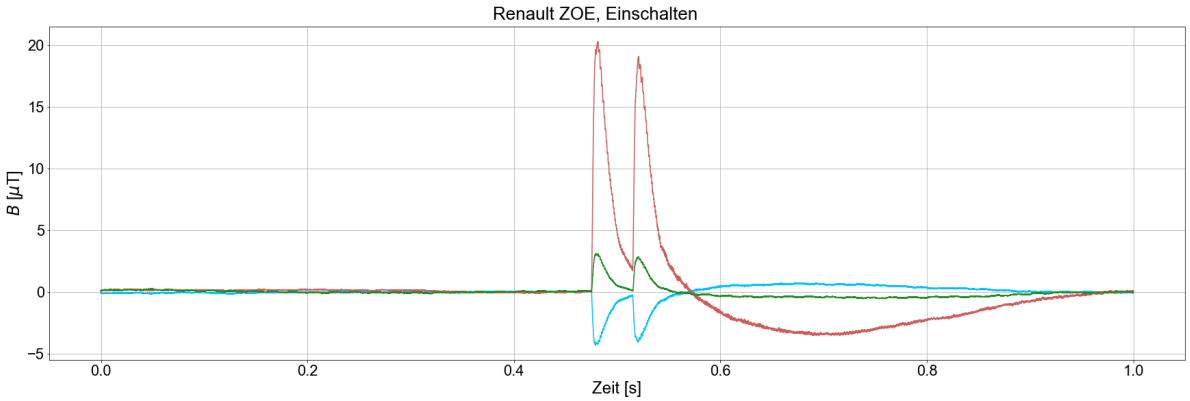


Abbildung 9.32: Zeitverlauf der Magnetfeldimmissionen während des Einschaltens des Fahrzeugs (gemessen am linken Sitz der Rückbank).

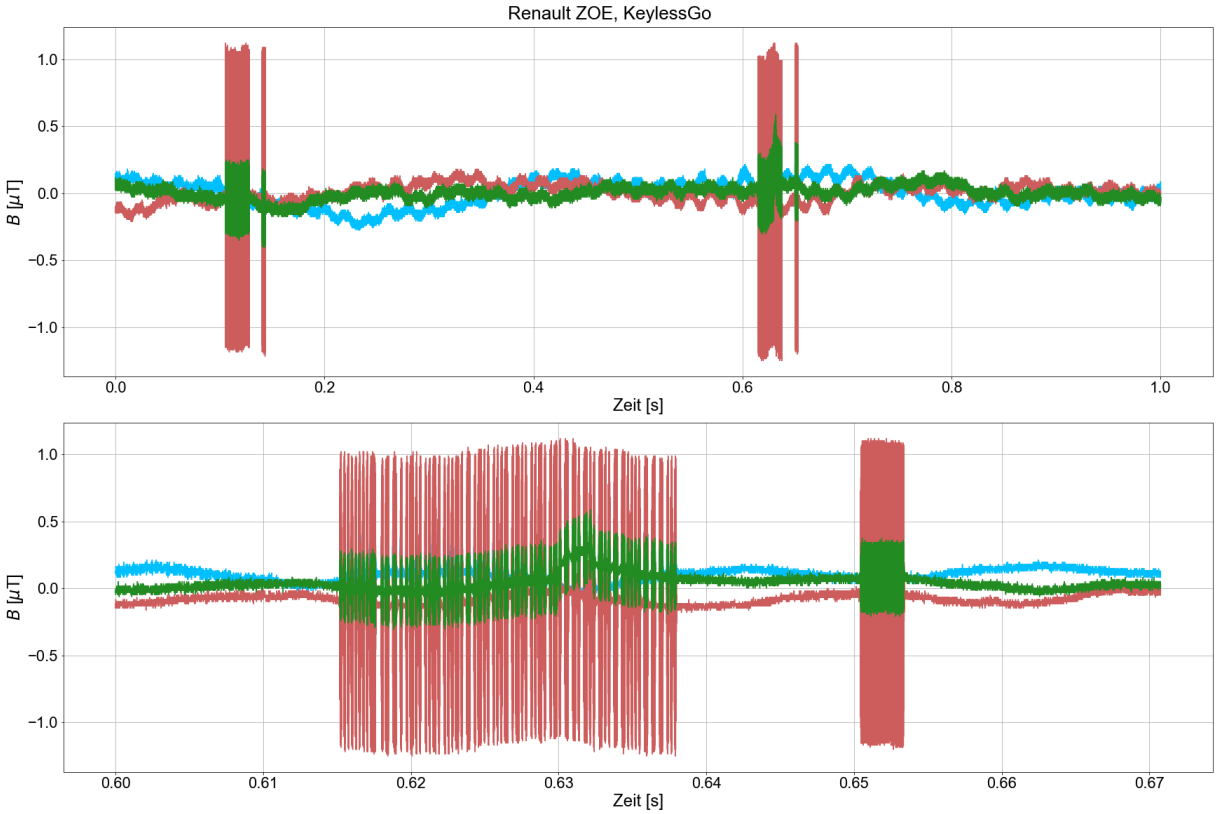


Abbildung 9.33: Zeitsignal des Keyless Go Systems (125 kHz Bursts) in unterschiedlichen Zeitachsenauflösungen.

Abbildung 9.34 bis Abbildung 9.36 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen zufolge des Lüfters (Klimaanlage), der Sitzheizung, der Warnblinkanlage und des Keyless Go Systems in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen (die genannten Immissionsanteile wurden nicht an allen Sitzplätzen erfasst).

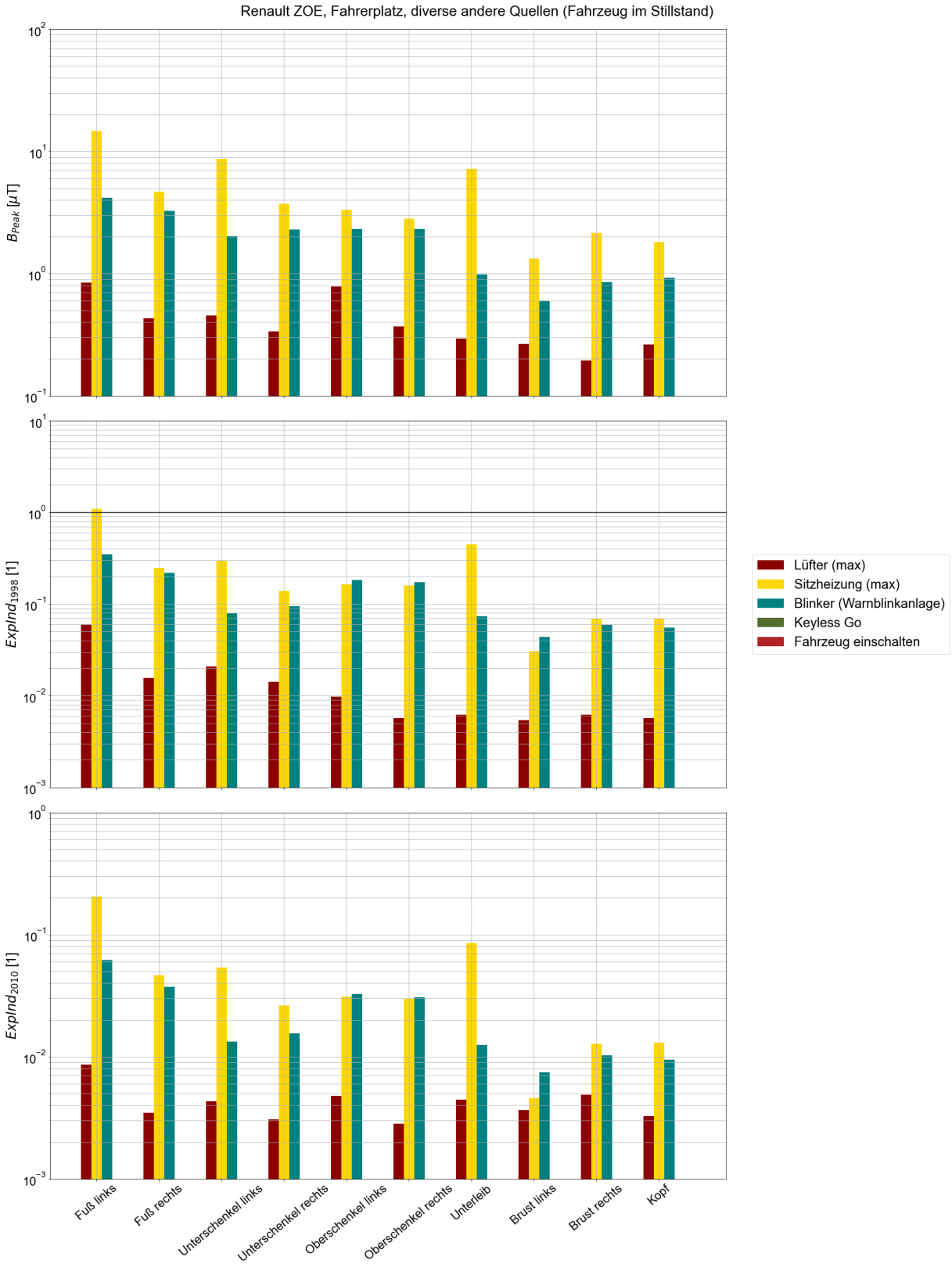


Abbildung 9.34: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Keyless Go und Fahrzeug einschalten wurden an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

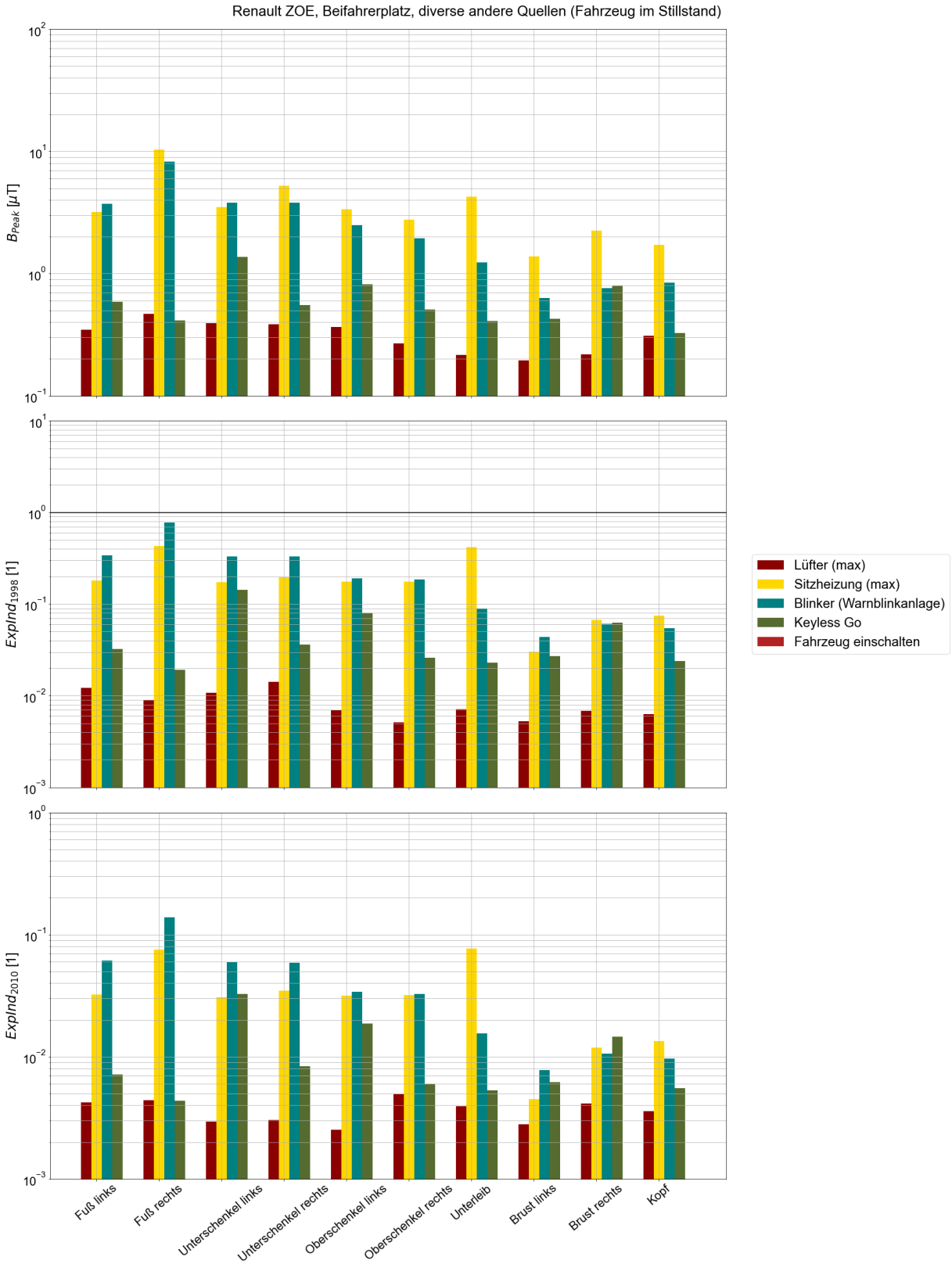


Abbildung 9.35: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Fahrzeug einschalten wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

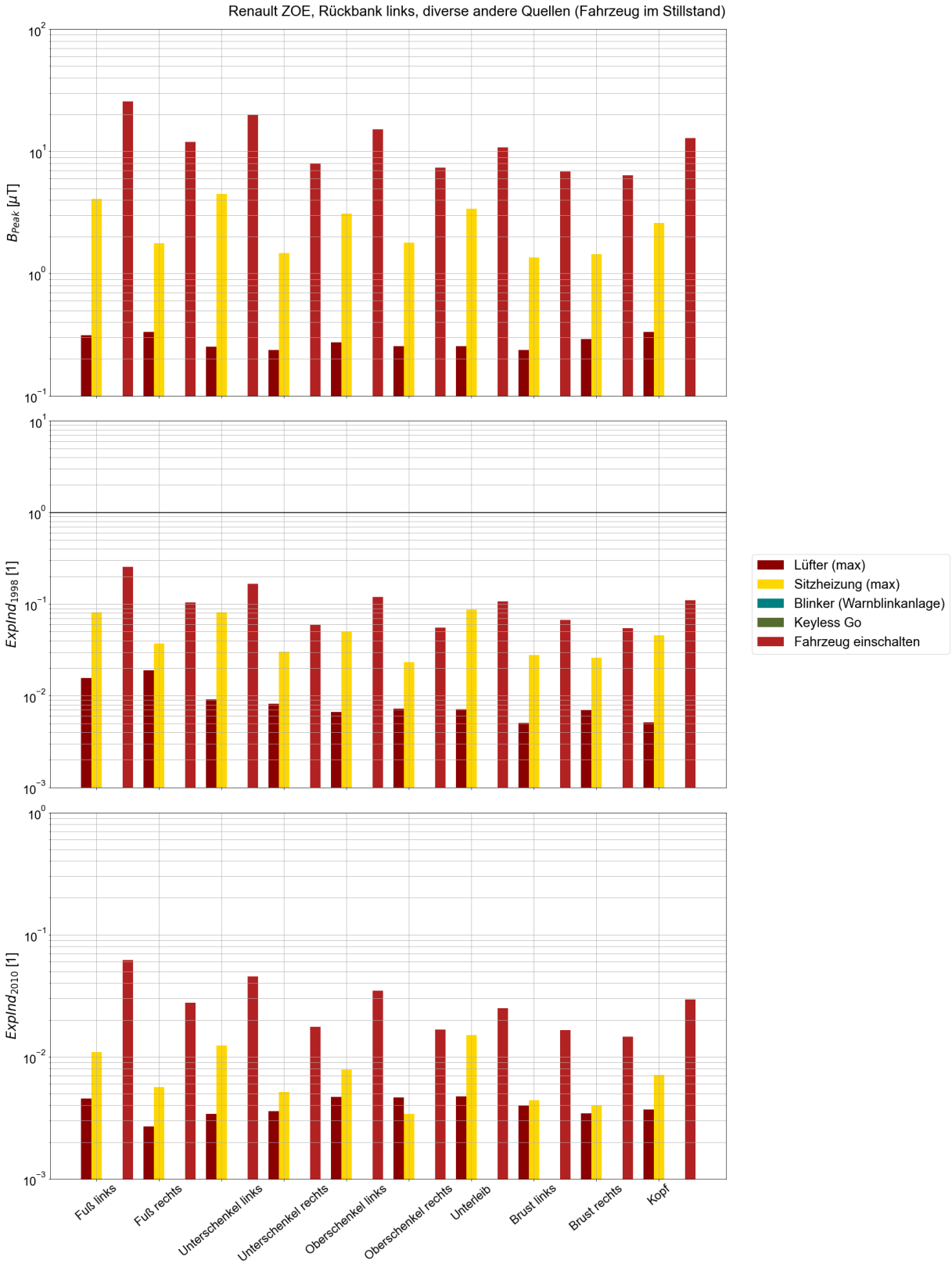


Abbildung 9.36: Magnetfeldimmissionen der Rückbank (linker Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Blinker und Keyless Go wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

9.4.2 Tesla Model 3



Abbildung 9.37: Untersuchter Tesla Model 3 auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.2.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Tesla Model 3

Baujahr: 2021

Motorleistung: 377 kW

Batteriekapazität: 60 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.37 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.38).

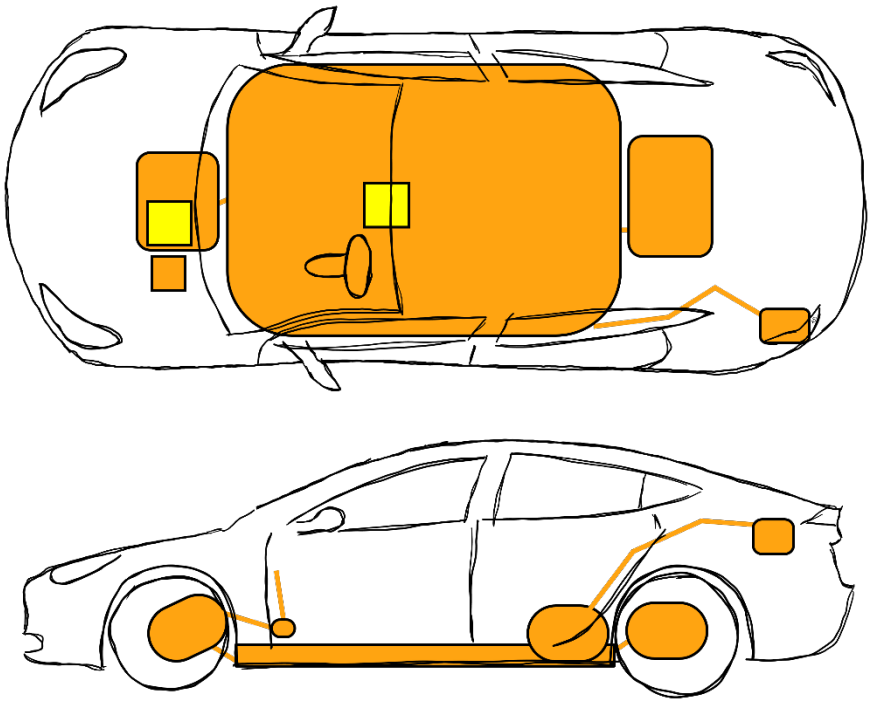


Abbildung 9.38: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Tesla Model 3 (modifiziert nach https://www.tesla.com/sites/default/files/downloads/Model_3_Emergency_Response_Guide_de.pdf).

9.4.2.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.39 bis Abbildung 9.44 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.39 bis Abbildung 9.41) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im rechten Fußbereich des Beifahrers im Ausmaß von ca. 0.17 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei ein Anteil von weniger als 0.01 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. Im Unterleibsbereich auf der Rückbank wurden beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit $ExpInd_{1998}$ von bis zu 0.09 erreicht (Anteil Reifenmagnetisierung < 0.006).

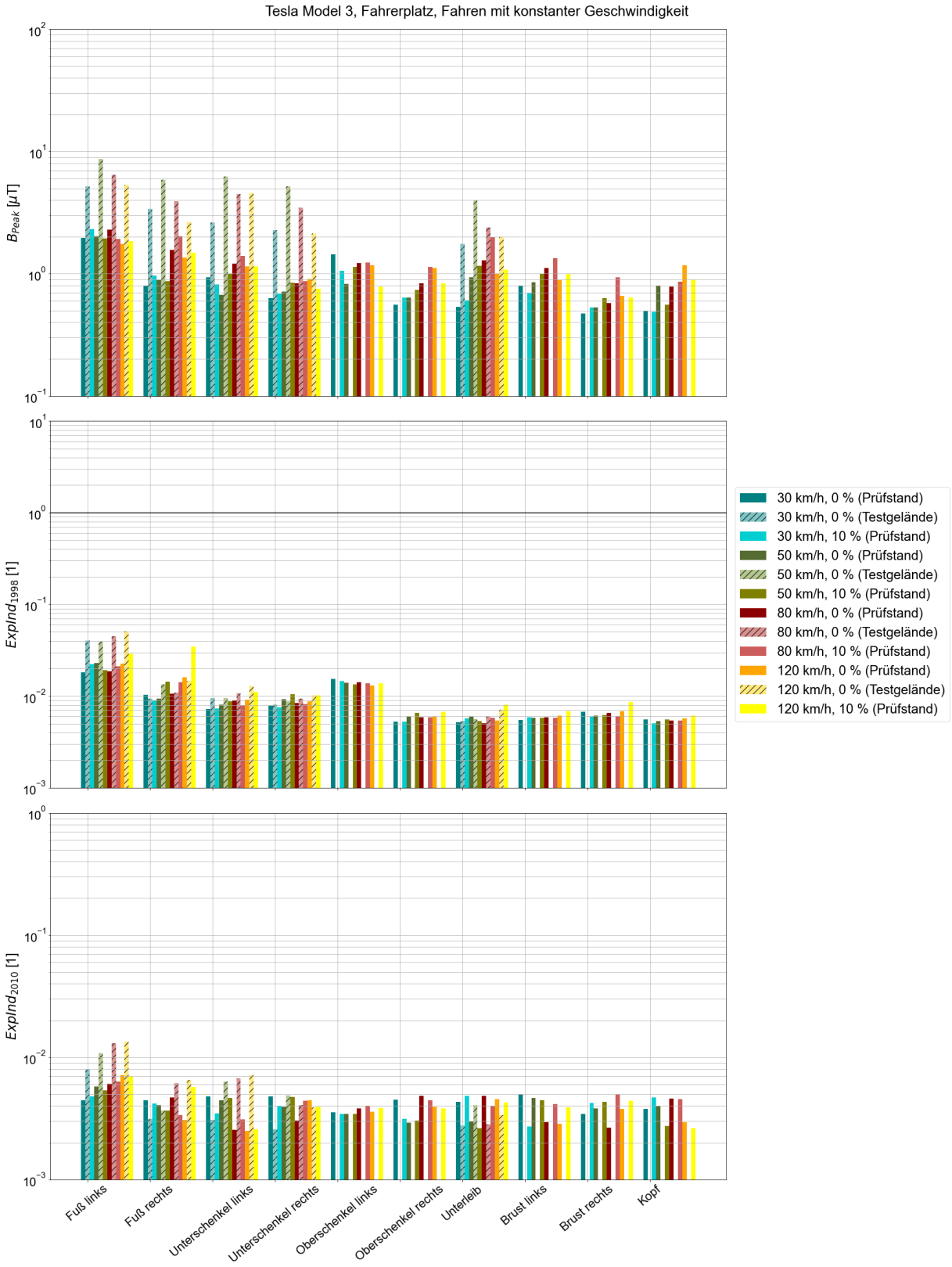


Abbildung 9.39: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

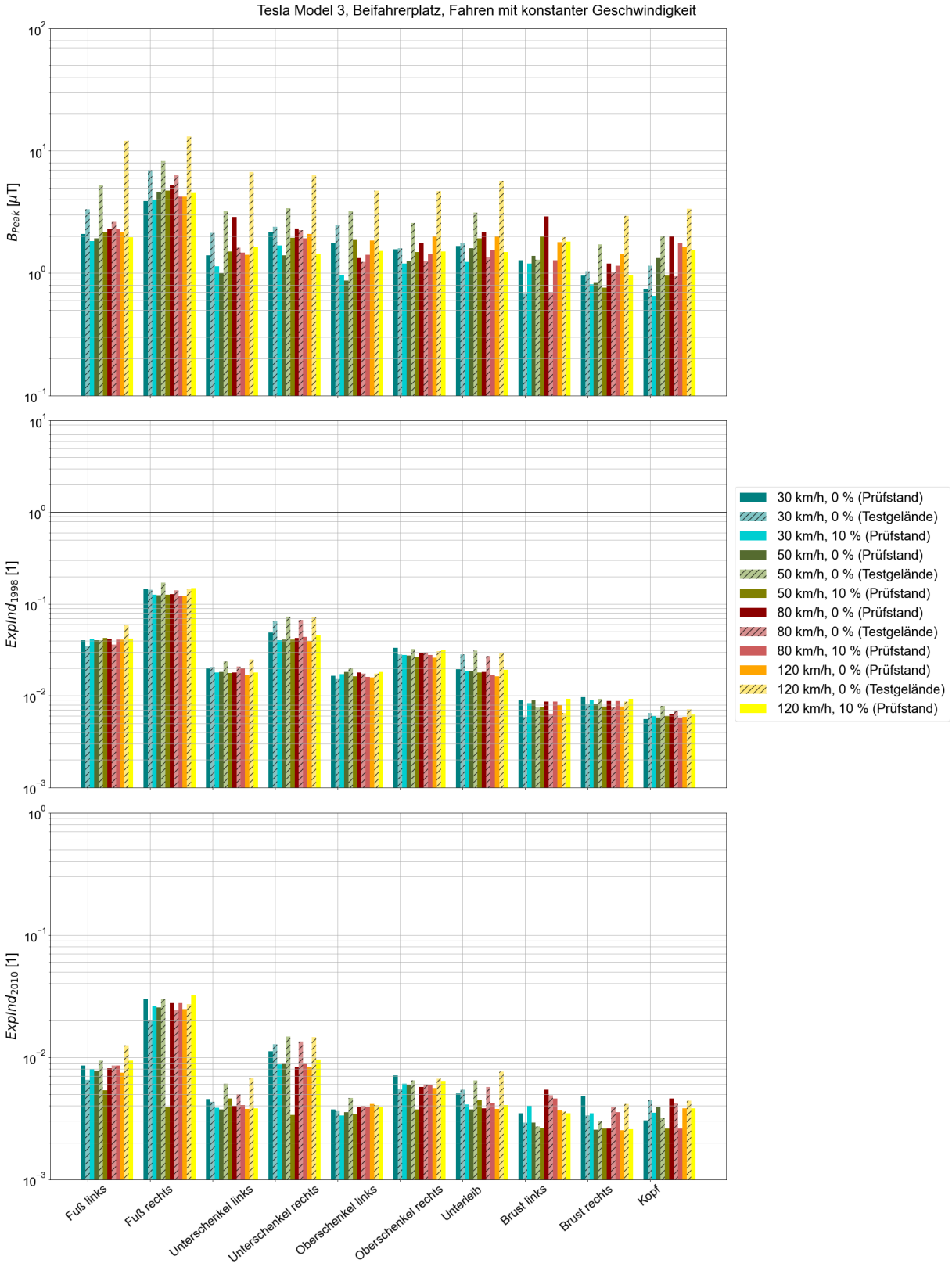


Abbildung 9.40: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

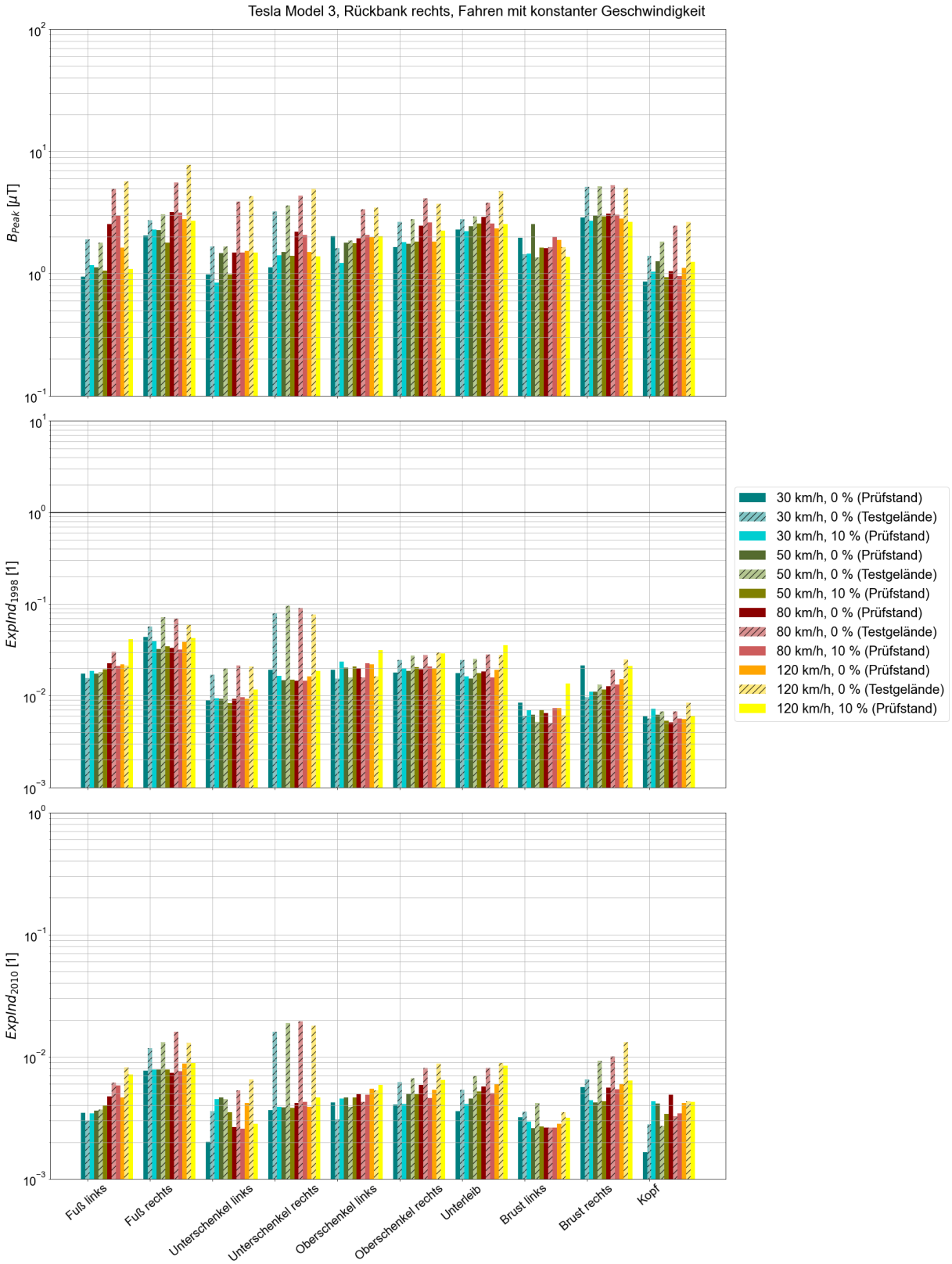


Abbildung 9.41: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

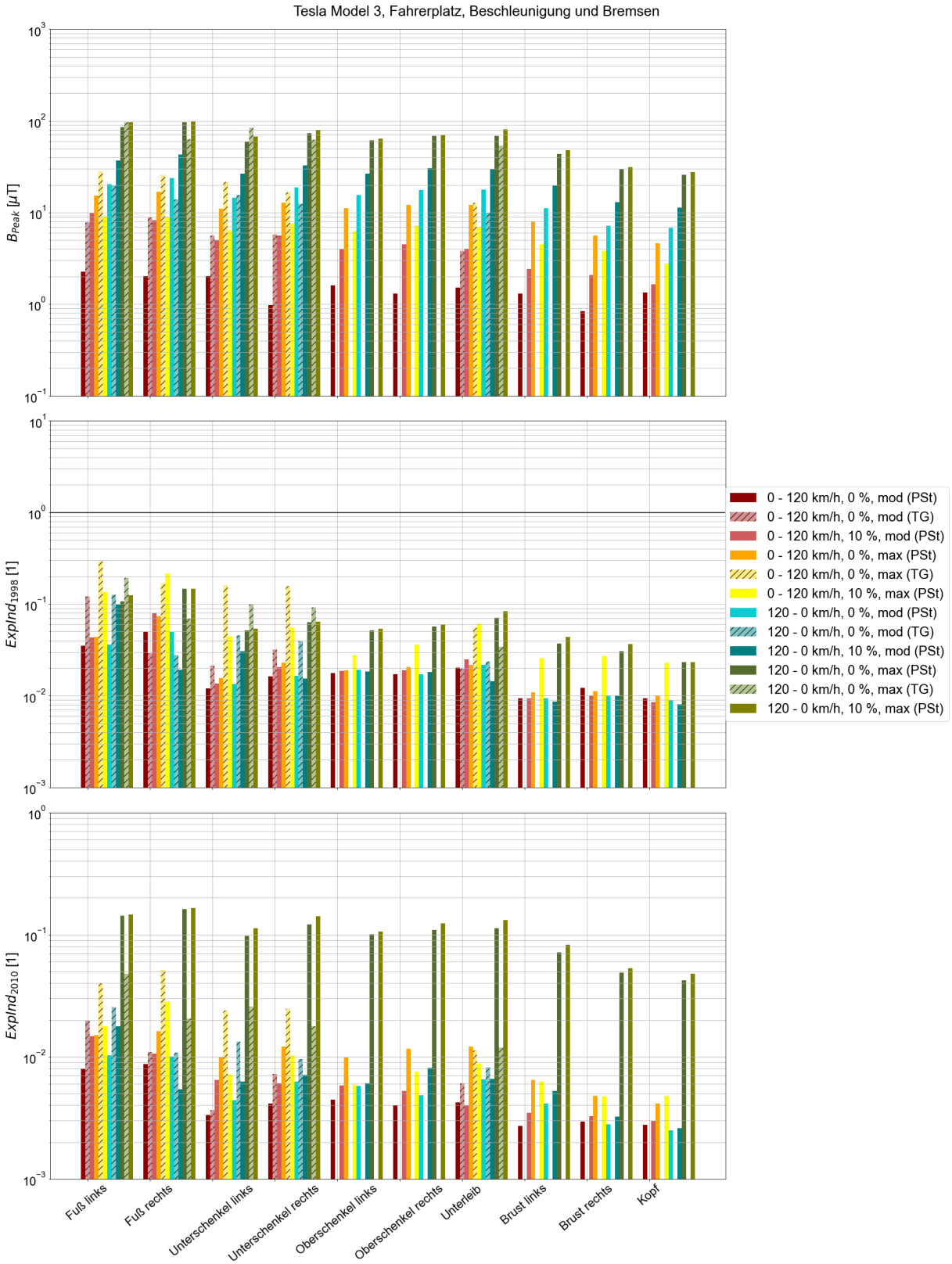


Abbildung 9.42: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

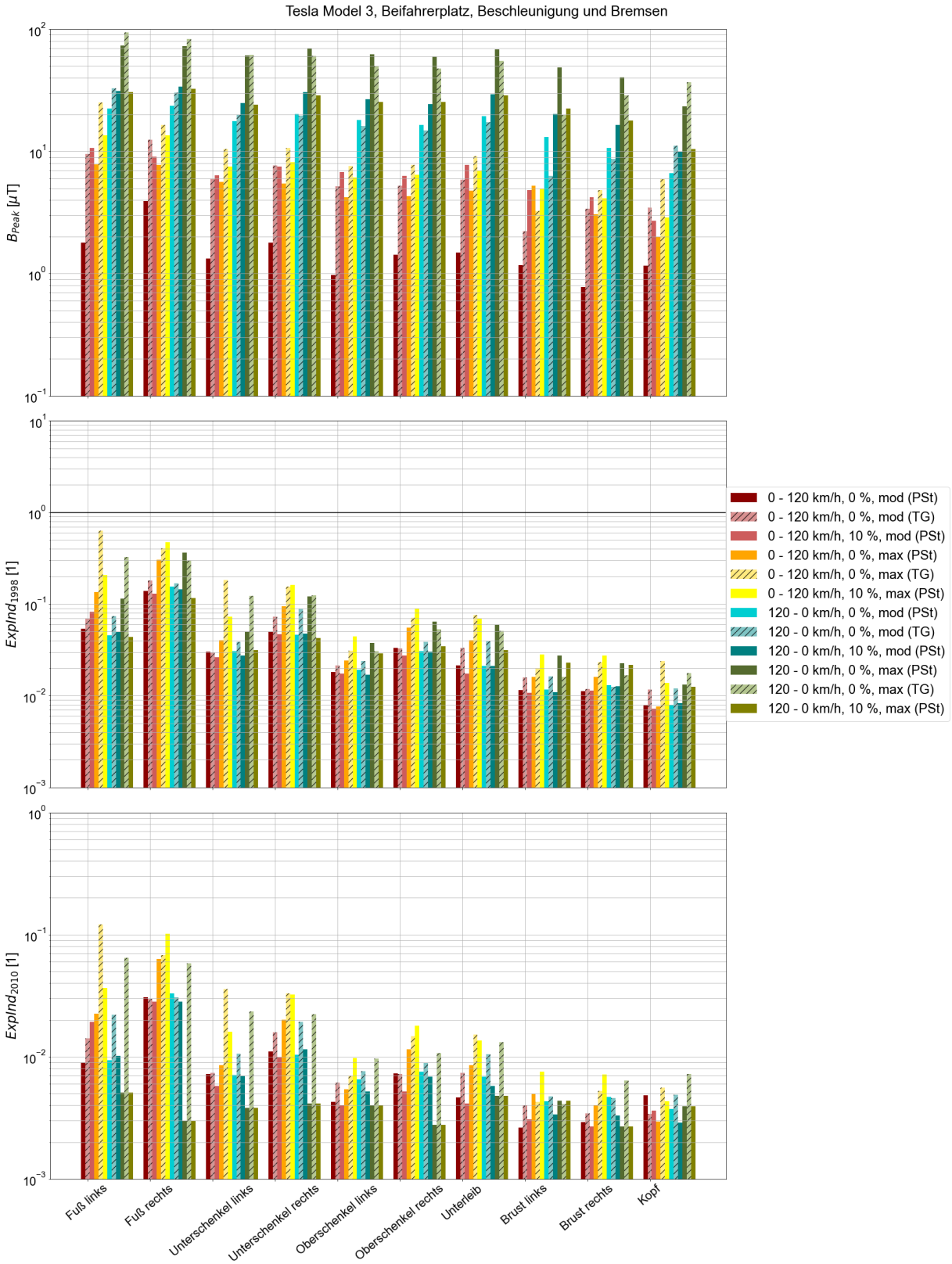


Abbildung 9.43: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

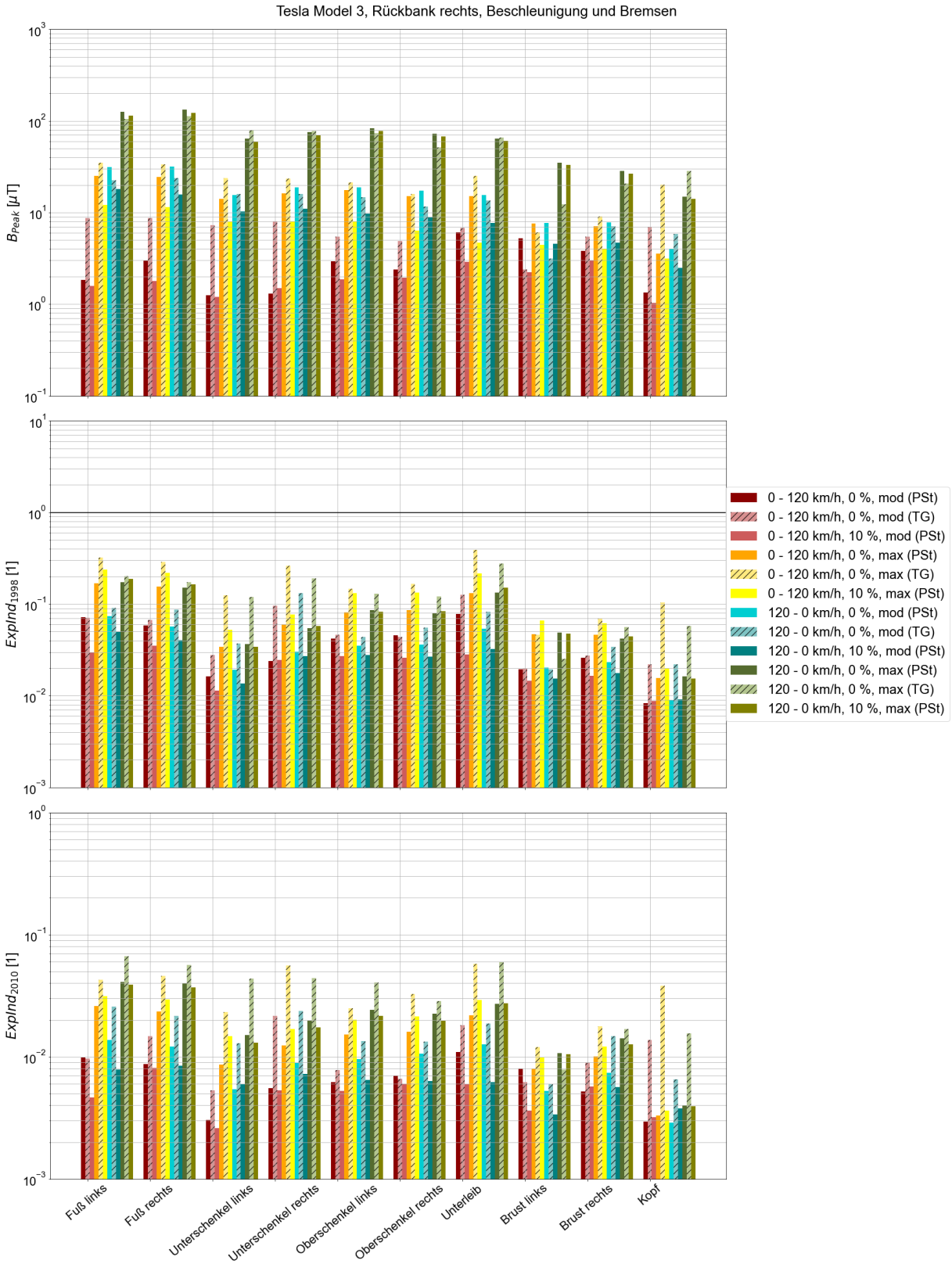


Abbildung 9.44: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.42 bis Abbildung 9.44) zeigten sich deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit. Die größten $ExpInd_{1998}$ wurden bei maximaler Beschleunigung erreicht und lagen im linken Fußraum des Beifahrers bei ca. 0.63 und im Unterleibsbereich auf der Rückbank bei ca. 0.39. Beim Bremsen wurden in diesen Bereichen Werte des $ExpInd_{1998}$ von ca. 0.32 bzw. 0.27 erreicht. Abbildung 9.45 und Abbildung 9.46 zeigen gemessene Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte während des Beschleunigens und zu Beginn des Bremsvorganges.

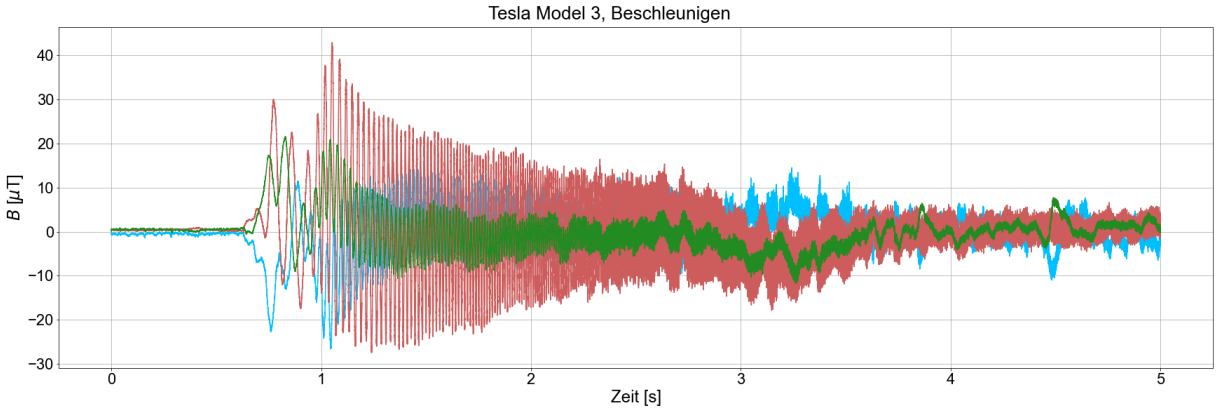


Abbildung 9.45: Verlauf der magnetischen Flussdichte während des Beschleunigens, gemessen am Testgelände im Bereich des linken Fußes am Beifahrerplatz.

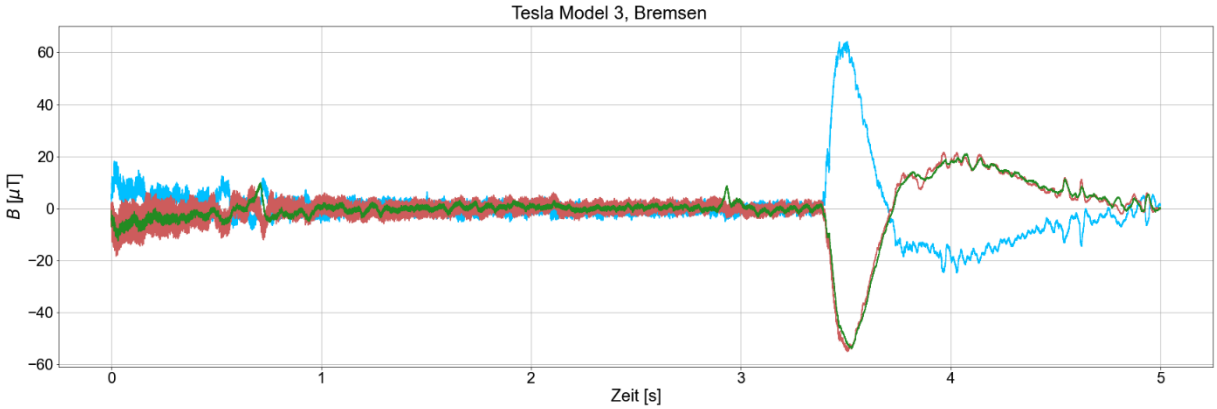


Abbildung 9.46: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte zu Beginn eines Bremsvorganges bei 120 km/h (bei Sekunde 3.4), gemessen am Testgelände im Bereich des linken Fußes am Beifahrerplatz. Das Ende des vorangegangenen Beschleunigungsvorgangs ist im linken Teil der Abbildung erkennbar.

9.4.2.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.47 und Abbildung 9.49 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer. Im Vergleich zu den anderen untersuchten Fahrzeugen zeigt der Tesla in den unteren Körperregionen bei stillstehendem aber eingeschaltetem Fahrzeug (z. B. Abbildung 9.47, in Phasen mit v = 0) ein etwas stärkeres „Grundrauschen“.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.48 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

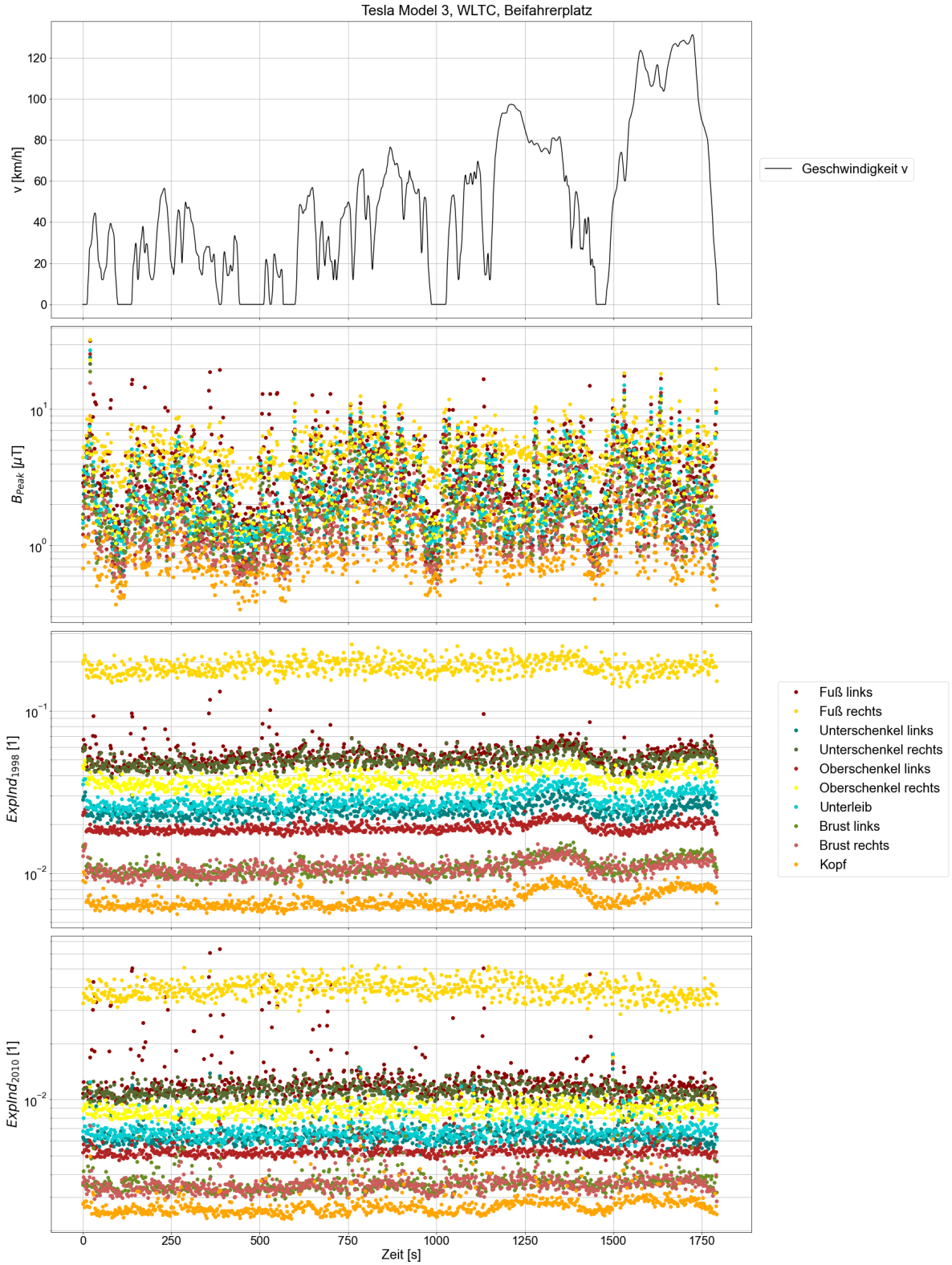


Abbildung 9.47: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

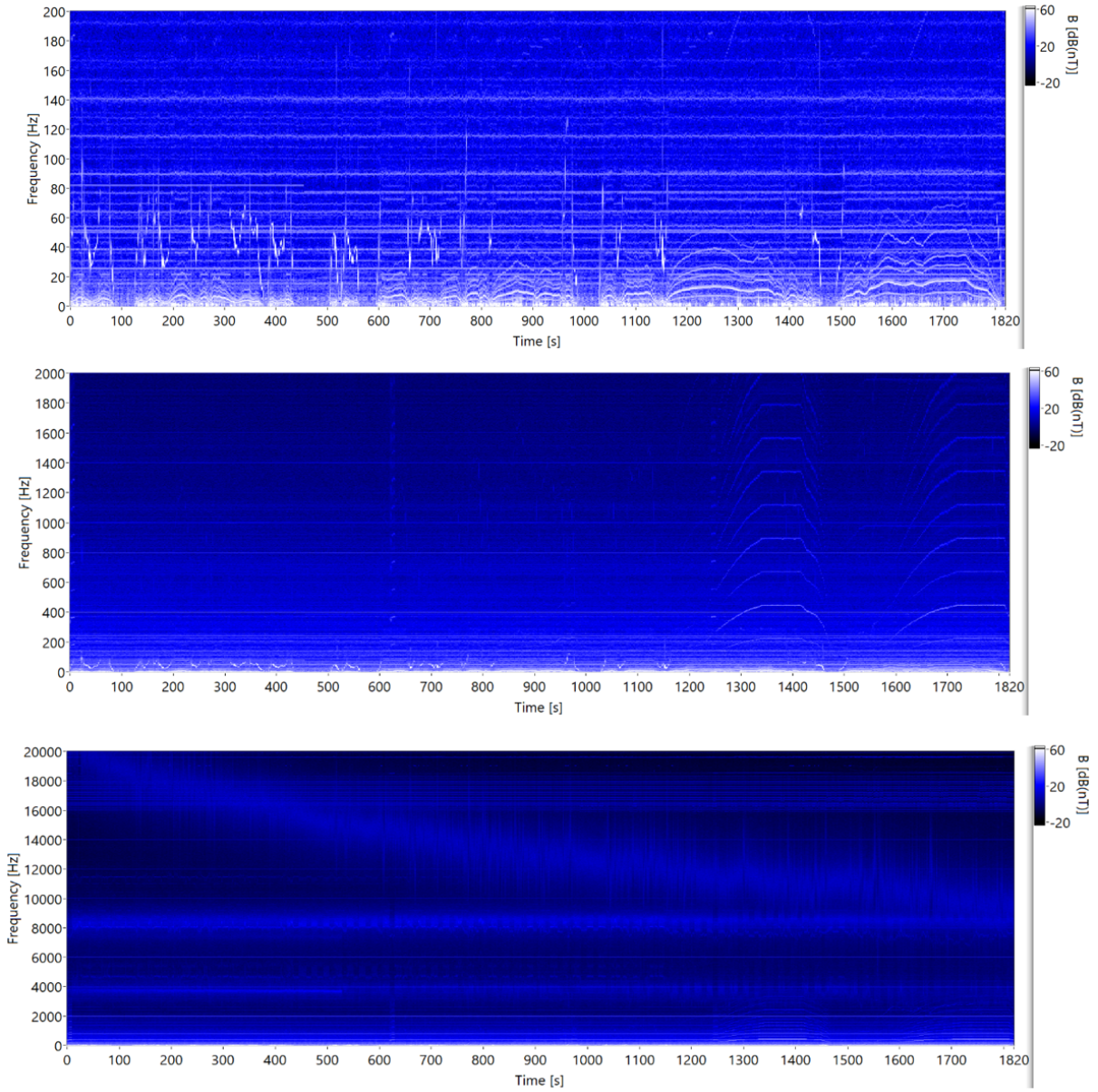


Abbildung 9.48: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Tesla Model 3 am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 - 20 kHz).

Abbildung 9.50 und Abbildung 9.51 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.52 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

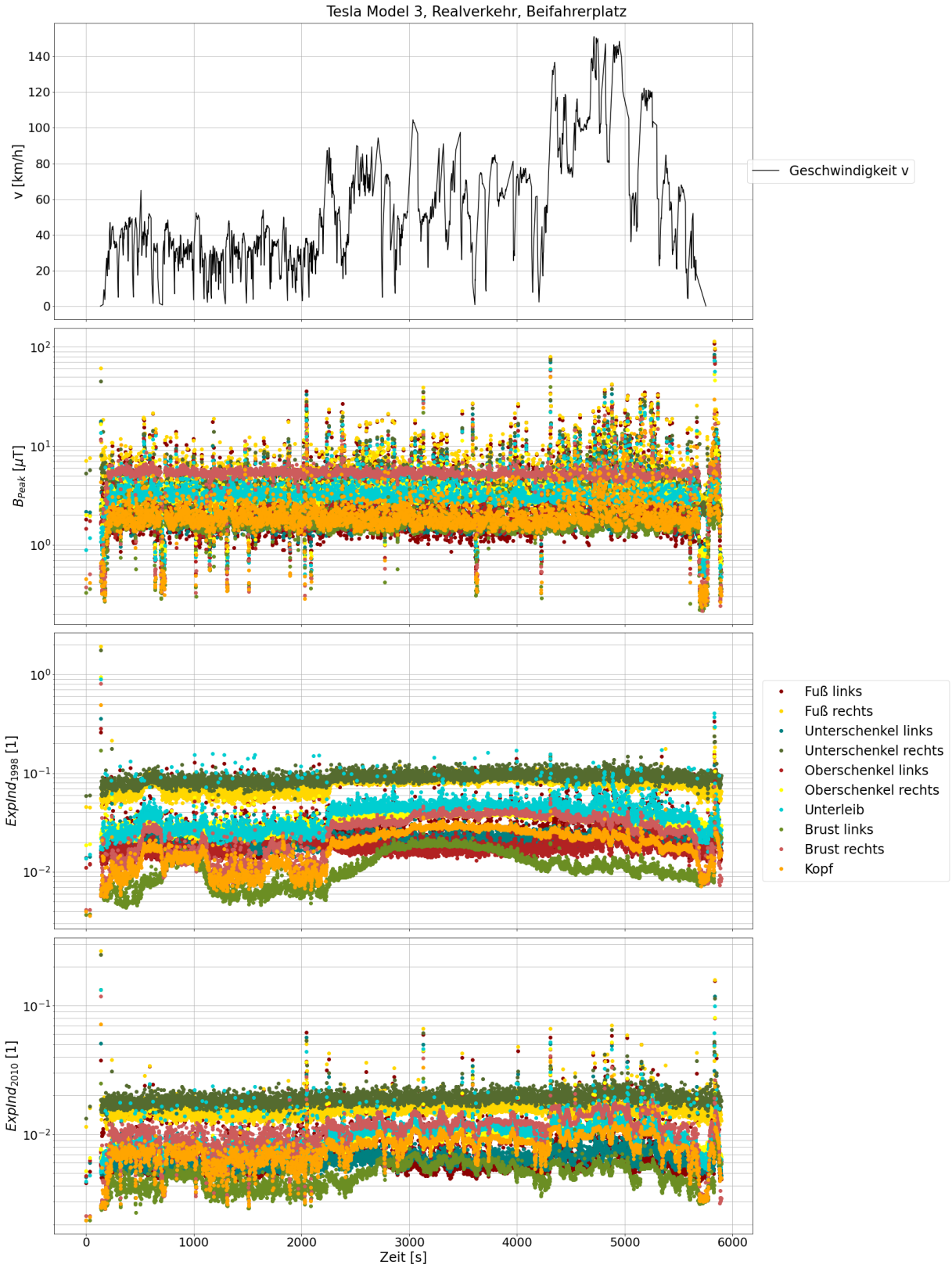


Abbildung 9.49: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

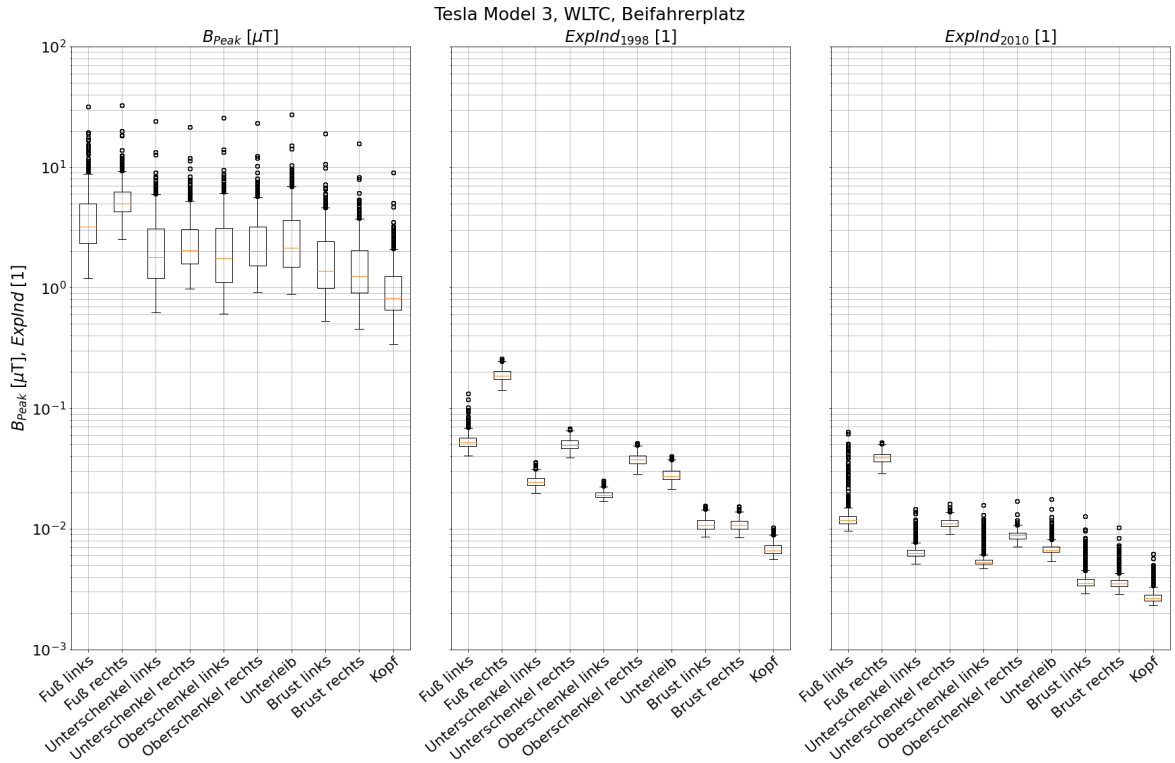


Abbildung 9.50: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

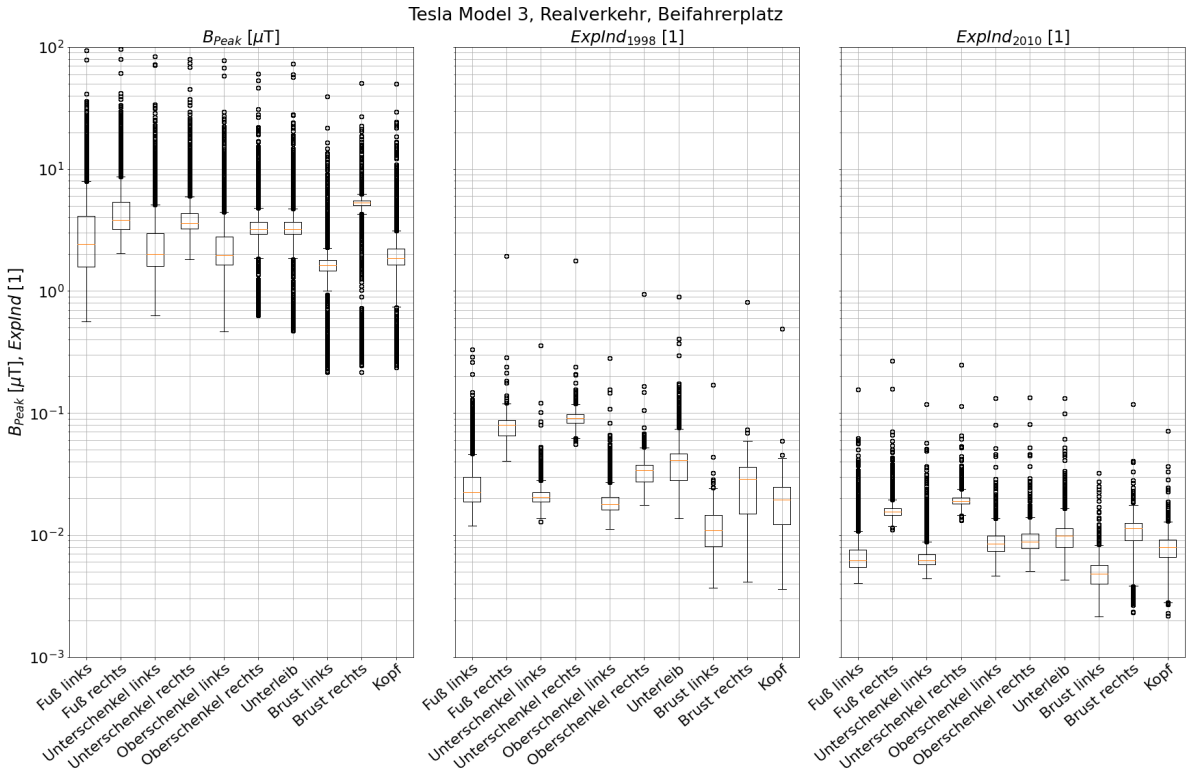


Abbildung 9.51: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

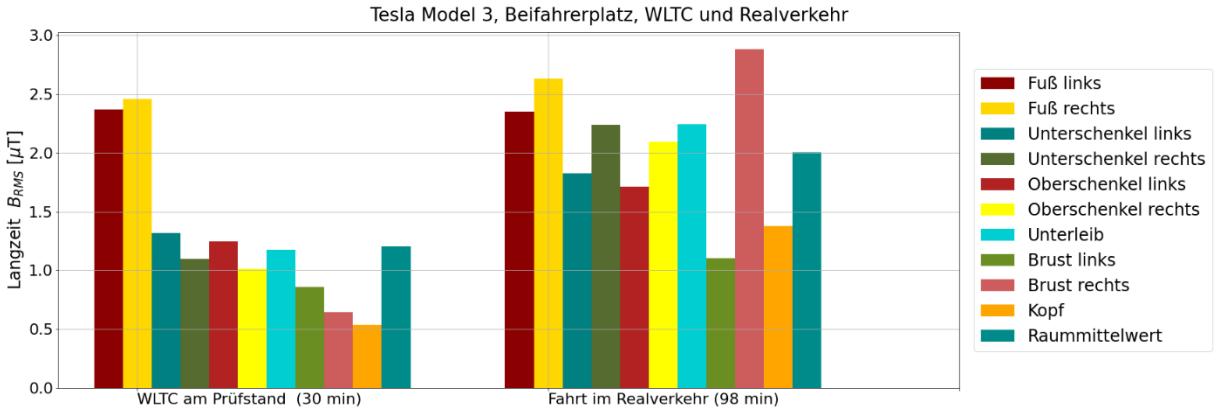


Abbildung 9.52: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.2.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten ExpInd$_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs (ExpInd$_{1998}$ von bis zu ca. 7.0 im Bereich des rechten Fußes am Beifahrerplatz) und beim Betätigen des Bremspedals im Stillstand (ExpInd$_{1998}$ von bis zu ca. 2.6 im Bereich des rechten Fußes am Beifahrerplatz) auf. Abbildung 9.53 und Abbildung 9.54 zeigen die zugehörigen Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte.

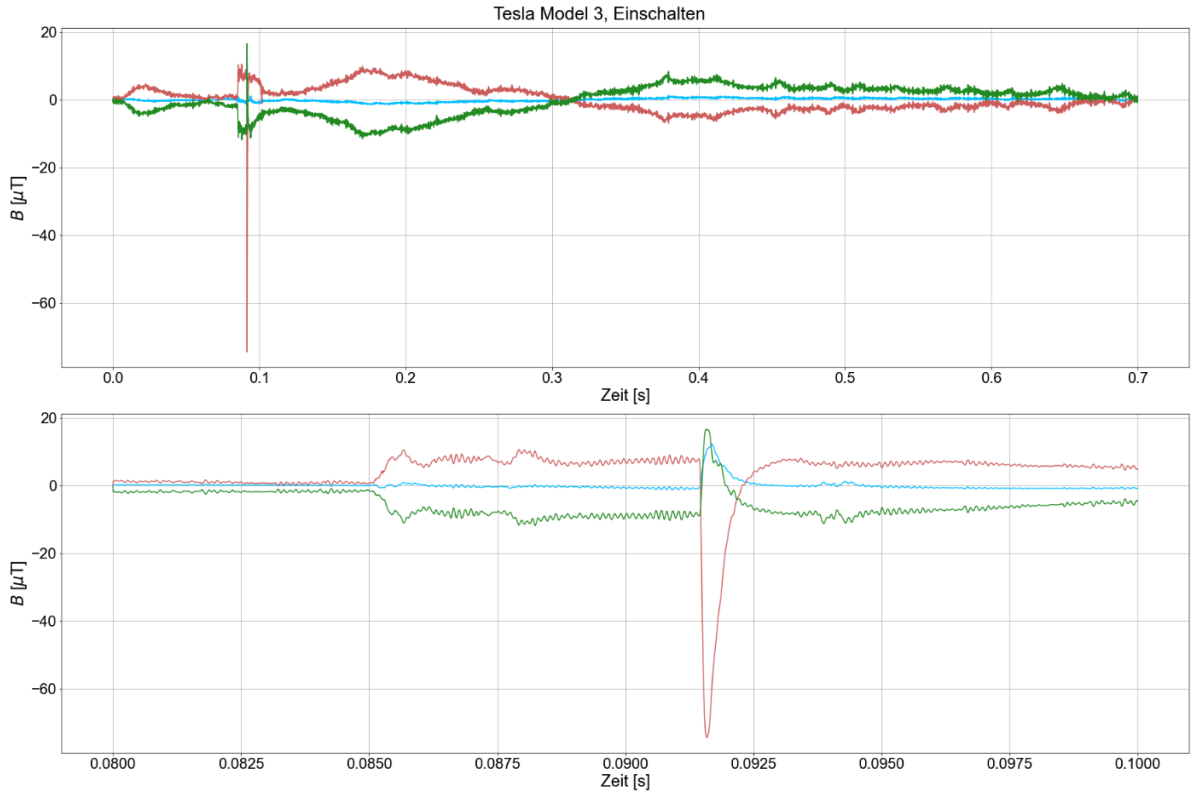


Abbildung 9.53: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im rechten Fußbereich des Beifahrerplatzes.

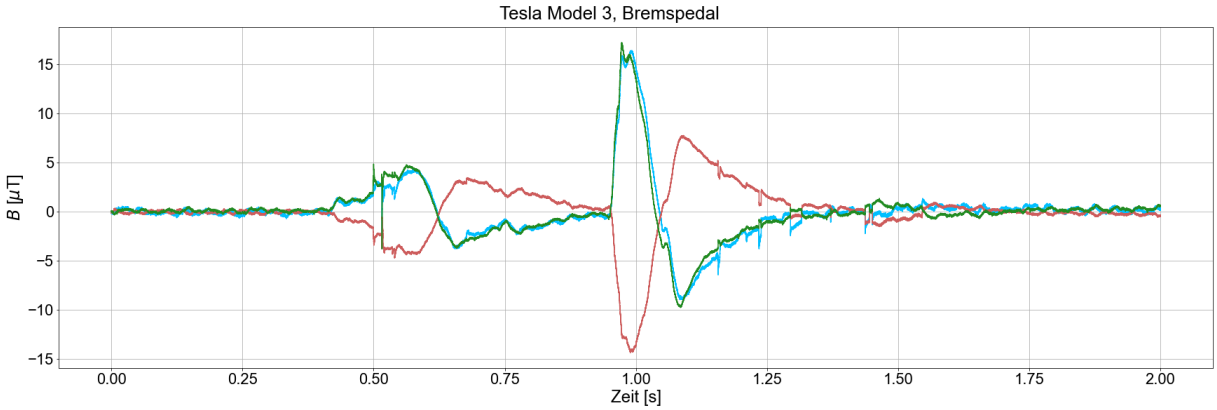


Abbildung 9.54: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Betätigen des Bremspedals im Stillstand, gemessen im rechten Fußbereich des Beifahrerplatzes.

Abbildung 9.55 bis Abbildung 9.57 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen zufolge des Lüfters (Klimaanlage), der Sitzheizung, der Beleuchtung, der Fensterheber, der Betätigung des Bremspedals im Stillstand sowie beim Aufschließen bzw. Einschalten des Fahrzeugs in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

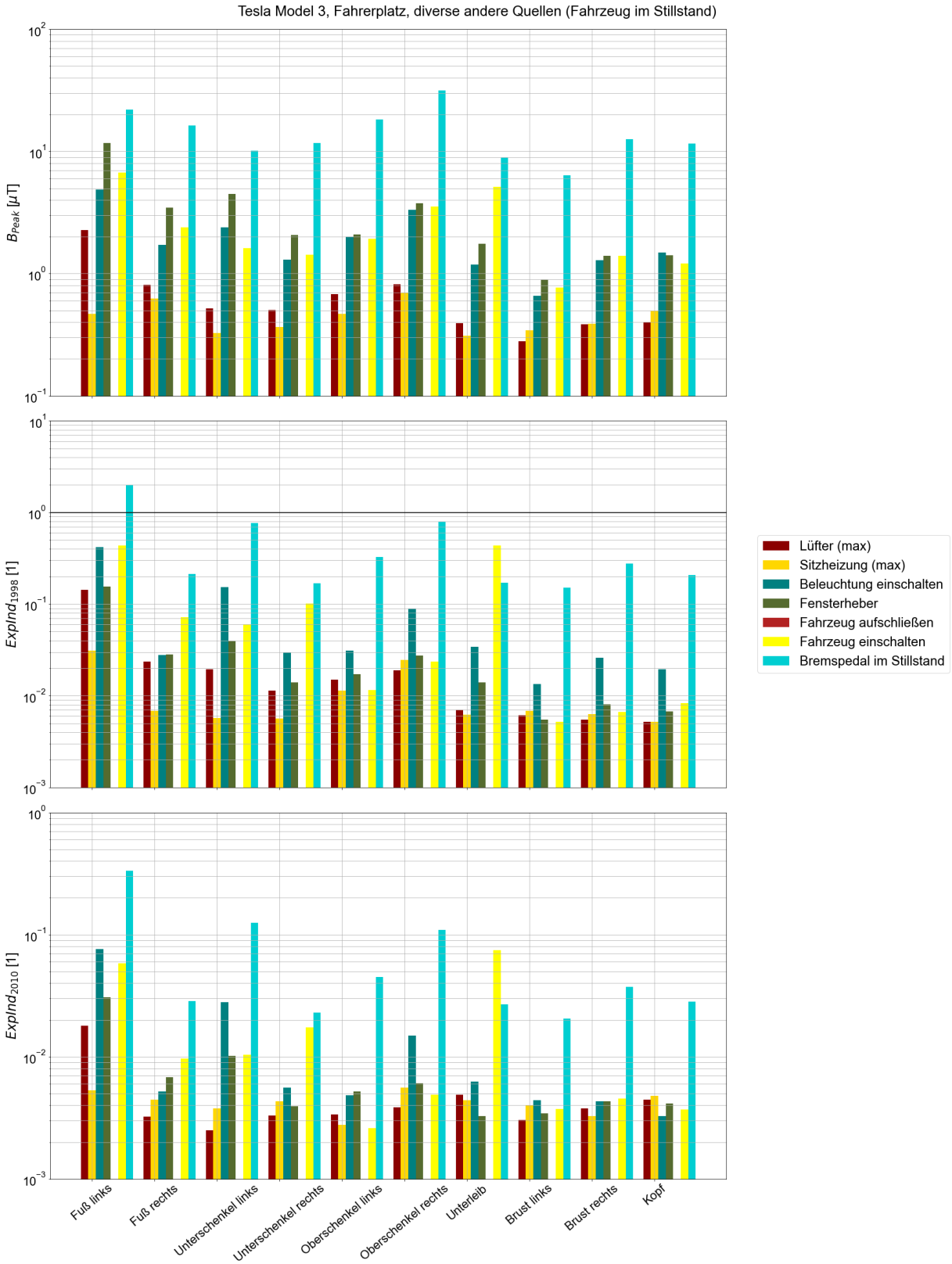


Abbildung 9.55: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Fahrzeug aufschließen wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

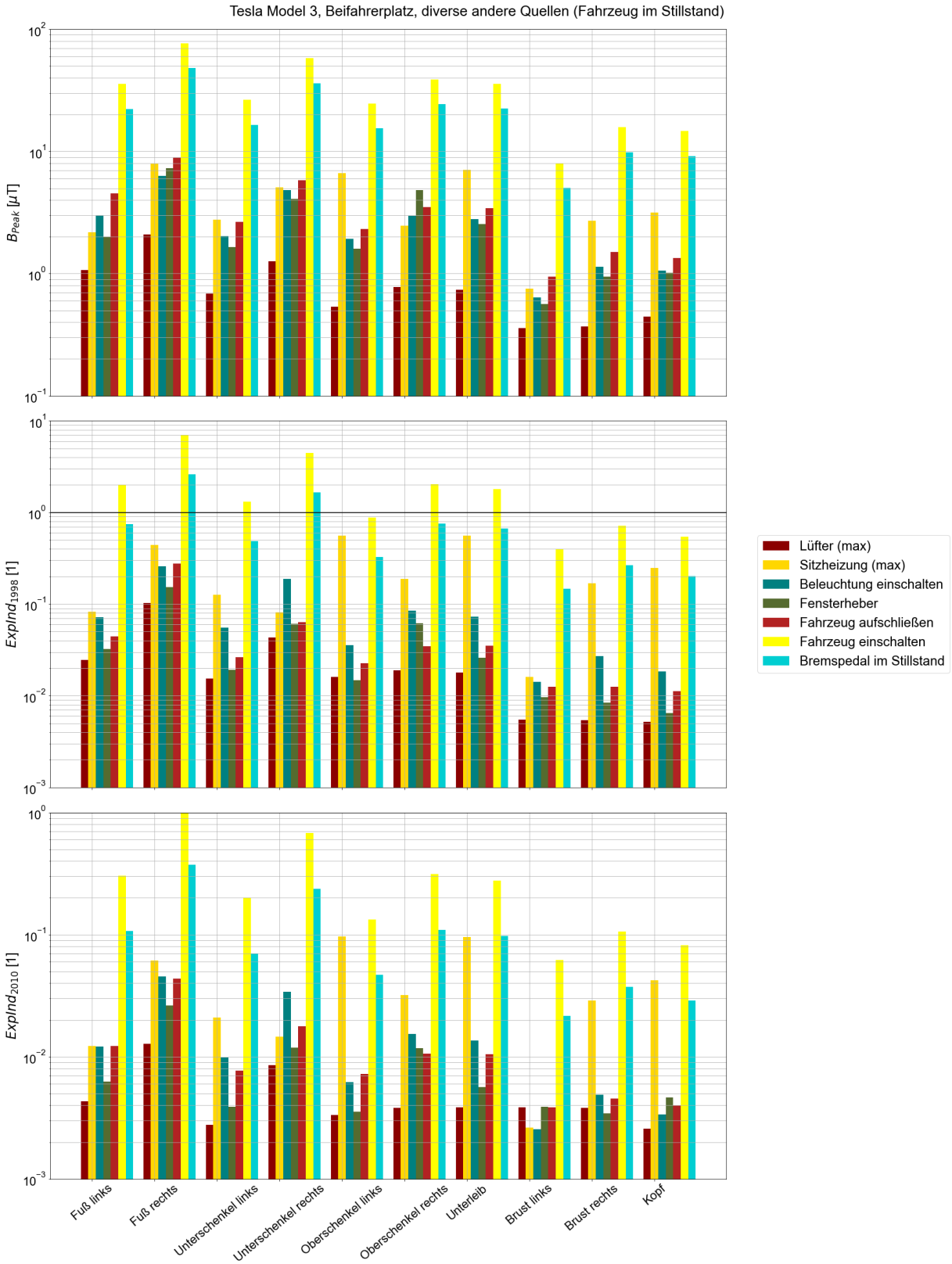


Abbildung 9.56: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

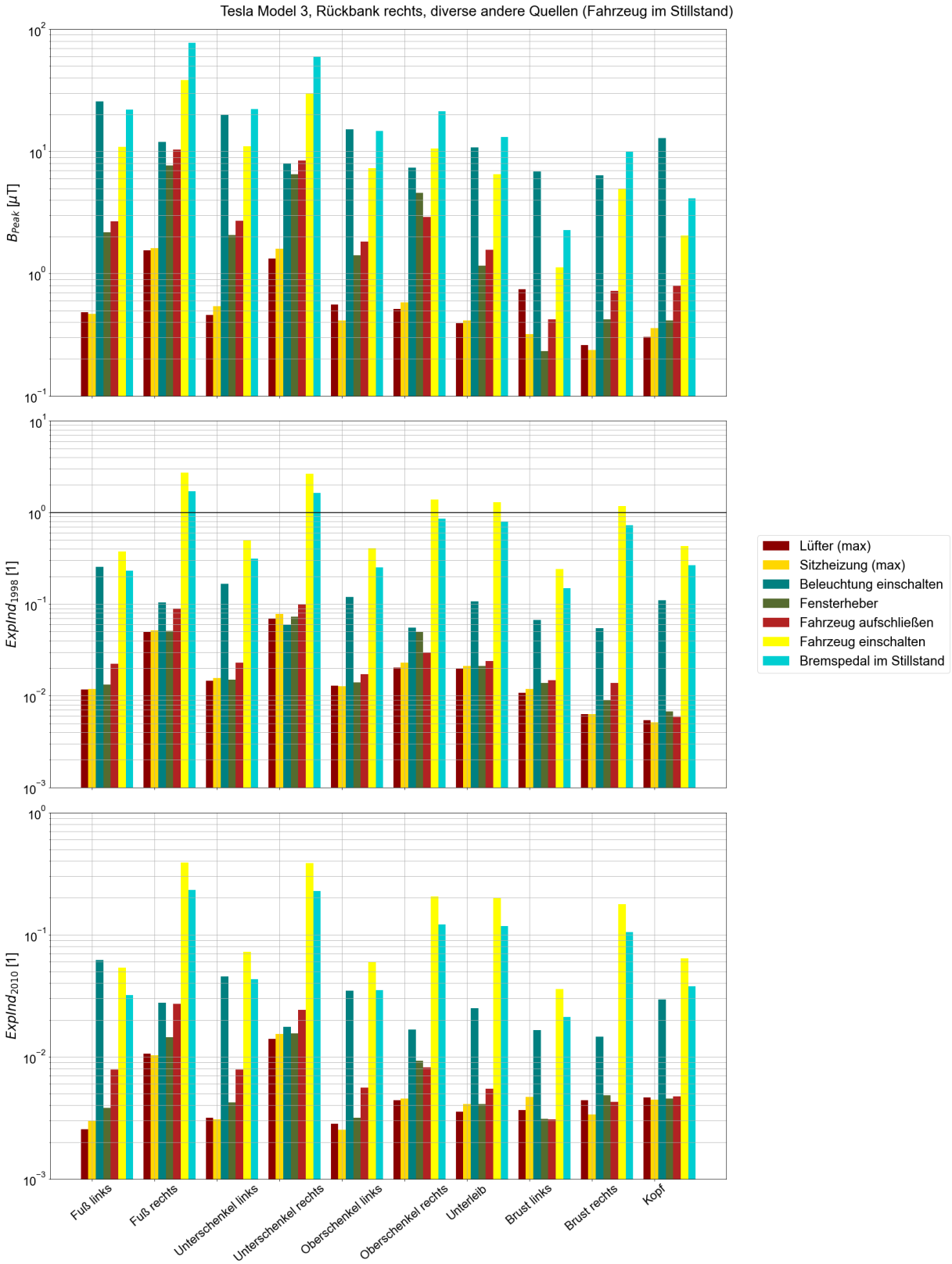


Abbildung 9.57: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

9.4.3 BMW i3



Abbildung 9.58: Untersuchter BMW i3 auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.3.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: BMW i3

Baujahr: 2020

Motorleistung: 135 kW

Batteriekapazität: 42 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.58 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.59).

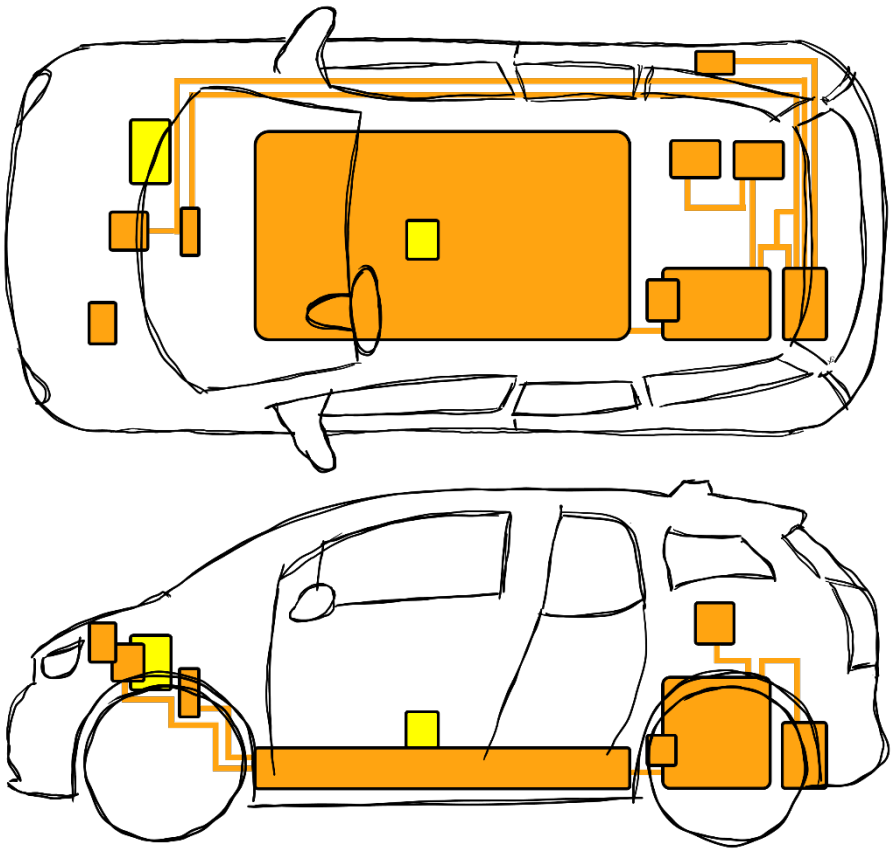


Abbildung 9.59: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im BMW i3 (modifiziert nach https://rettungskarten-service.de/wp-content/uploads/bmw-i3-i03-kombilimousine-baujahr-ab-112015.pdf).

9.4.3.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.60 bis Abbildung 9.65 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.60 bis Abbildung 9.62) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im Unterleibsbereich auf der Rückbank im Ausmaß von ca. 0.11 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Der Anteil der Reifenmagnetisierung betrug dort weniger als 0.01. Im Fußbereich von Fahrer und Beifahrerplatz hingegen betrug der Anteil der Reifenmagnetisierung am $ExpInd_{1998}$ bis zu 0.03 (linker Fuß am Fahrerplatz) bzw. bis zu 0.04 (rechter Fuß am Beifahrerplatz), jeweils bei 120 km/h.

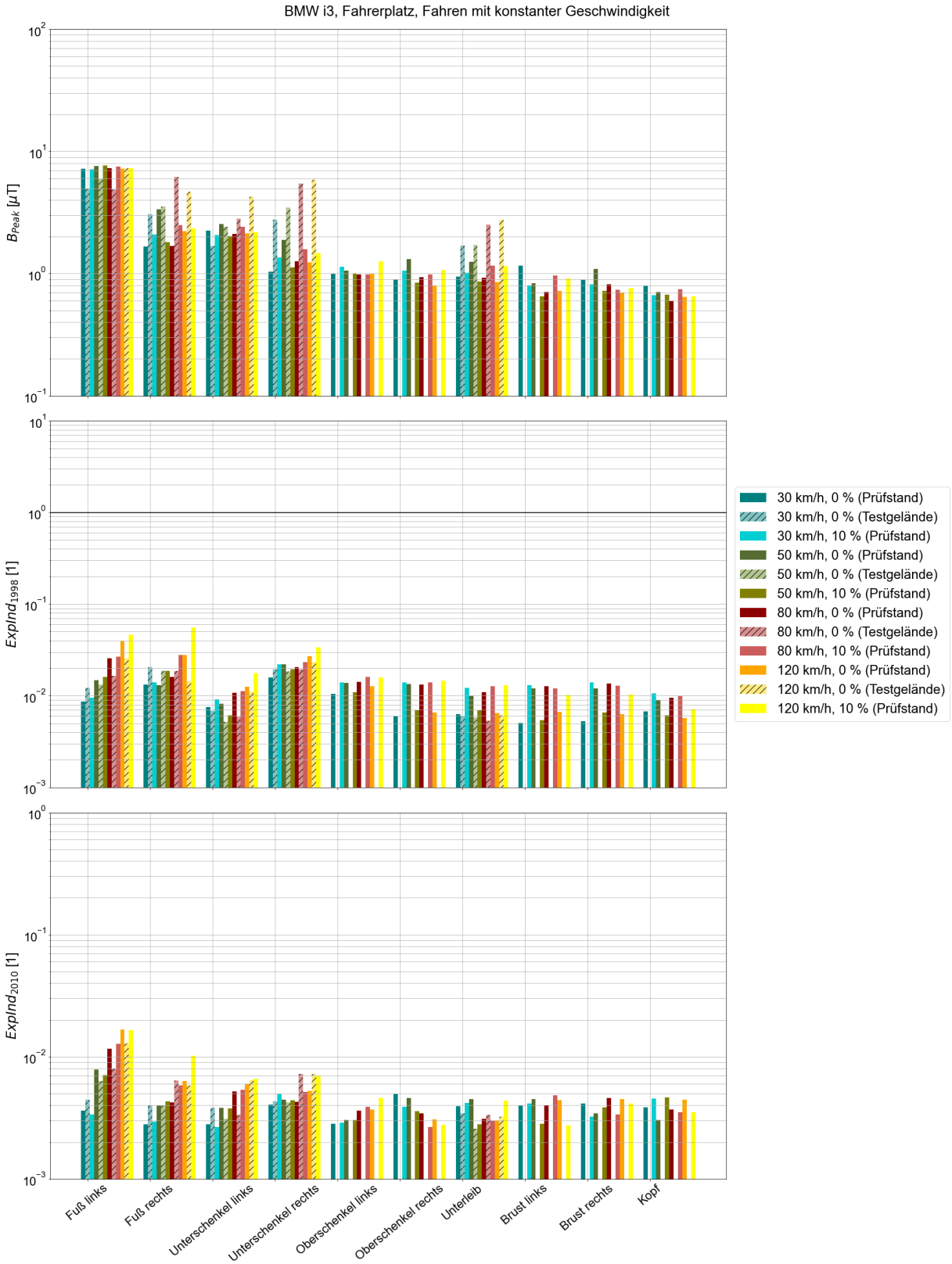


Abbildung 9.60: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

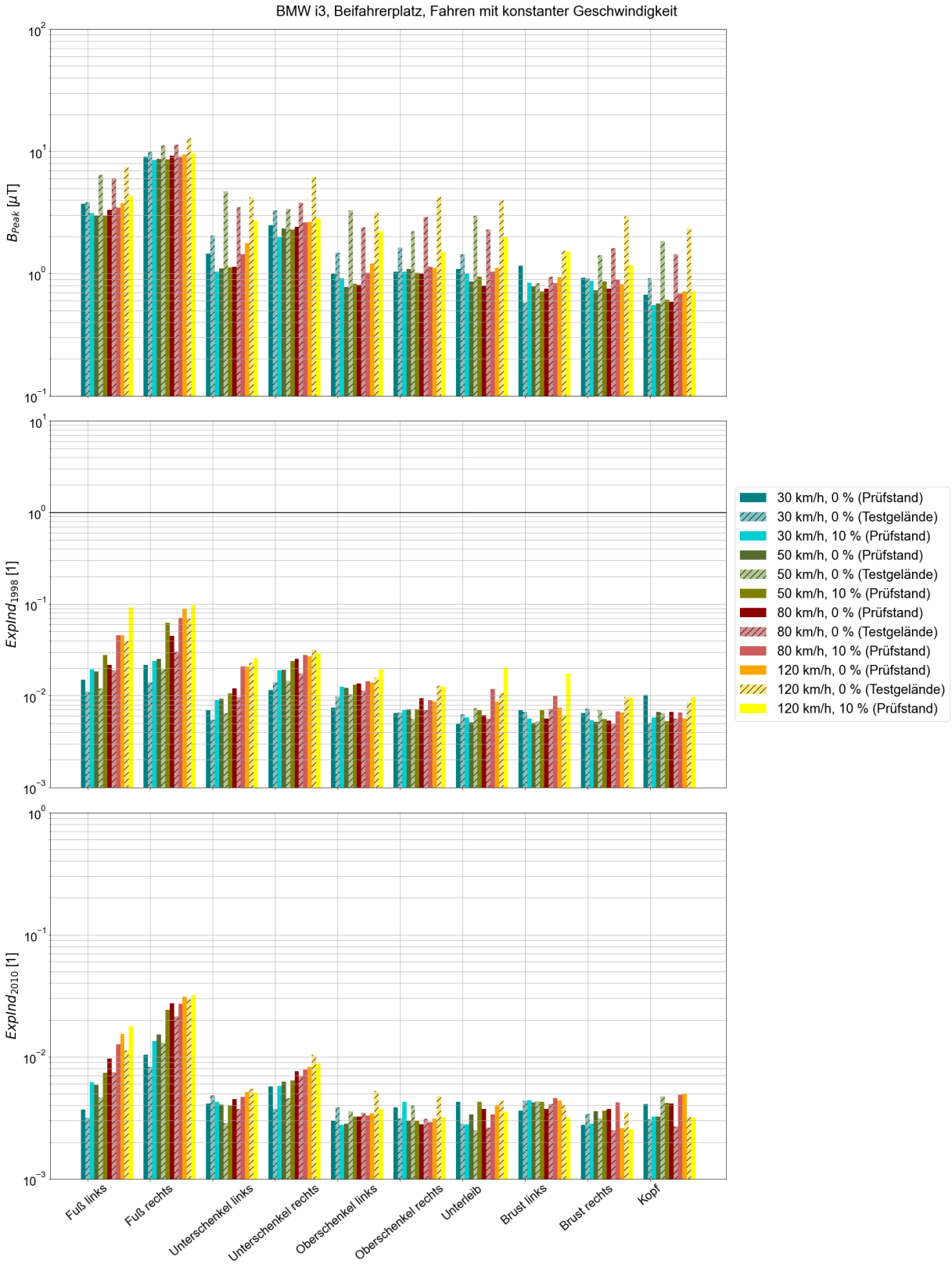


Abbildung 9.61: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

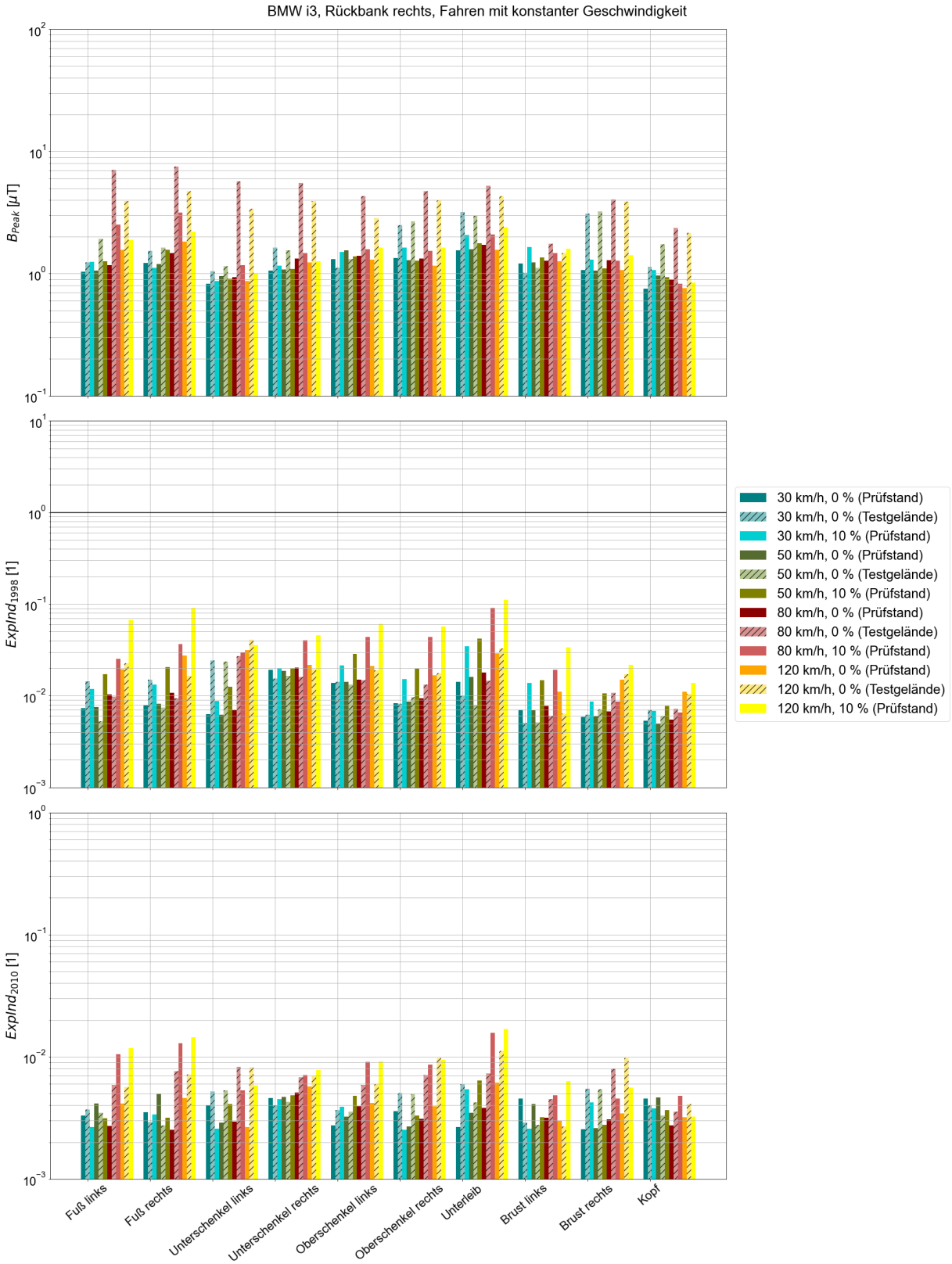


Abbildung 9.62: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

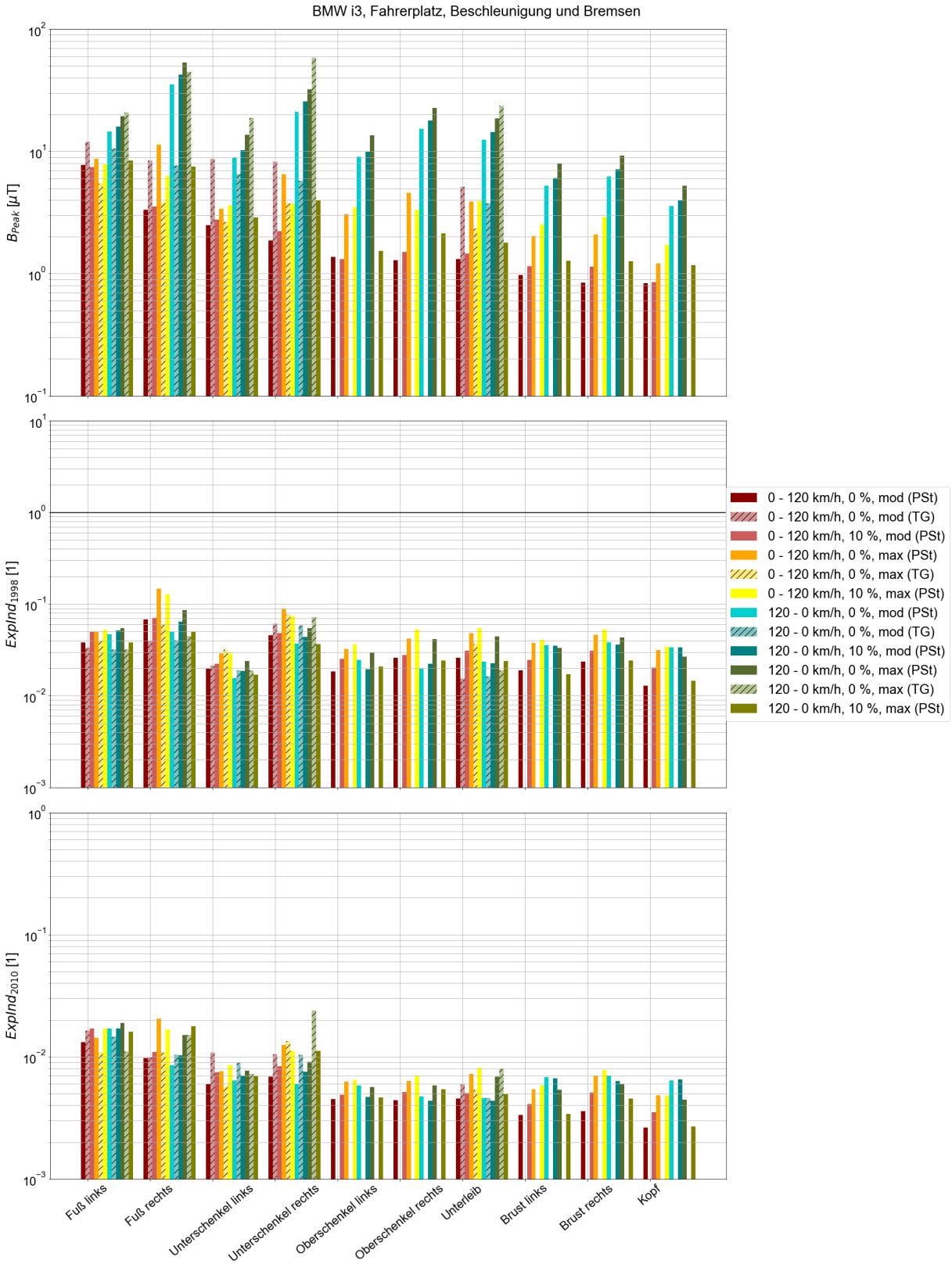


Abbildung 9.63: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

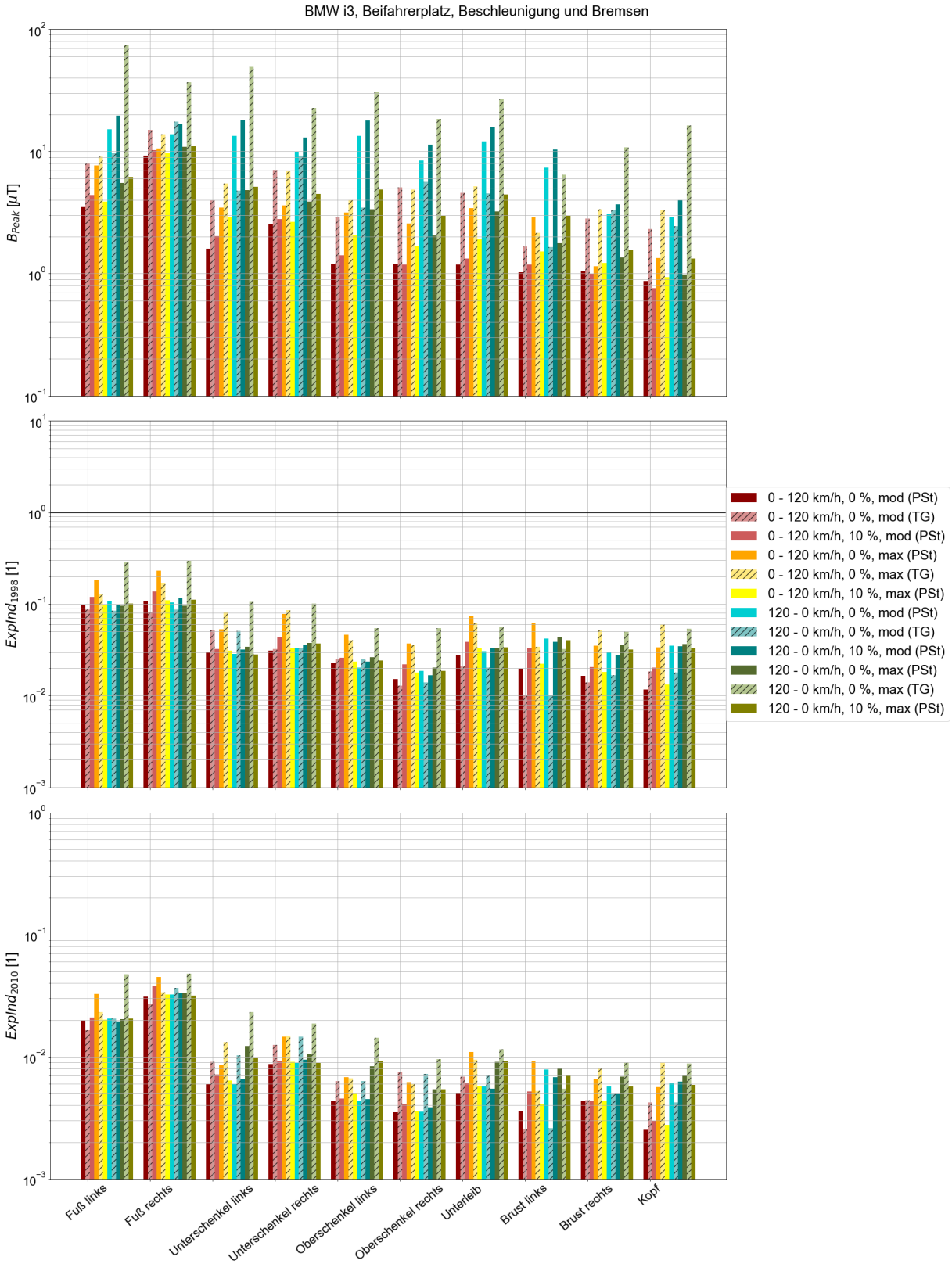


Abbildung 9.64: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

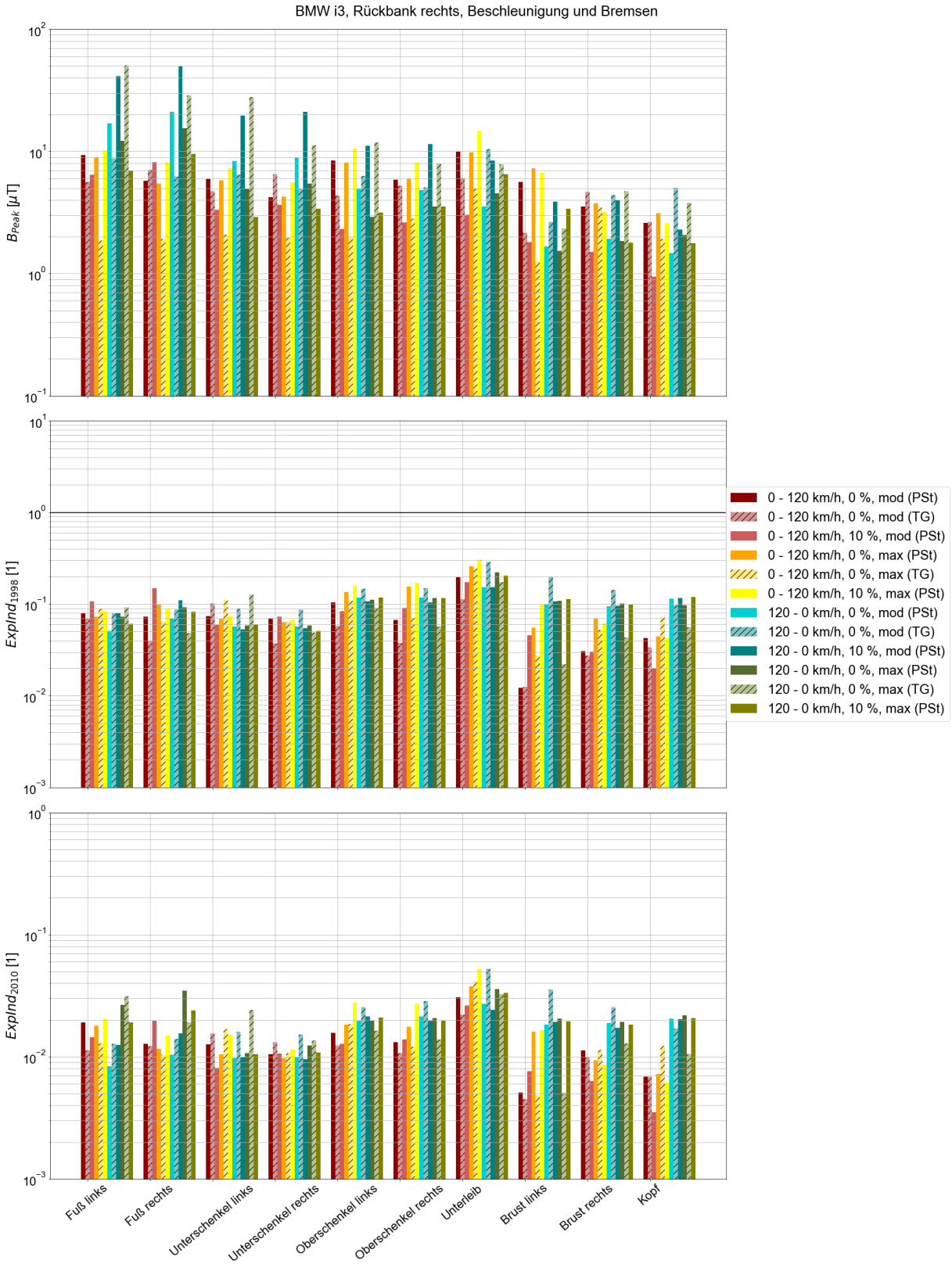


Abbildung 9.65: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.63 bis Abbildung 9.65) zeigten sich deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit. Die größten $ExpInd_{1998}$ wurden wieder im Unterleibsbereich auf der Rückbank gefunden und lagen bei ca. 0.3. Abbildung 9.66 und Abbildung 9.67 zeigen gemessene transiente Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte während des Beschleunigens und des Bremsens.

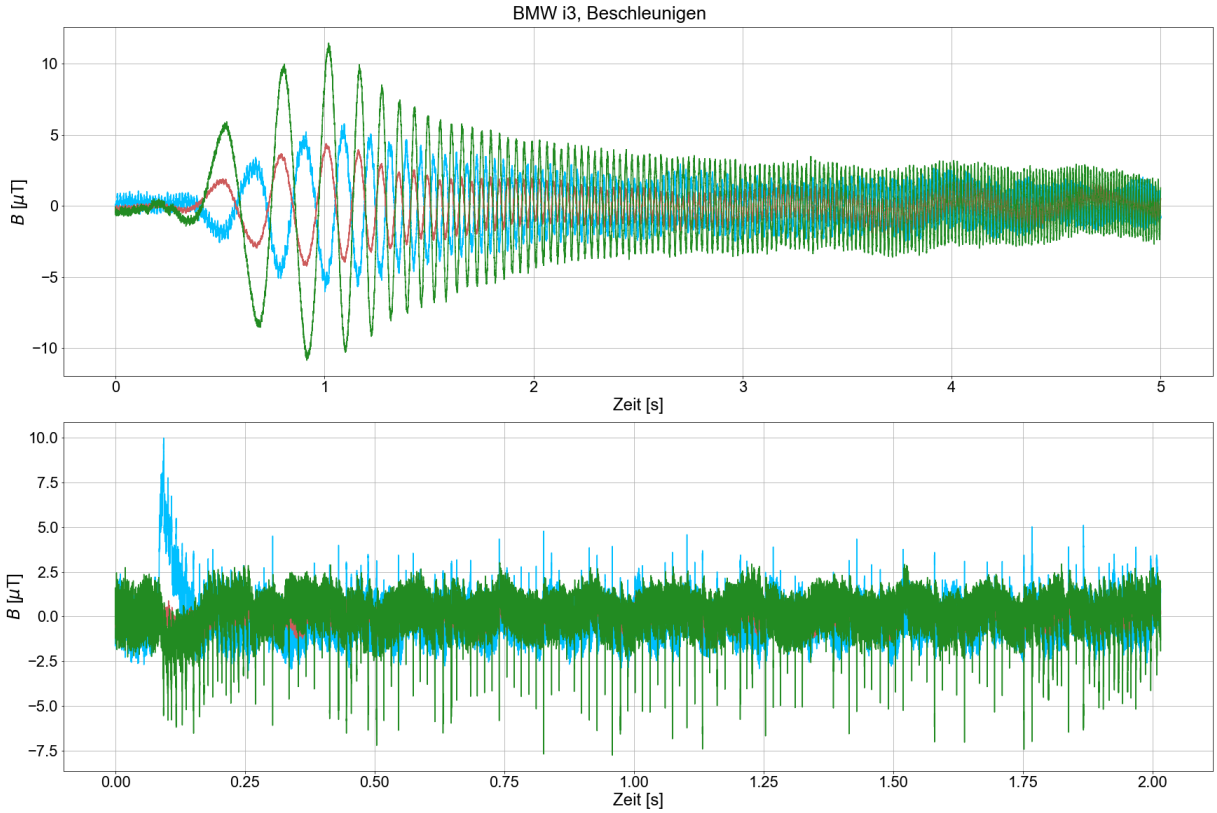


Abbildung 9.66: Verlauf der magnetischen Flussdichte während eines Beschleunigungsvorganges, gemessen im Unterleibsbereich der Rückbank (rechter Sitzplatz). Oben: Beginn des Beschleunigungsvorganges; unten: Endphase des Beschleunigungsvorganges, in der nach einem transienten Vorgang (links im Bild) deutliche „Spikes“ auftreten.

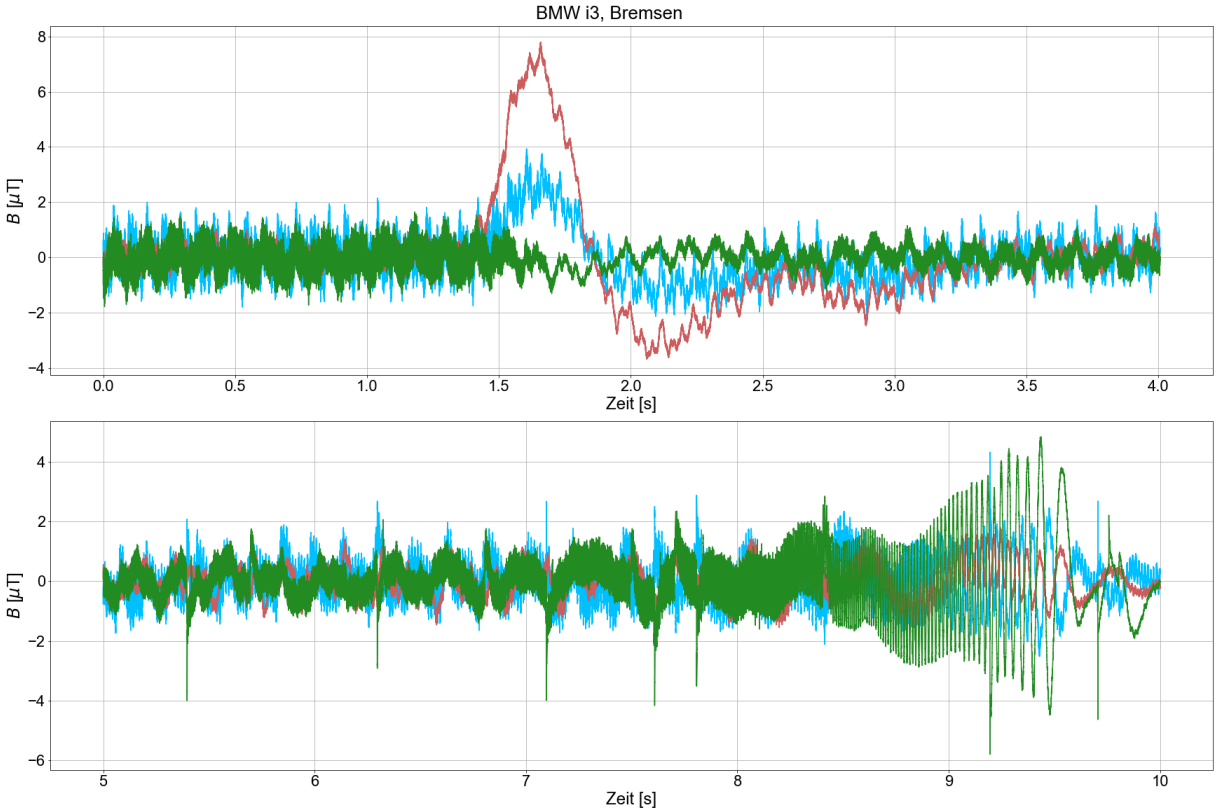


Abbildung 9.67: Verlauf der magnetischen Flussdichte während eines Bremsvorganges, gemessen im Unterleibsbereich der Rückbank (rechter Sitzplatz). Oben: Beginn des Bremsvorganges (Betätigung des Bremspedals); unten: Endphase des Bremsvorganges bis zum Stillstand.

9.4.3.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.68 und Abbildung 9.70 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ auf der Rückbank (rechts) über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer. Auffällig dabei ist, dass die im Unterleibsbereich auf der Rückbank auftretenden maximalen Expositionsindizes teilweise bis zu ca. einen Faktor 1.6 größer waren als bei den systematischen Messungen am Prüfstand und am Testgelände gemessen. Den Grund dafür bilden „Spikes“ der magnetischen Flussdichte (Abbildung 9.71), die in dieser Phase während Brems- und Beschleunigungsmanövern mit größerer Amplitude als während der systematischen Messungen am Prüfstand und am Testgelände auftraten. Eine mögliche Erklärung für diesen Effekt könnten unterschiedliche Batterieladezustände und damit unterschiedlich stark ausgeprägte Rekuperationsverhalten sein, da das untersuchte Modell des BMW i3 auffällig starke Rekuperation zur Erzielung eines „One Pedal Drive“ Fahrmodus ermöglicht, welche bei hohem Batterieladezustand naturgemäß aber nicht ausgeschöpft werden kann.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.69 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

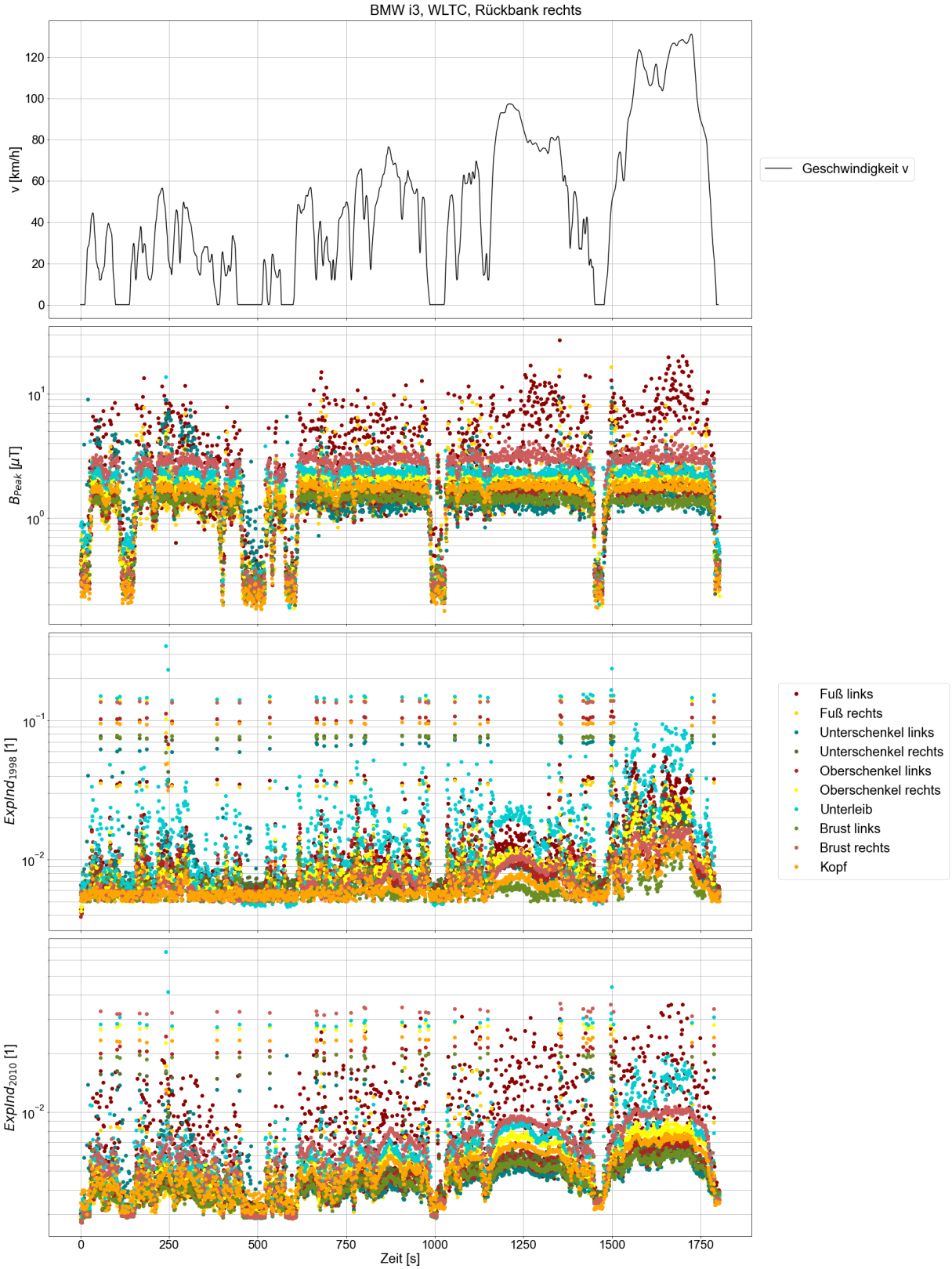


Abbildung 9.68: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

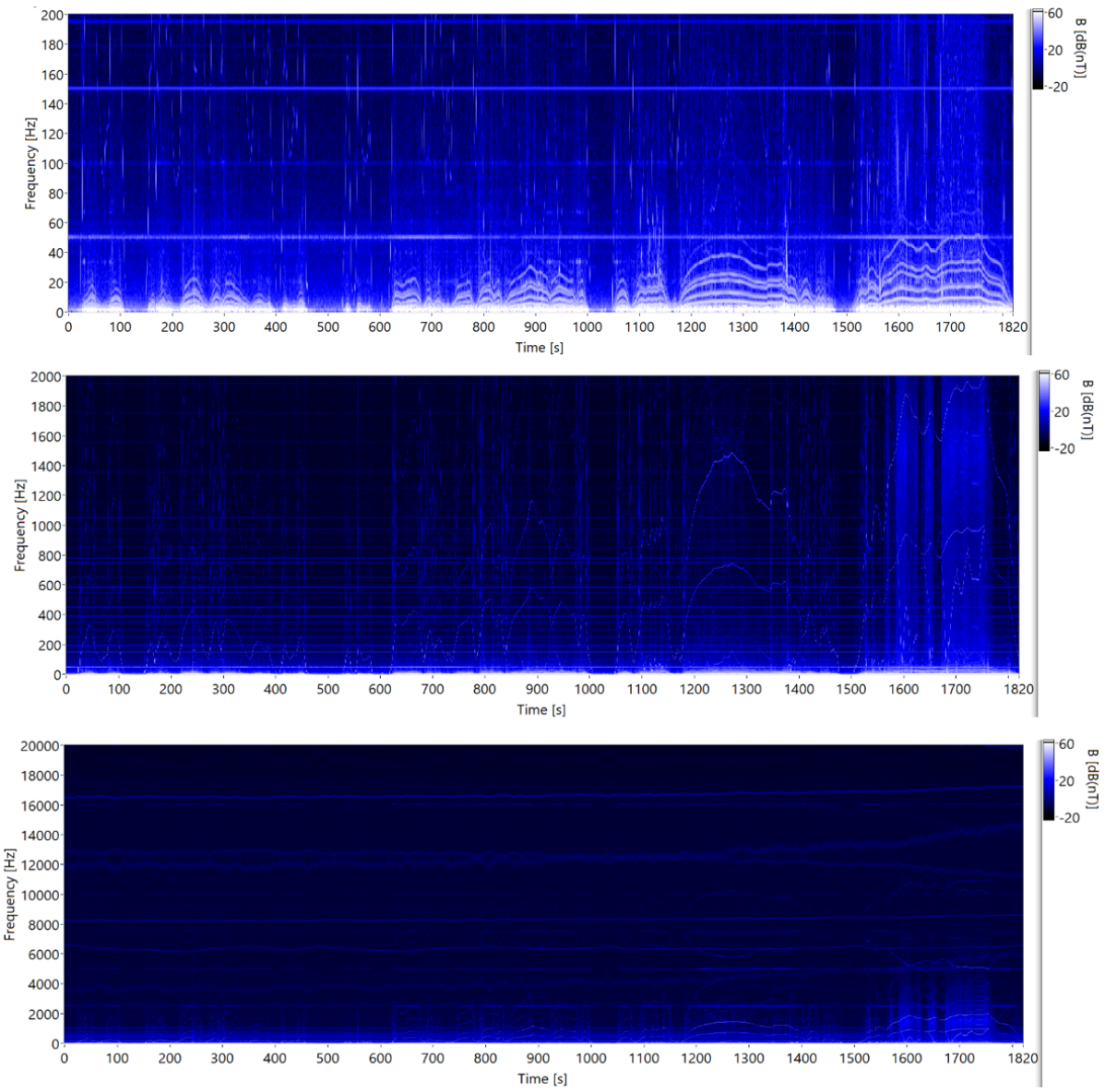


Abbildung 9.69: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im BMW i3 am rechten Sitzplatz der Rückbank in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

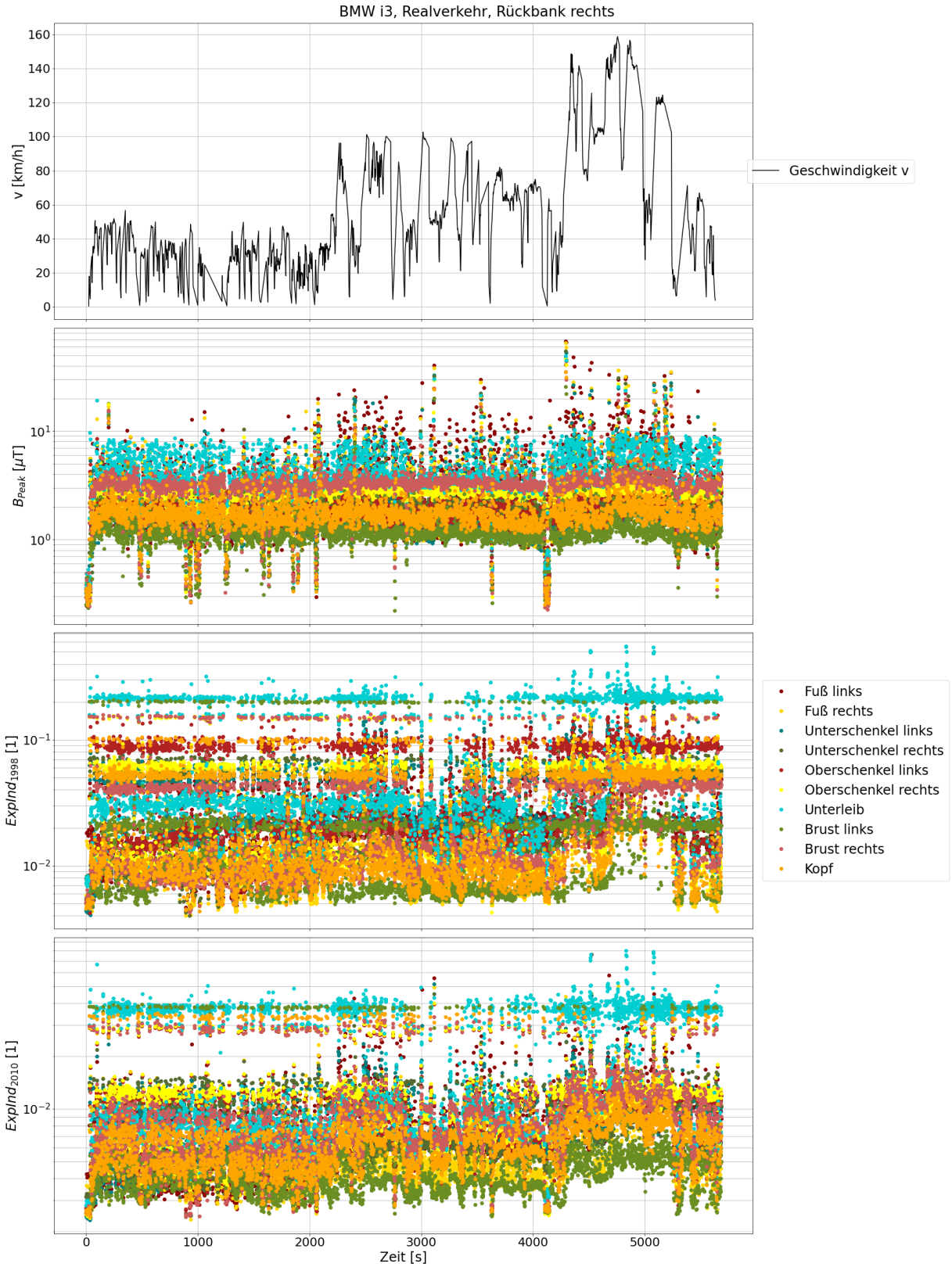


Abbildung 9.70: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

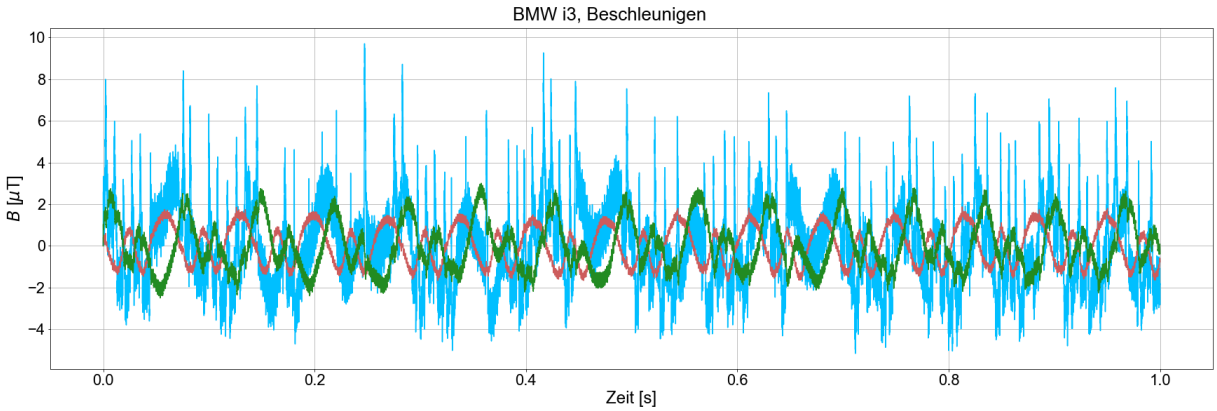


Abbildung 9.71: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte am Ende eines Beschleunigungsvorganges während der Fahrt im Realverkehr, gemessen im Unterleibsbereich der Rückbank (rechter Sitzplatz).

Abbildung 9.72 und Abbildung 9.73 zeigen statistische Auswertungen der Messergebnisse während des WLTC und der Fahrt im Realverkehr in Form von Boxplots.

Abbildung 9.74 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

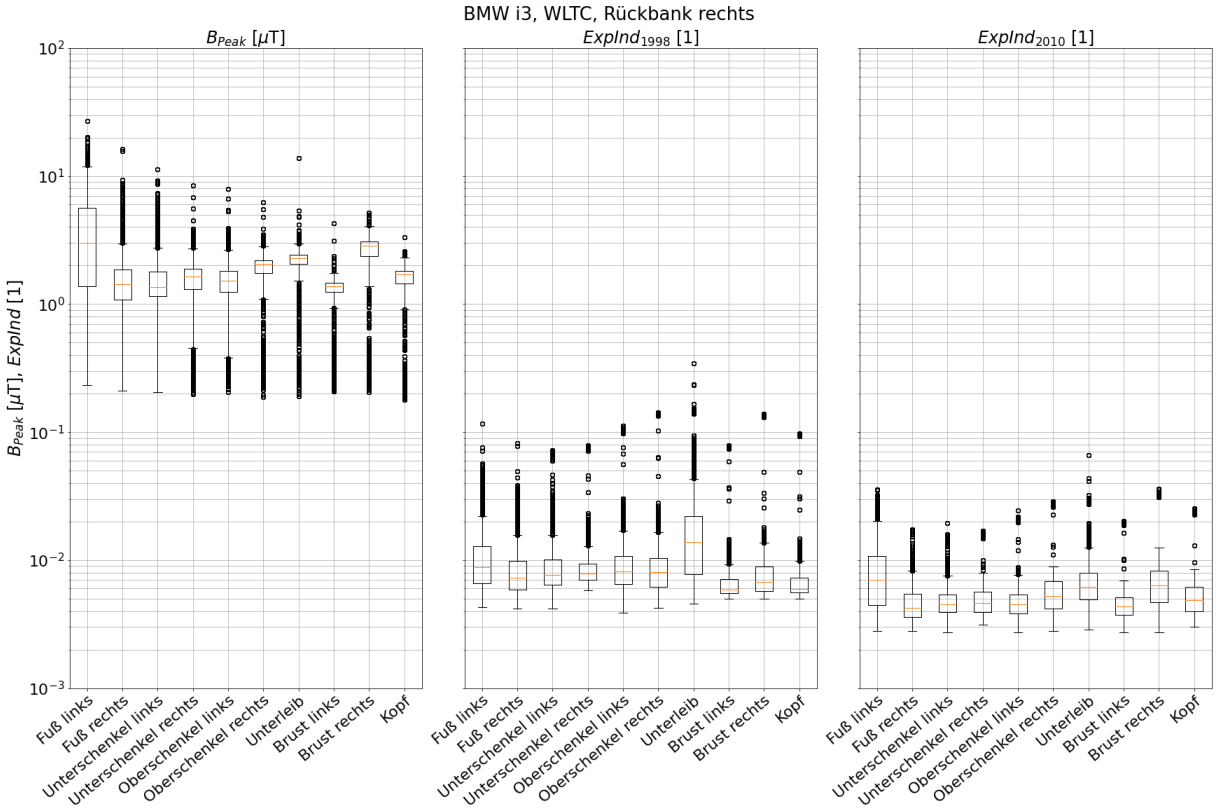


Abbildung 9.72: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

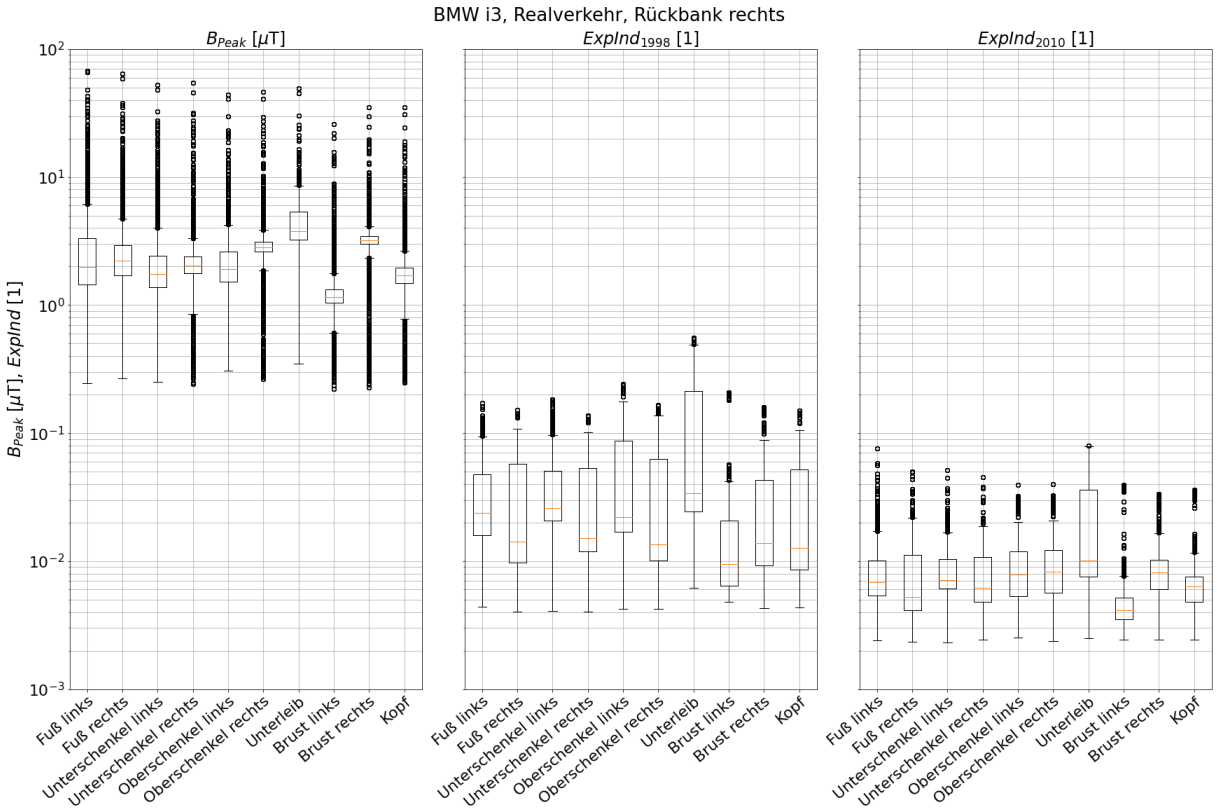


Abbildung 9.73: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

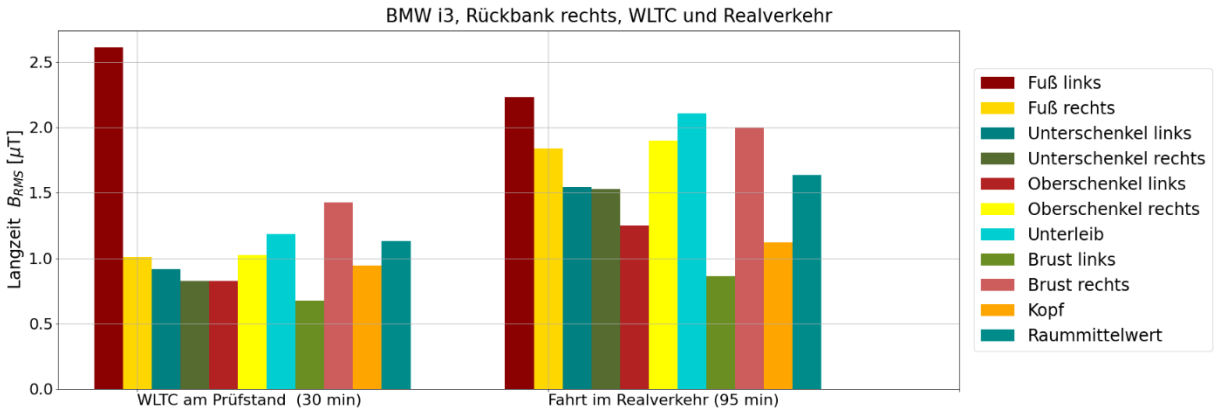


Abbildung 9.74: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.3.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten zufolge der Sitzheizung auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 0.56 im Unterleibsbereich am Beifahrerplatz). Abbildung 9.75 zeigt den zugehörigen Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte.

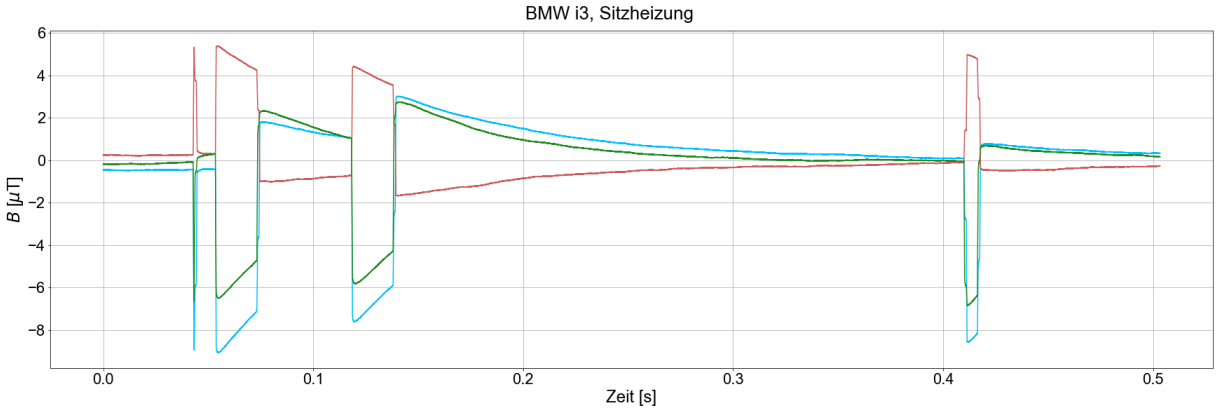


Abbildung 9.75: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte der Sitzheizung des Fahrzeugs, gemessen im Unterleibsbereich des Beifahrerplatzes.

Abbildung 9.76 bis Abbildung 9.78 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

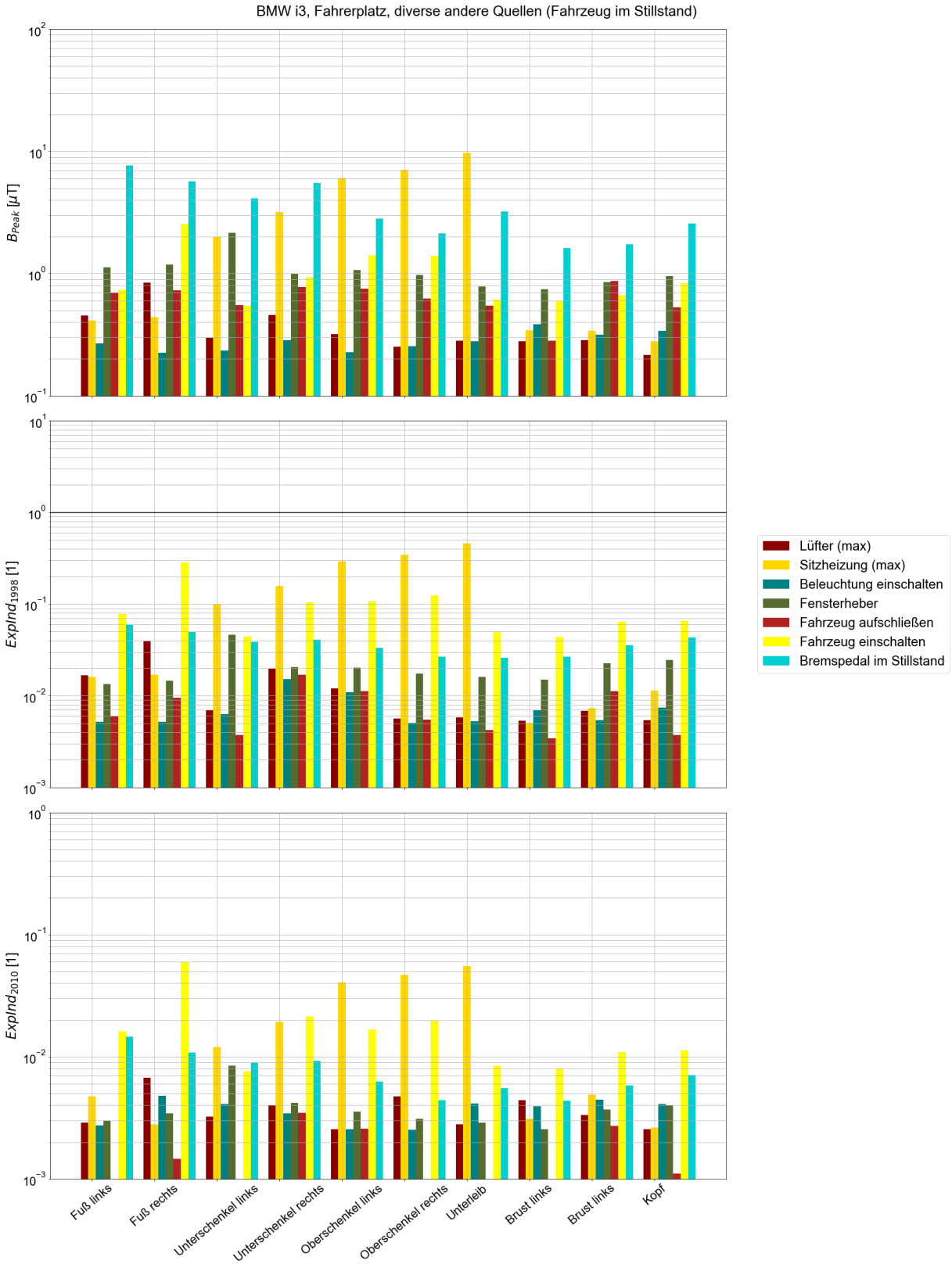


Abbildung 9.76: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

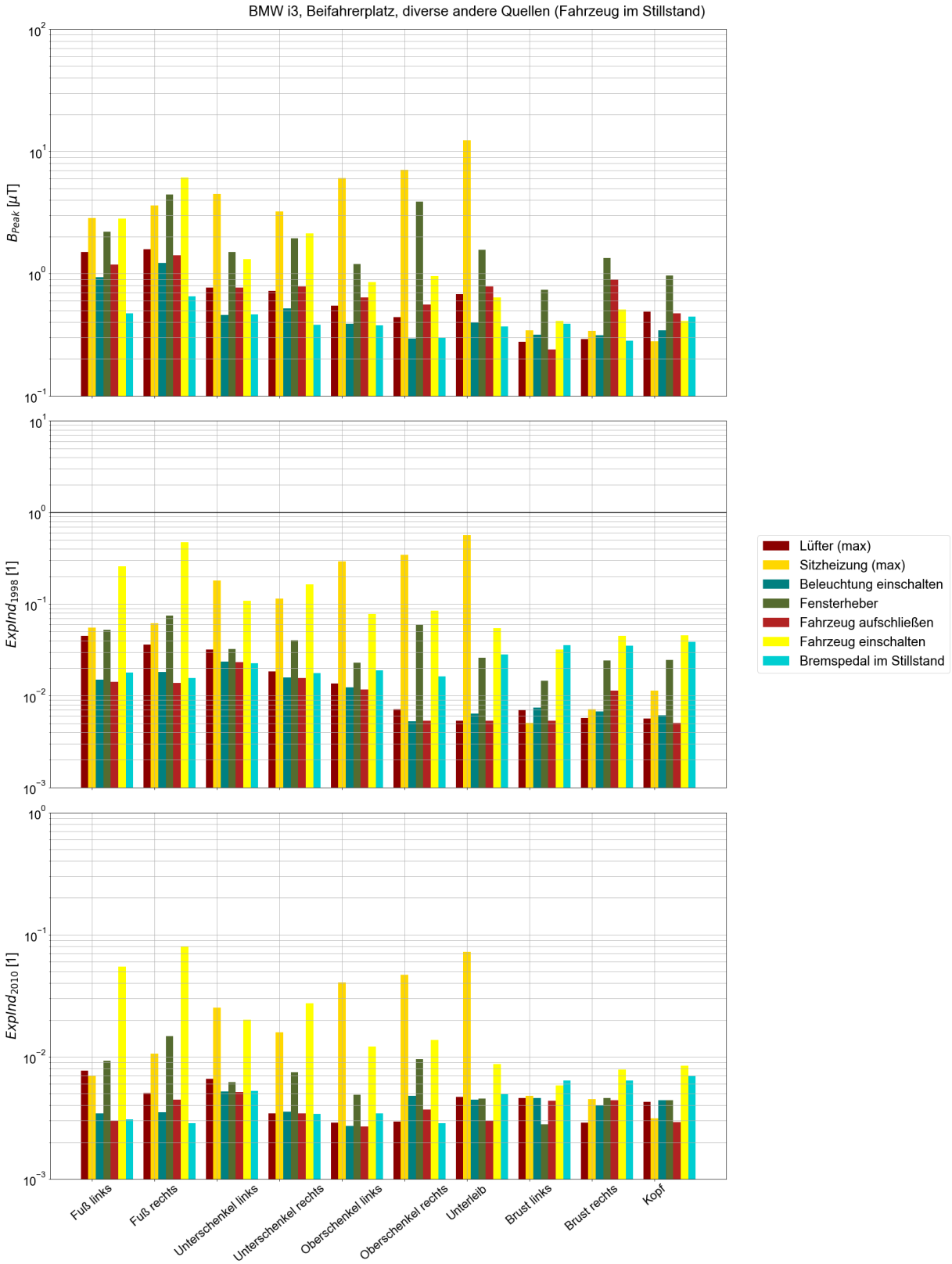


Abbildung 9.77: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

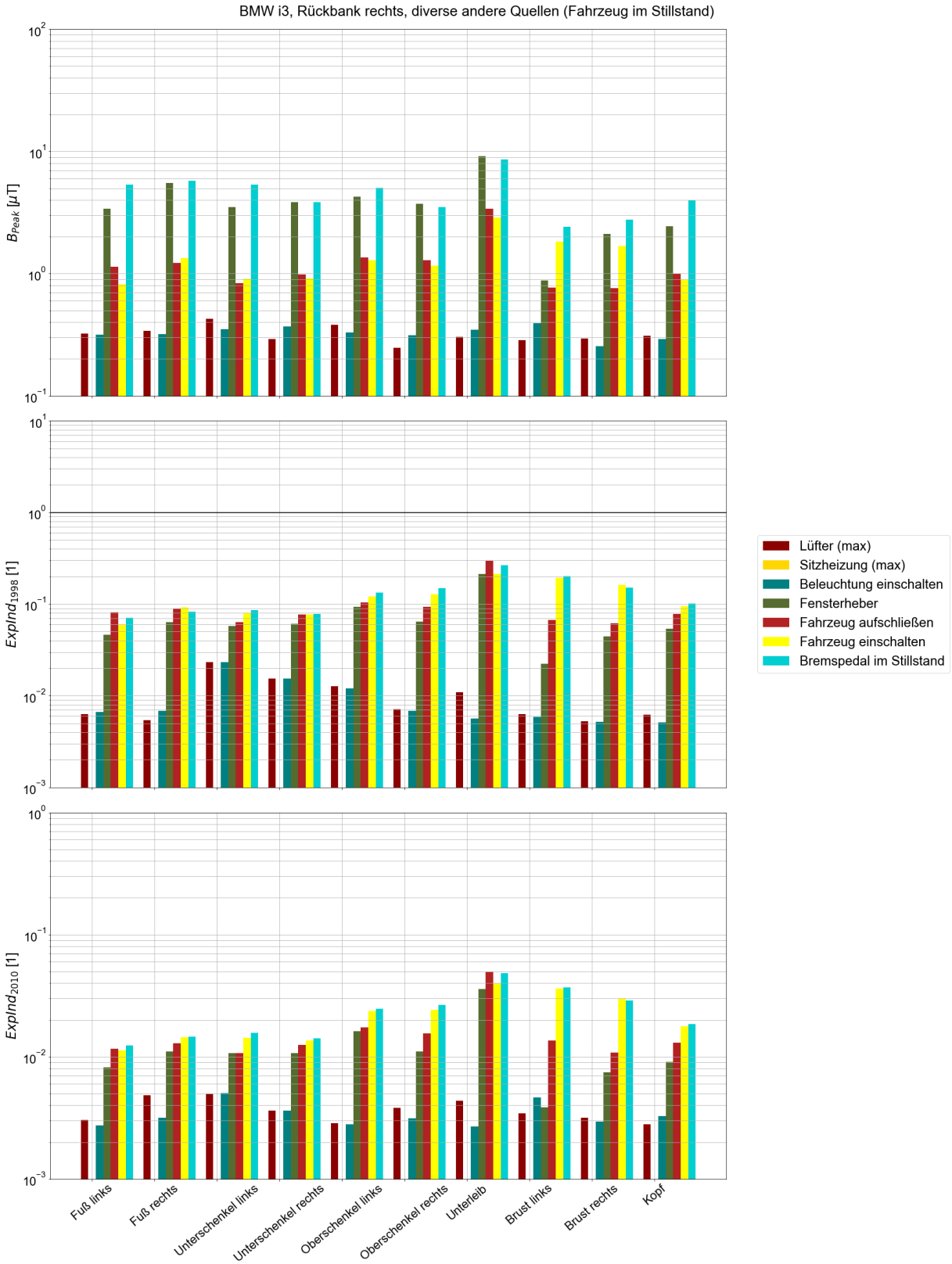


Abbildung 9.78: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Die Immission ausgehend von der Sitzheizung der Vordersitze wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

9.4.4 Volkswagen ID.3



Abbildung 9.79: Untersuchter Volkswagen ID.3 auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.4.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: VW ID.3

Baujahr: 2021

Motorleistung: 150 kW

Batteriekapazität: 77 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.79 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.80).

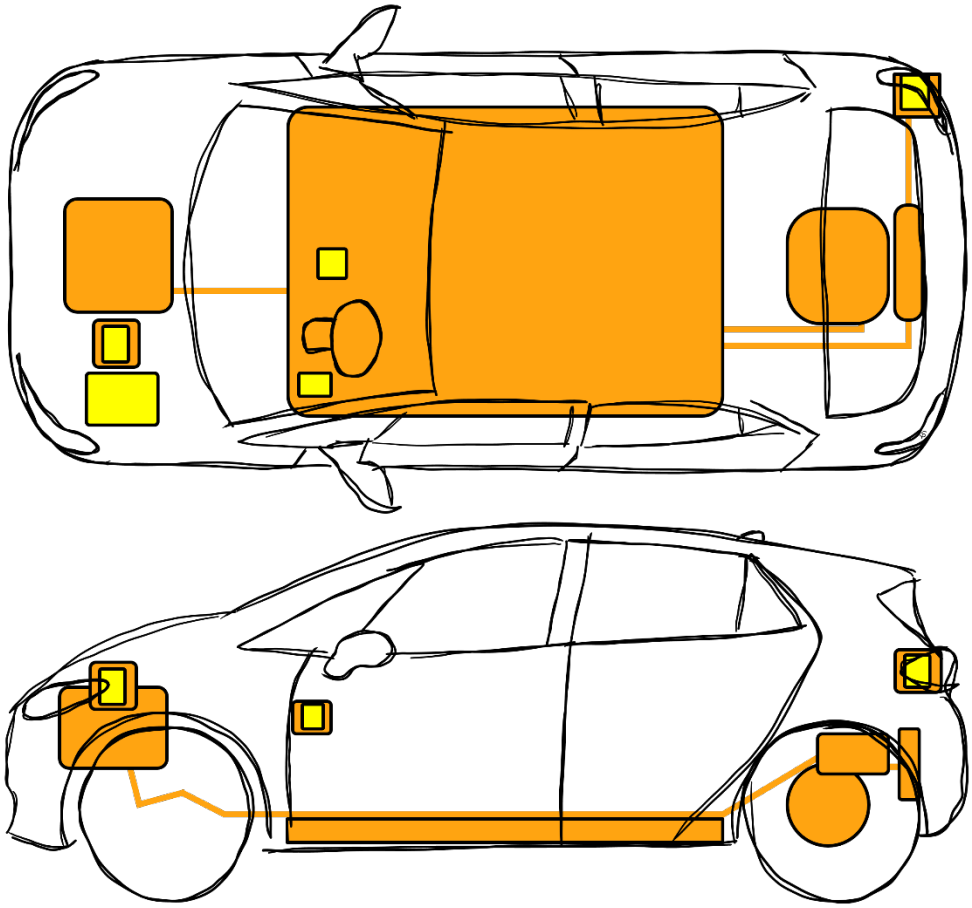


Abbildung 9.80: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im VW ID.3 (modifiziert nach https://rettungskarten-service.de/wp-content/uploads/volkswagen_id-3_hatchback_2021_5d_electric_de-1.pdf).

9.4.4.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.81 bis Abbildung 9.86 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am mittleren Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.81 bis Abbildung 9.83) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im Fußbereich des Fahrers im Ausmaß von ca. 0.09 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Im Bereich der Rückbank blieben die $ExpInd_{1998}$ durchwegs unterhalb von 0.05. Der Anteil der Reifenmagnetisierung betrug dabei weniger als 0.008 (Fußbereich des Fahrers) bzw. weniger als 0.005 (Rückbank).

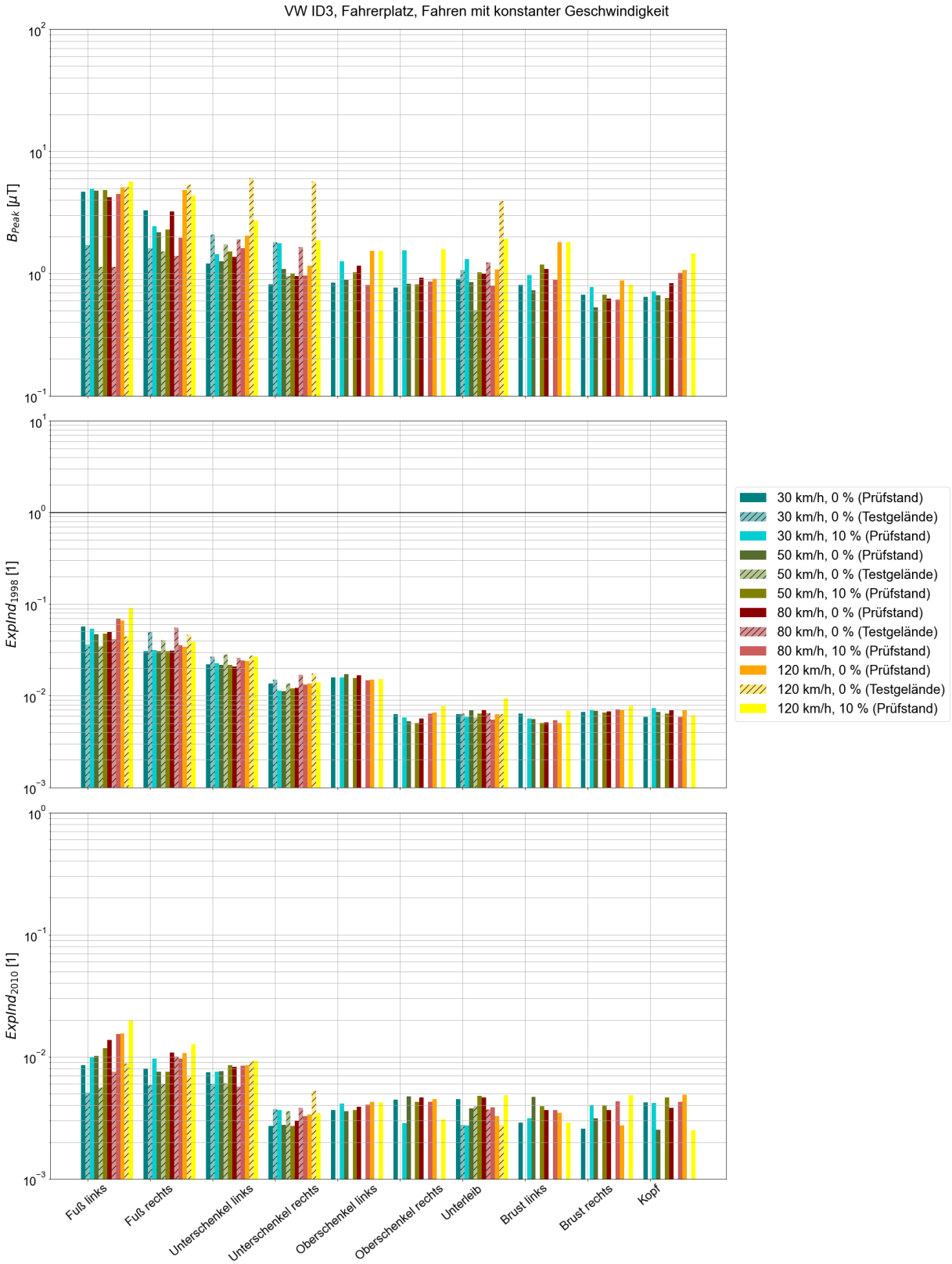


Abbildung 9.81: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

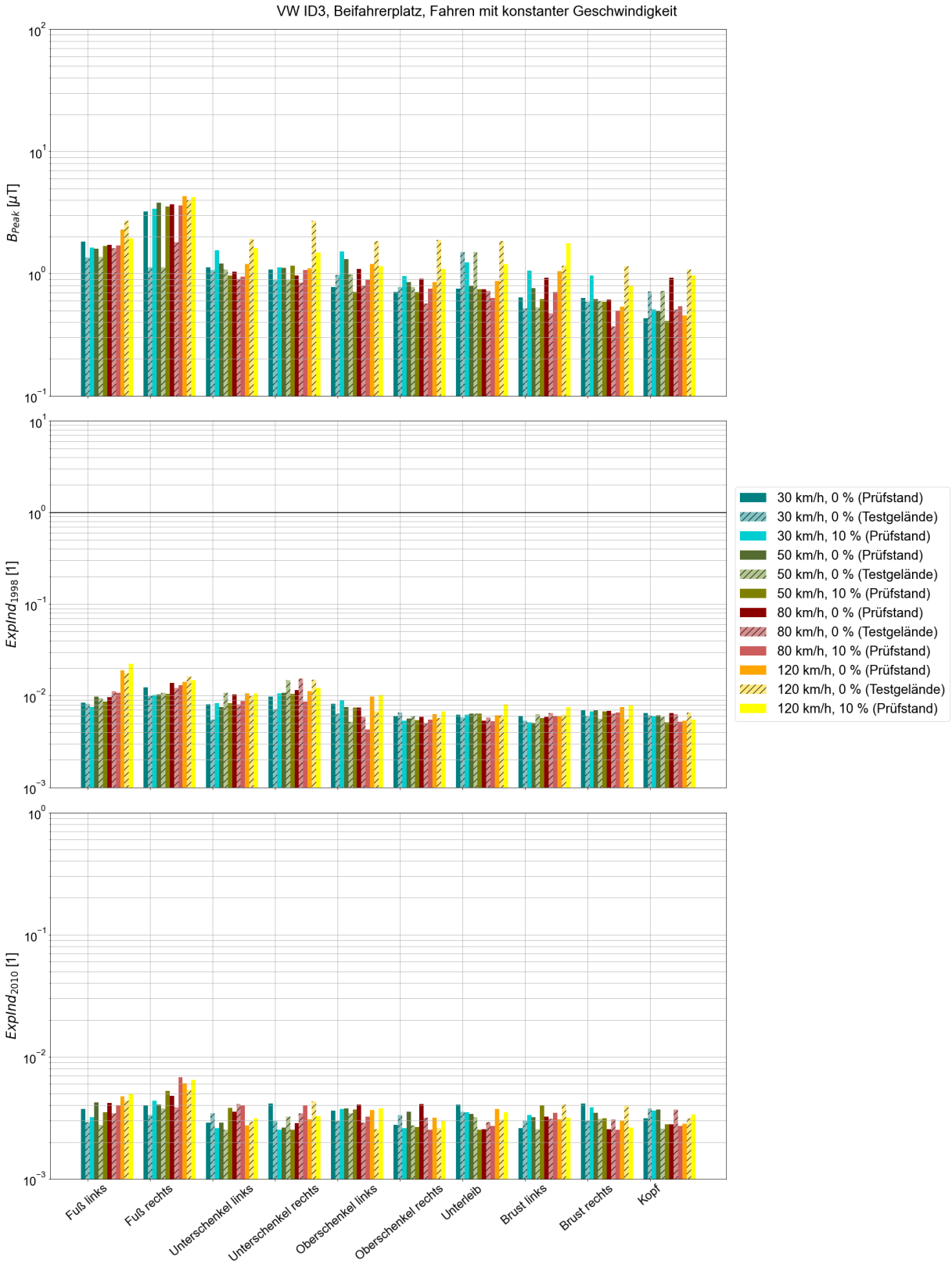


Abbildung 9.82: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

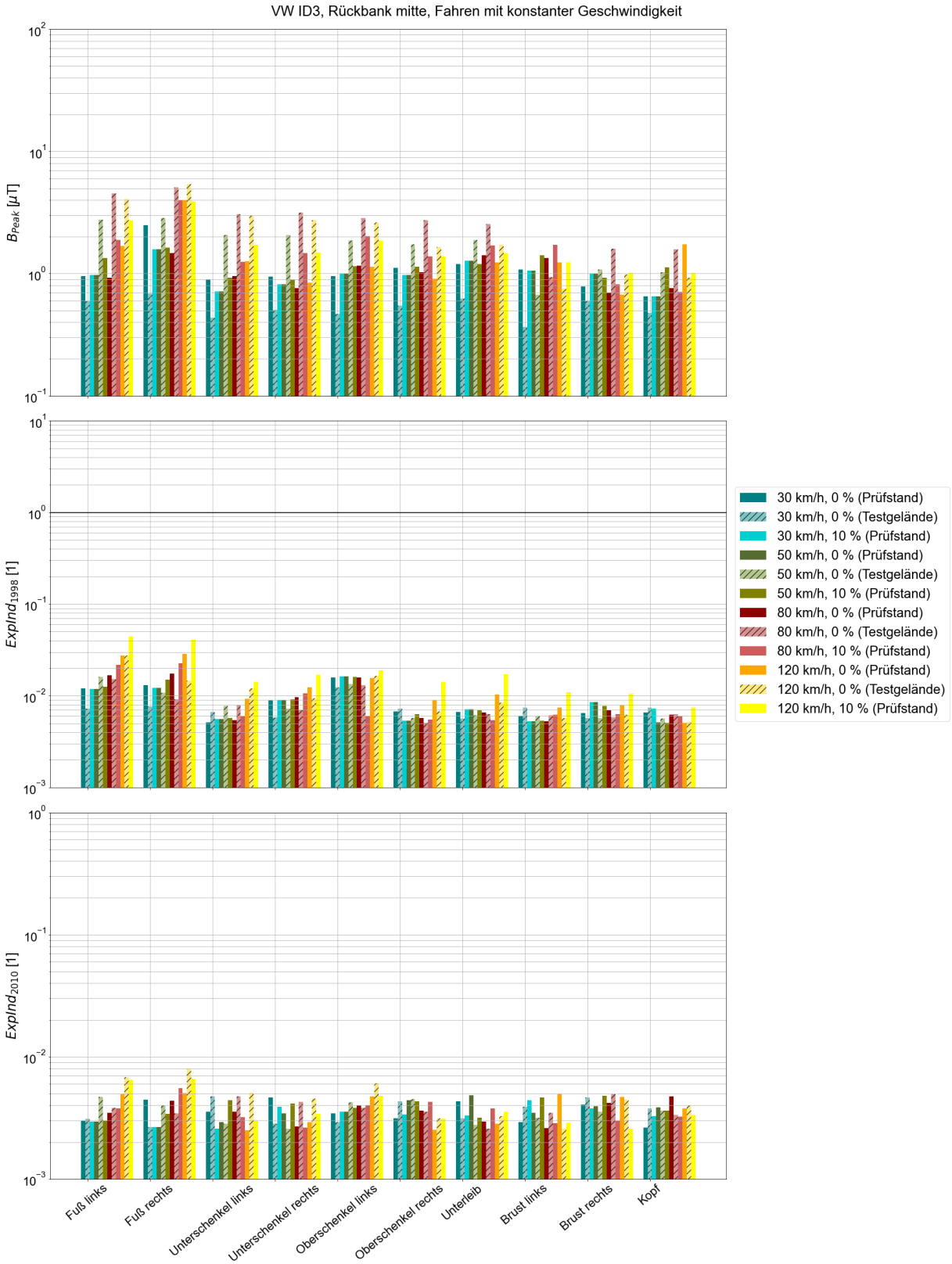


Abbildung 9.83: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (Mitte) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

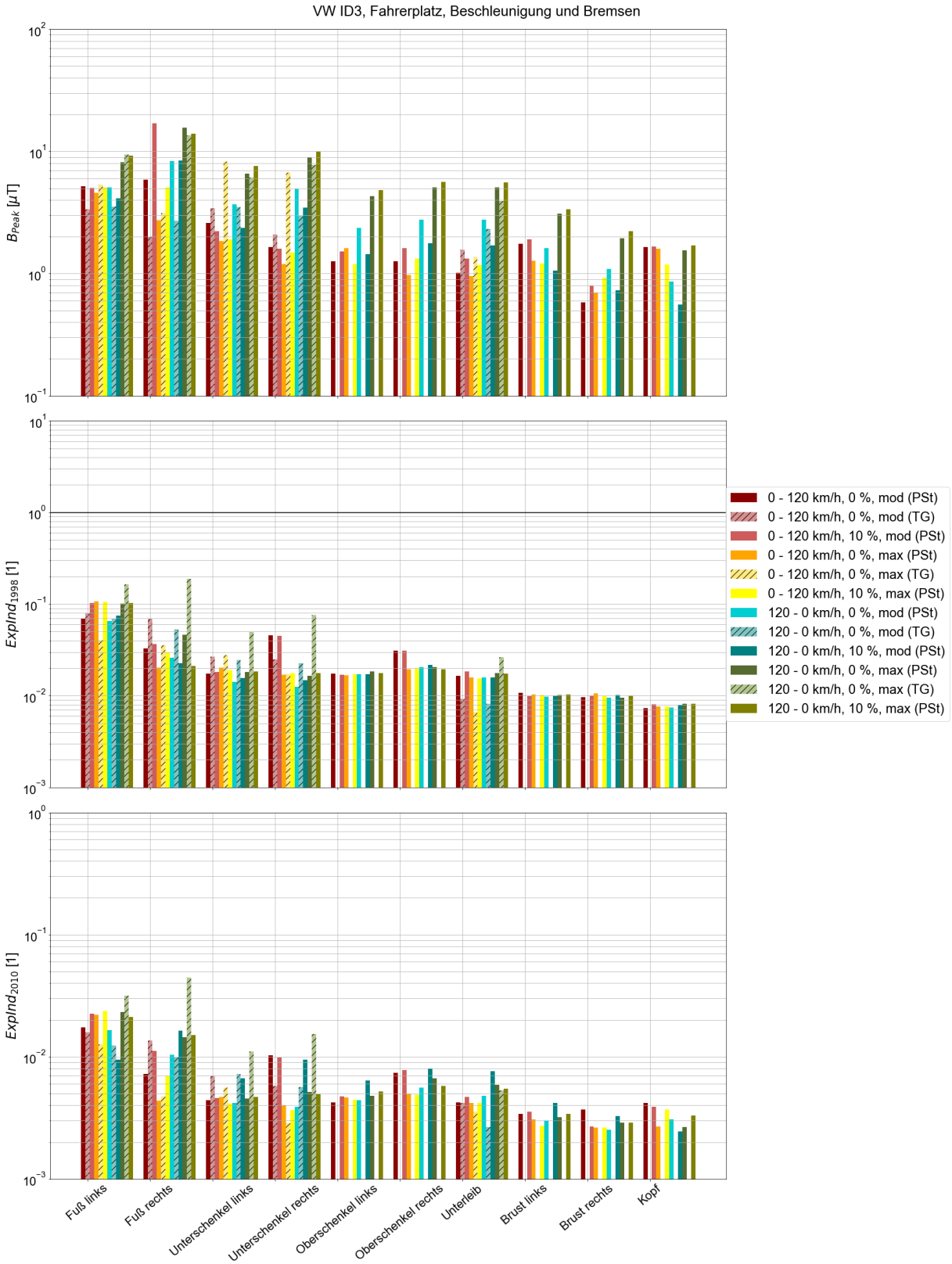


Abbildung 9.84: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

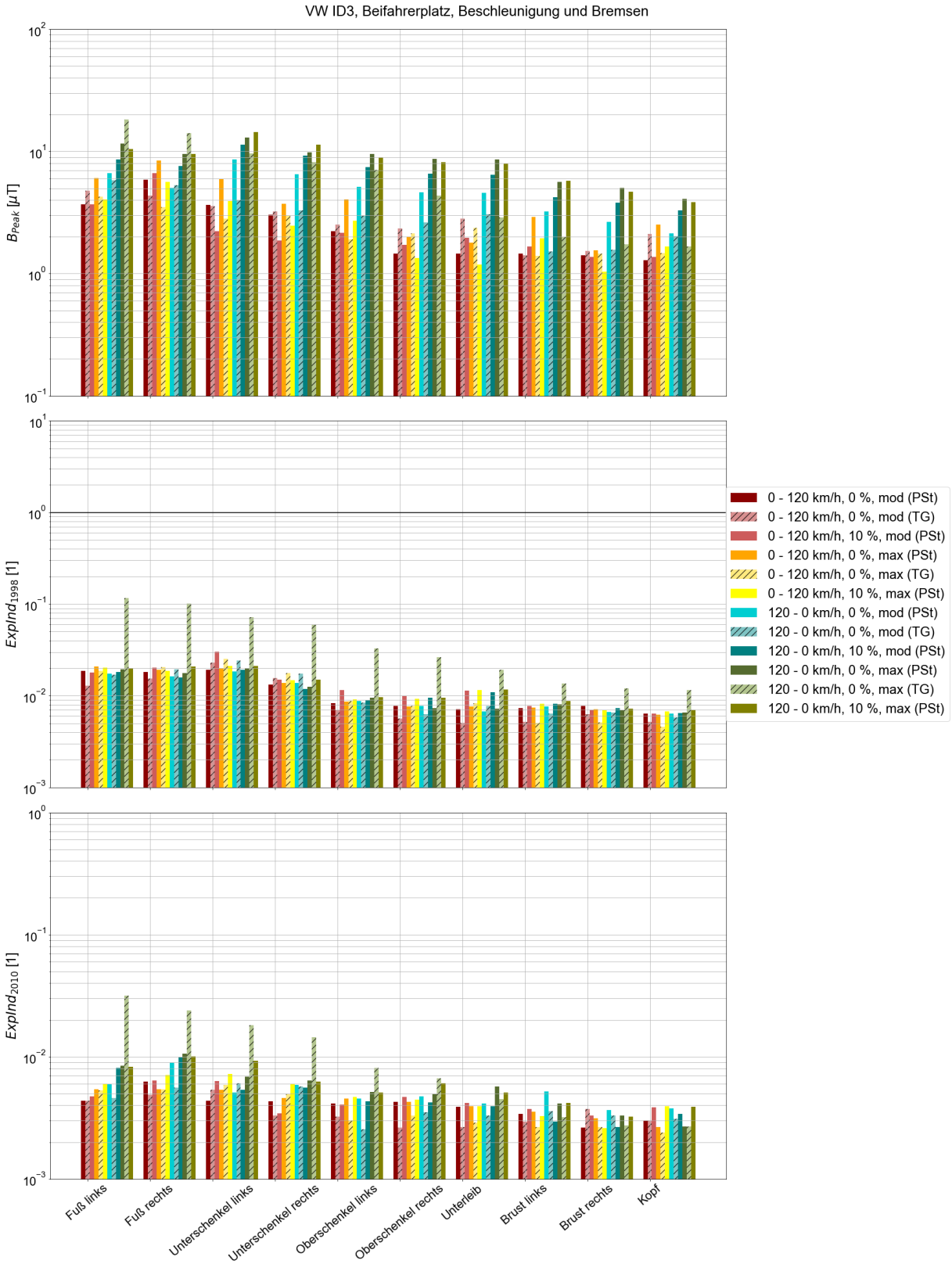


Abbildung 9.85: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

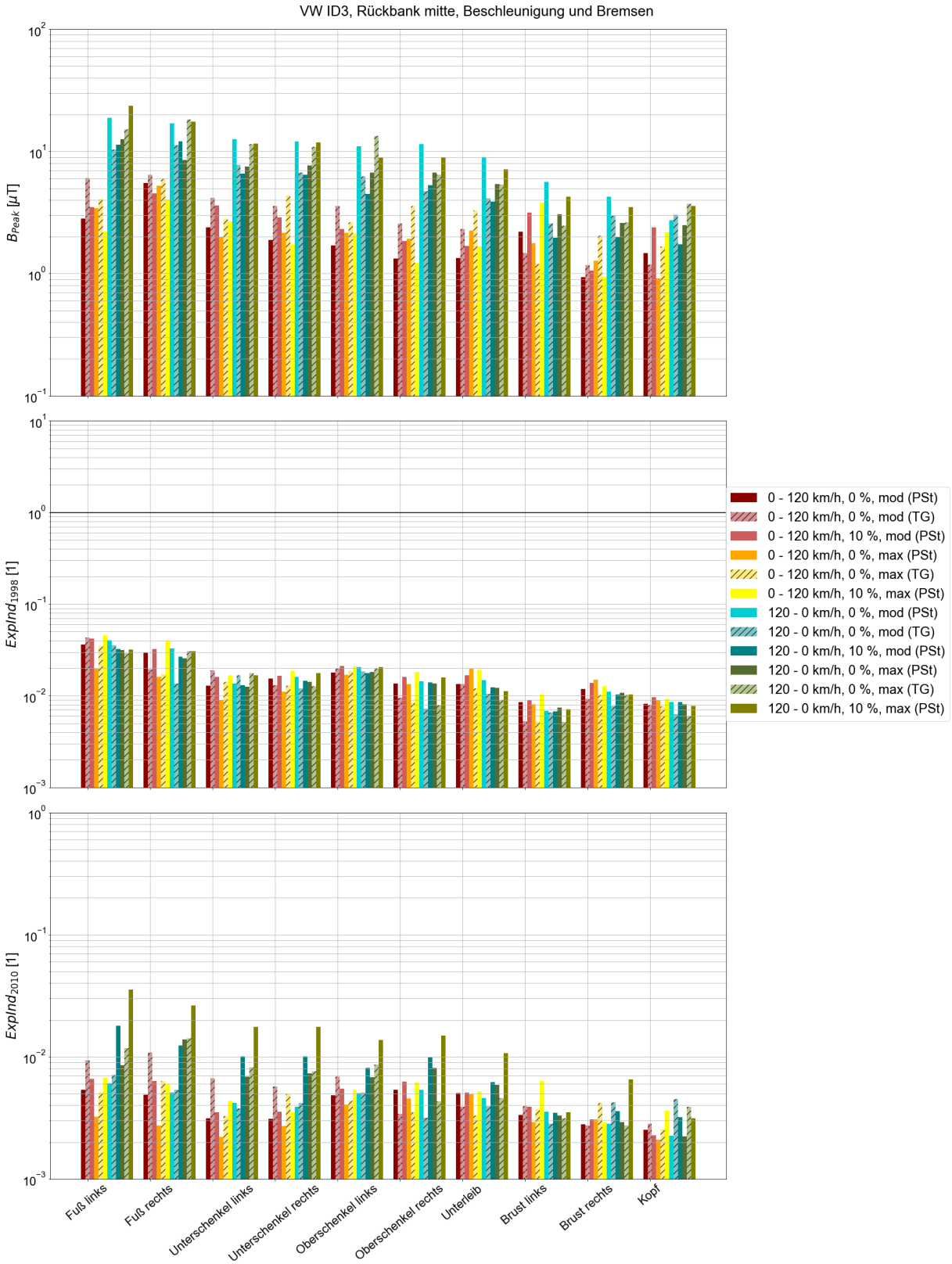


Abbildung 9.86: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (Mitte) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.84 bis Abbildung 9.86) zeigten sich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, die bei starkem Bremsen im Fußbereich des Fahrerplatzes bis zu ca. 0.19 betrugen. Am Beifahrerplatz bzw. auf der Rückbank erreichten die $ExpInd_{1998}$ Werte von bis zu ca. 0.12 (Beifahrer, linker Fuß) bzw. ca. 0.05 (Fußbereich der Rückbank). Die genannten maximalen $ExpInd_{1998}$ im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer wurden von transienten Signal-Bursts beim Übergang von starker Beschleunigung zu starkem Bremsen verursacht (Abbildung 9.87), was nur beim Fahren am Testgelände, nicht jedoch am Prüfstand untersucht wurde.

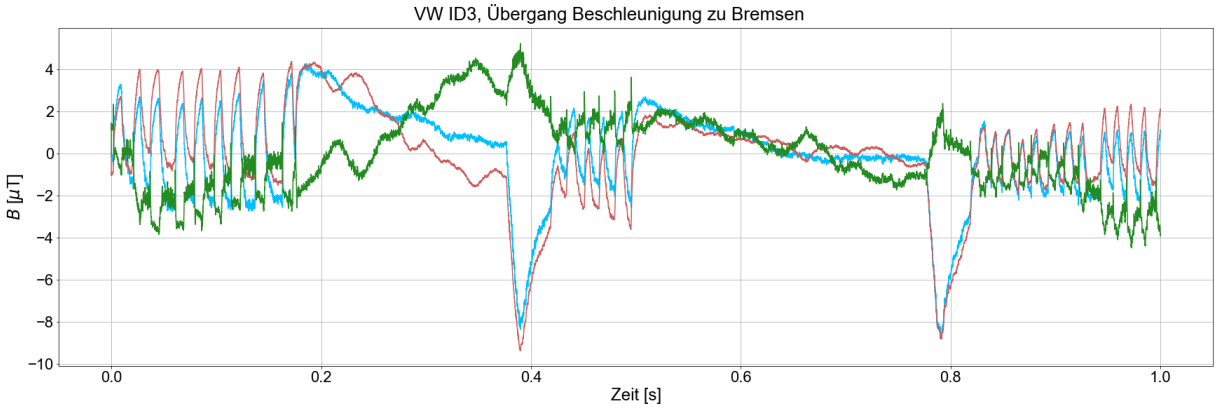


Abbildung 9.87: Verlauf der magnetischen Flussdichte im Übergang von starker Beschleunigung zu starkem Bremsen, gemessen am Testgelände im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz.

9.4.4.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.88 und Abbildung 9.90 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer. Zusätzlich zeigt Abbildung 9.89 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.91 und Abbildung 9.92 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.93 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

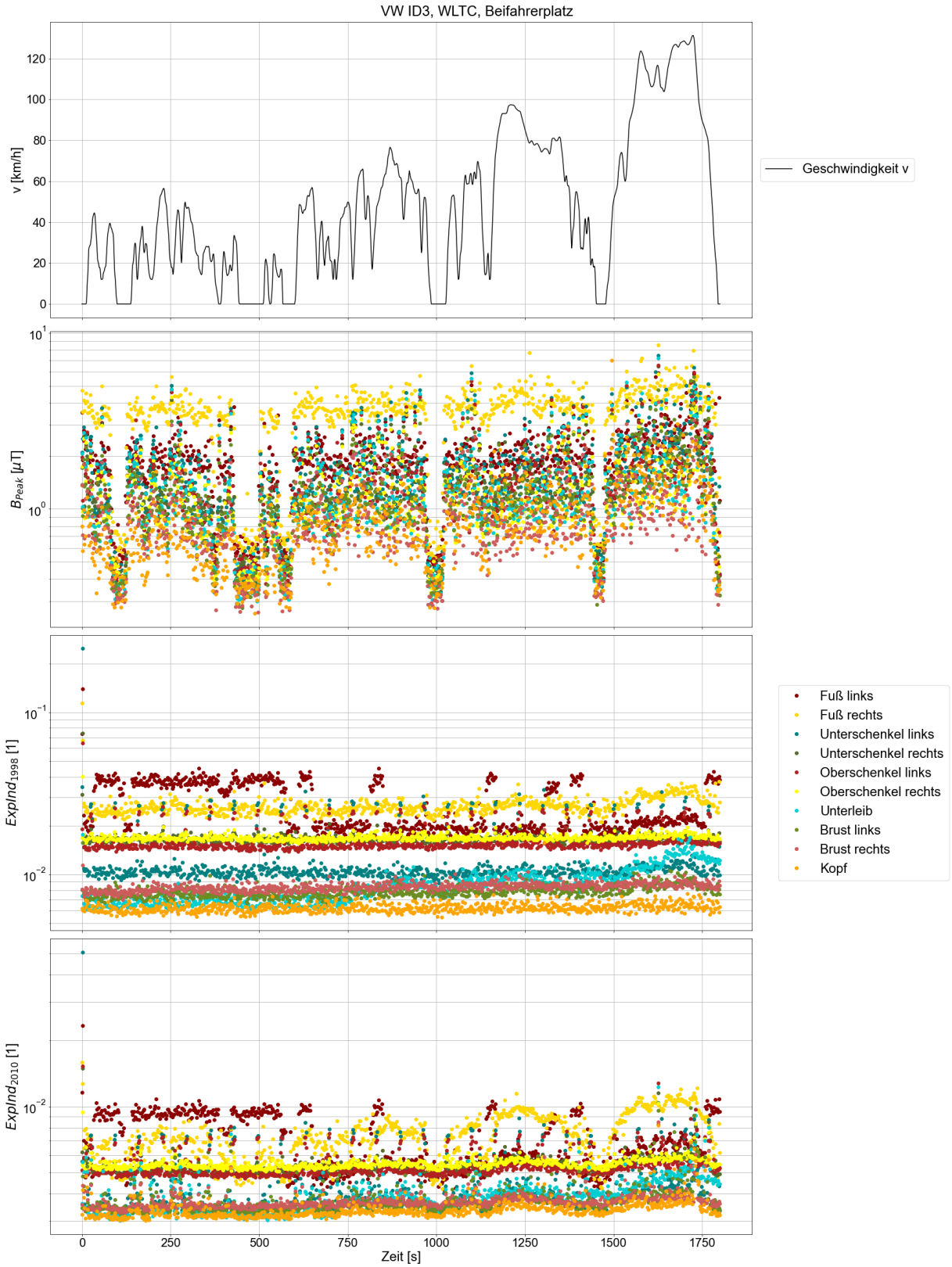


Abbildung 9.88: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

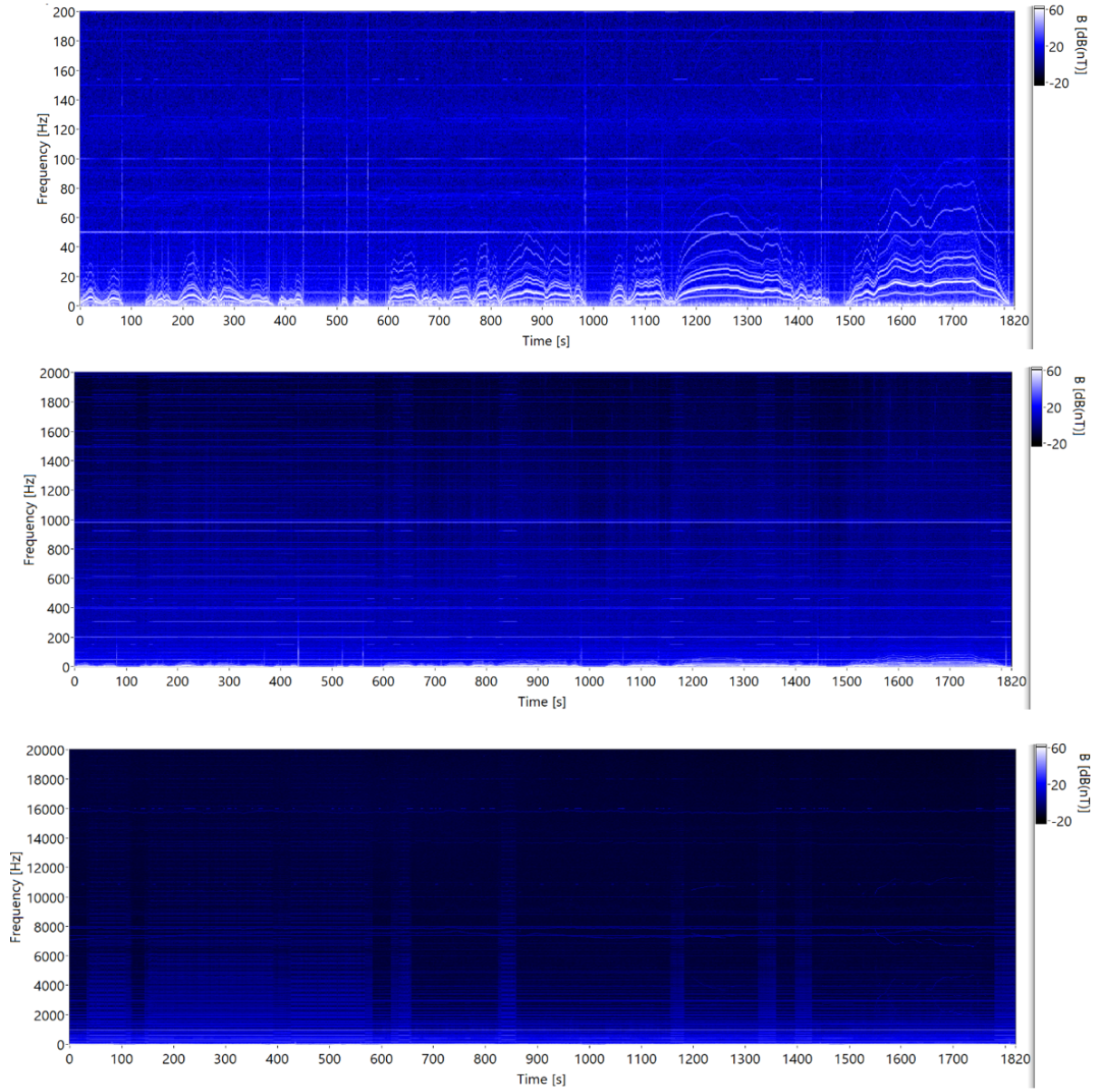


Abbildung 9.89: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im VW ID.3 am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 - 20 kHz).

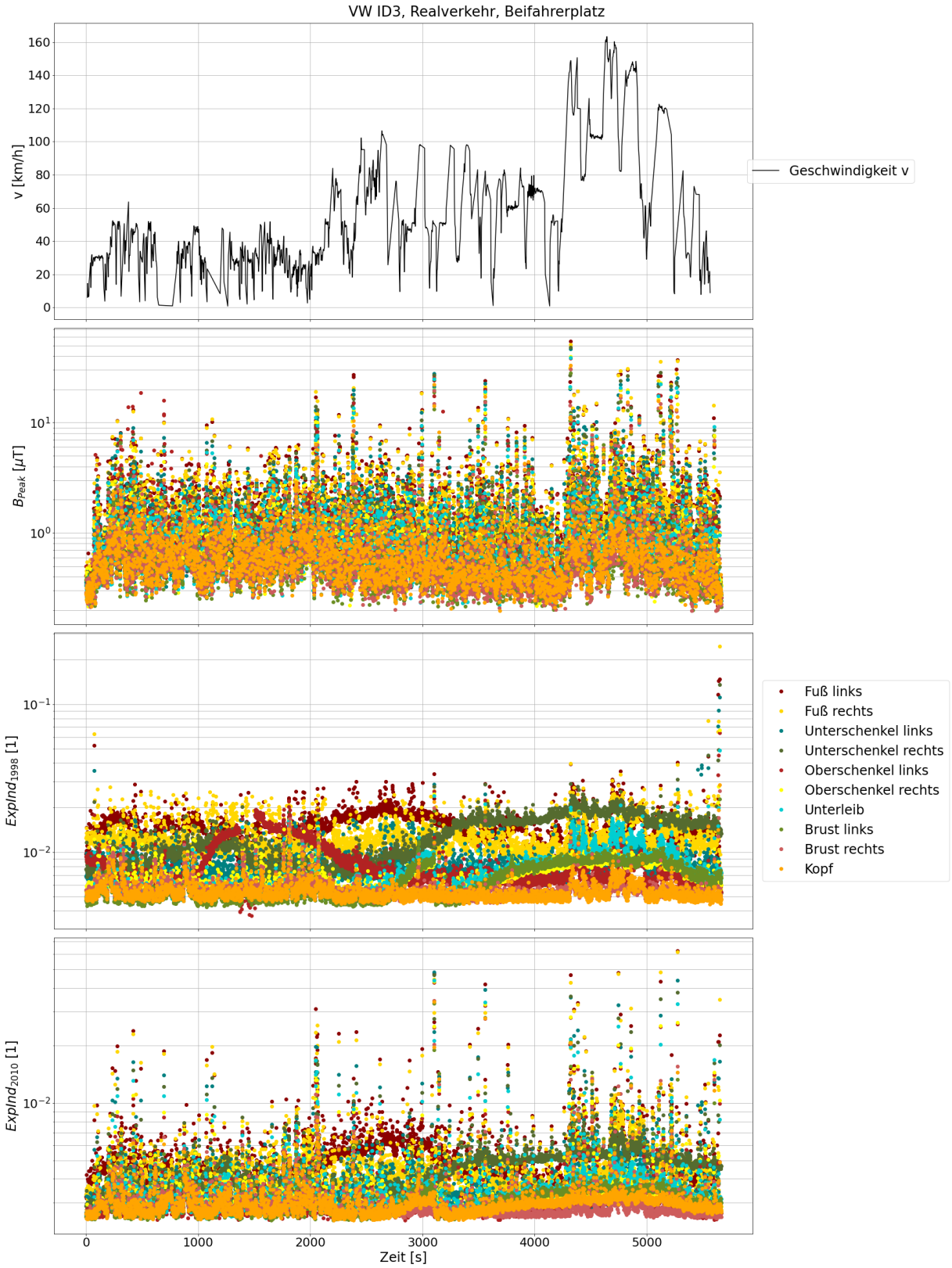


Abbildung 9.90: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

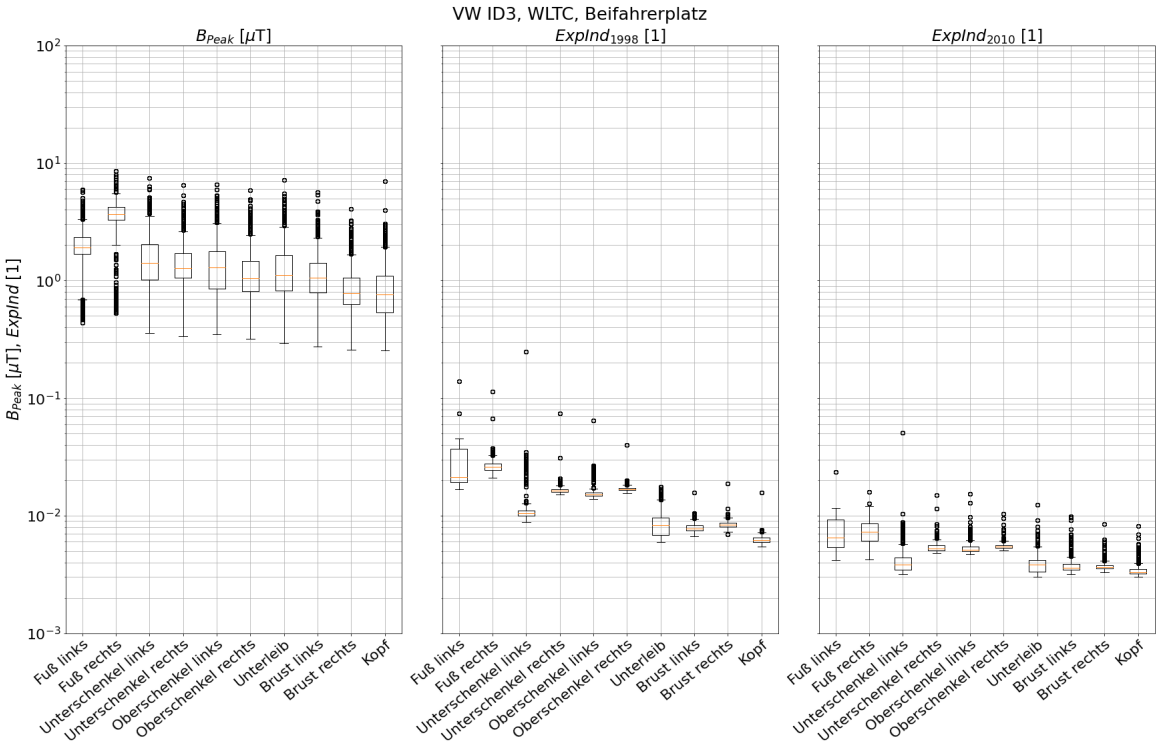


Abbildung 9.91: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

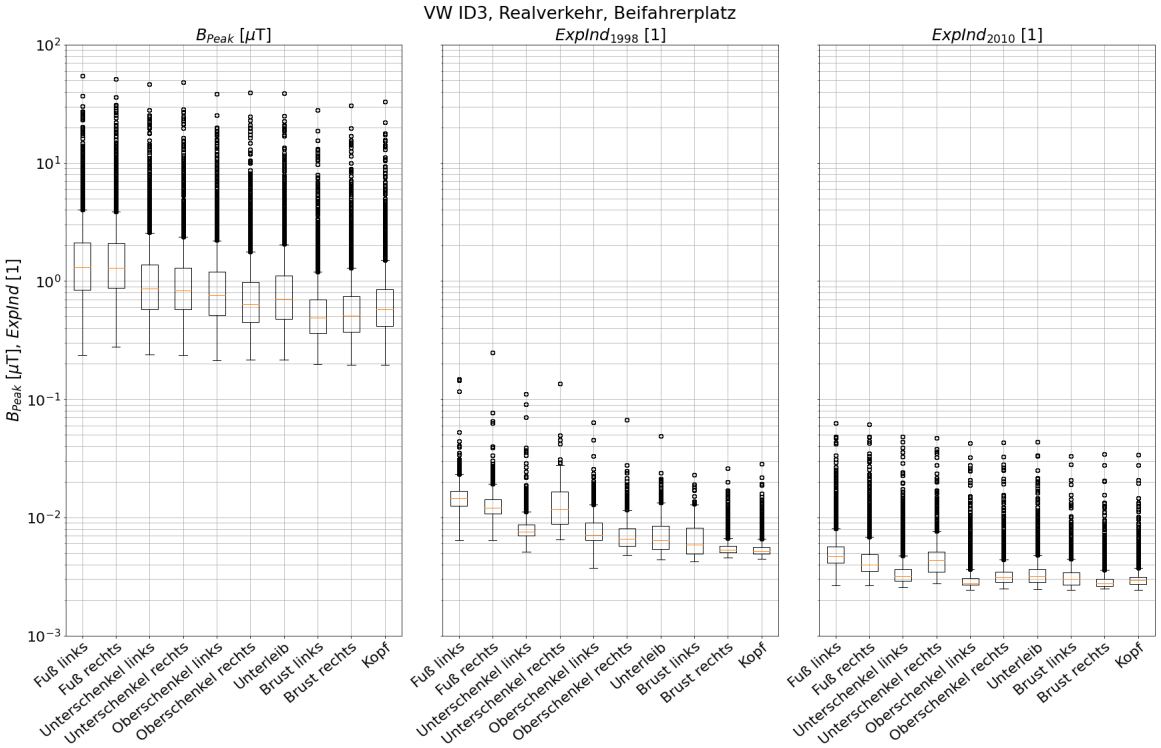


Abbildung 9.92: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

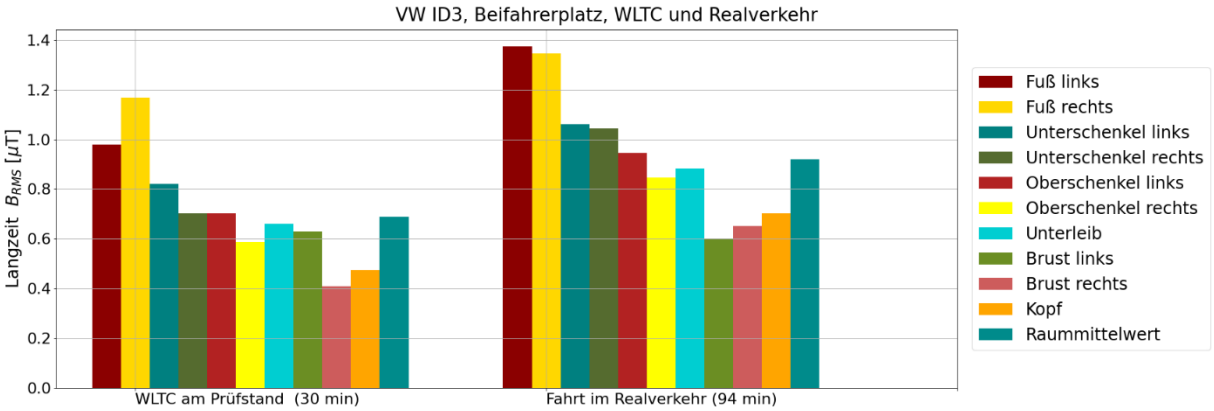


Abbildung 9.93: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.4.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Ein- bzw. Ausschalten des Fahrzeugs auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 1.8 im Bereich des rechten Fußes am Beifahrerplatz).

Abbildung 9.94 bis Abbildung 9.96 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

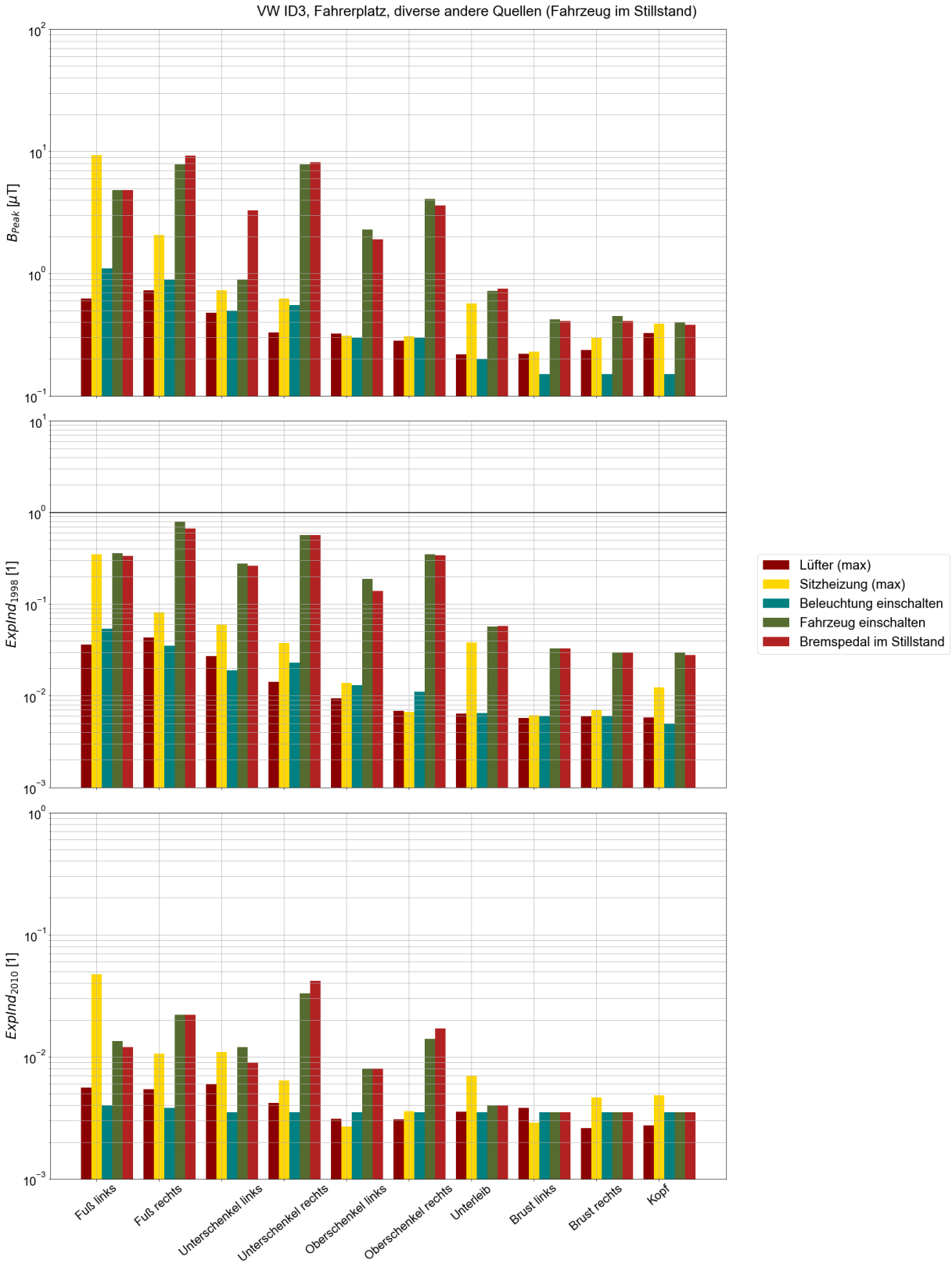


Abbildung 9.94: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

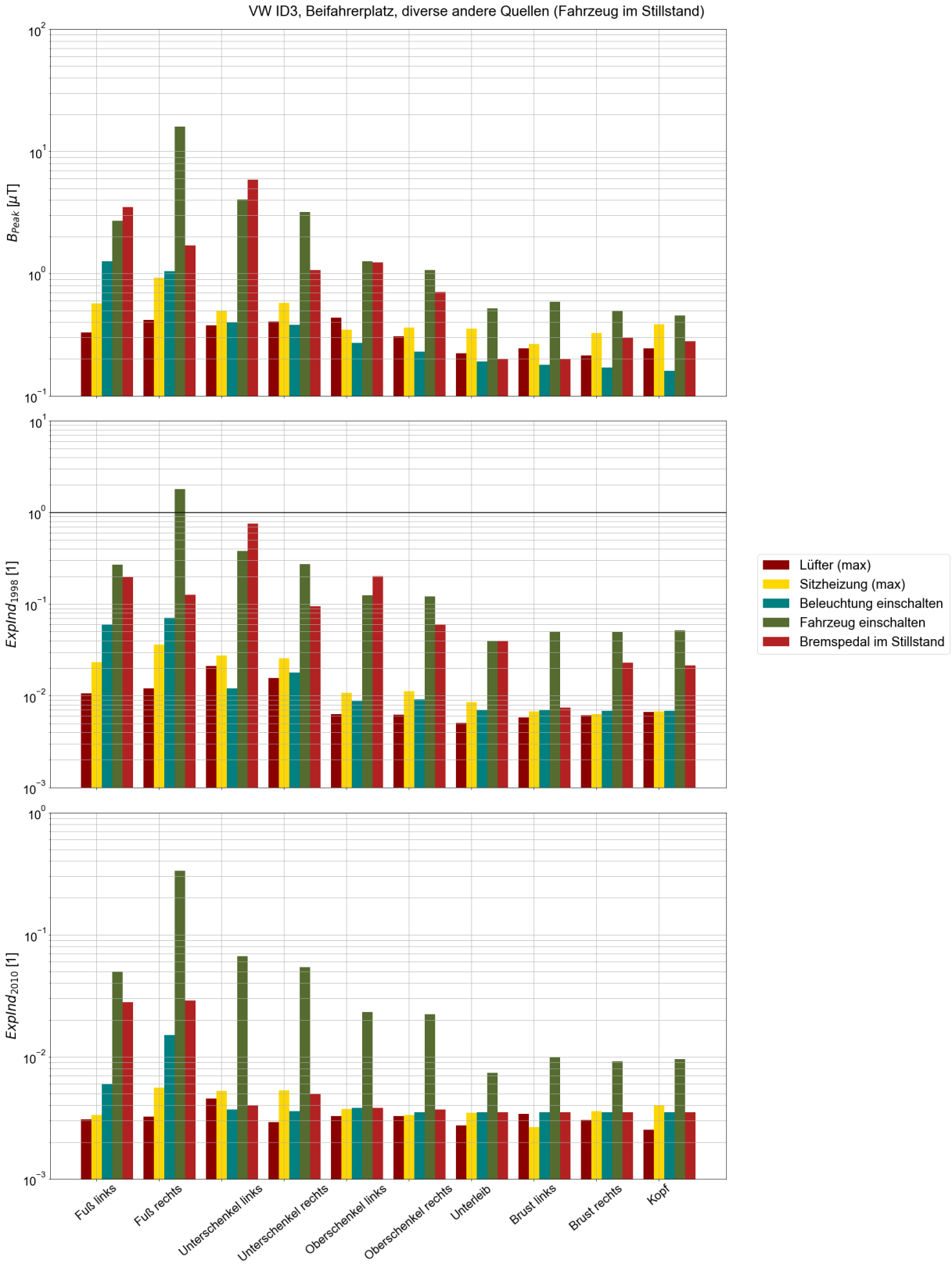


Abbildung 9.95: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

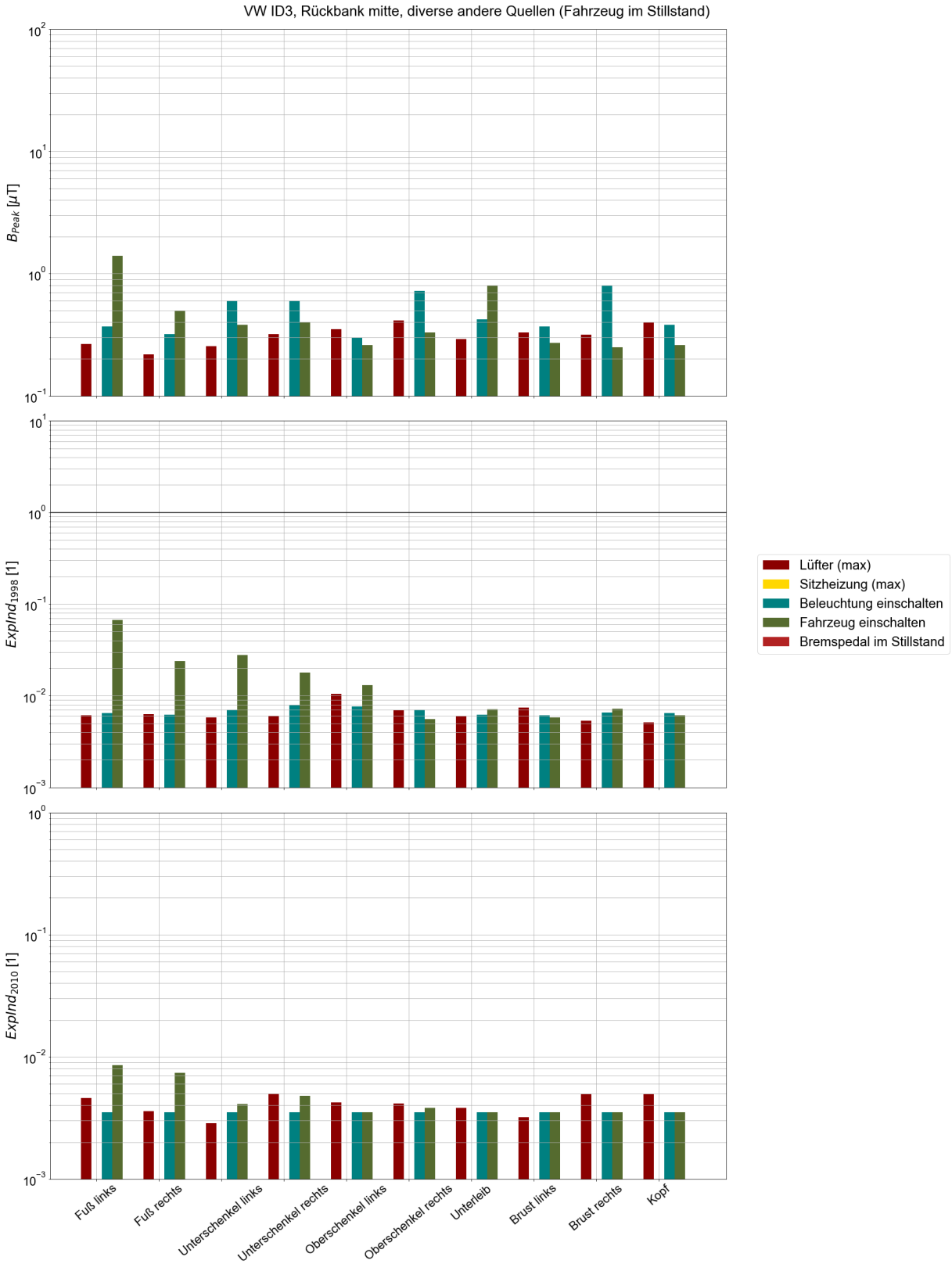


Abbildung 9.96: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (Mitte) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Immissionen von der Sitzheizung der Vordersitze und der Betätigung des Bremspedals im Stillstand wurden an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

9.4.5 Audi e-tron quattro



Abbildung 9.97: Untersuchter Audi e-tron quattro auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.5.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Audi e-tron 55 quattro

Baujahr: 2021

Motorleistung: 300 kW

Batteriekapazität: 95 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.97 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.98).

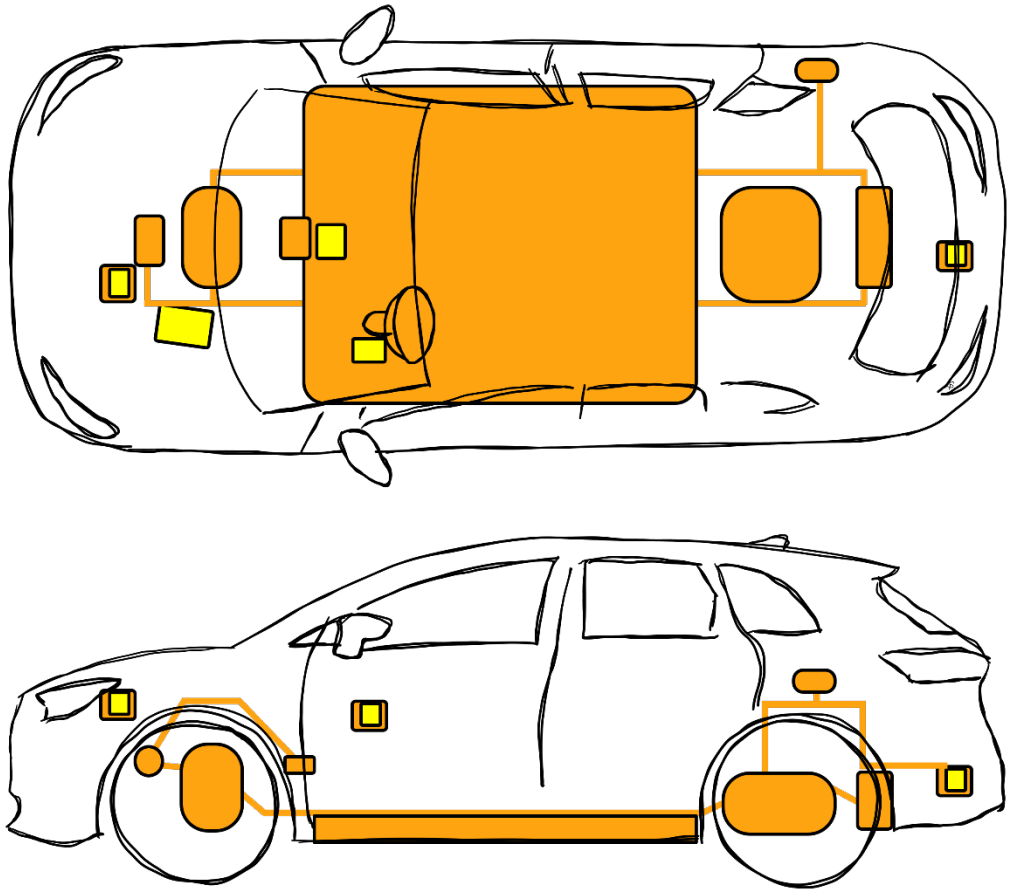


Abbildung 9.98: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Audi e-tron quattro (modifiziert nach https://rettungskarten-service.de/wp-content/uploads/audi-q4-e-tron-suv-inkl.-sportback-baujahr-ab-2021.pdf).

9.4.5.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.99 bis Abbildung 9.104 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am mittleren Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.99 bis Abbildung 9.101) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im linken Fußbereich des Beifahrers im Ausmaß von ca. 0.08 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei ein Anteil von ca. 0.01 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. Im Oberschenkel- und Unterleibsbereich auf der Rückbank wurden beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit $ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 0.02 erreicht (Anteil der Reifenmagnetisierung < 0.005).

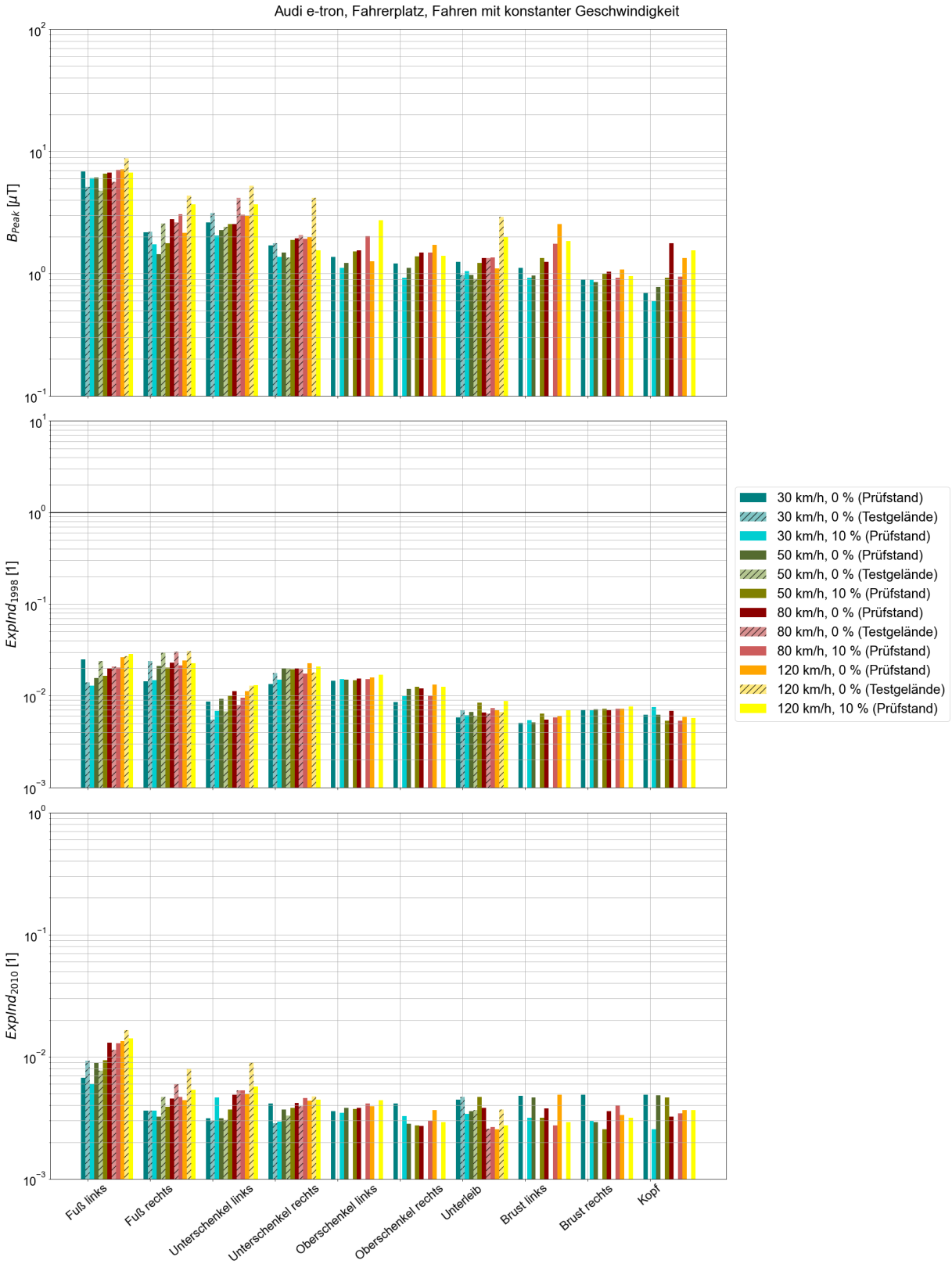


Abbildung 9.99: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

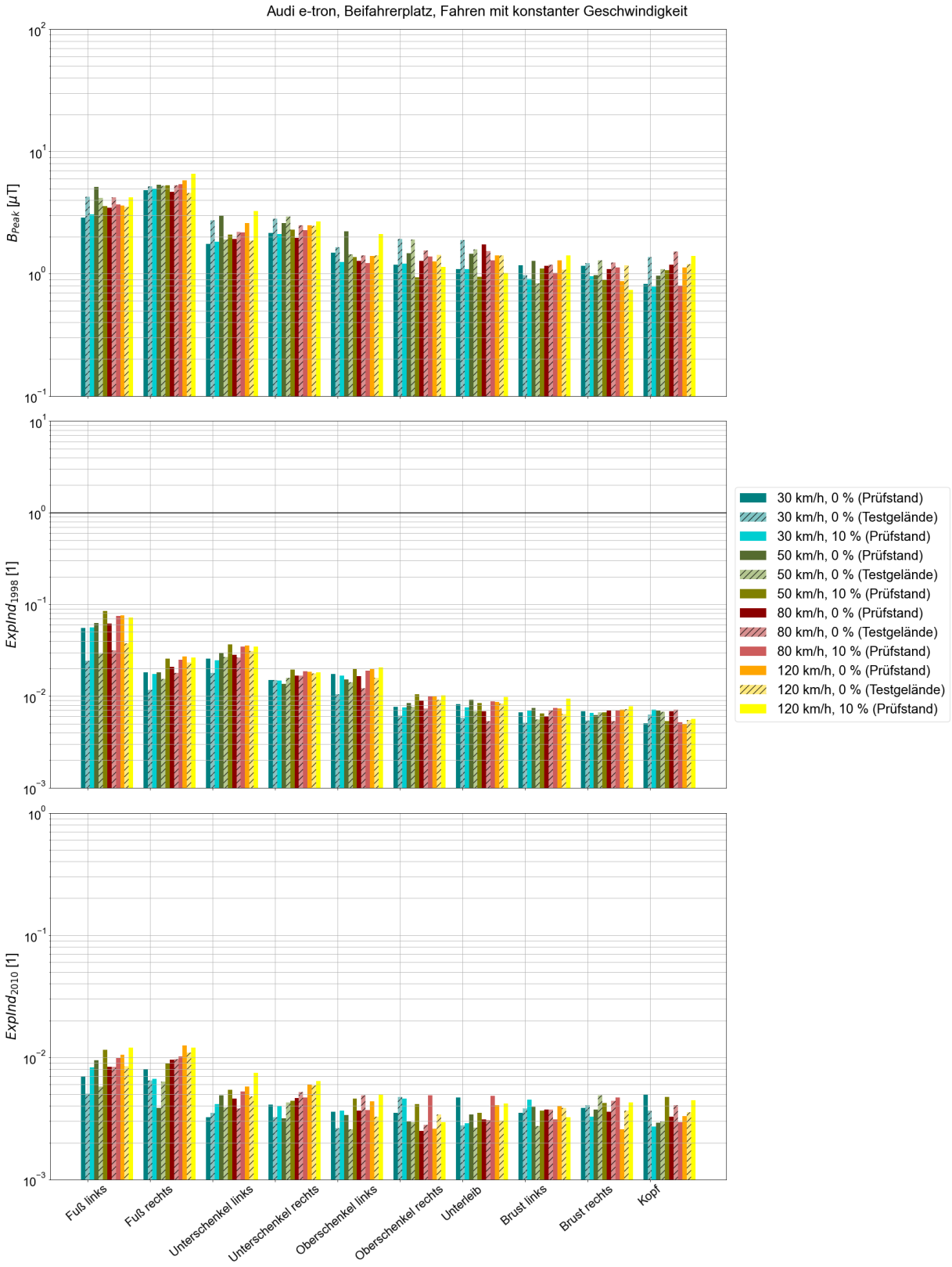


Abbildung 9.100: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

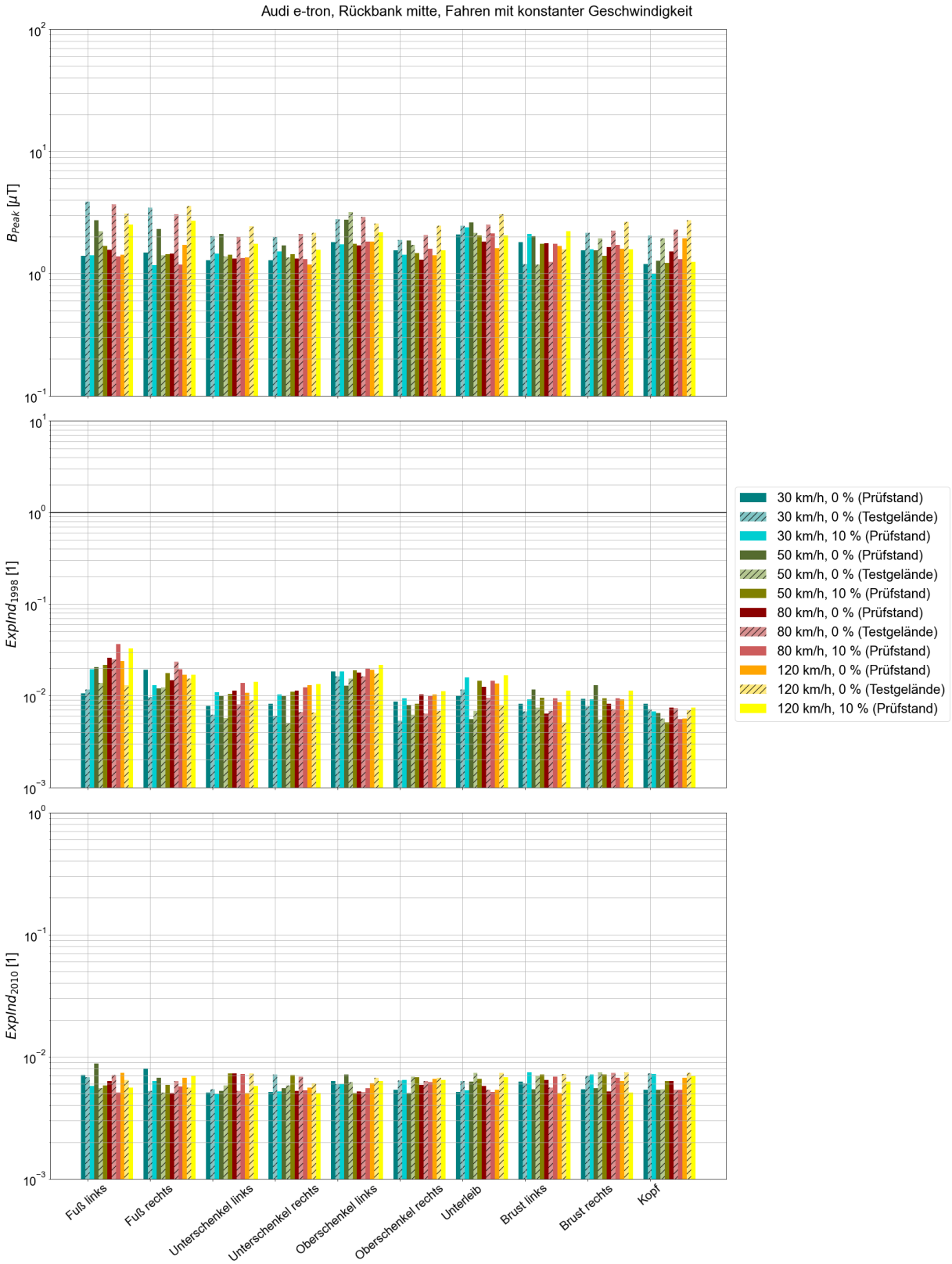


Abbildung 9.101: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (Mitte) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

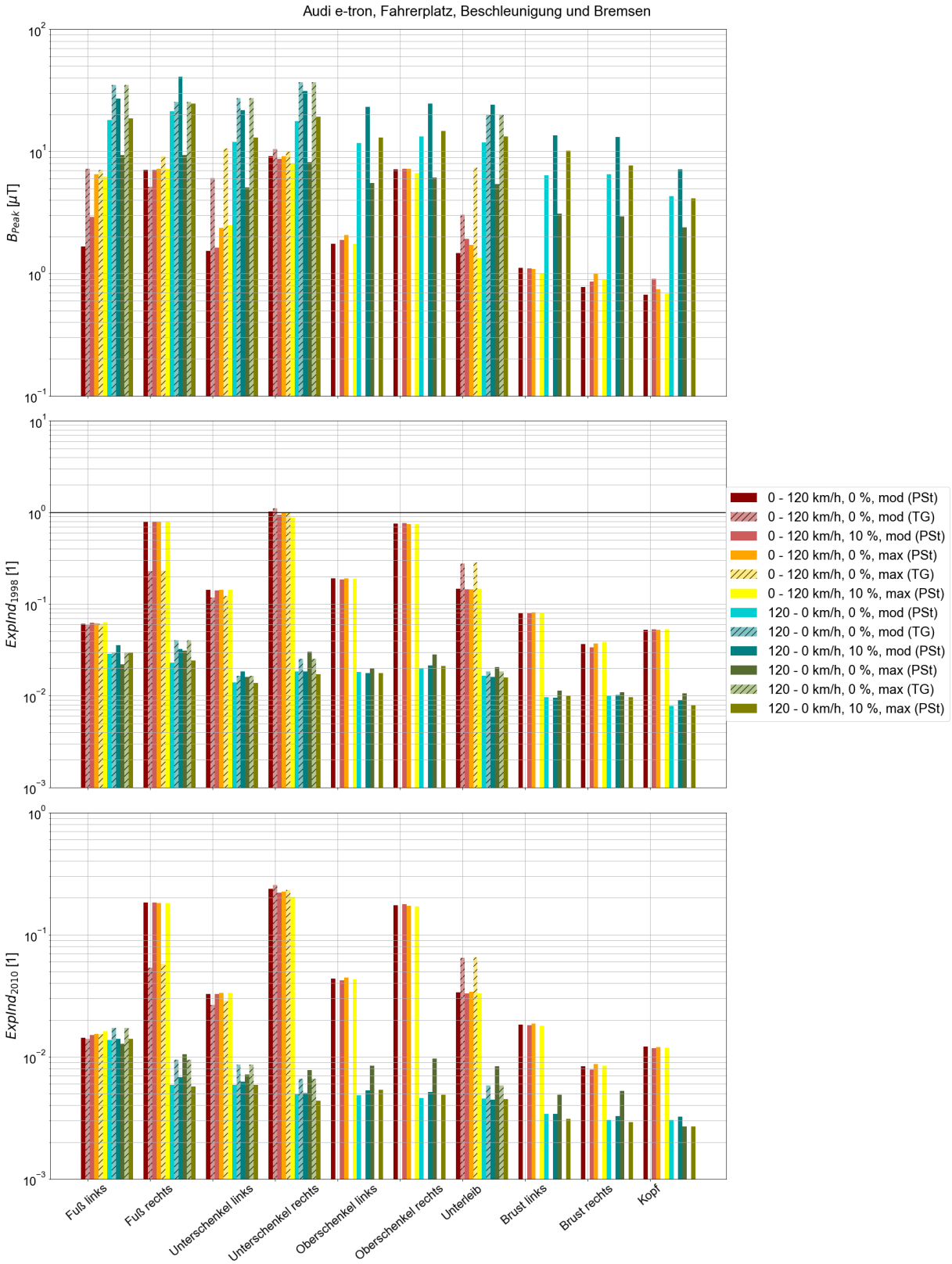


Abbildung 9.102: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

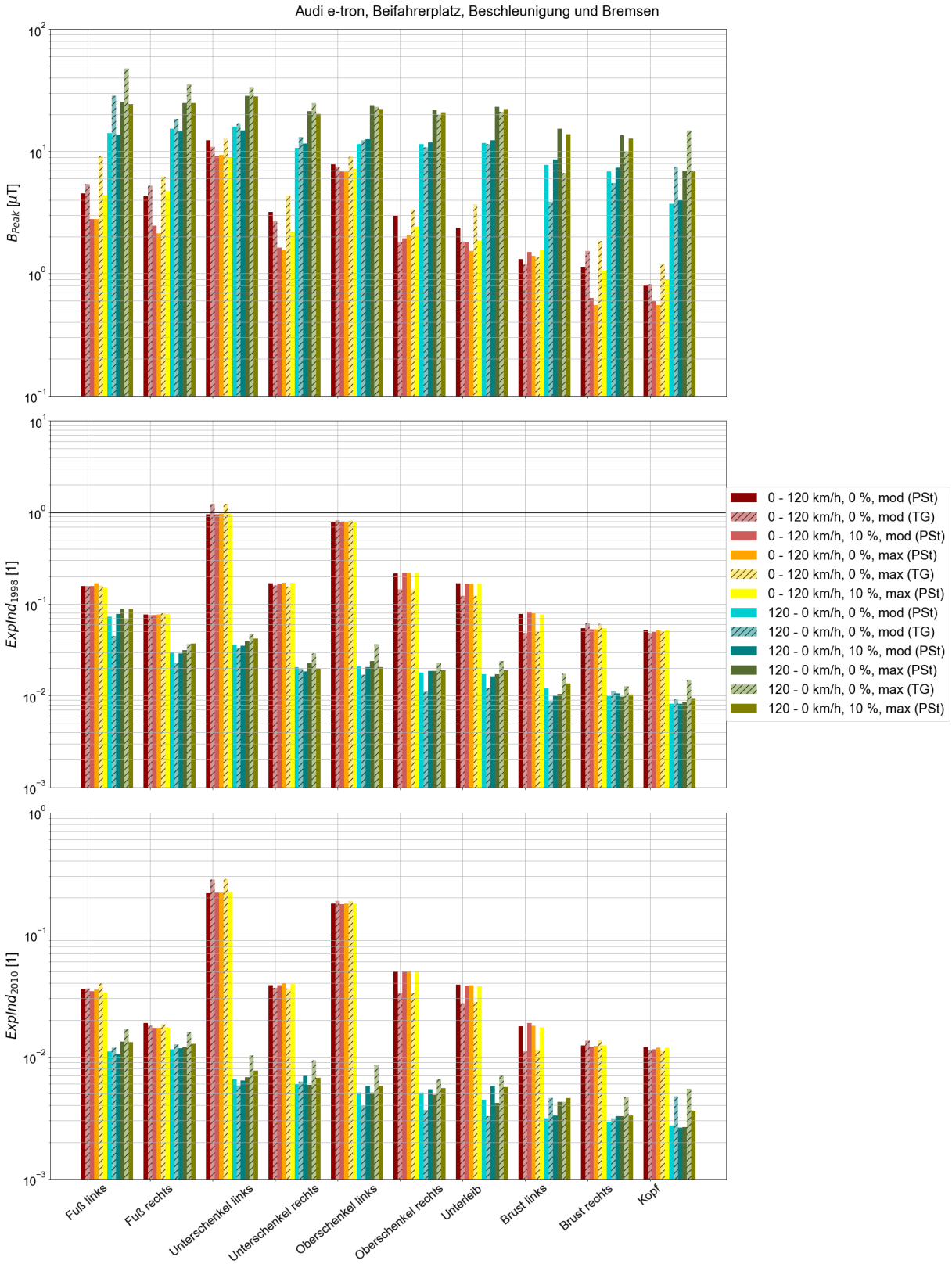


Abbildung 9.103: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

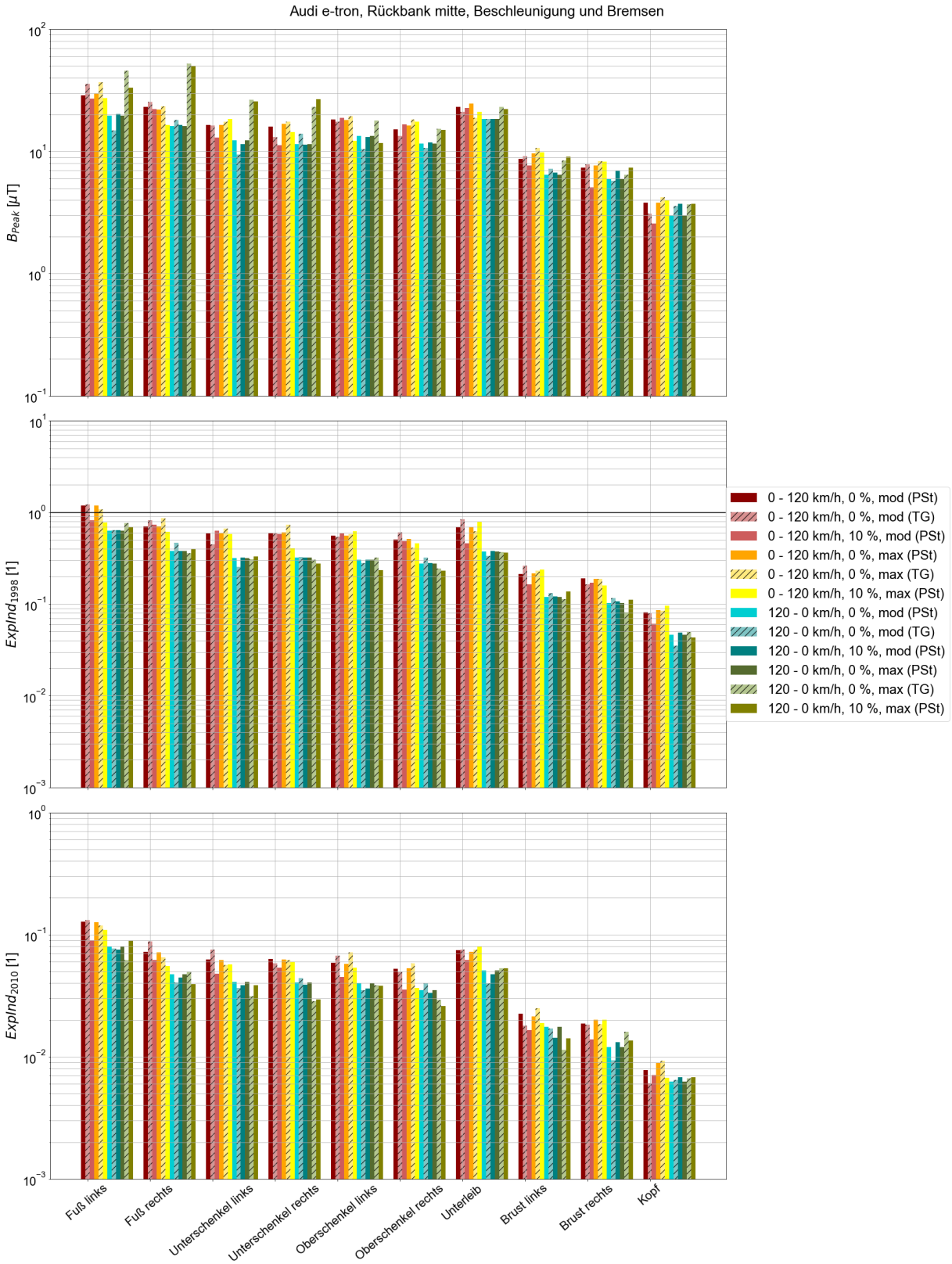


Abbildung 9.104: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (Mitte) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.102 bis Abbildung 9.104) zeigten sich deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit. Die größten $ExpInd_{1998}$ wurden bei (moderater und maximaler) Beschleunigung erreicht und lagen im Bereich des rechten bzw. linken Unterschenkels von Fahrer bzw. Beifahrer bei 1.11 bzw. 1.23 und im jeweiligen Oberschenkelbereich noch bei ca. 0.8. Ähnlich hohe $ExpInd_{1998}$ wurden auch im Bereich der Füße (1.22) und im Unterleibsbereich (0.8) am mittleren Sitz der Rückbank gemessen. Grund dafür waren offensichtlich Burst-artige Ströme, die in Zusammenhang mit moderaten bzw. starken Beschleunigungsmanövern auftraten, nicht jedoch bei geringer Beschleunigung (Abbildung 9.105). Die Amplitude dieser Burst-artigen Signale war nahezu unabhängig vom Lastzustand.

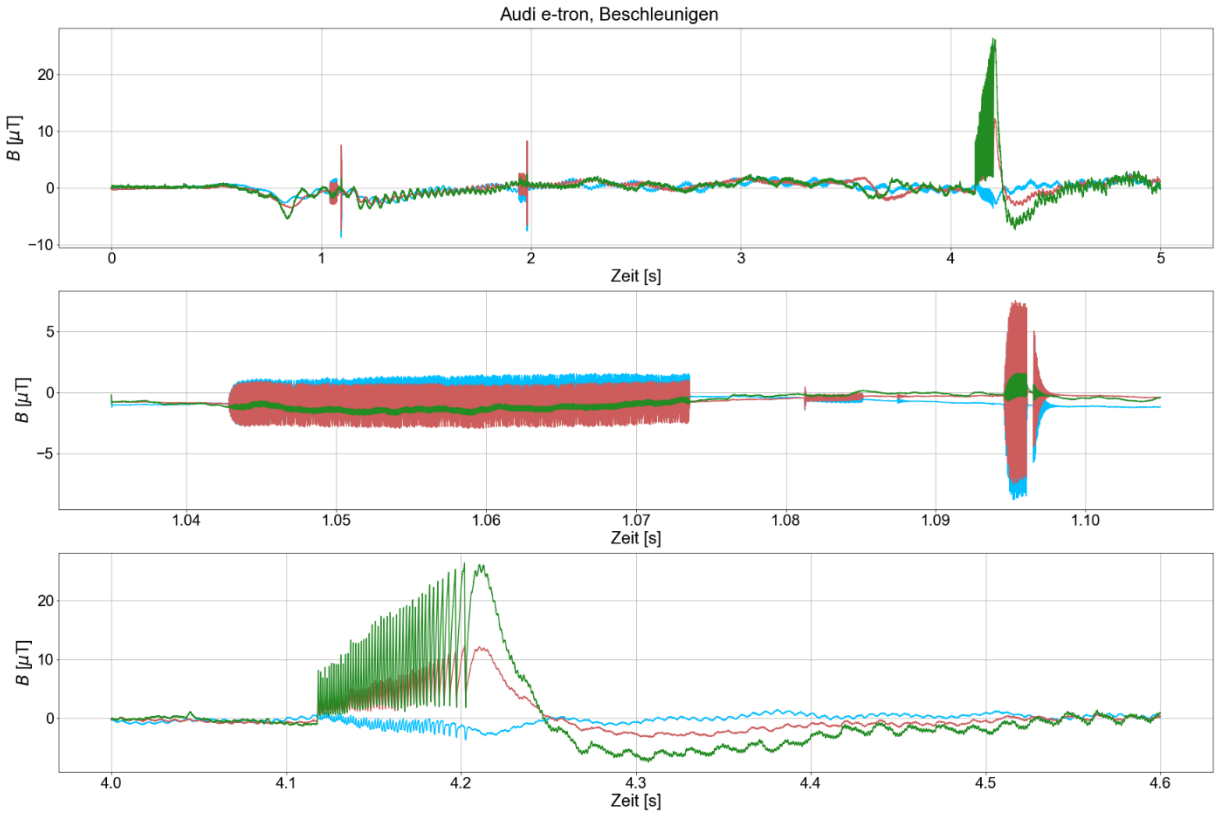


Abbildung 9.105: Verlauf der magnetischen Flussdichte während starken Beschleunigens, gemessen am Testgelände im Bereich des linken Unterschenkels am Beifahrerplatz. Die kurzen Bursts bei Sekunde 1.095 (vergrößert im mittleren Teilbild) und bei Sekunde 1.98 sind bestimmend für den Expositionsindex (in diesem Fall konkret $ExpInd_{1998}$ = 1.23). Der etwas längere Burst bei Sekunde 4.12 mit höchster Amplitude (vergrößert im unteren Teilbild) führt auf einen $ExpInd_{1998}$ = 0.95.

Beim Bremsen zeigten sich die größten (last-unabhängigen) Expositionsindizes auf der Rückbank ($ExpInd_{1998}$ bis zu 0.77) im Bereich des linken Fußes am mittleren Sitzplatz (im Unterleibsbereich noch $ExpInd_{1998}$ ca. 0.37).

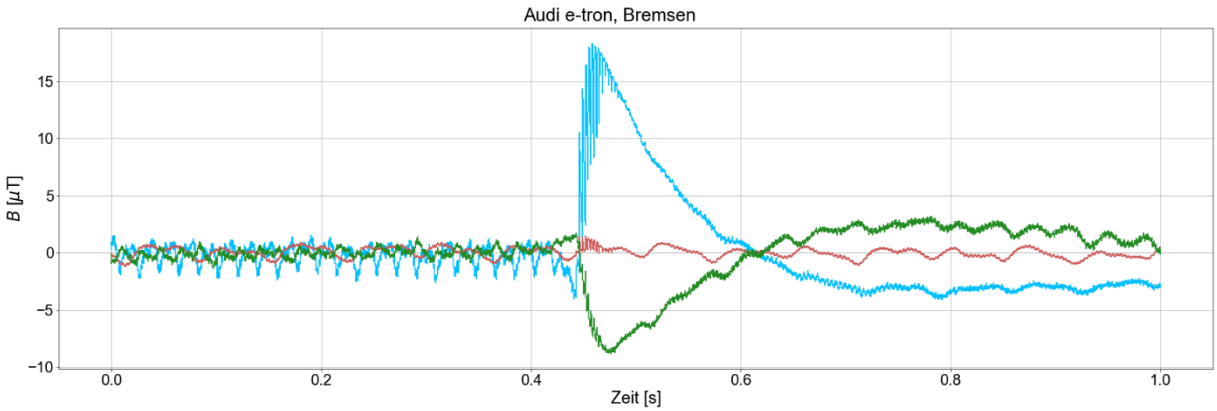


Abbildung 9.106: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte zu Beginn eines Bremsvorganges bei 120 km/h (bei Sekunde 0.45), gemessen im Bereich des linken Fußes am mittleren Sitzplatz der Rückbank.

9.4.5.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.107 und Abbildung 9.109 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.108 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.110 und Abbildung 9.111 zeigen statistische Auswertungen der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.112 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

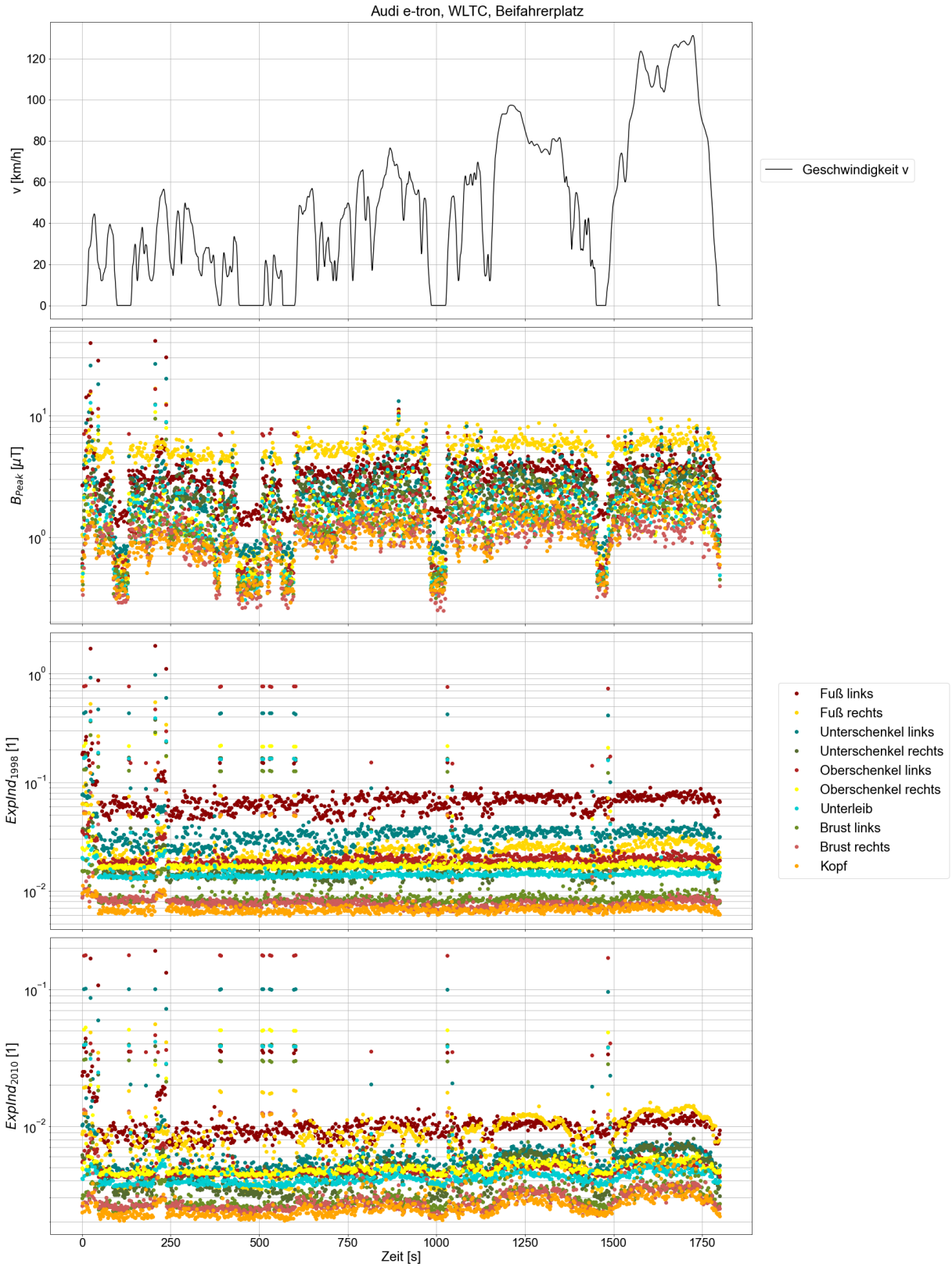


Abbildung 9.107: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

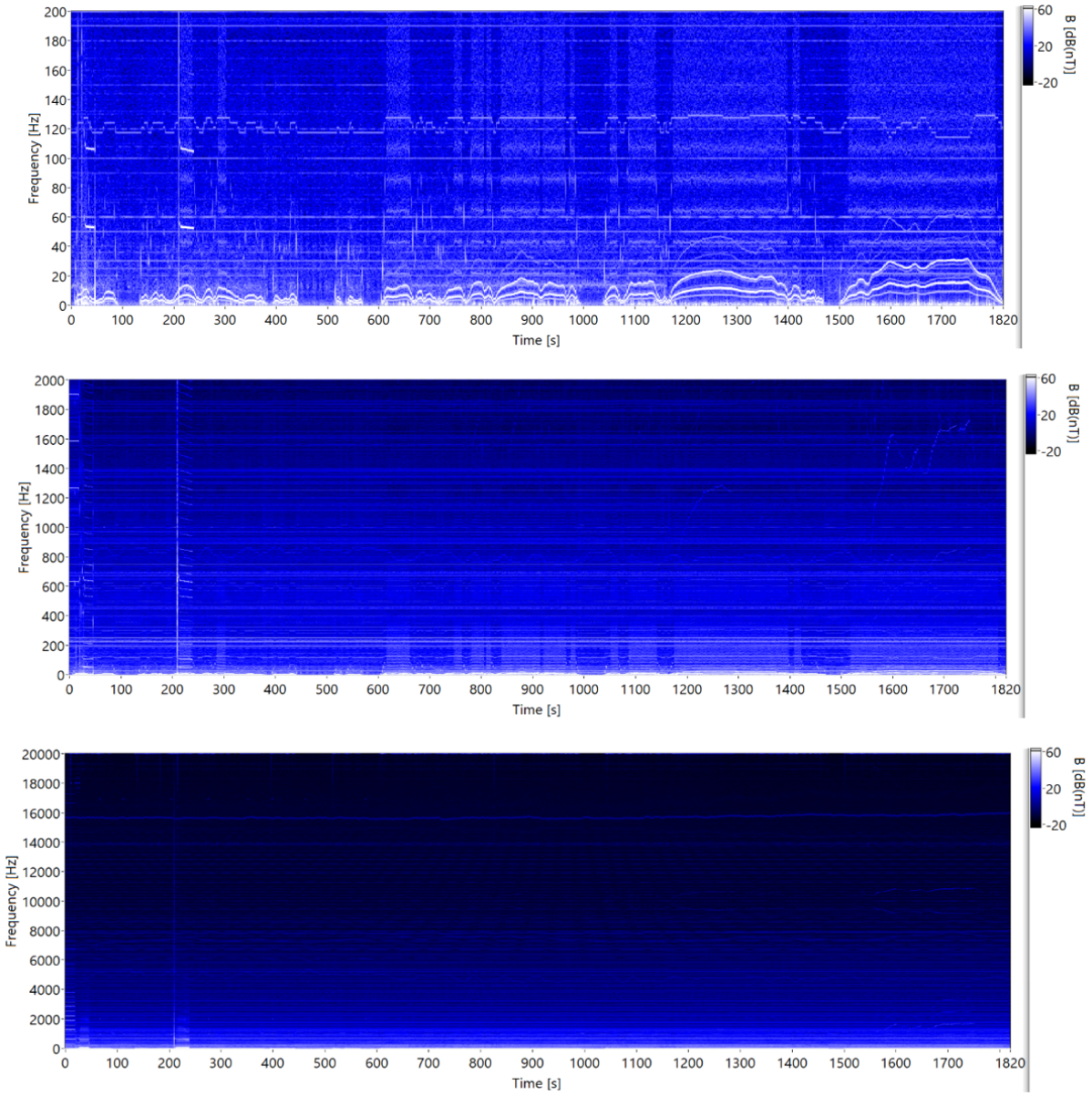


Abbildung 9.108: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Aude e-tron, am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

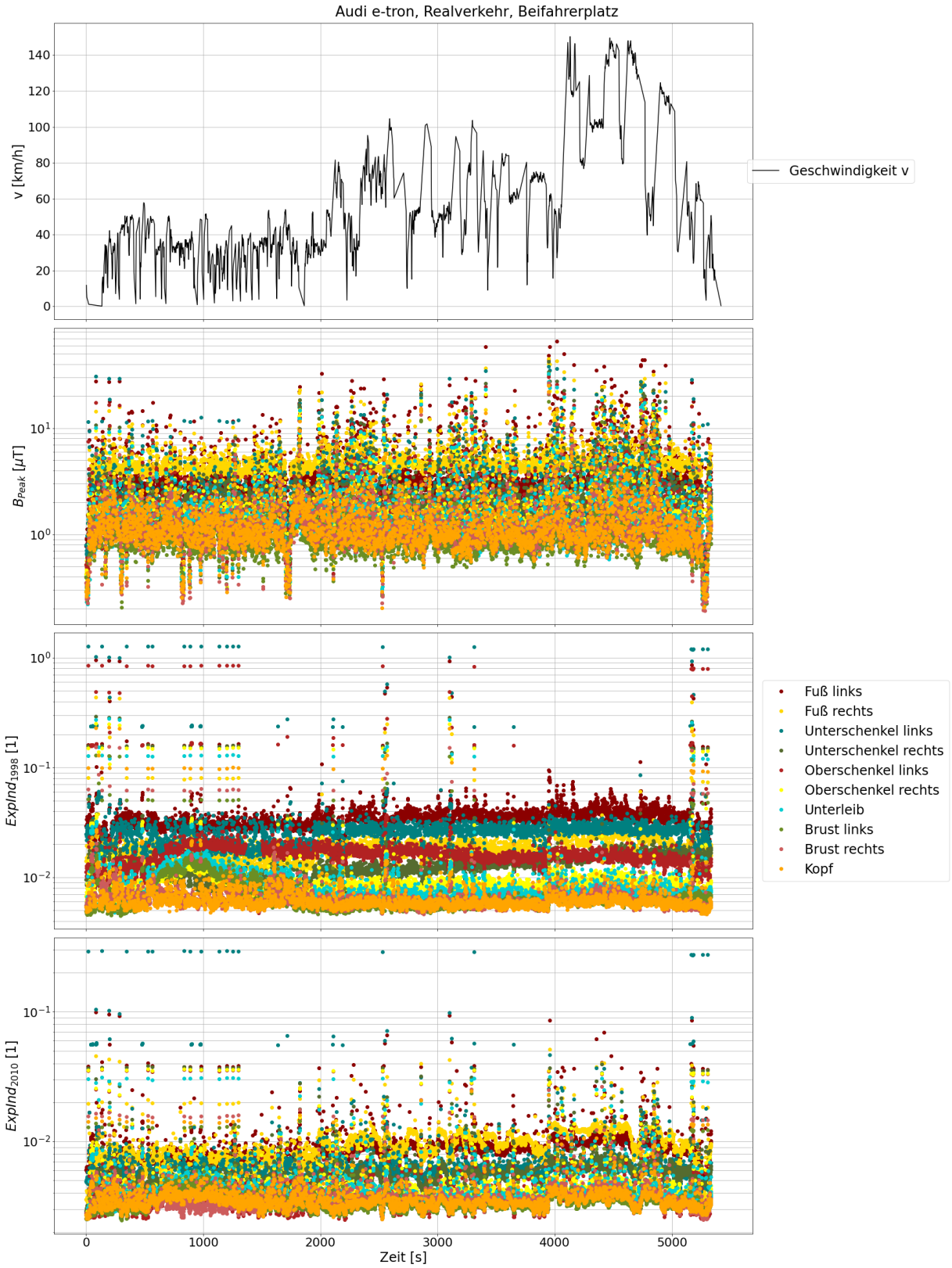


Abbildung 9.109: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

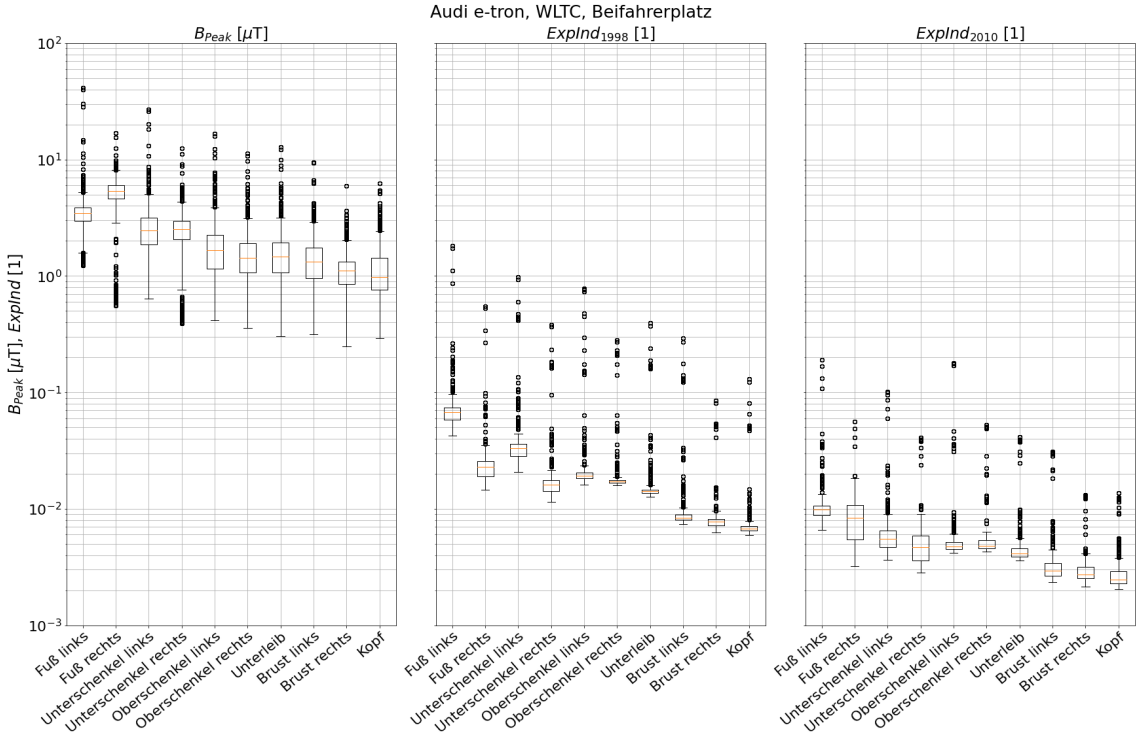


Abbildung 9.110: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

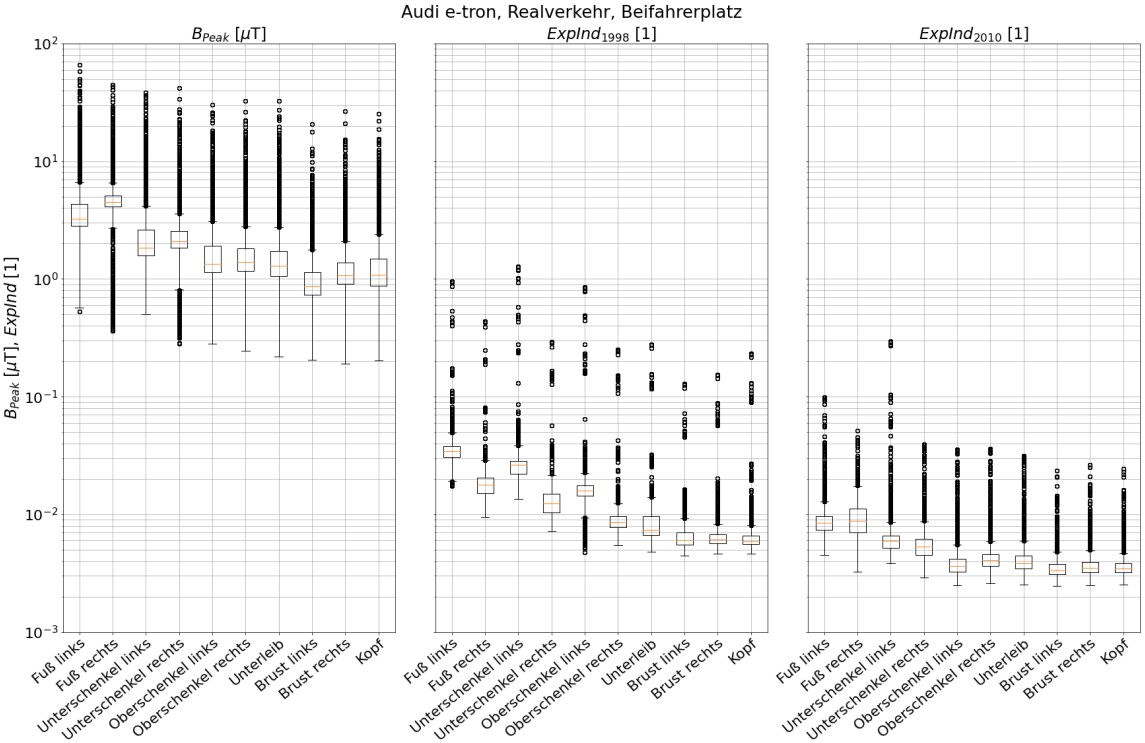


Abbildung 9.111: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

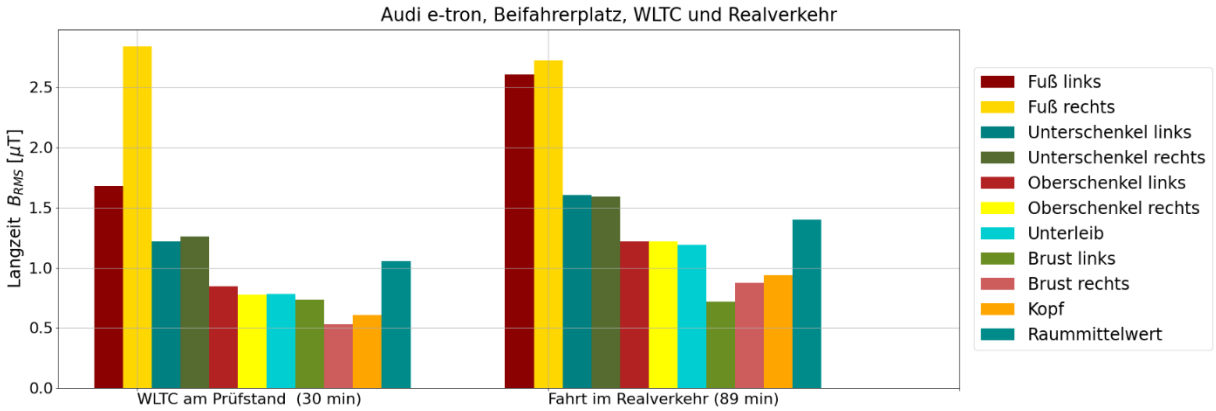


Abbildung 9.112: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.5.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 1.1 im Bereich des linken Unterschenkels am Beifahrerplatz) und durch die Sitzheizung im Unterleibsbereich am Beifahrerplatz auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 0.6). Abbildung 9.113 und Abbildung 9.114 zeigen zugehörige Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte.

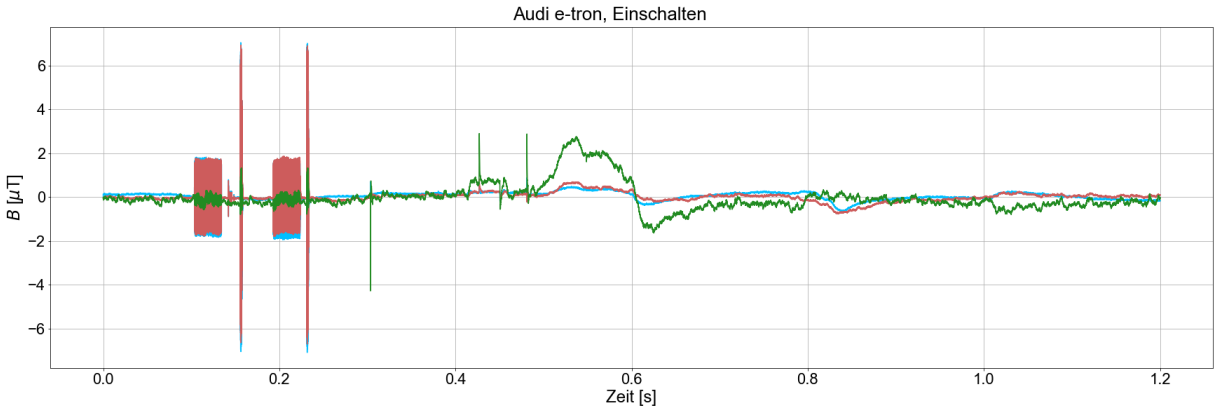


Abbildung 9.113: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im Bereich des linken Unterschenkels am Beifahrerplatz. Die für den Expositionsindex bestimmenden Bursts (bei Sekunde ca. 0.16 und ca. 0.23) entsprechen den auch beim Beschleunigen beobachteten Signal-Zeitverläufen.

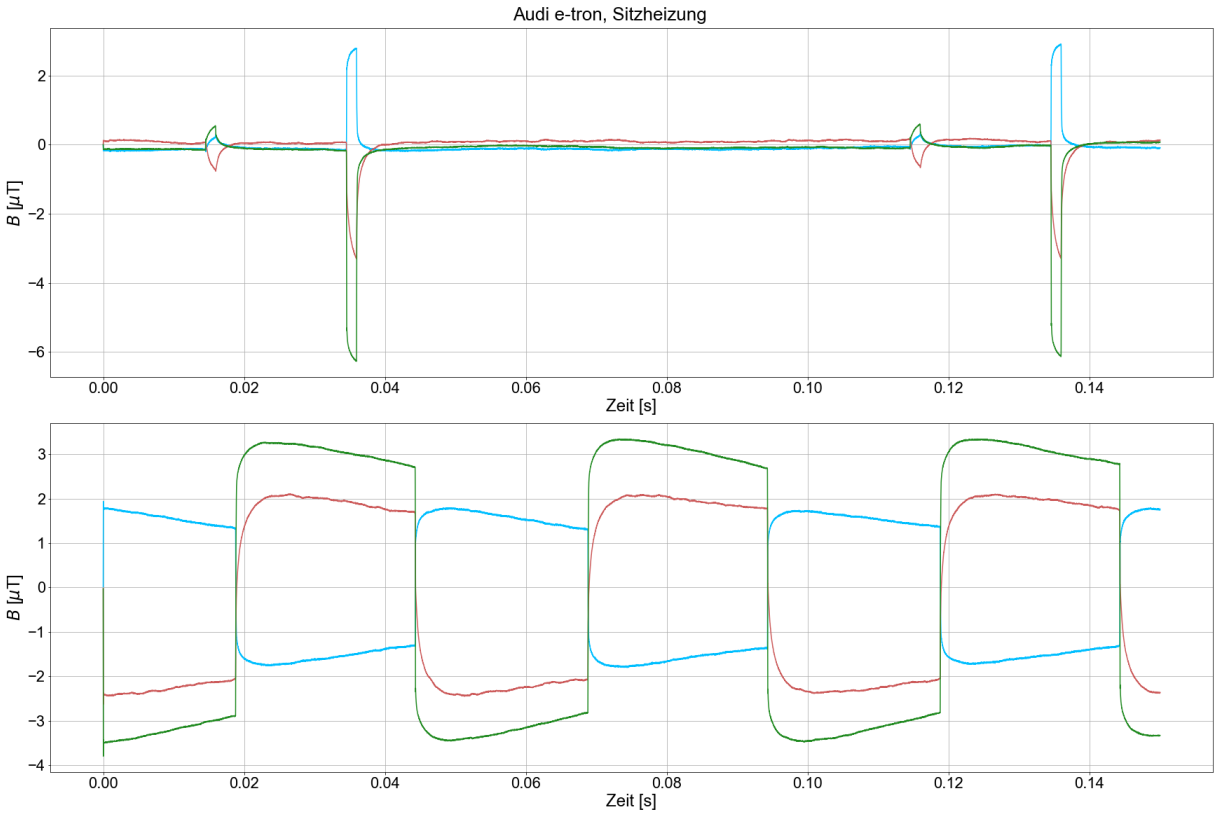


Abbildung 9.114: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte verursacht durch die Sitzheizung, gemessen im Unterleibsbereich am Beifahrerplatz. Oben: niedrigste Stufe; unten: höchste Stufe. Die unterschiedlichen Stufen führen zu keinen relevanten Unterschieden im Expositionsindex.

Abbildung 9.115 bis Abbildung 9.117 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am mittleren Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

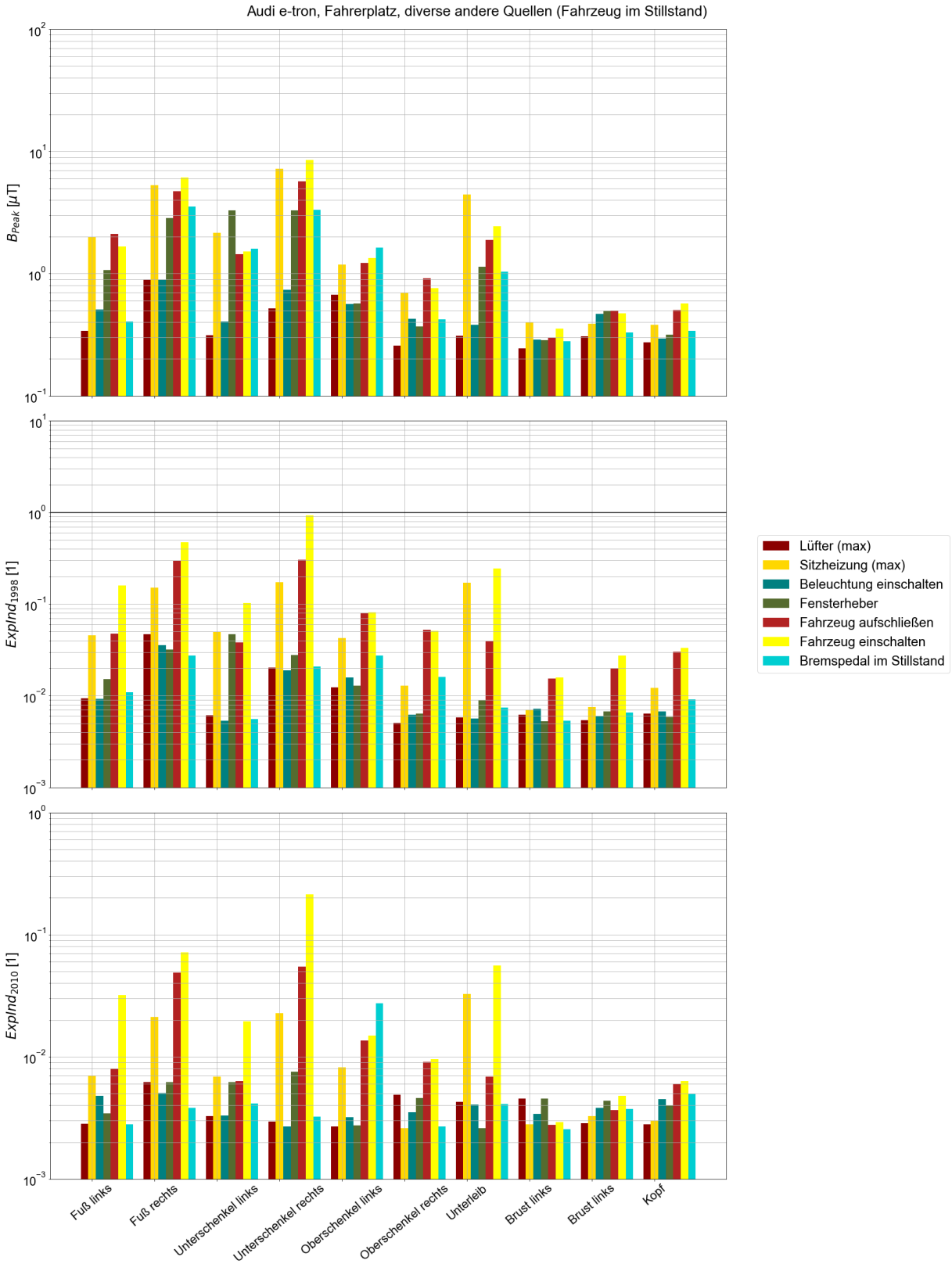


Abbildung 9.115: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

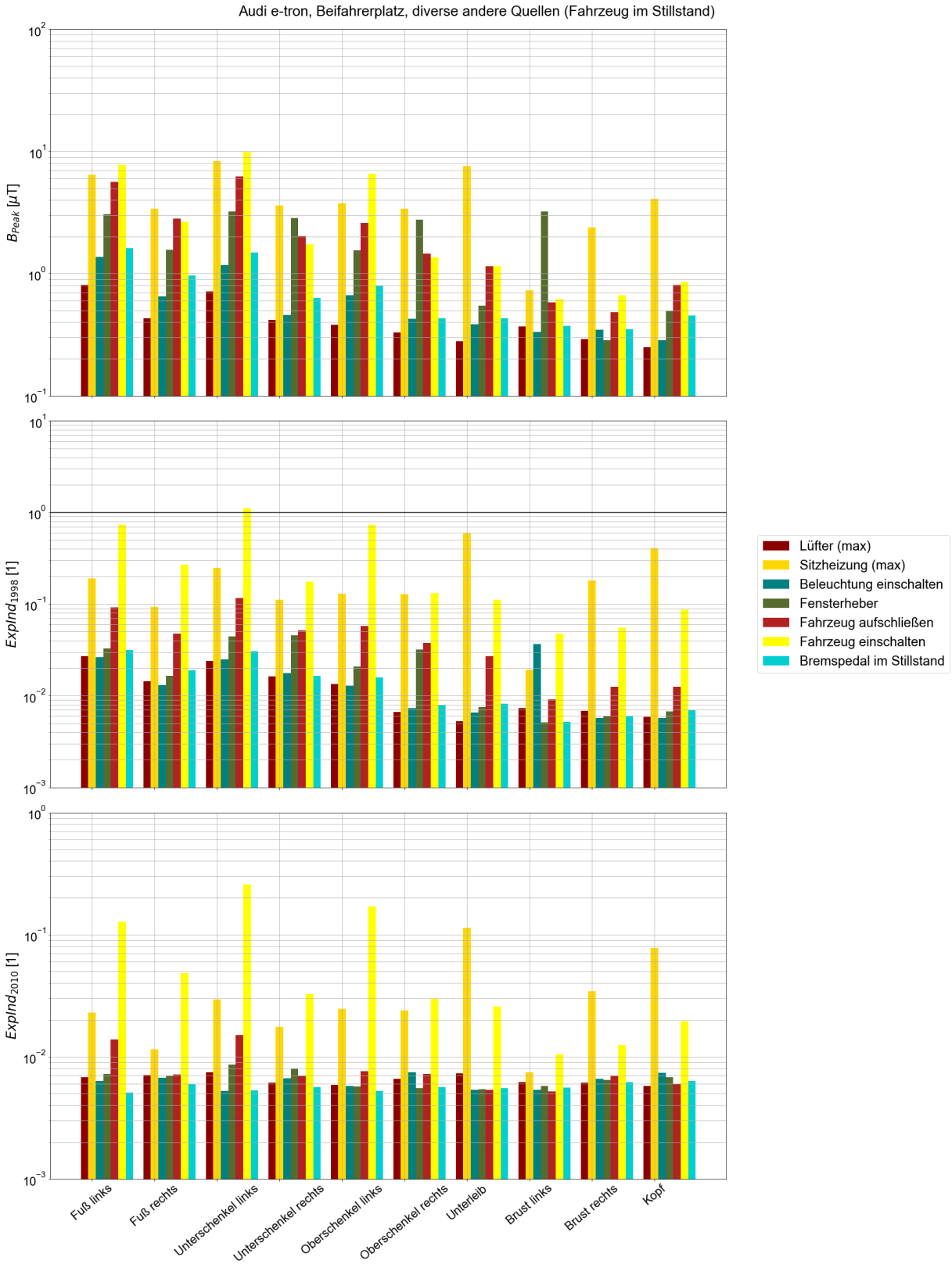


Abbildung 9.116: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

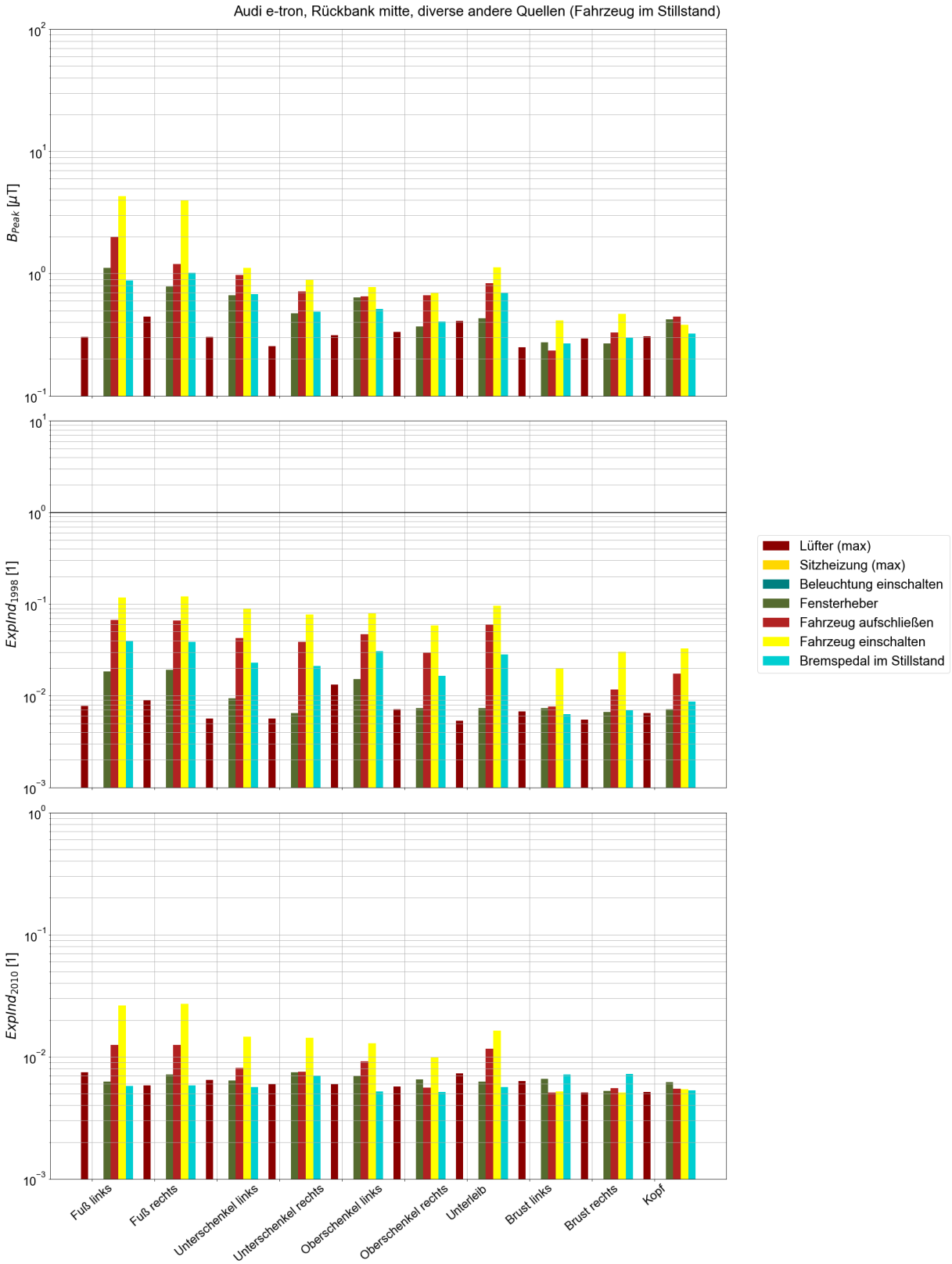


Abbildung 9.117: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (Mitte) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Die Sitzheizung der Vordersitze und Beleuchtung einschalten wurden an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

9.4.6 Peugeot e-208



Abbildung 9.118: Untersuchter Peugeot e-208 auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.6.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Peugeot e-208

Baujahr: 2020

Motorleistung: 100 kW

Batteriekapazität: 50 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.118 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.119).

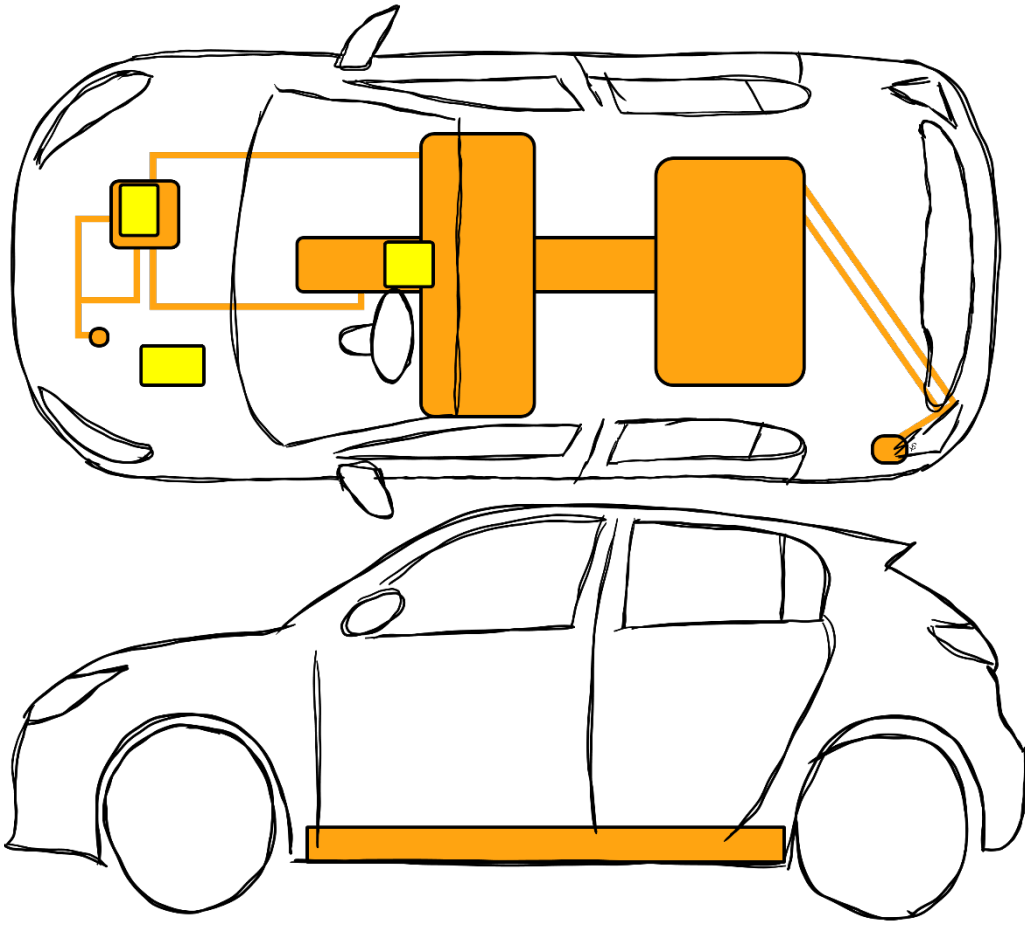


Abbildung 9.119: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Peugeot e-208 (modifiziert nach https://public.servicebox.peugeot.com/AP/secours/AP/documents/de_DE/PDF_FAD/FAD_e208_1PP2_de_DE.pdf).

9.4.6.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.120 bis Abbildung 9.125 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.120 bis Abbildung 9.122) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im Fußbereich des Fahrers im Ausmaß von bis zu ca. 0.07 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei dort ein Anteil von ca. 0.007 (rechter Fuß) - 0.02 (linker Fuß) auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. Am Beifahrerplatz bzw. auf der Rückbank blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit unterhalb von 0.04 bzw. 0.03.

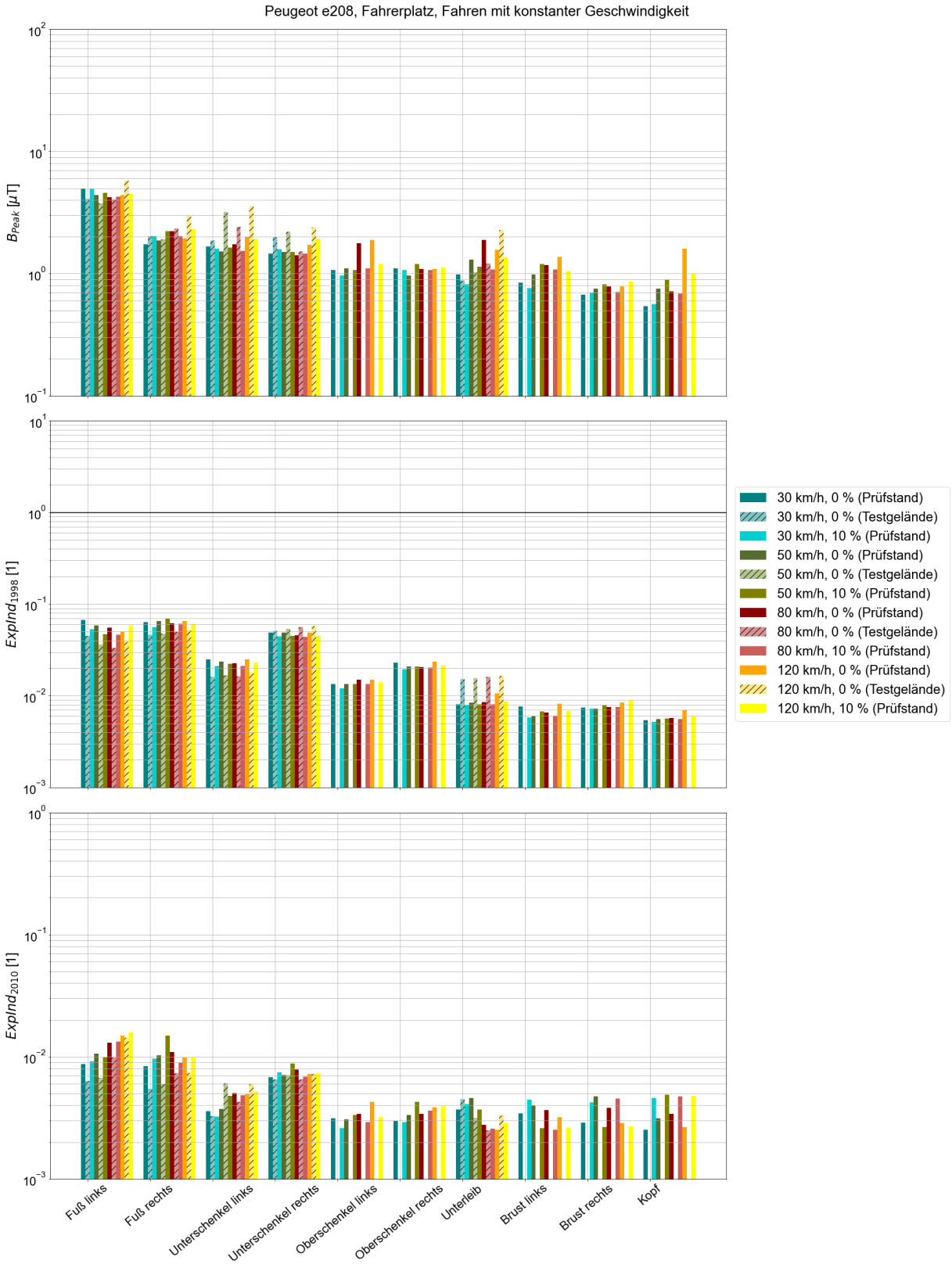


Abbildung 9.120: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

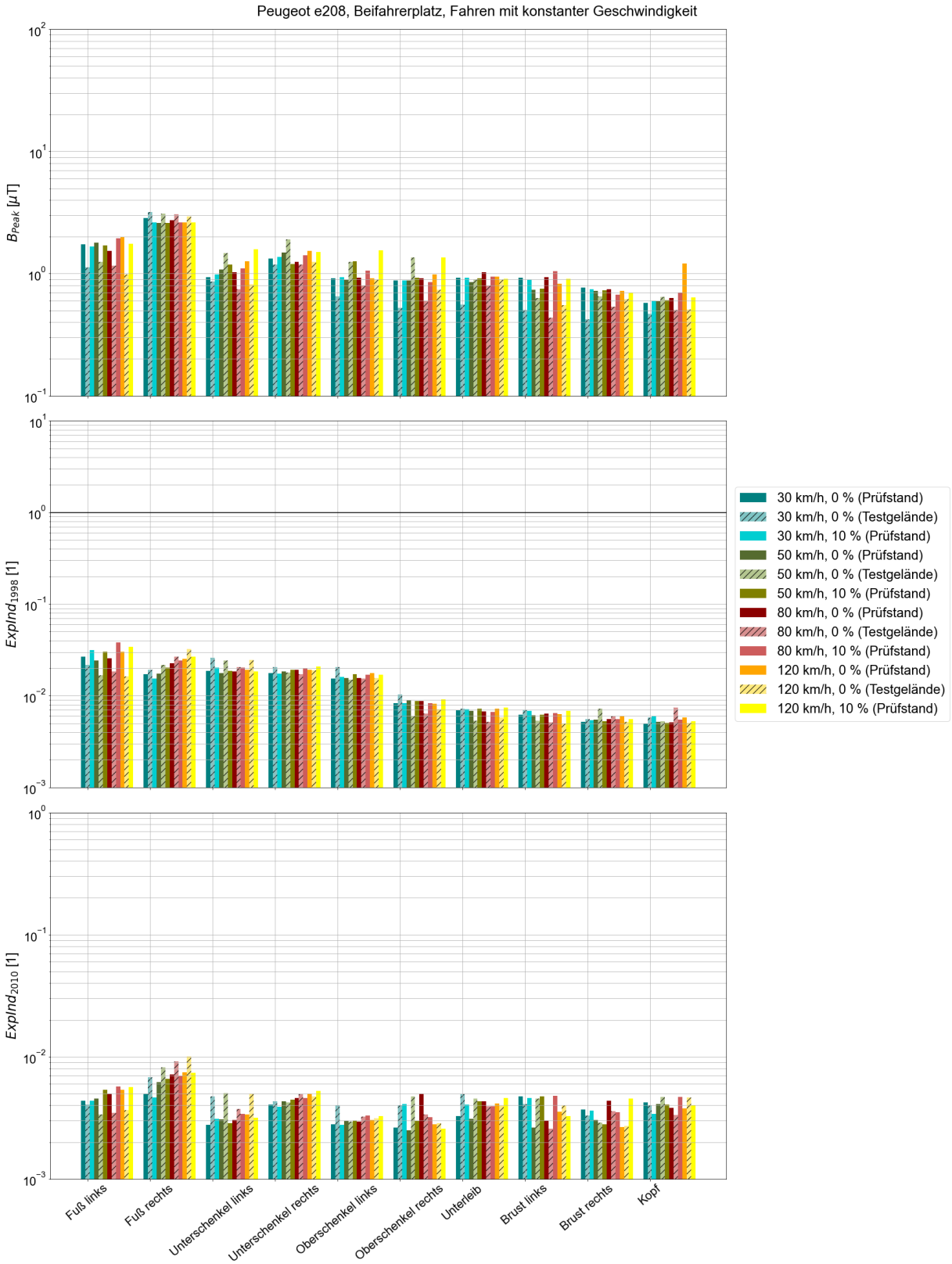


Abbildung 9.121: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

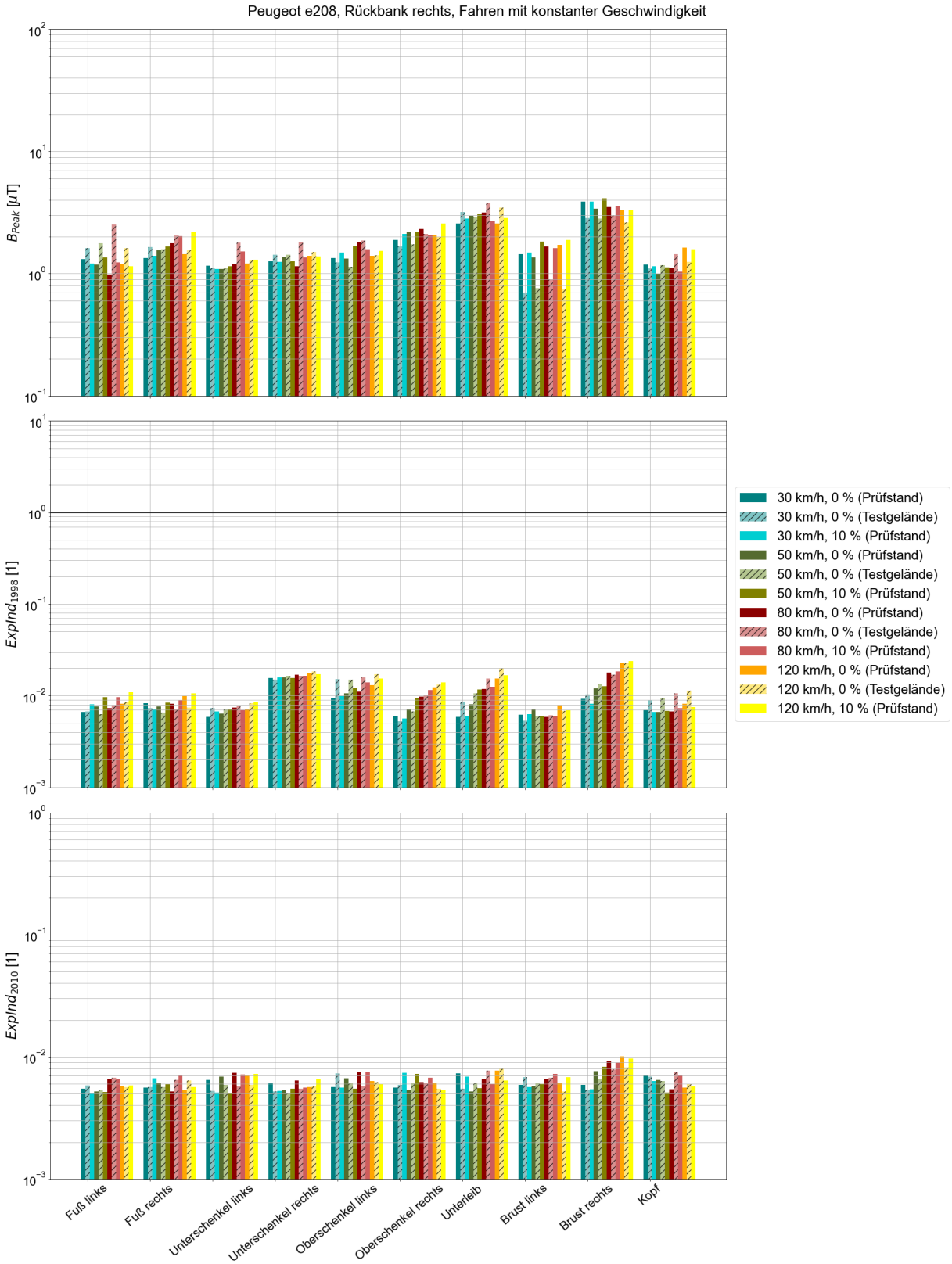


Abbildung 9.122: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

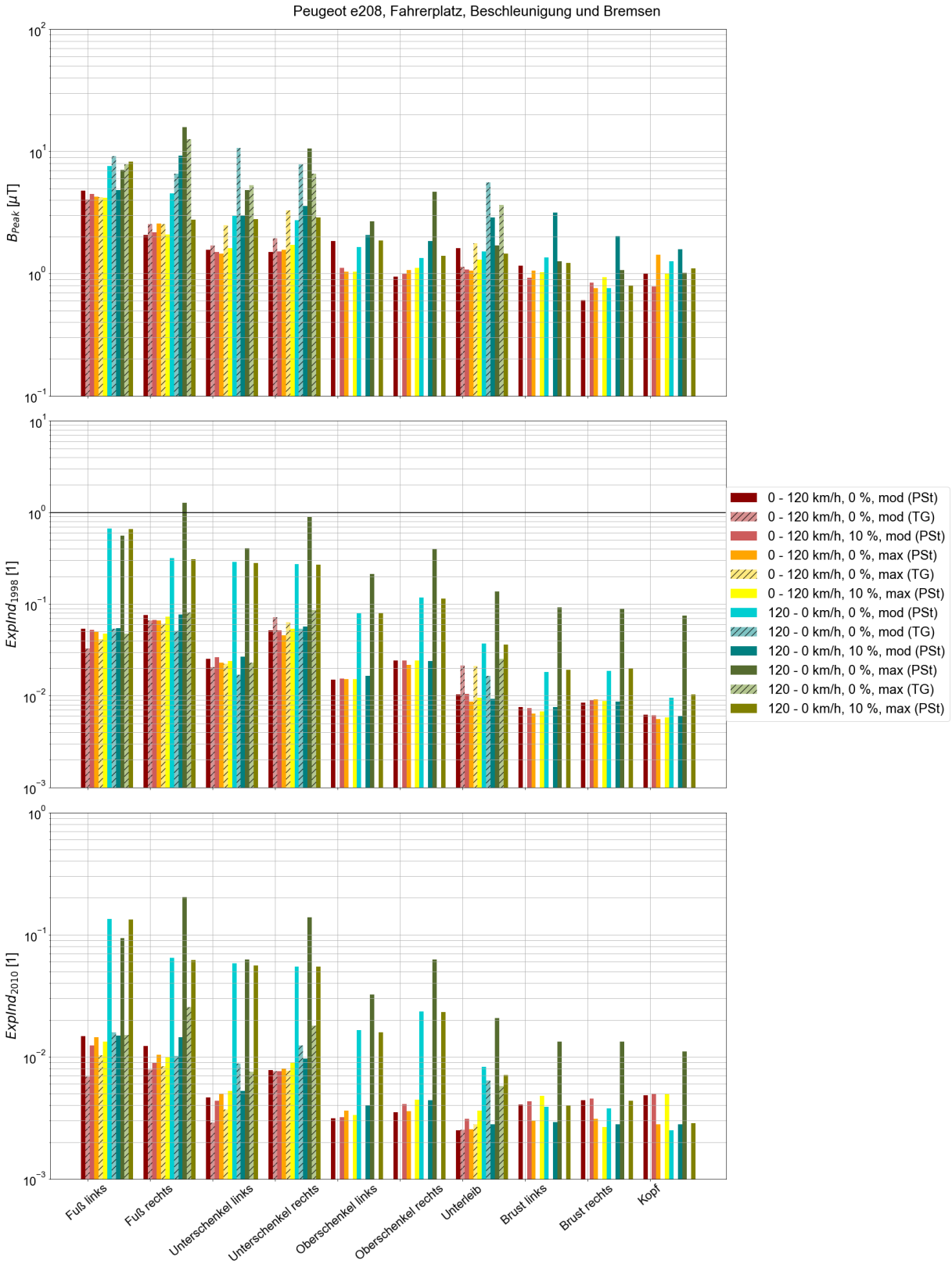


Abbildung 9.123: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

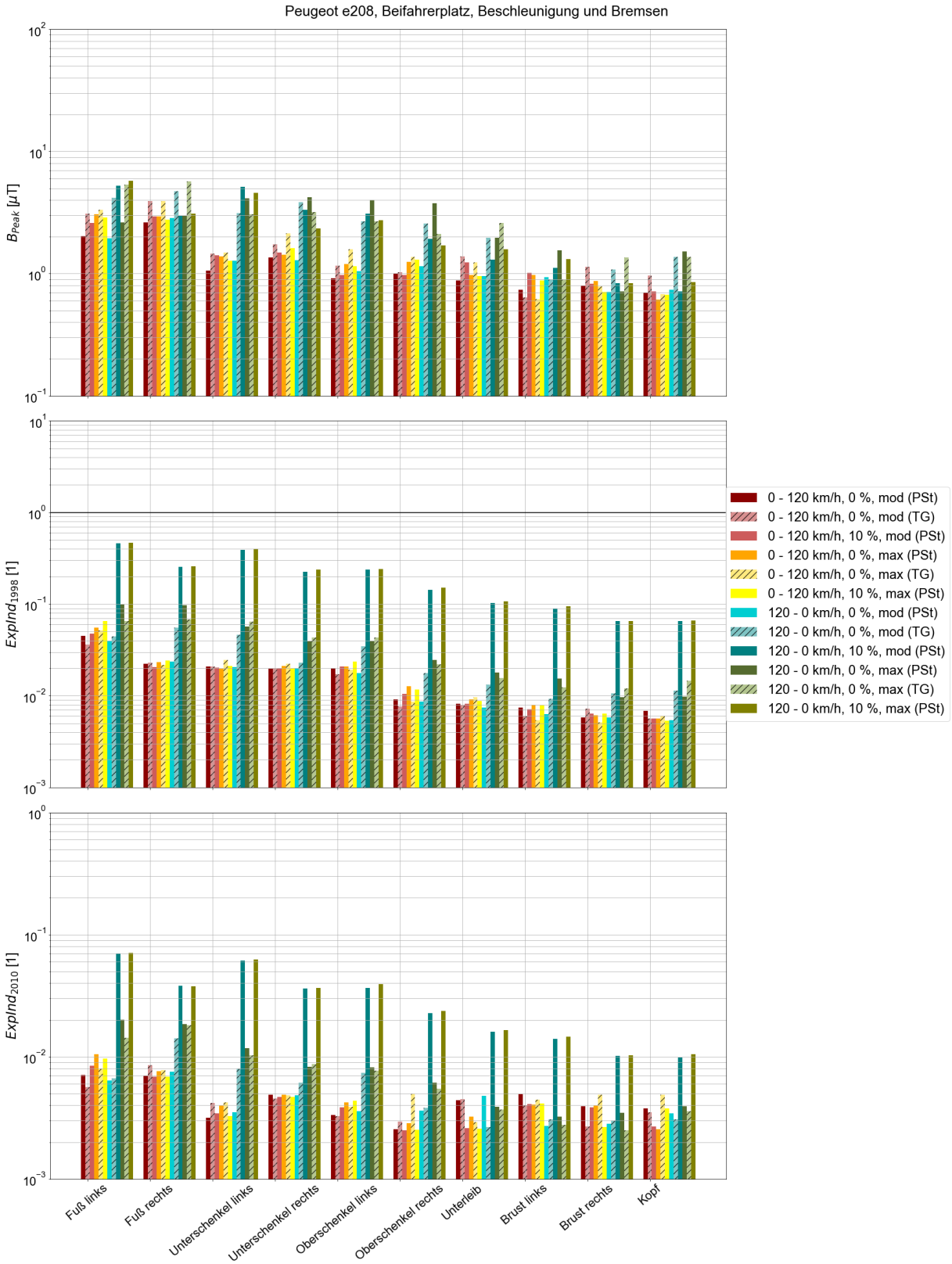


Abbildung 9.124: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

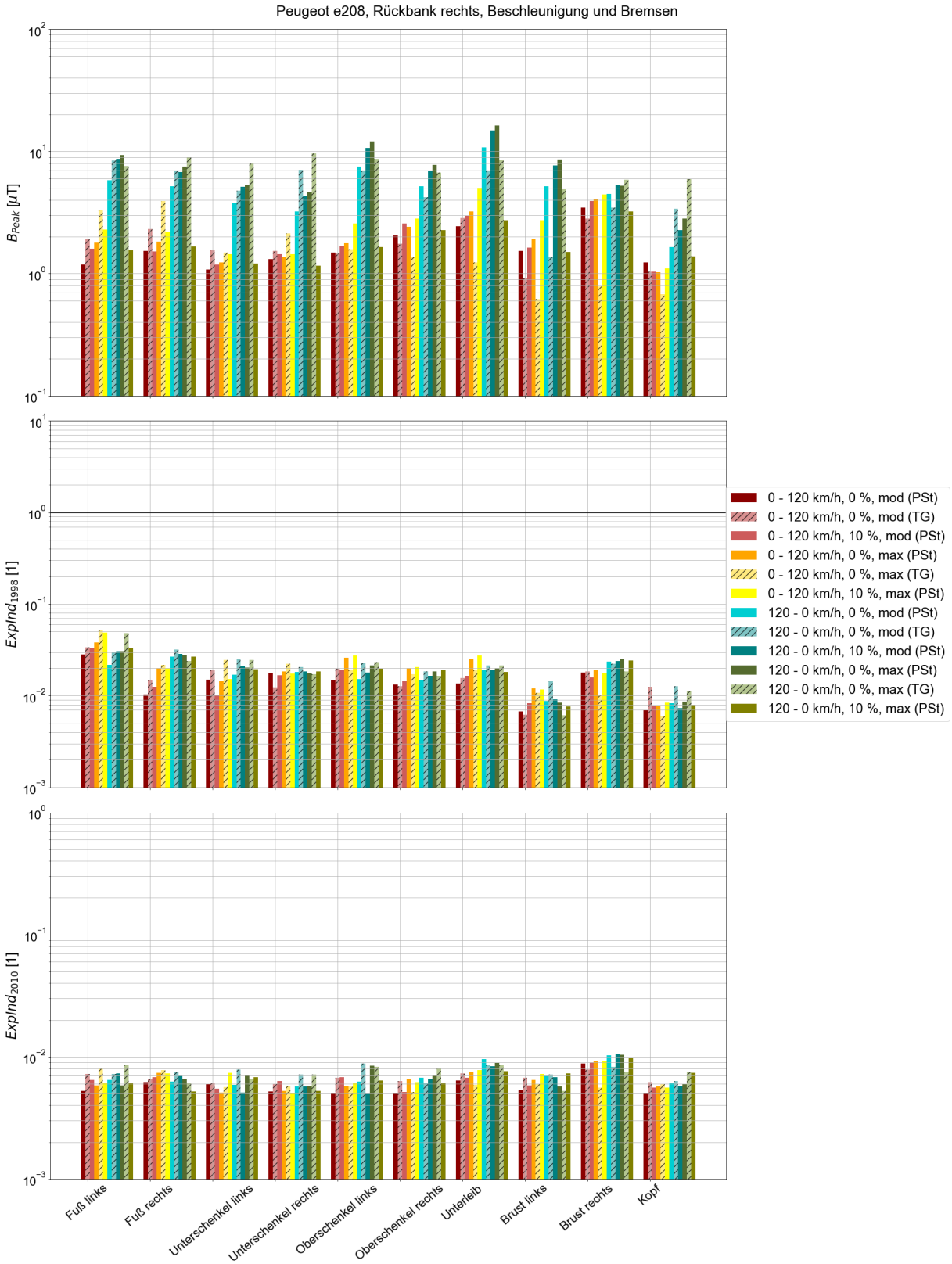


Abbildung 9.125: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.123 bis Abbildung 9.125) zeigten sich am Fahrer- und Beifahrerplatz deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, wobei die größten $ExpInd_{1998}$ bei starkem Bremsen zufolge unterschiedlicher transienter Signalanteile auftraten. Im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz zeigten sich am Prüfstand bei starken Bremsmanövern reproduzierbar $ExpInd_{1998}$ bis zu 1.28. Beim Fahren am Testgelände und im Realverkehr konnten diese Transienten allerdings nicht mehr in diesem Ausmaß gemessen werden. Die Ursache dafür waren die notwendigerweise leicht unterschiedlichen Positionen der Messsonden im rechten Fußbereich des Fahrerplatzes bei den Messungen am Prüfstand und am Testgelände.

Abbildung 9.126 und Abbildung 9.127 zeigen die am Prüfstand gemessenen transienten Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte während zweier verschiedener starker Bremsmanöver.



Abbildung 9.126: Zeitverlauf eines transienten Signalverlaufs der magnetischen Flussdichte während eines starken Bremsmanövers, gemessen am Prüfstand im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz ($ExpInd_{1998}$ = 0.34, $ExpInd_{2010}$ = 0.07).

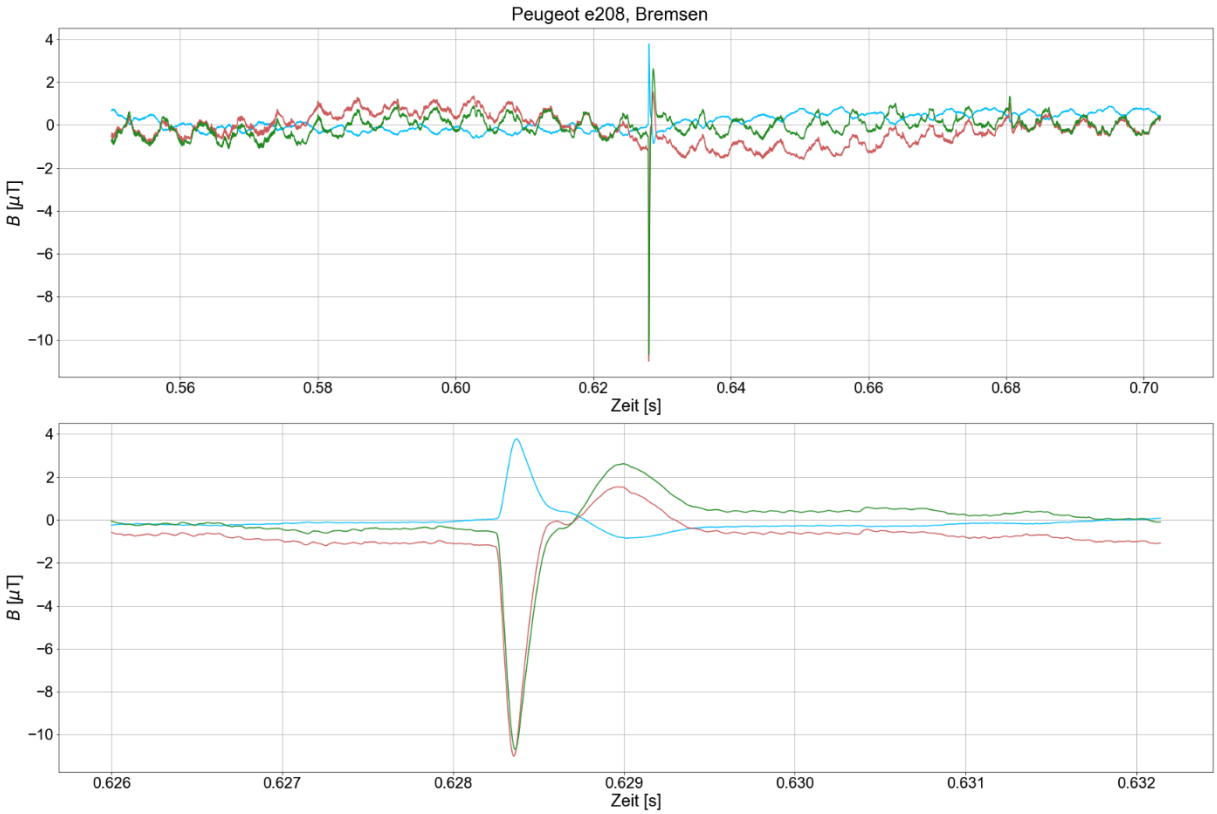


Abbildung 9.127: Zeitverlauf eines weiteren transienten Signalverlaufs der magnetischen Flussdichte, gemessen am Prüfstand im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz, während eines starken Bremsmanövers mit maximaler Verzögerung ($ExpInd_{1998}$ = 1.28, $ExpInd_{2010}$ = 0.20).

9.4.6.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.128 und Abbildung 9.130 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.129 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.131 und Abbildung 9.132 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Die in Abbildung 9.128 bzw. Abbildung 9.130 zwar geringfügigen (ca. 0.5%pkte), jedoch deutlich erkennbaren Anstiege des $ExInd_{1998}$ im Unterleibsbereich bei ca. Sekunde 1200 bzw. im Bereich des linken Unterschenkels bei ca. Sekunde 1900, wurden vermutlich durch sich verändernde Positionen der entsprechenden Magnetfeldsonden während der Fahrt verursacht.

Abbildung 9.133 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

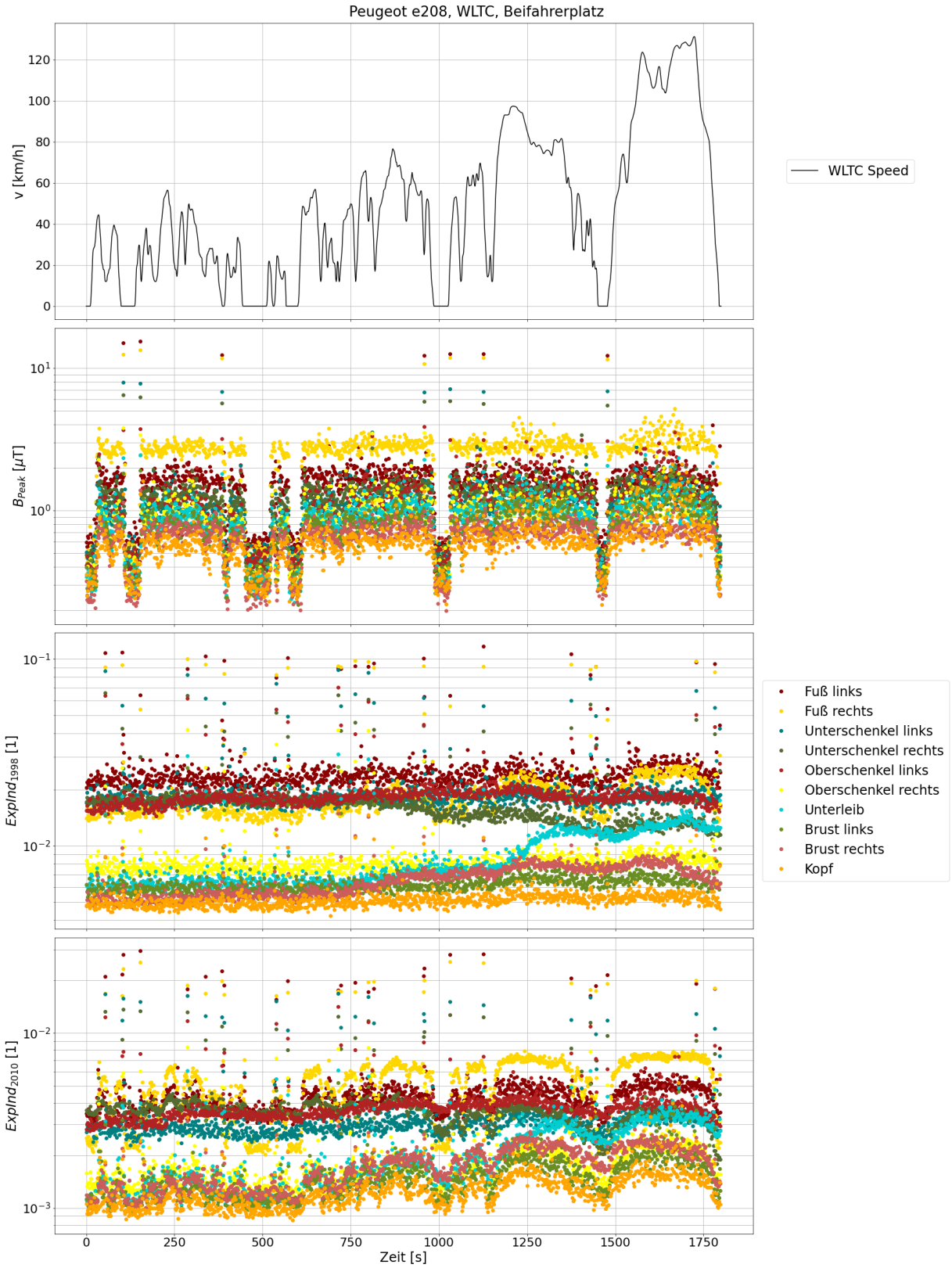


Abbildung 9.128: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

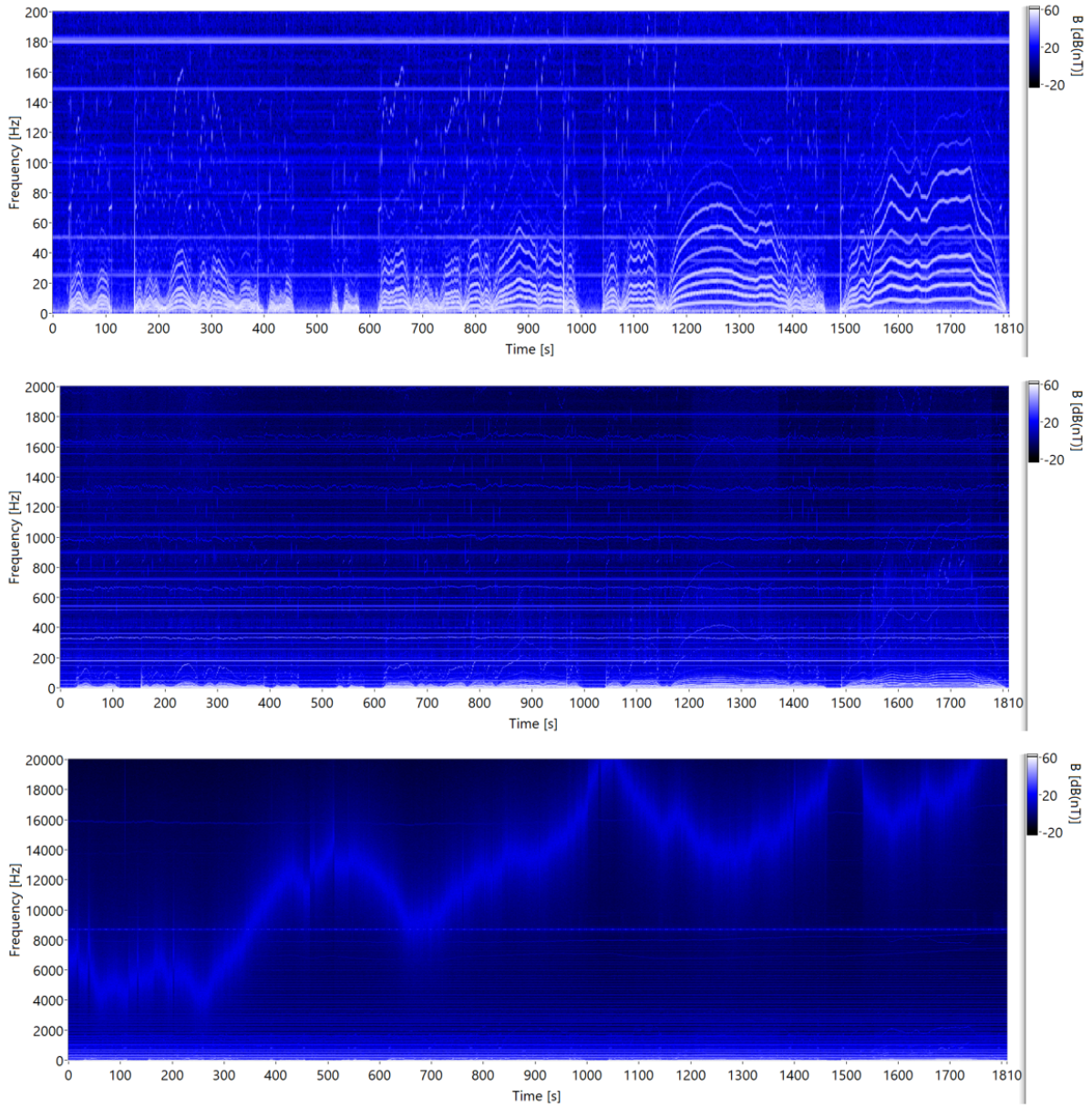


Abbildung 9.129: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Peugeot e208 am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

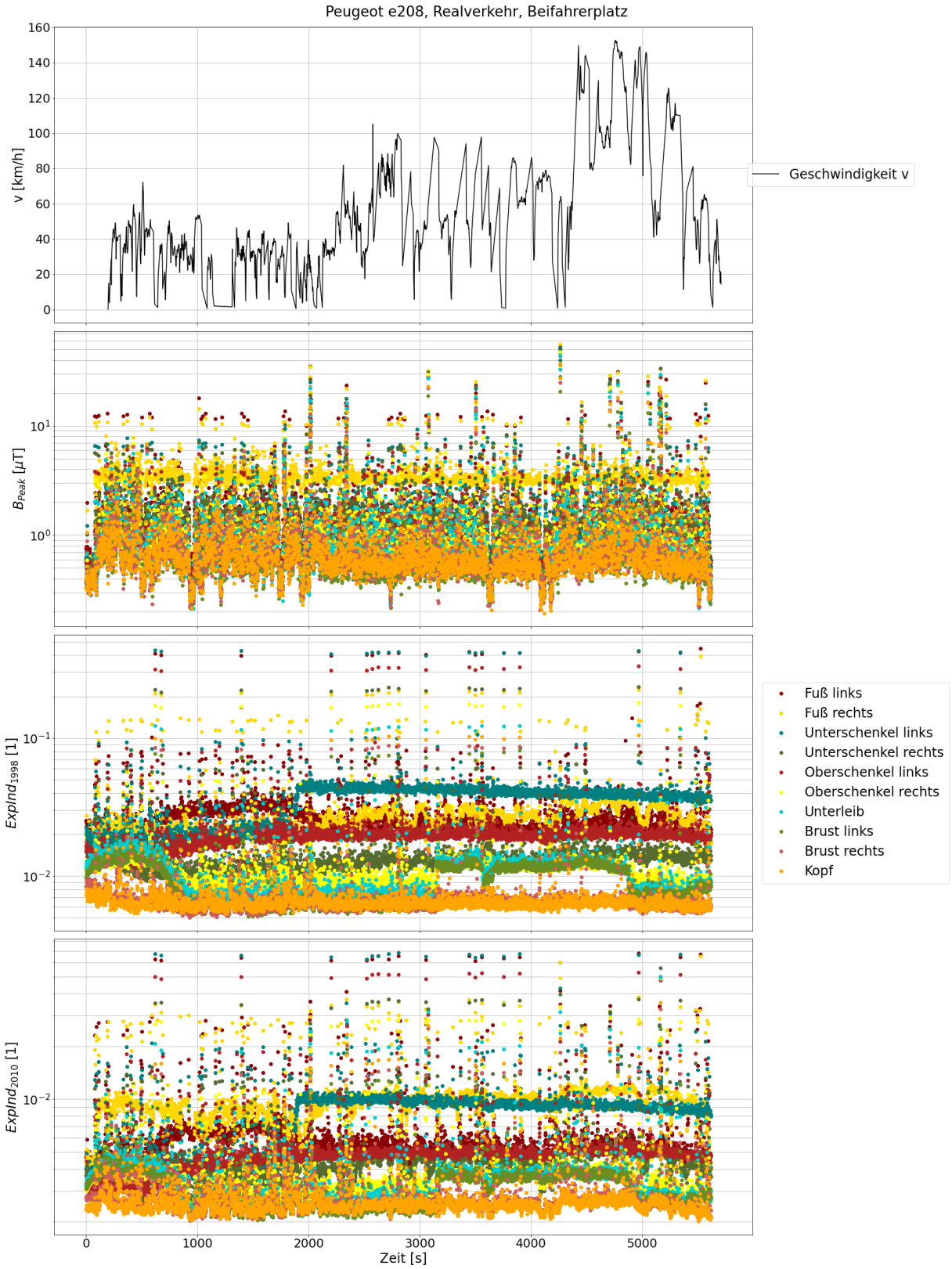


Abbildung 9.130: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

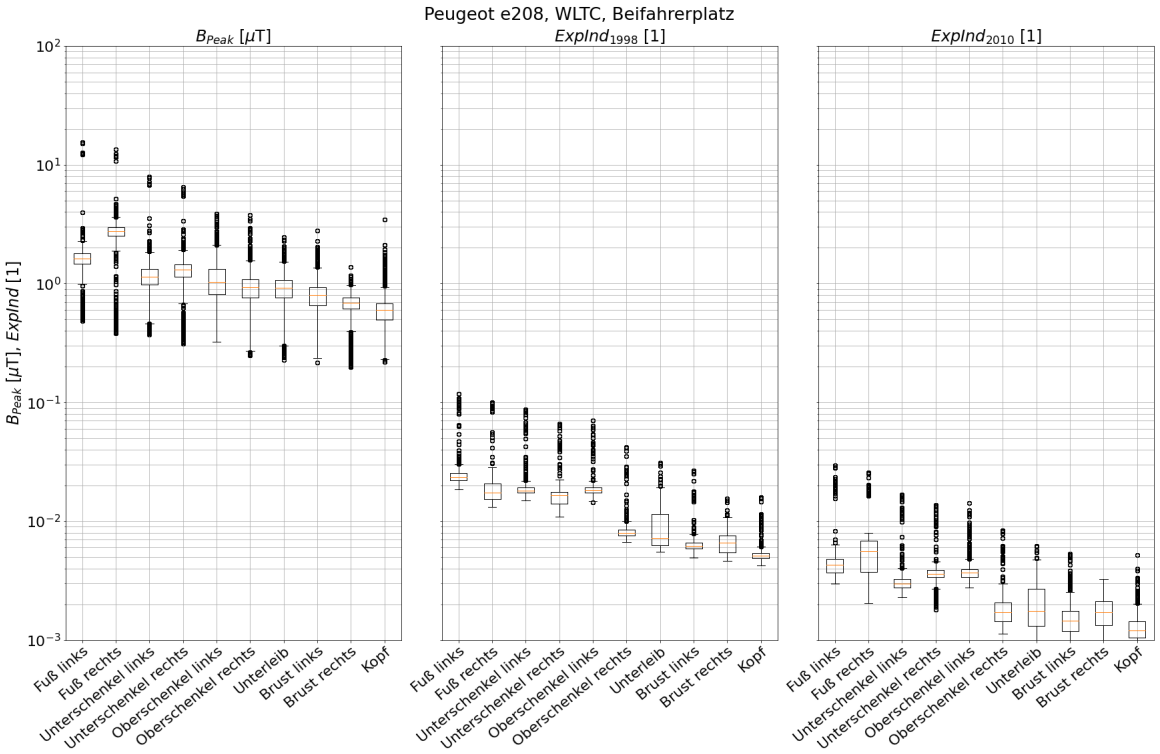


Abbildung 9.131: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

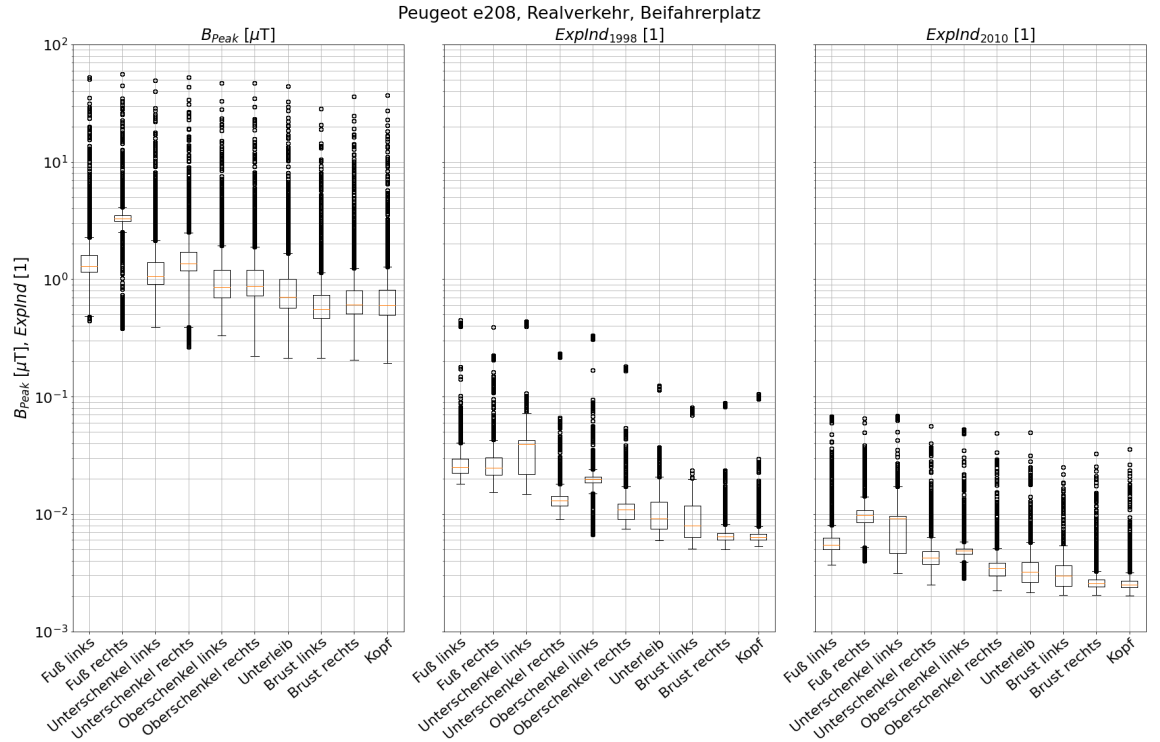


Abbildung 9.132: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

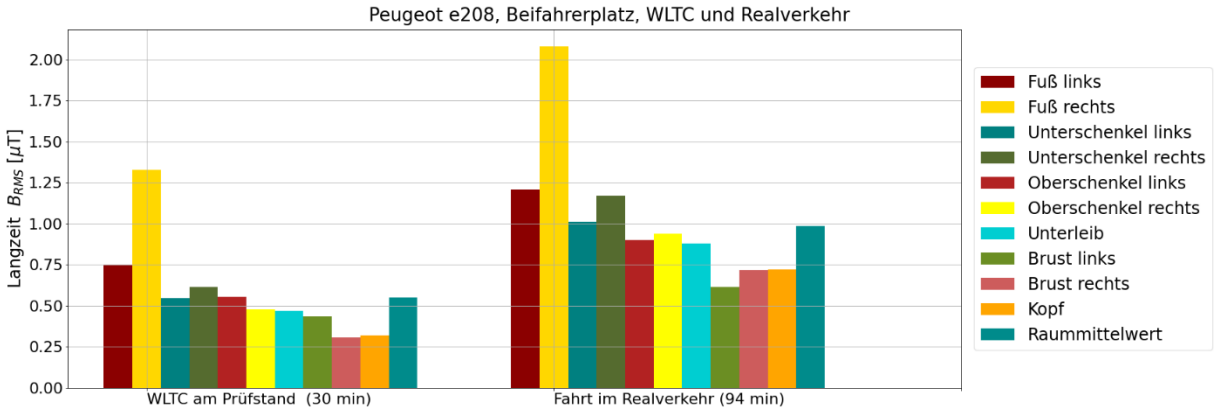


Abbildung 9.133: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.6.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ (bis zu ca. 1.9 im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz) traten beim Betätigen des Bremspedals nach dem Einschalten des Fahrzeugs auf. Transiente Magnetfelder zufolge des Fensterhebers führten im Fußbereich von Fahrer (links) und Beifahrer (rechts) zu $ExpInd_{1998}$ von ca. 0.5.

Abbildung 9.134 und Abbildung 9.135 zeigen zugehörige Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte.

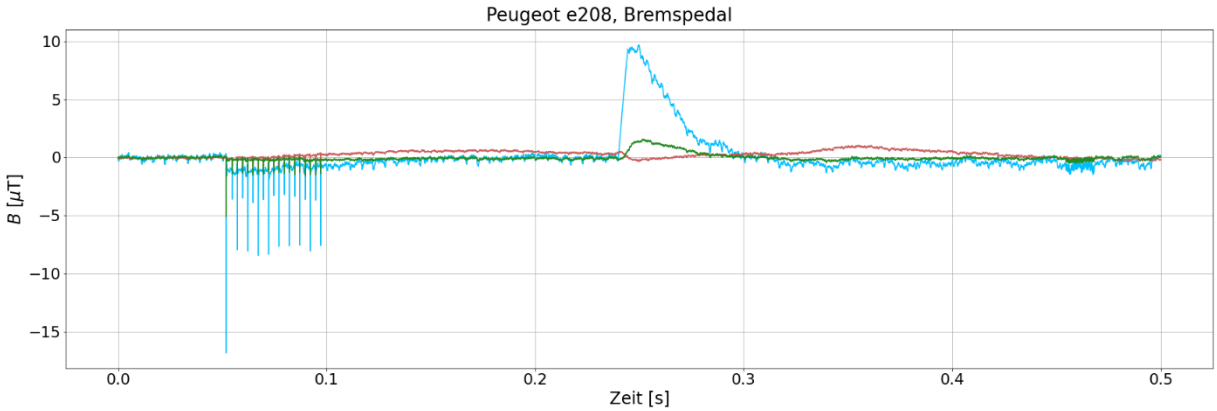


Abbildung 9.134: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Betätigen des Bremspedals nach dem Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes.

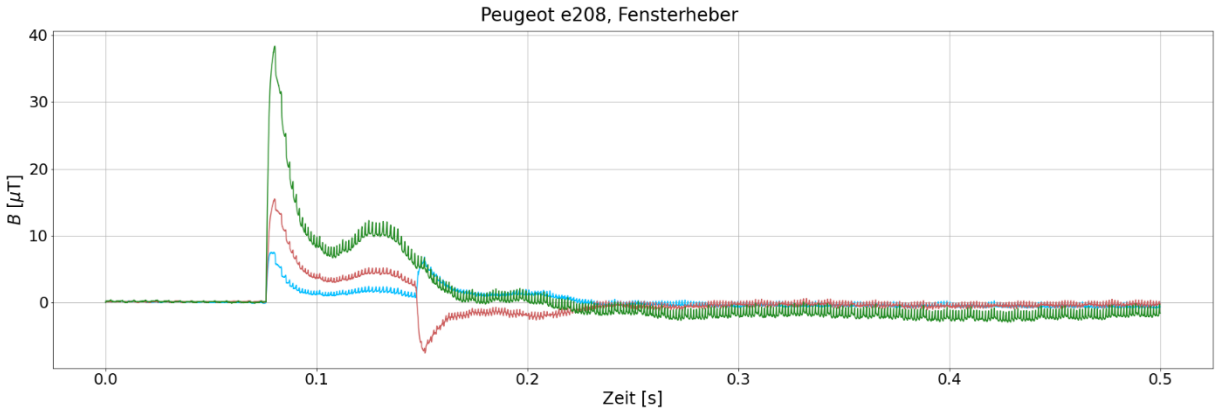


Abbildung 9.135: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Betätigen des Fensterhebers, gemessen im rechten Fußbereich des Beifahrerplatzes.

Abbildung 9.136 bis Abbildung 9.138 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

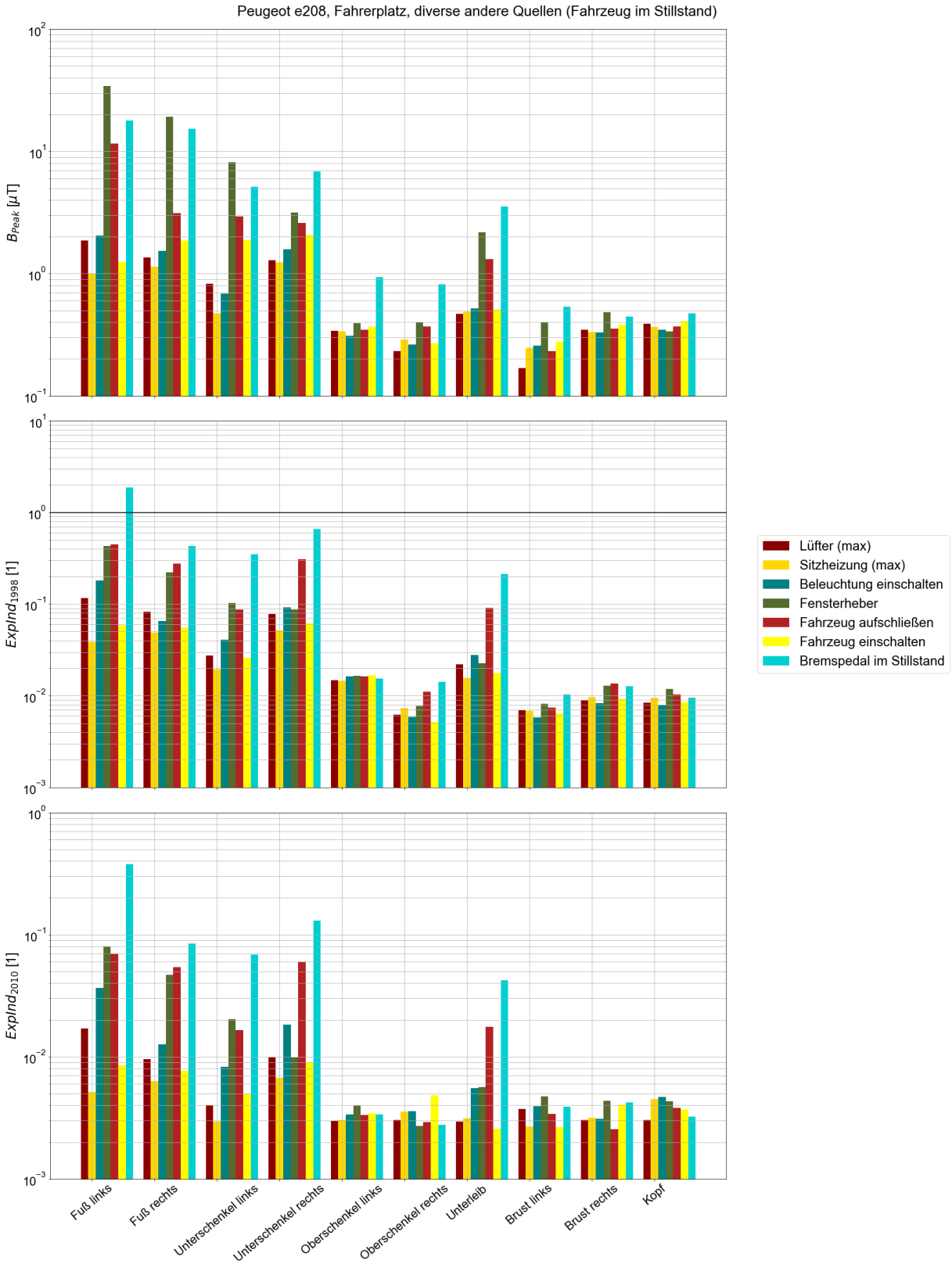


Abbildung 9.136: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

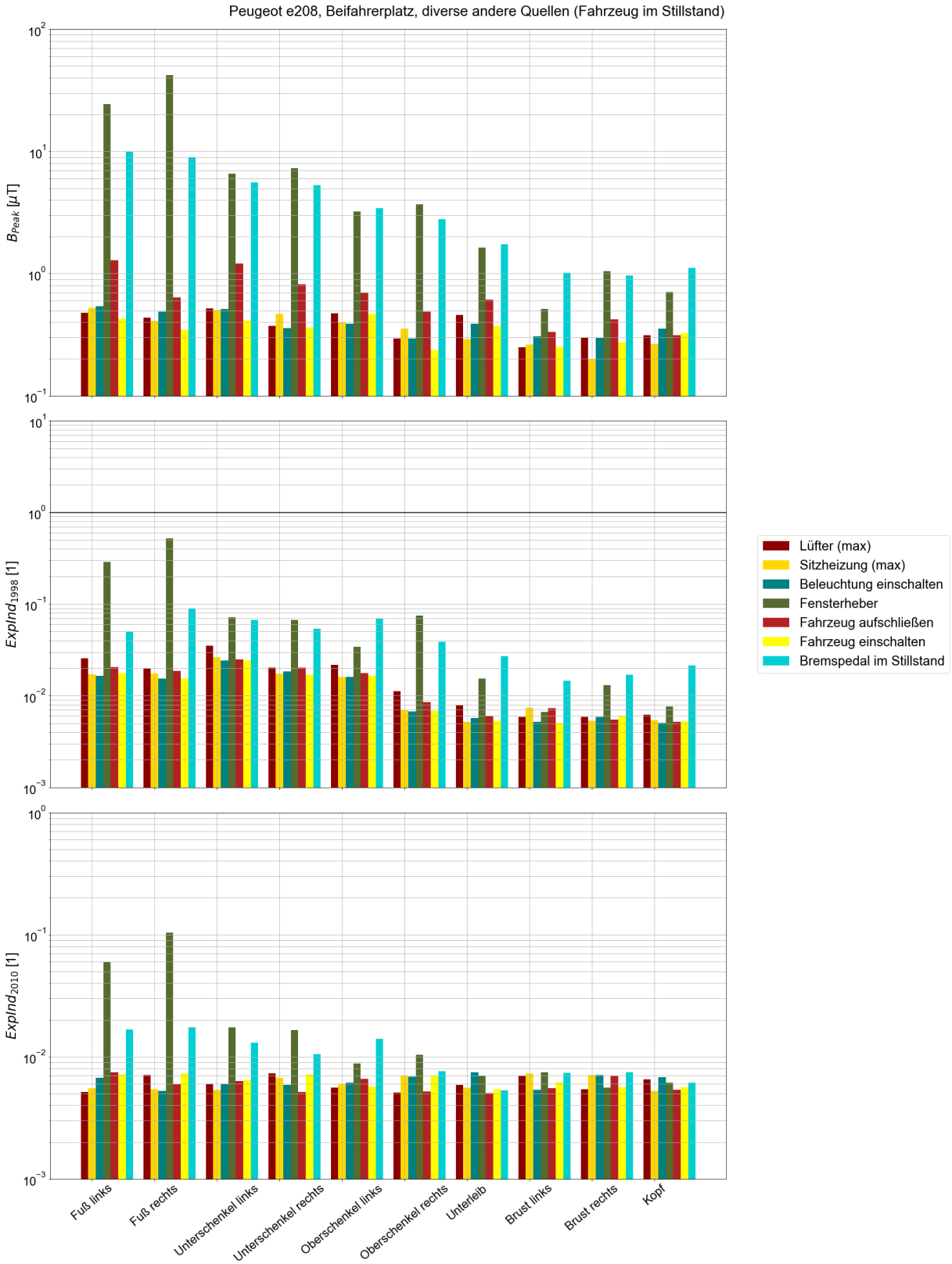


Abbildung 9.137: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

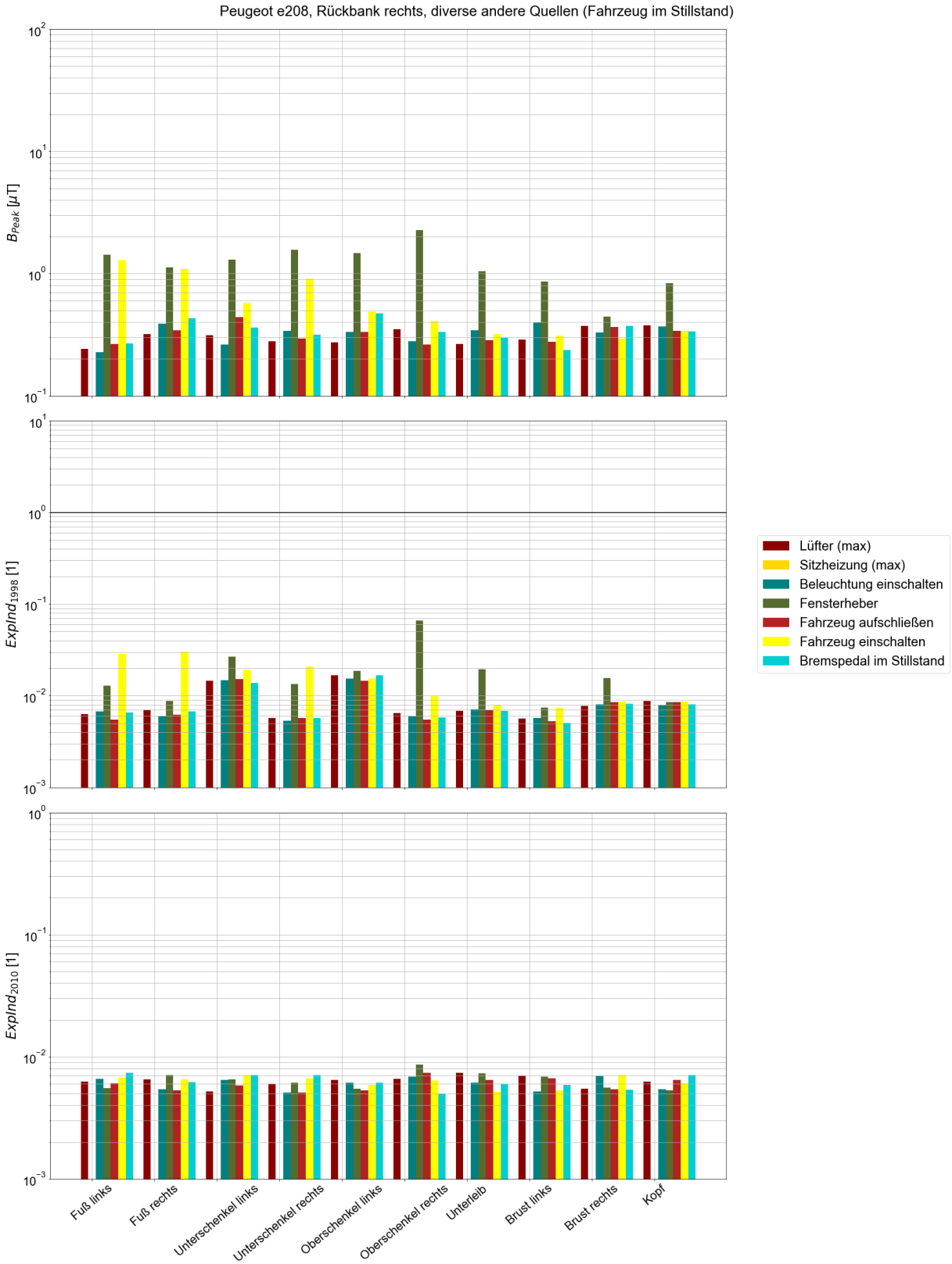


Abbildung 9.138: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Die Immission der Sitzheizung der Vordersitze wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

9.4.7 Porsche Taycan



Abbildung 9.139: Untersuchter Porsche Taycan auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.7.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Porsche Taycan Turbo S

Baujahr: 2021

Motorleistung: 300 kW

Batteriekapazität: 93 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.139 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.140).

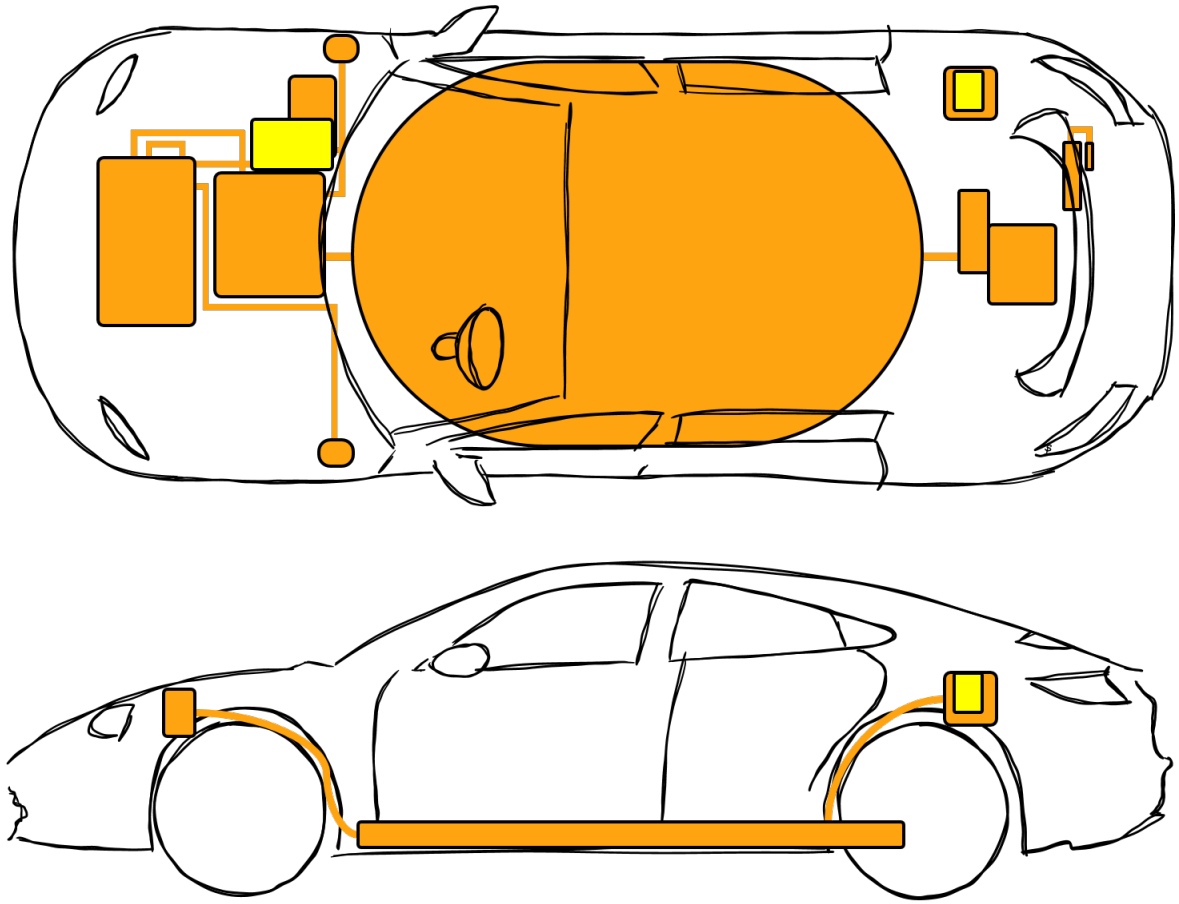


Abbildung 9.140: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Porsche Taycan (modifiziert nach https://rettungskarten-service.de/wp-content/uploads/porsche-taycan-y1a-limousine-baujahr-ab-2020.pdf).

9.4.7.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.141 bis Abbildung 9.146 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.141 bis Abbildung 9.143) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im linken Fußbereich des Beifahrers im Ausmaß von ca. 0.18 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Der Anteil der Reifenmagnetisierung war in dieser Messposition vergleichsweise gering und betrug weniger als 0.01. In anderen Positionen war der Anteil der Reifenmagnetisierung am Expositionsindex deutlich größer. Im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz betrug er beispielsweise ca. 0.018 ($ExpInd_{1998}$), im Bereich der rechten Brust am rechten Sitz der Rückbank sogar bis zu 0.035 ($ExpInd_{1998}$) bei 120 km/h. Der an dieser Position gemessene höchste $ExpInd_{1998}$ von 0.076 beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit wurde daher fast zur Hälfte durch die Reifenmagnetisierung verursacht.

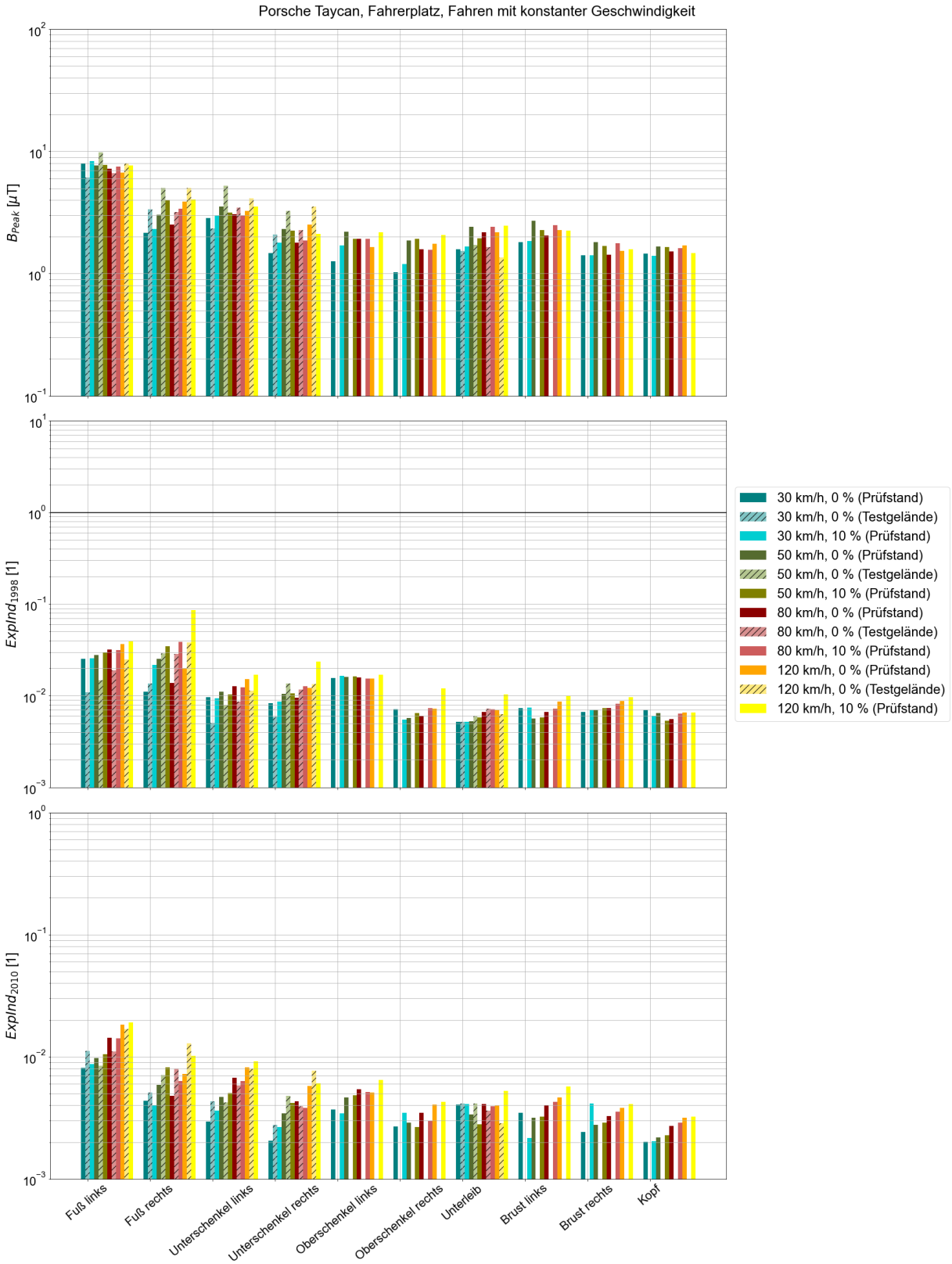


Abbildung 9.141: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

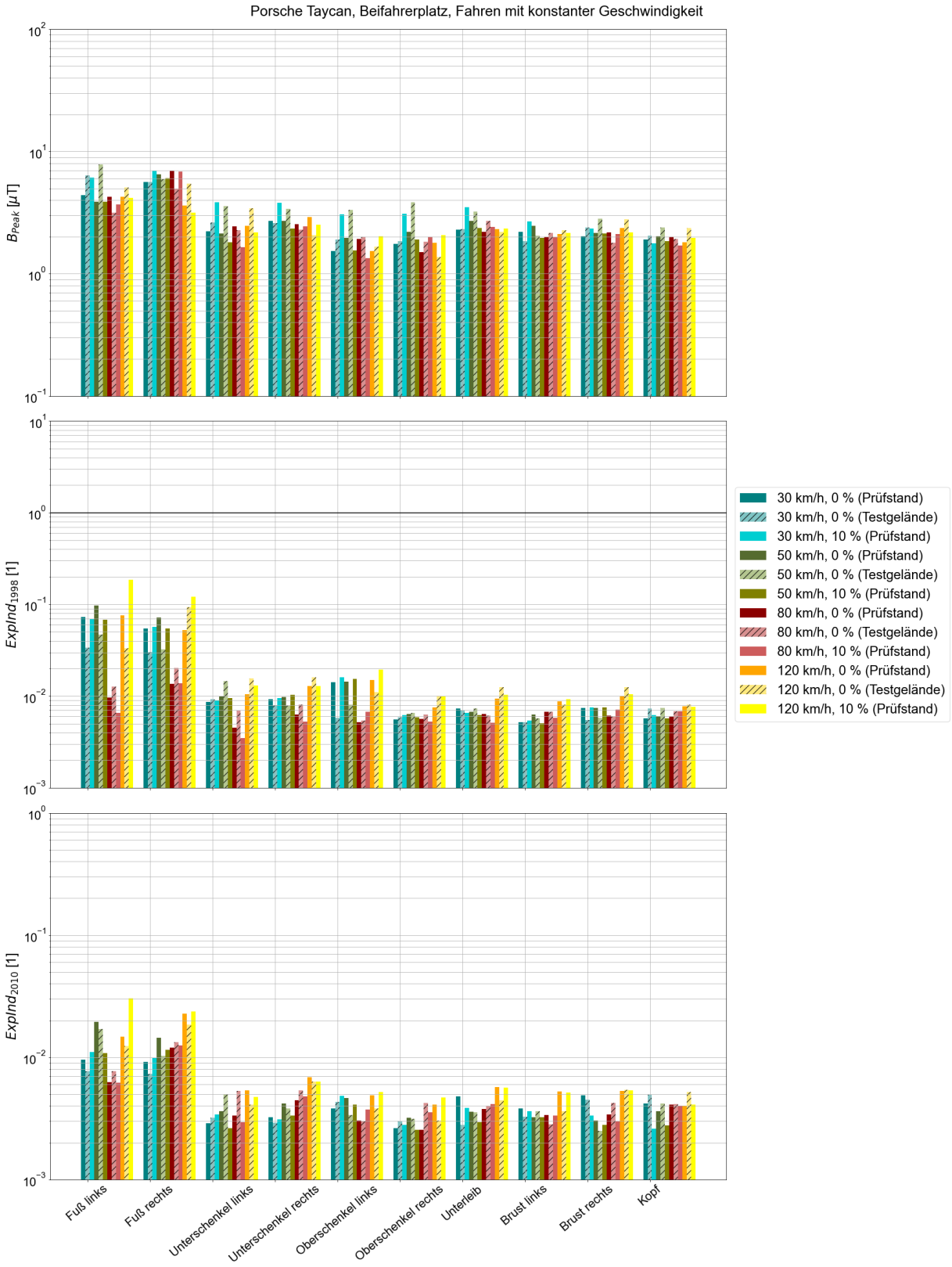


Abbildung 9.142: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

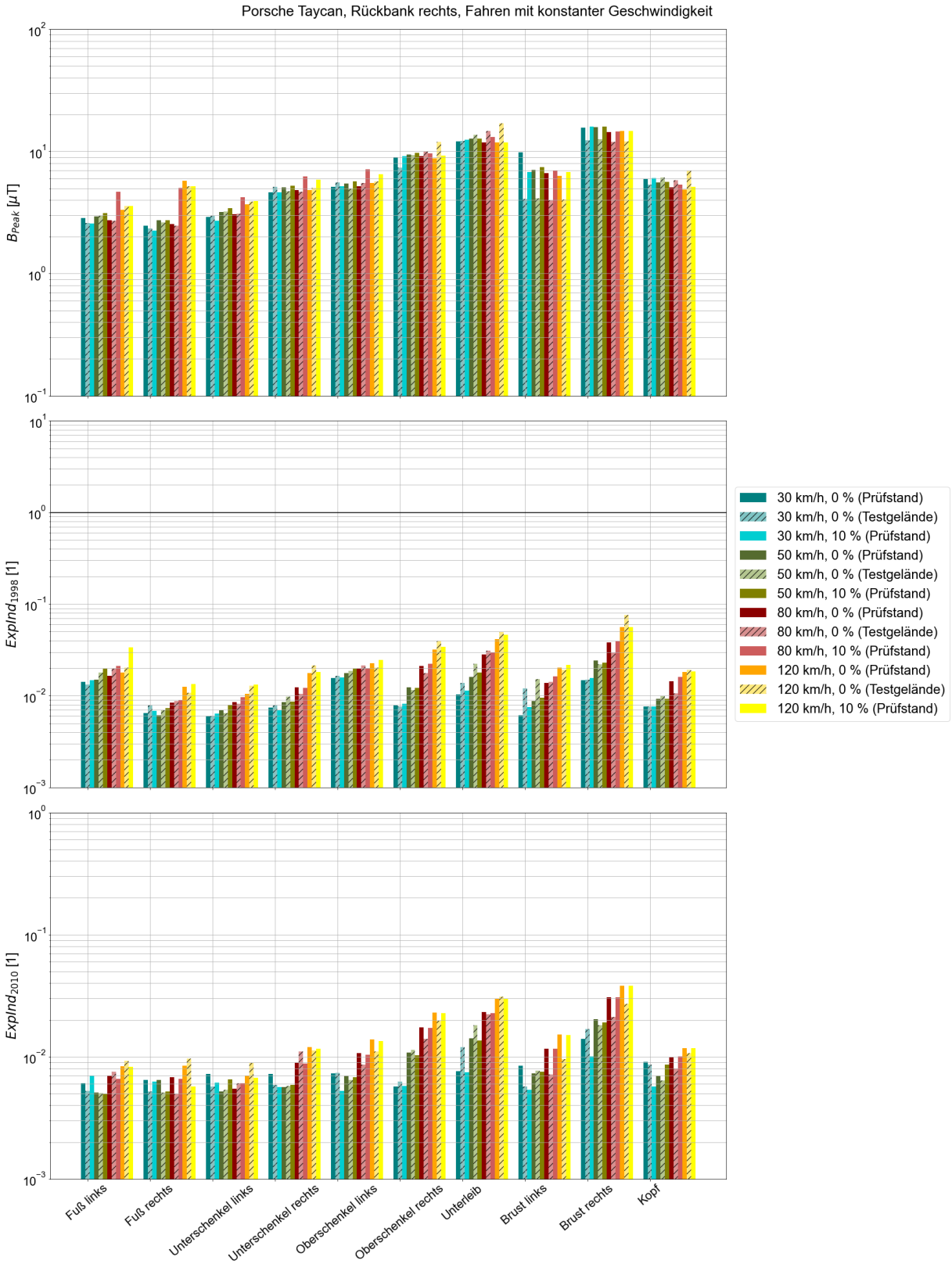


Abbildung 9.143: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

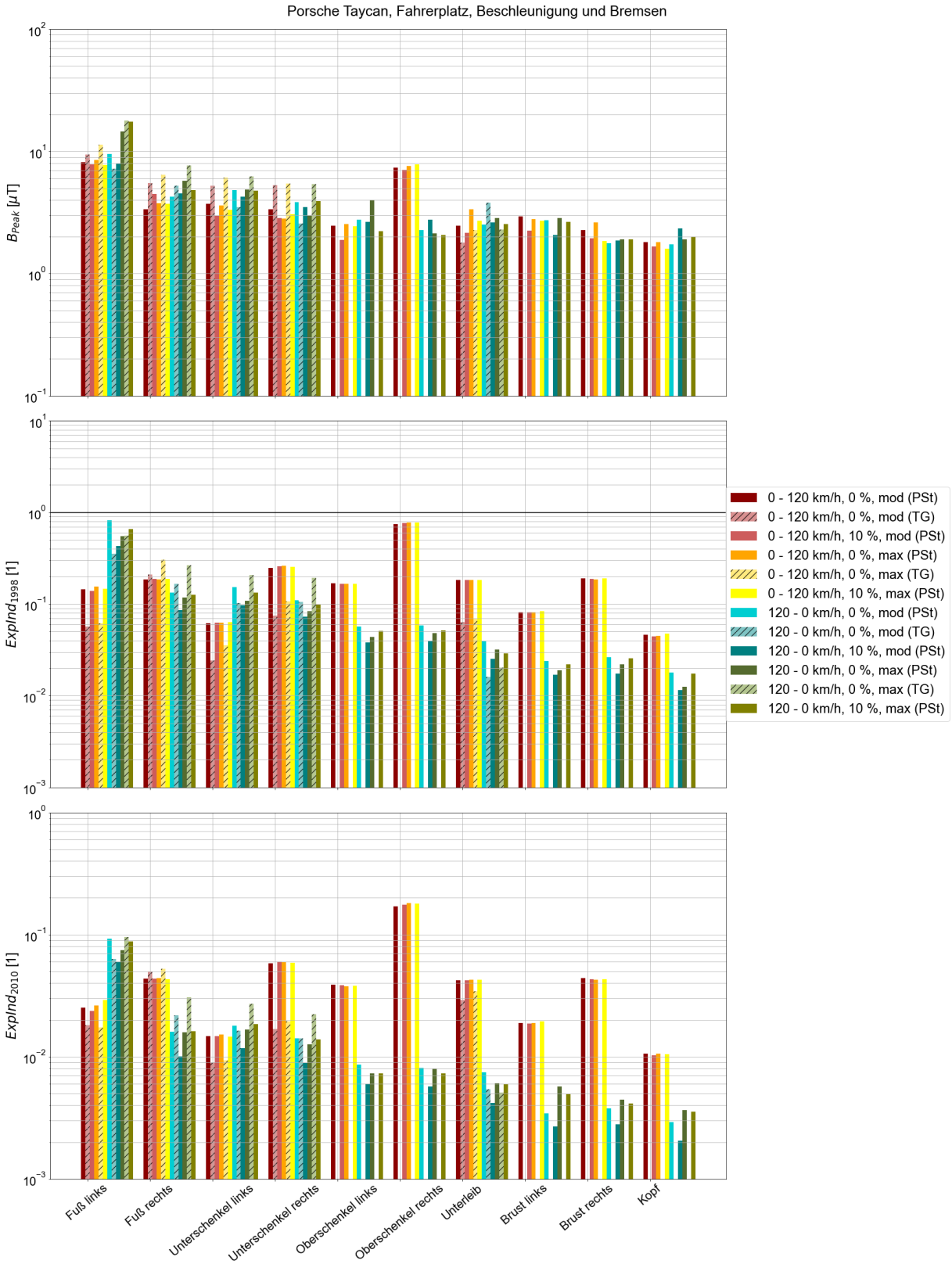


Abbildung 9.144: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

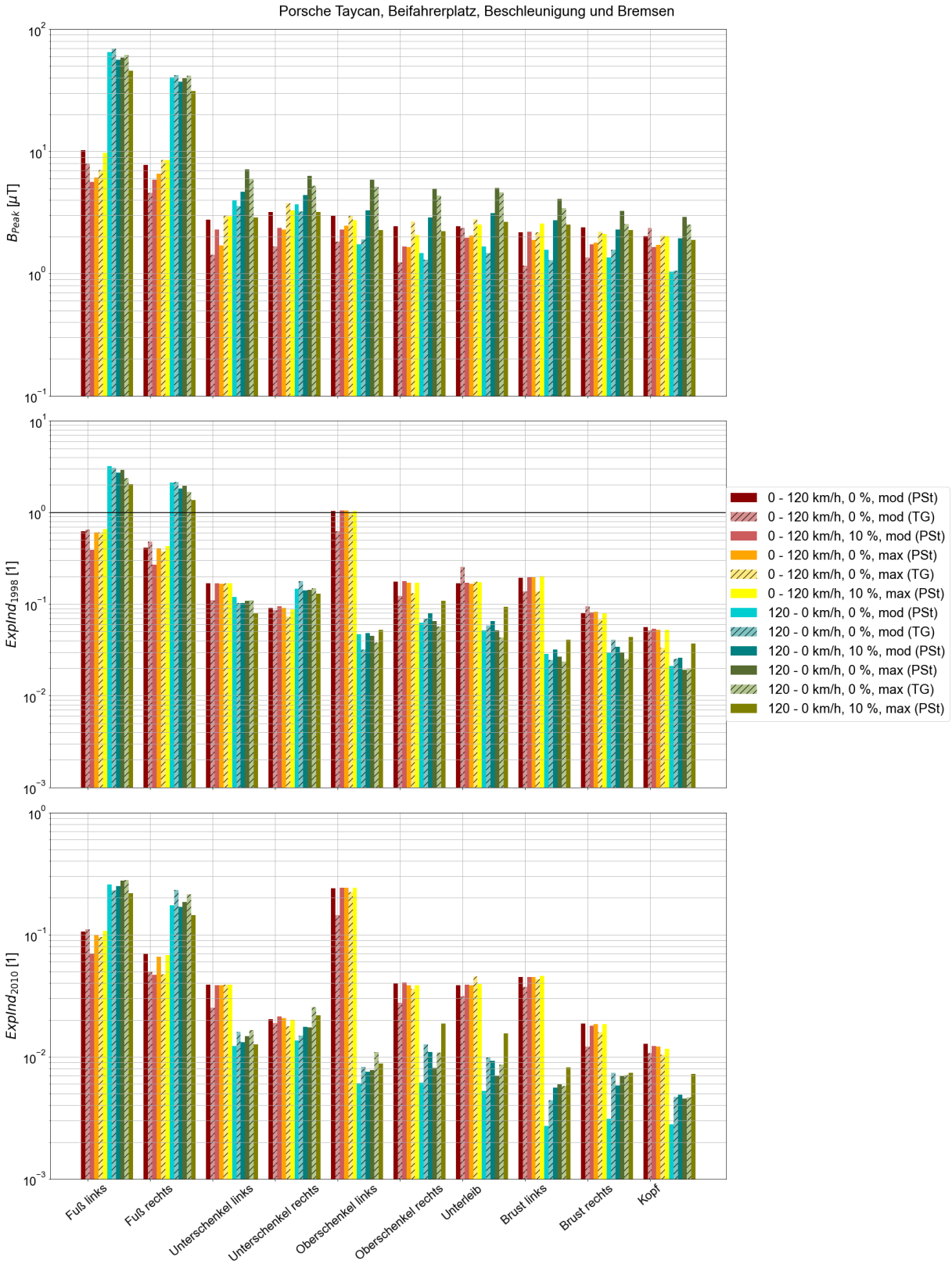


Abbildung 9.145: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

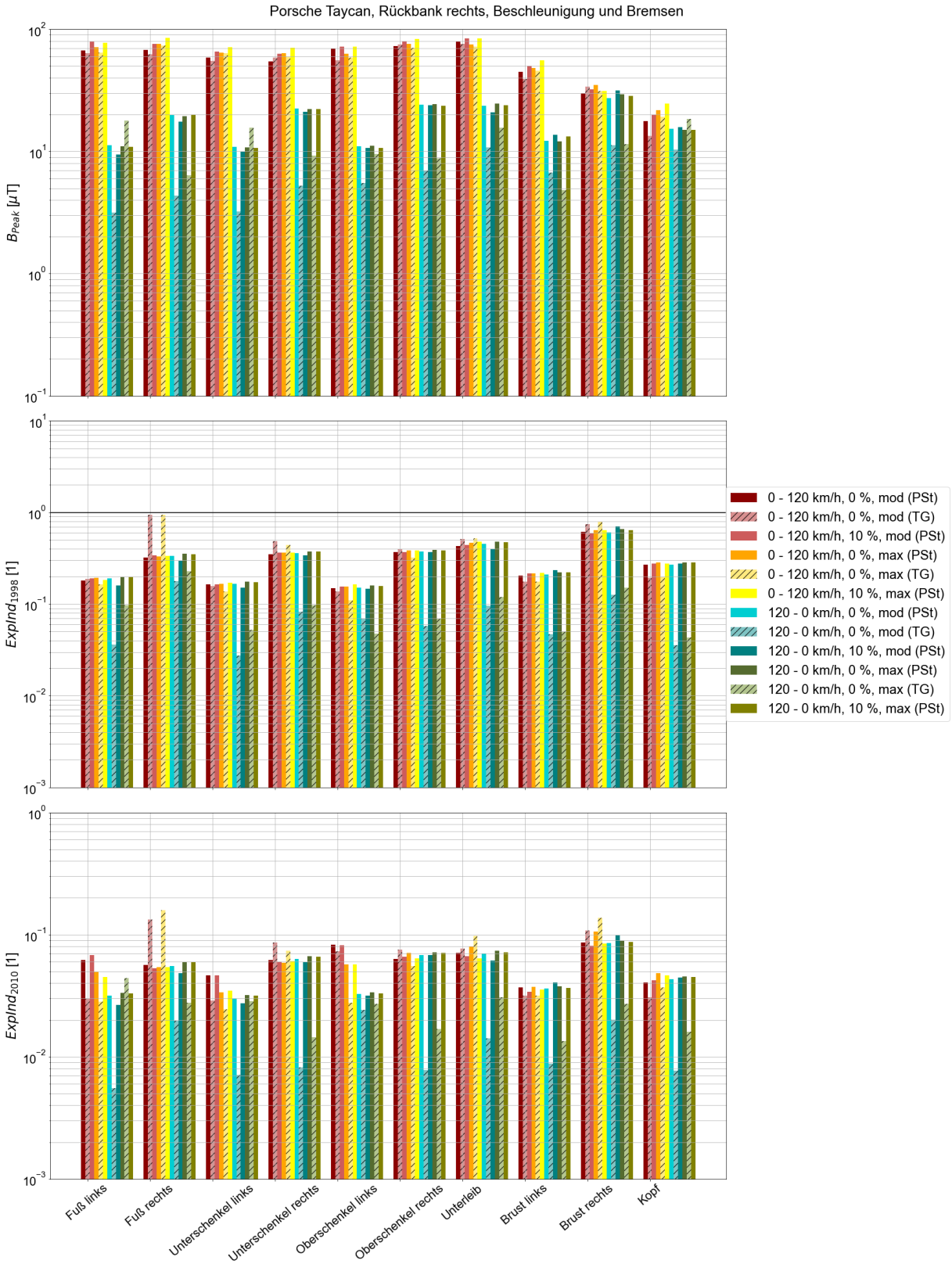


Abbildung 9.146: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.144 bis Abbildung 9.146) zeigten sich deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit. Die größten $ExpInd_{1998}$ wurden im Fußbereich des Beifahrerplatzes beim Bremsen erreicht und lagen bei ca. 3.2, also oberhalb des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Ursache für die vergleichsweise hohen Expositionsindizes in diesem Bereich waren Burst-artig auftretende Magnetfelder gegen Ende des Bremsvorganges (unmittelbar vor Stillstand, Abbildung 9.147).

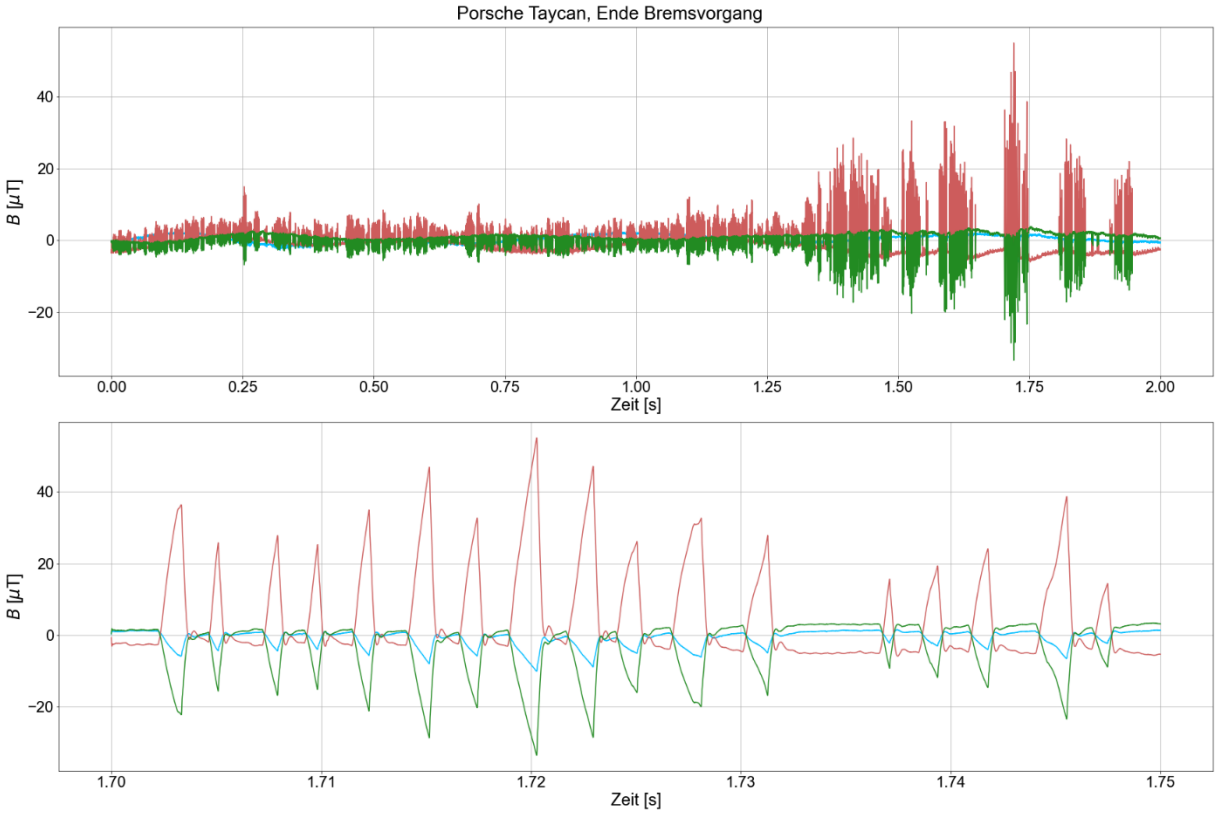


Abbildung 9.147: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte am Ende des Bremsvorganges, gemessen am Prüfstand im Bereich des linken Fußes am Beifahrerplatz.

$ExpInd_{1998}$ im Bereich von bis zu 1.05 im Bereich des linken bzw. rechten Oberschenkels von Beifahrer bzw. Fahrersitz traten während des Beschleunigens auf, verursacht durch Burst-artige Magnetfeldverläufe (Abbildung 9.148), wie dies in sehr ähnlicher Weise auch schon beim Audi e-tron gefunden wird (vgl. Abbildung 9.105, Mitte).

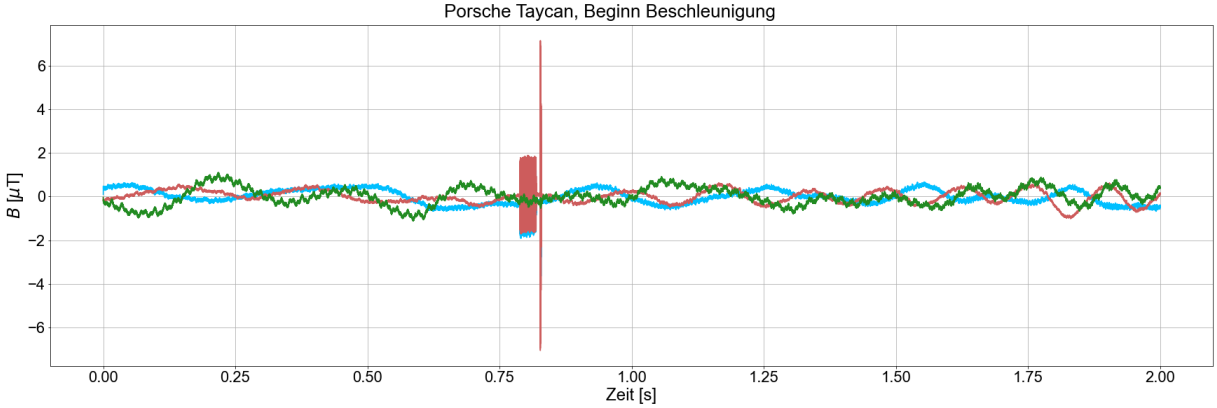


Abbildung 9.148: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte am Beginn eines Beschleunigungsvorganges, gemessen im Bereich des linken Oberschenkels am Beifahrerplatz.

Auffallend im Porsche Taycan waren die während Beschleunigung auftretenden vergleichsweise hohen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte auf der Rückbank. Grund dafür war ein transienter Magnetfeldverlauf während des Beschleunigungsvorganges (Abbildung 9.149). Diese Phase war auch fahrdynamisch wahrnehmbar (wie vom Umschalten zwischen Gängen in Fahrzeugen mit Automatikgetriebe bekannt) und stand offensichtlich im Zusammenhang mit dem Umschalten von erstem auf den zweiten Gang am Hinterachsenantrieb des Fahrzeugs (Kabelverlauf zum/vom Motor im Bereich hinter dem rechten Platz der Rückbank[32]). Die in dieser Phase auftretenden $ExpInd_{1998}$ von mehr als 0.5 im Unterleibs- und Brustbereich waren jedoch nicht durch die hohen Amplituden verursacht, sondern von reproduzierbar auftretenden steilflankigen „Spikes“ unmittelbar davor (unteres Teilbild von Abbildung 9.149).

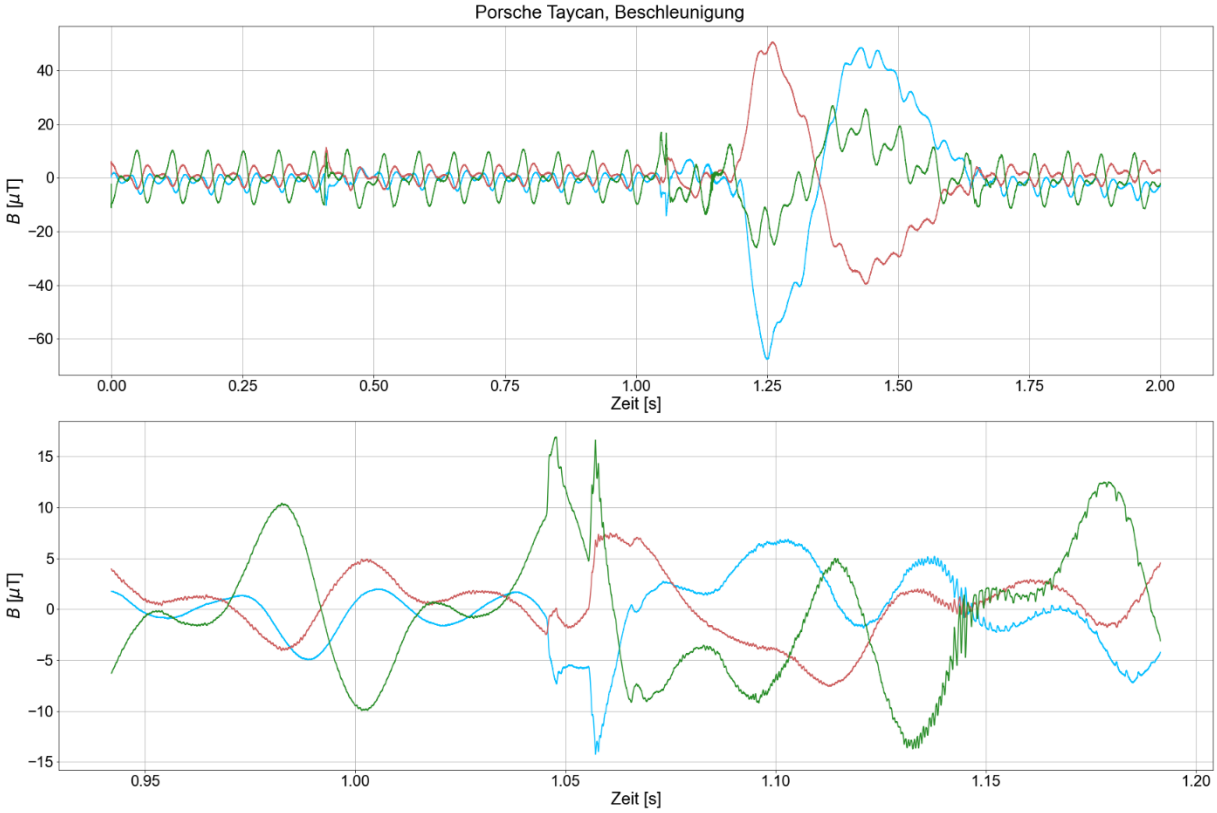


Abbildung 9.149: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte während des Beschleunigens, gemessen im Unterleibsbereich am rechten Sitzplatz der Rückbank. Das untere Teilbild zeigt eine Vergrößerung jenes Bereiches innerhalb dieses Zeitverlaufes, der zum größten Expositionsindex führt (steilflankige Spikes im Zeitintervall 1.04 – 1.07 Sekunden).

Angemerkt wird, dass das Umschalten vom ersten auf den zweiten Gang auch im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer zu hohen Spitzenwerten der magnetischen Flussdichte führte (teilweise bis nahezu 200 µT, gemessen während der Fahrt im Realverkehr, siehe Abbildung 9.153), allerdings blieben die damit assoziierten $ExpInd_{1998}$ unterhalb von 0.25, da in diesen Bereichen die oben gezeigten steilflankigen Spikes in keinem relevanten Ausmaß auftraten. Am Fahrer- und Beifahrerplatz waren die maximal auftretenden Expositionsindizes durch die

[32] Siehe https://www.xautoworld.com/opinion/taycan-201-tesla-range/#, zuletzt abgerufen am 20.06.2024.

in Abbildung 9.147 und Abbildung 9.148 gezeigten Signalsequenzen beim Bremsen und Beschleunigen bestimmt.

Eine weiterer transienter Signalverlauf, der zu $ExpInd_{1998}$ von bis zu 0.85 bzw. 0.65 im Fußbereich des Beifahrerplatzes bzw. im Brustbereich des rechten Sitzplatzes auf der Rückbank führte, trat in unmittelbarer zeitlicher Nähe des zum-Stillstand-kommen des Fahrzeugs auf (Abbildung 9.150).

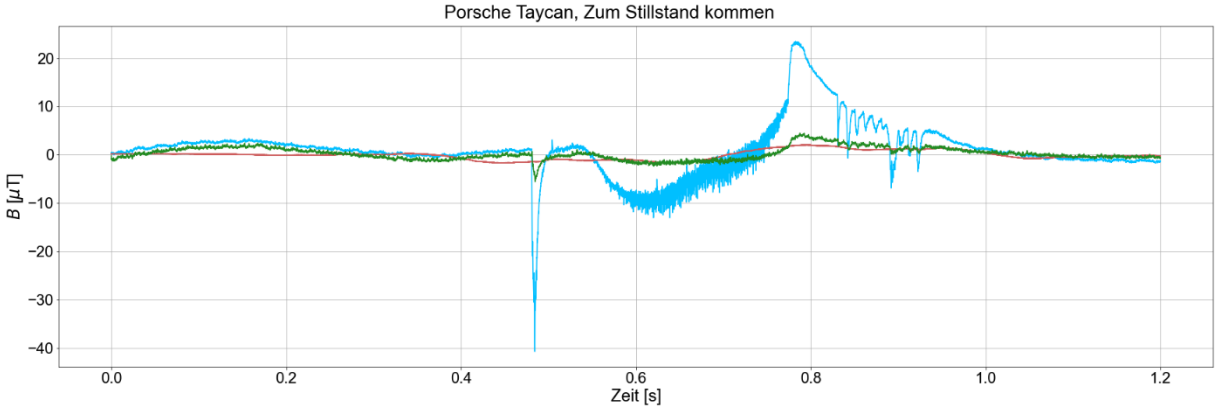


Abbildung 9.150: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte unmittelbar vor bzw. während des zum-Stillstand-kommen des Fahrzeugs, gemessen im Bereich des rechten Fußes am Beifahrerplatz.

9.4.7.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.151 und Abbildung 9.153 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.152 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.154 und Abbildung 9.155 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.156 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

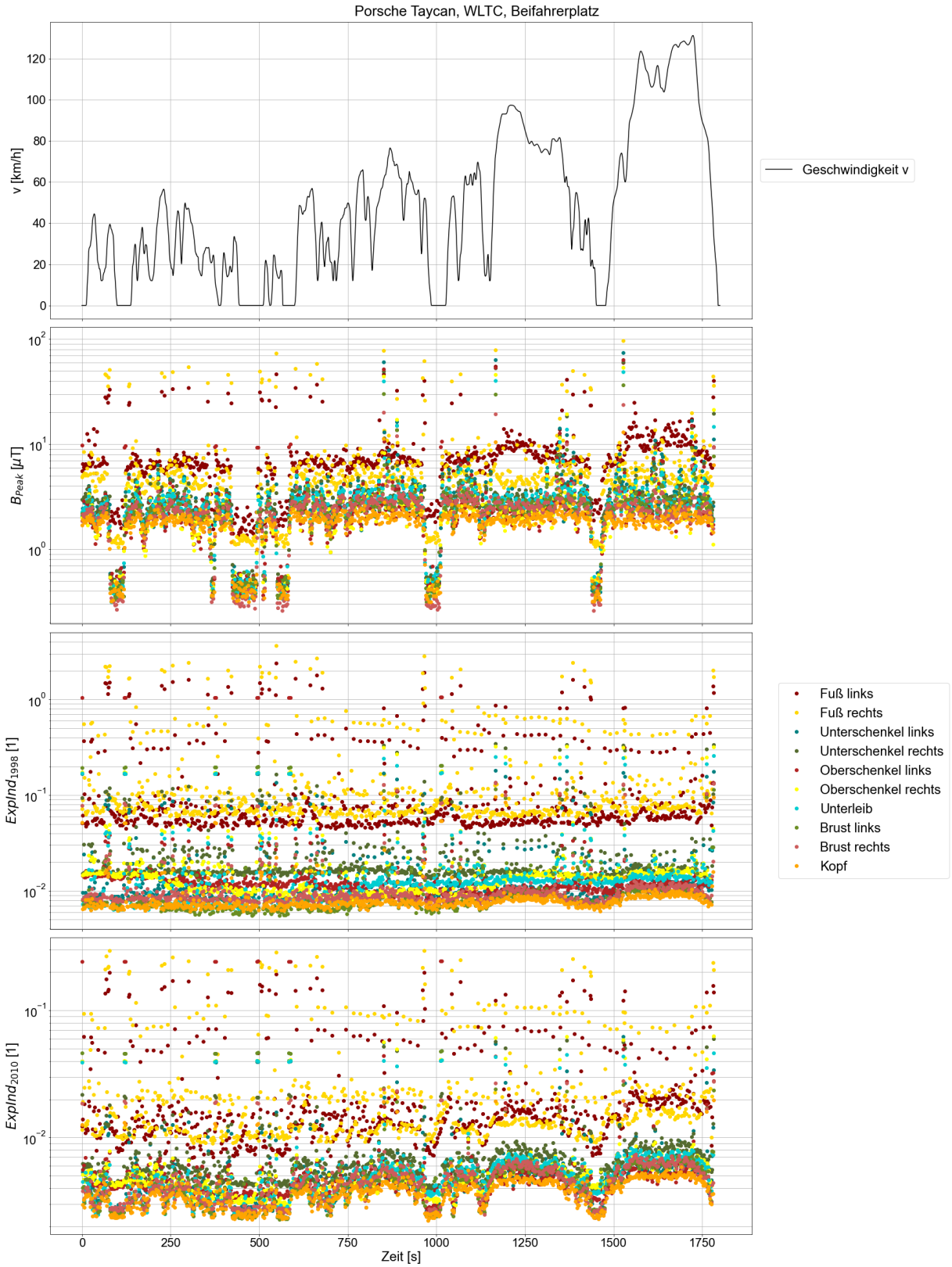


Abbildung 9.151: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

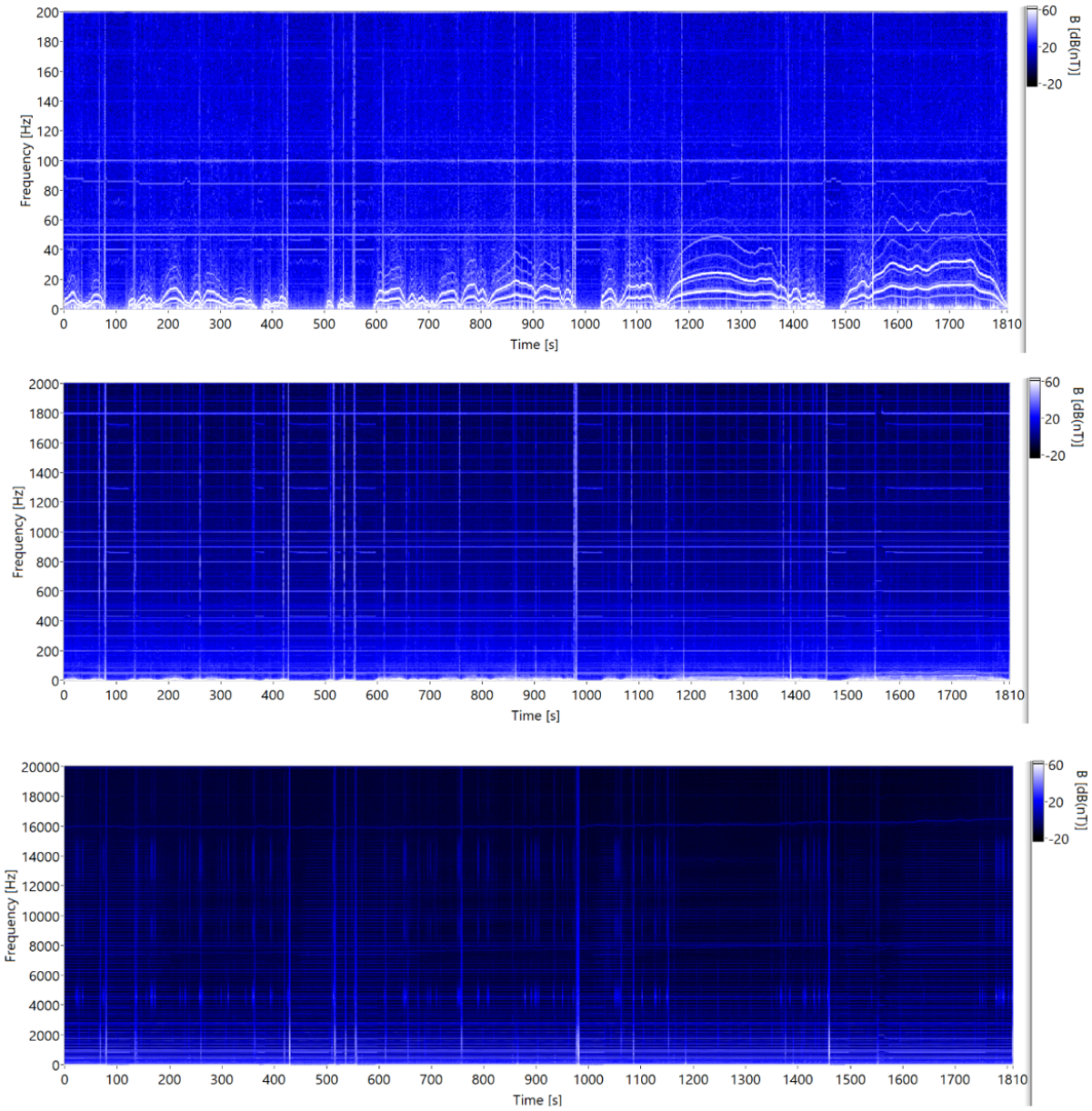


Abbildung 9.152: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Porsche Taycan am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 - 20 kHz).

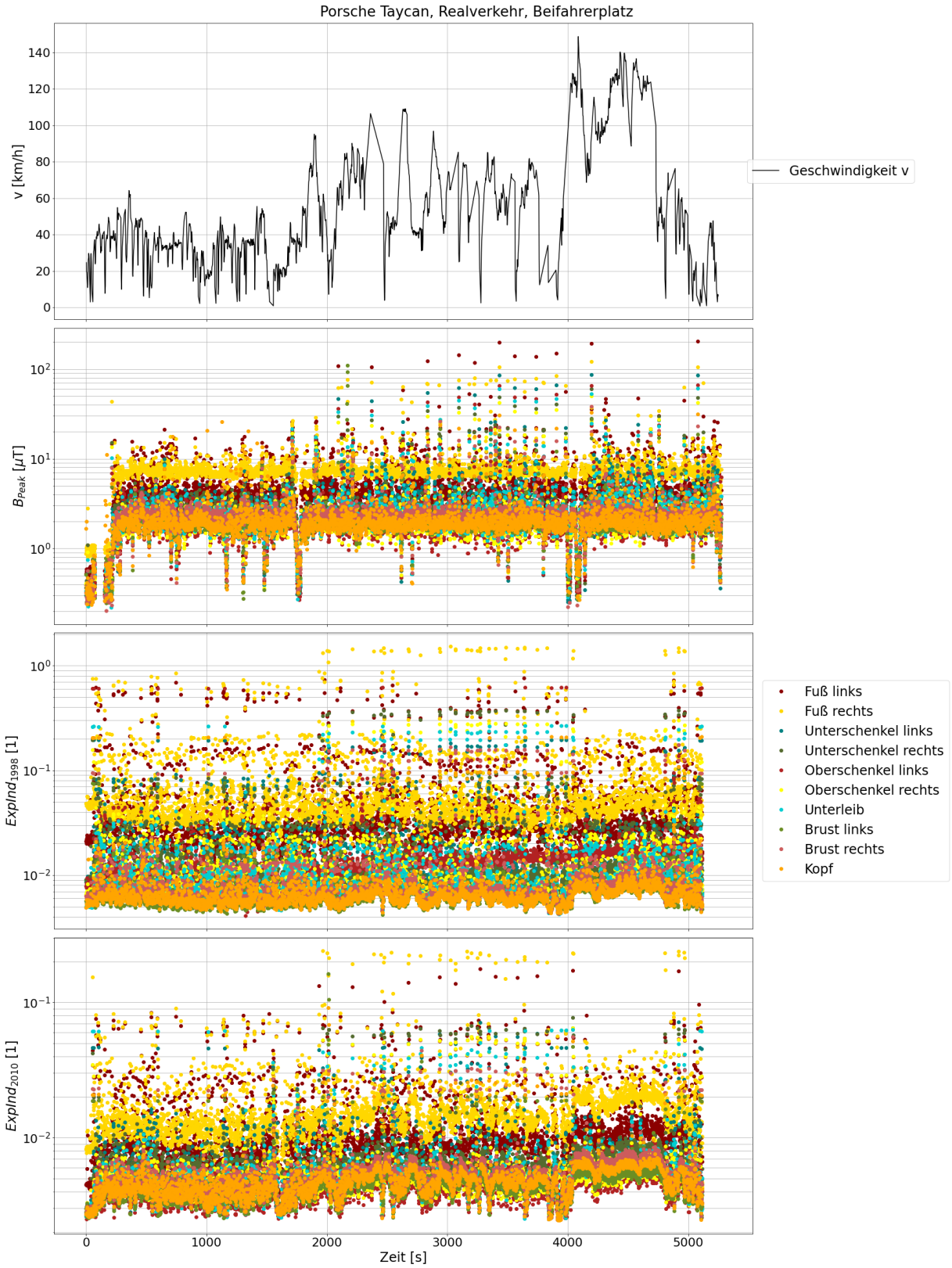


Abbildung 9.153: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

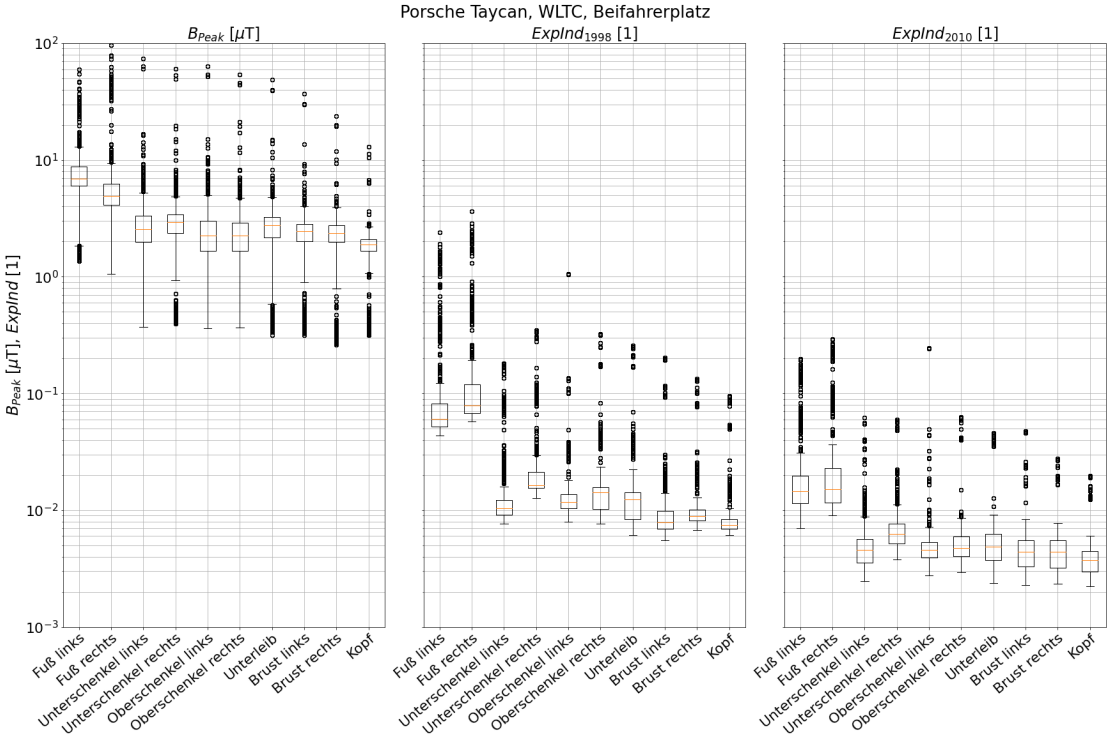


Abbildung 9.154: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

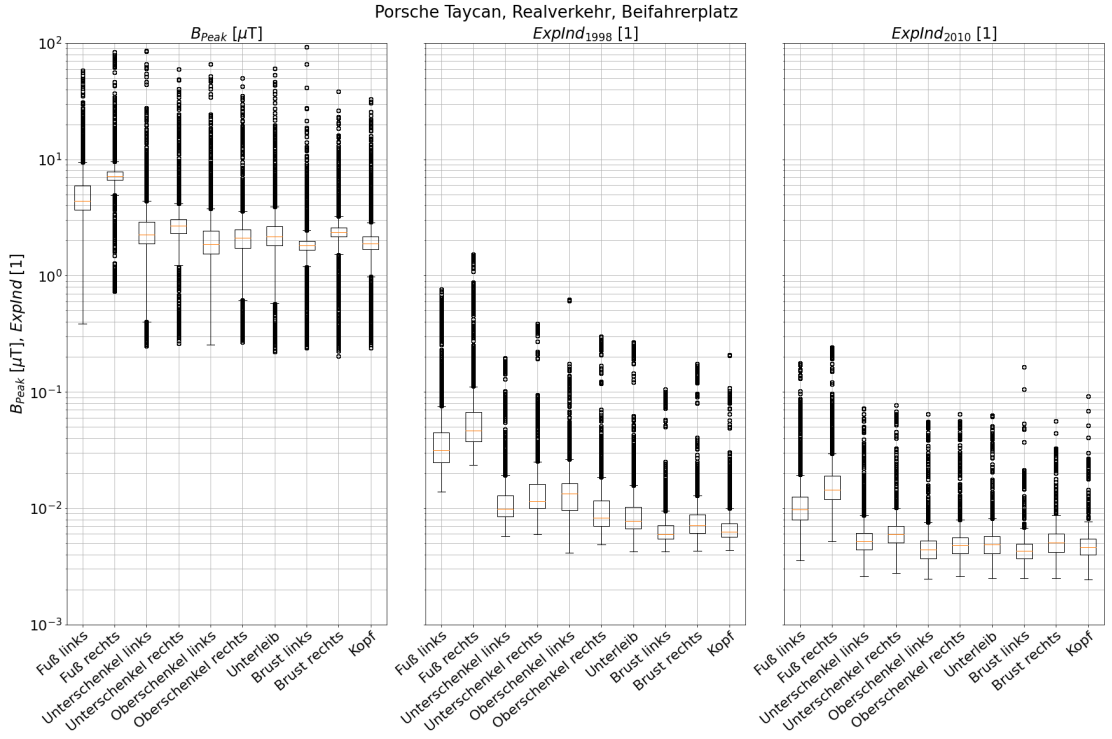


Abbildung 9.155: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer). Ausreißer > 100 µT nicht dargestellt (siehe Abbildung 9.153).

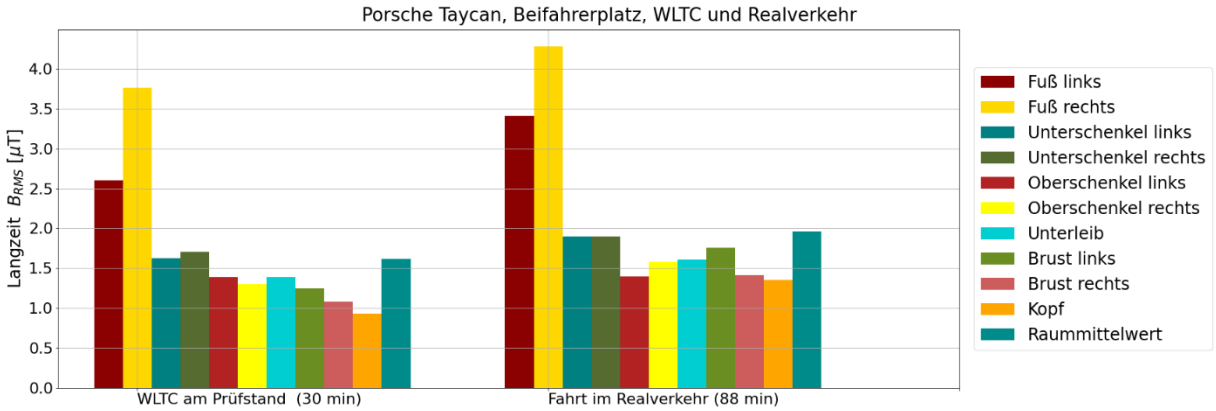


Abbildung 9.156: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.7.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 1.7 im Bereich des rechten Fußes am Beifahrerplatz und 1.2 bzw. 1.1 im Bereich des rechten Fuß- bzw. Brustbereich am rechten Sitzplatz der Rückbank). Die Sitzheizung führte im Oberschenkel- und Unterleibsbereich von Fahrer- und Beifahrerplatz zu $ExpInd_{1998}$ von ca. 0.7 - 0.85, im Fußbereich von Fahrer und Beifahrerplatz traten lokal sogar $ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 1.0 zufolge der Sitzheizung auf (rechter Fußbereich des Fahrers und linker Fußbereich des Beifahrers).

Abbildung 9.157 und Abbildung 9.158 zeigen zugehörige Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte.

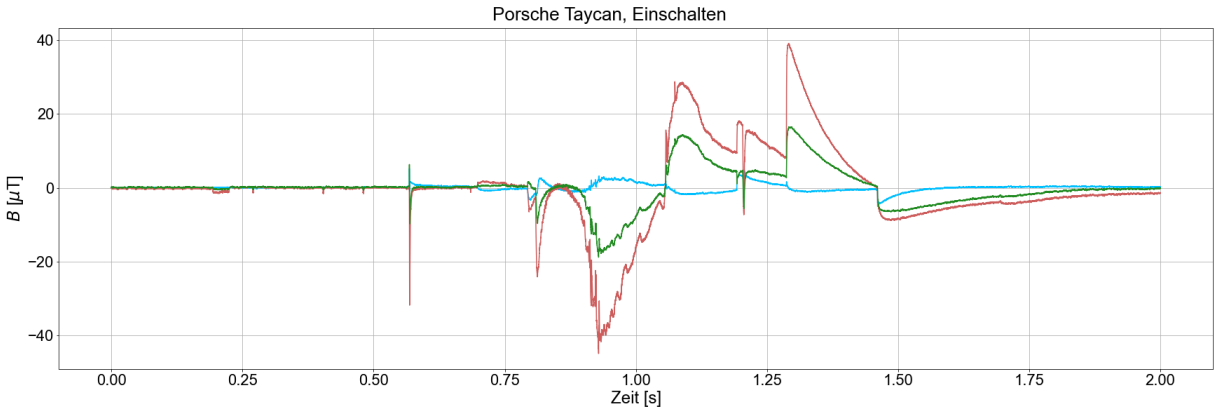


Abbildung 9.157: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im rechten Fußbereich des Beifahrerplatzes.

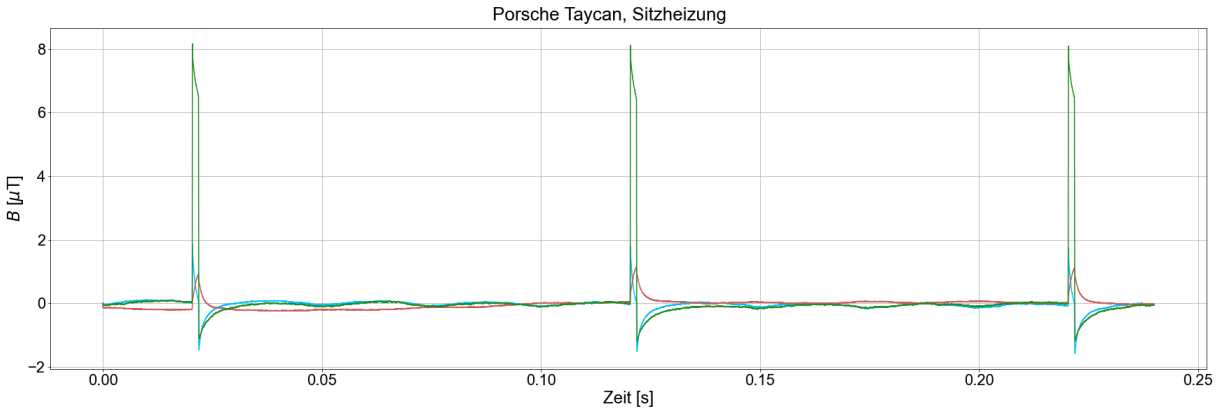


Abbildung 9.158: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte zufolge der Sitzheizung (niedrige Stufe), gemessen im Oberschenkelbereich des Fahrerplatzes.

Abbildung 9.159 bis Abbildung 9.161 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

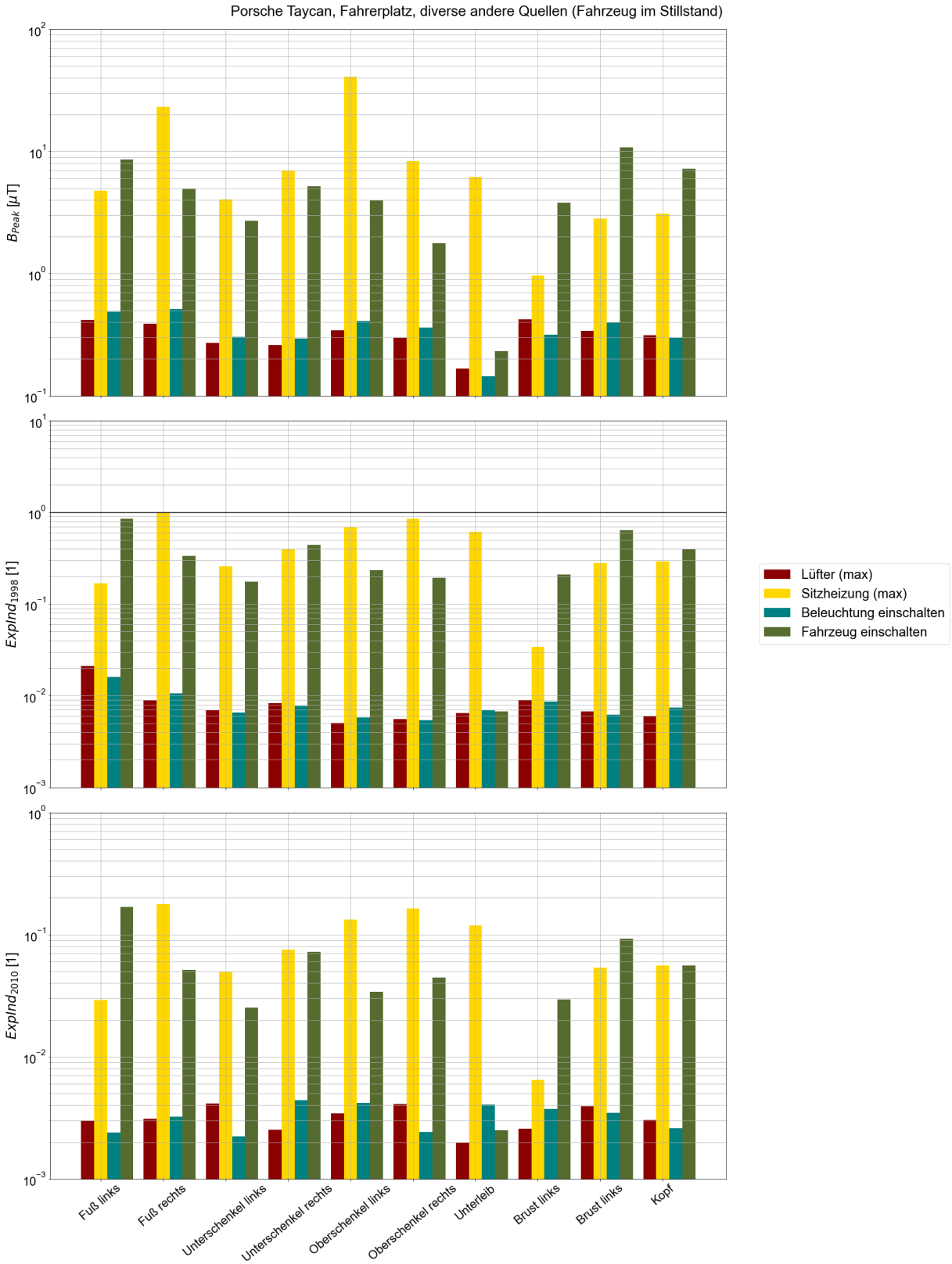


Abbildung 9.159: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

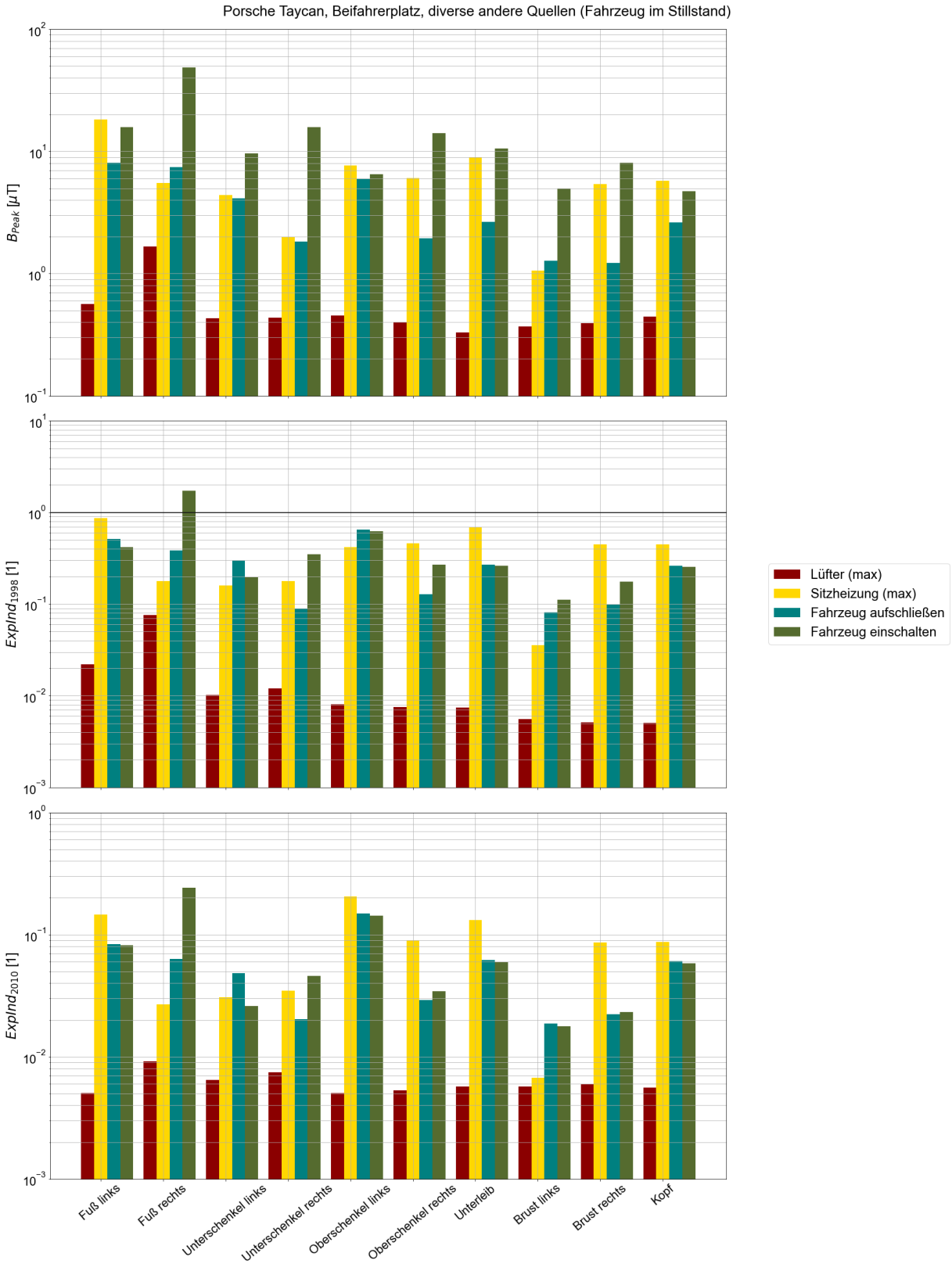


Abbildung 9.160: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

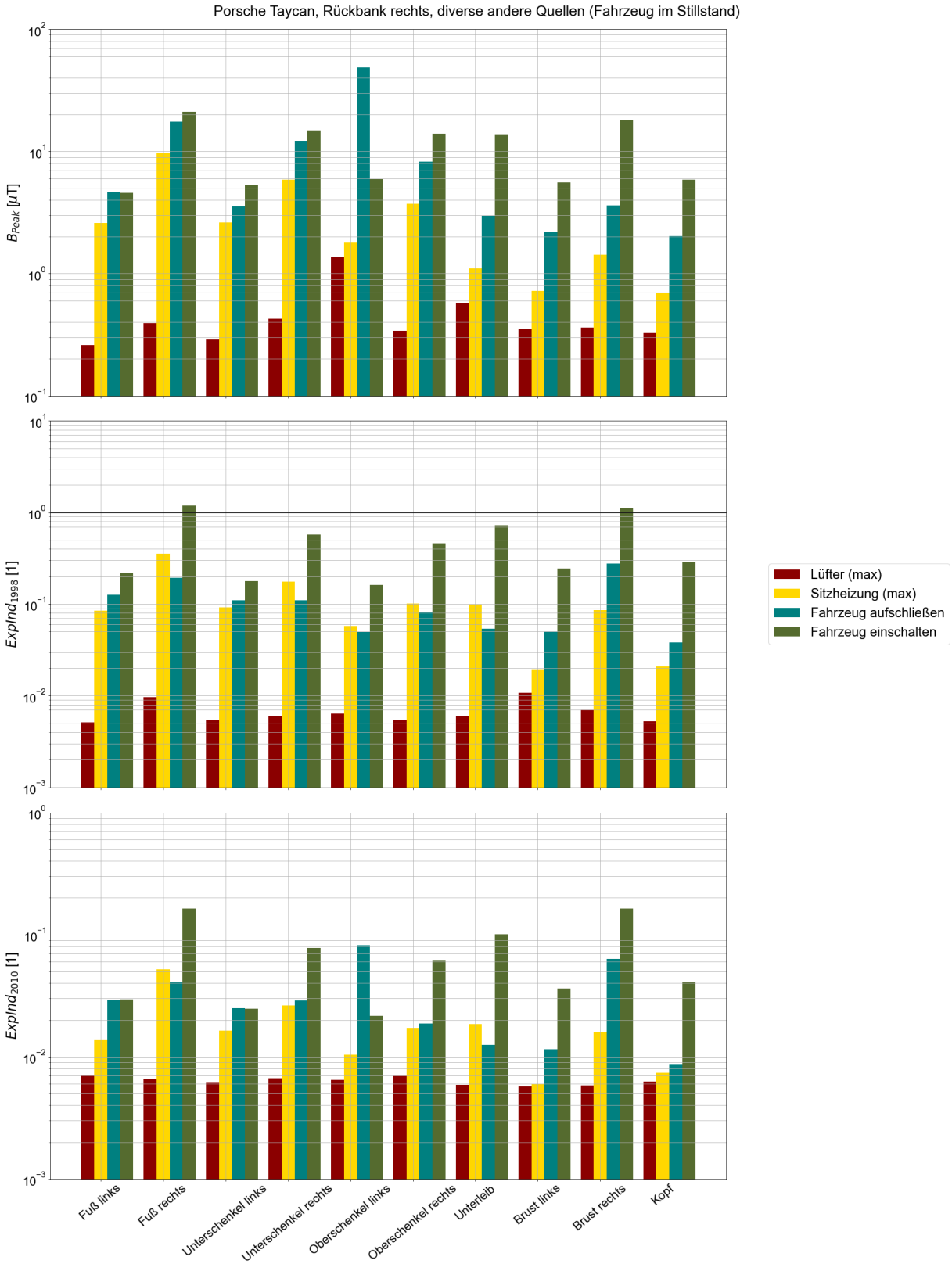


Abbildung 9.161: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

9.4.8 Aiways U5



Abbildung 9.162: Untersuchter Aiways U5 auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.8.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Aiways U5

Baujahr: 2021

Motorleistung: 150 kW

Batteriekapazität: 63 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.162 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.163).

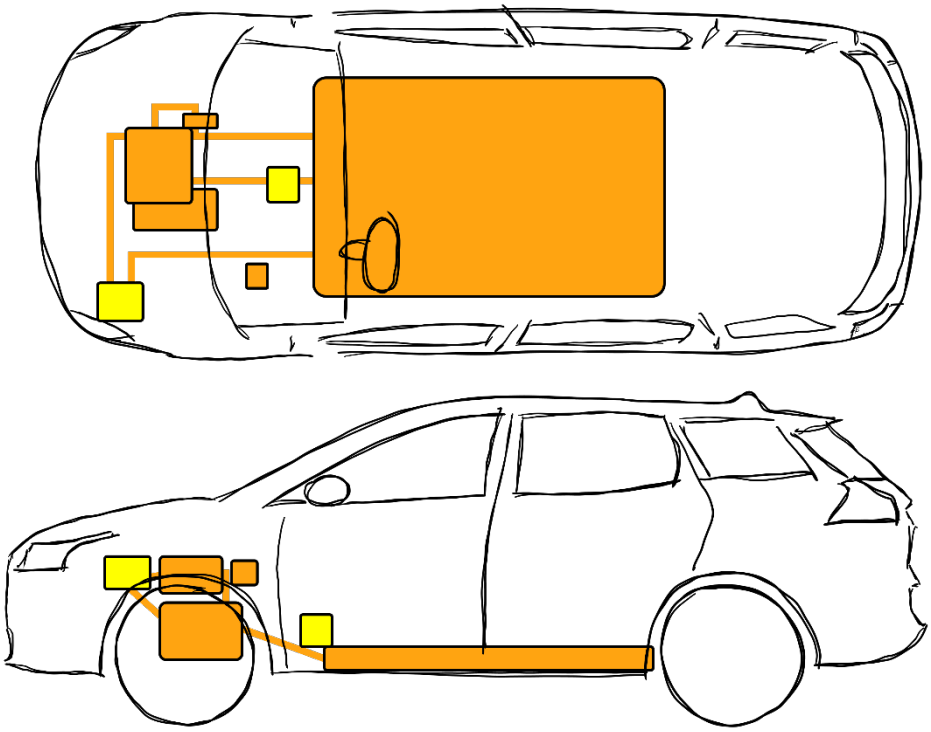


Abbildung 9.163: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Aiways U5 (modifiziert nach https://aiways-switzerland.ch/wp-content/uploads/2022/08/Rettungskarte-Aiways-U5.pdf).

9.4.8.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.164 bis Abbildung 9.169 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.164 bis Abbildung 9.166) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im rechten Fußbereich des Beifahrers im Ausmaß von ca. 0.19 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei ein Anteil von ca. 0.01 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. Am Fahrerplatz bzw. am linken Sitzplatz auf der Rückbank blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit unterhalb von 0.08 bzw. unterhalb von 0.05.

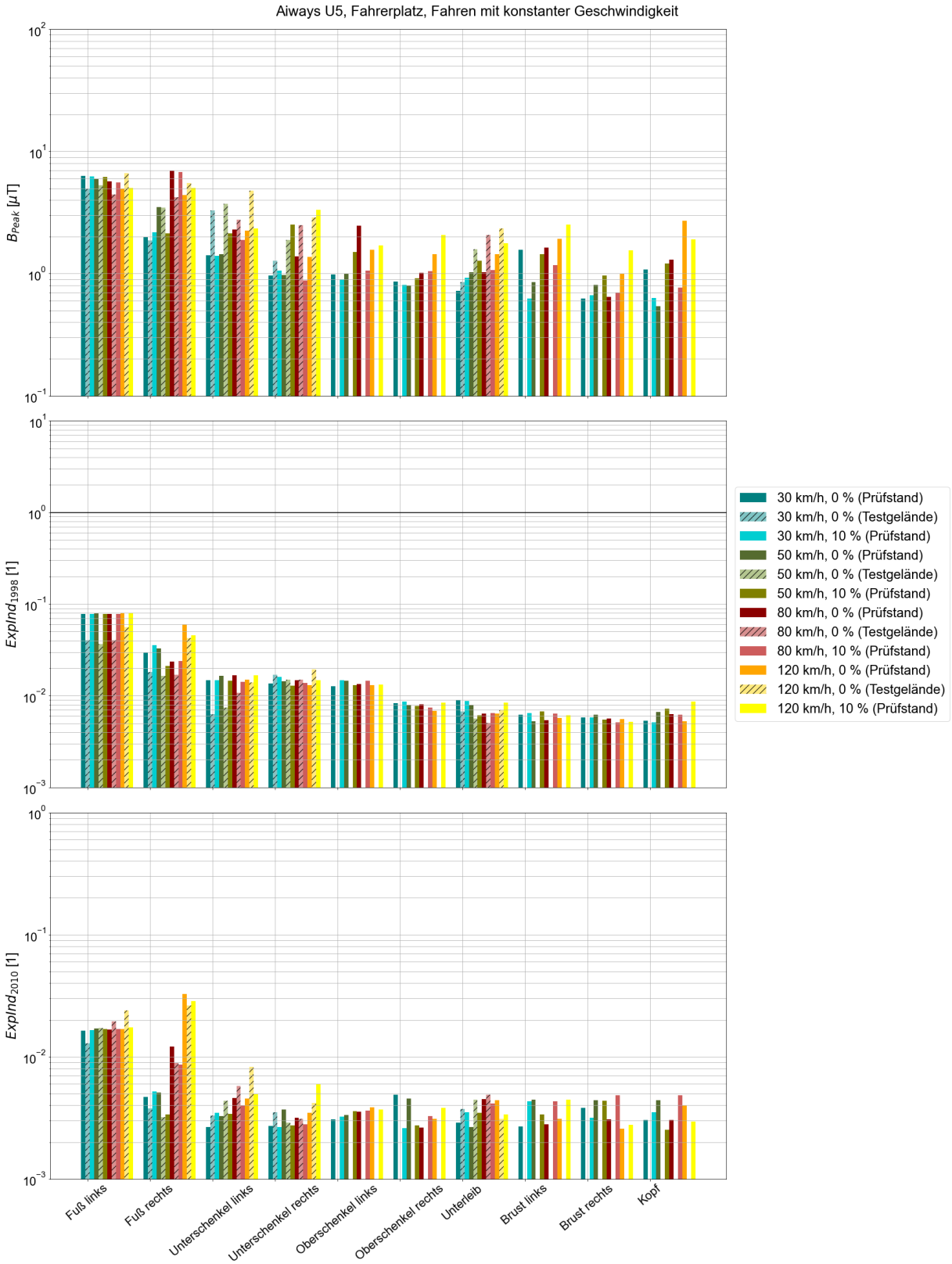


Abbildung 9.164: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

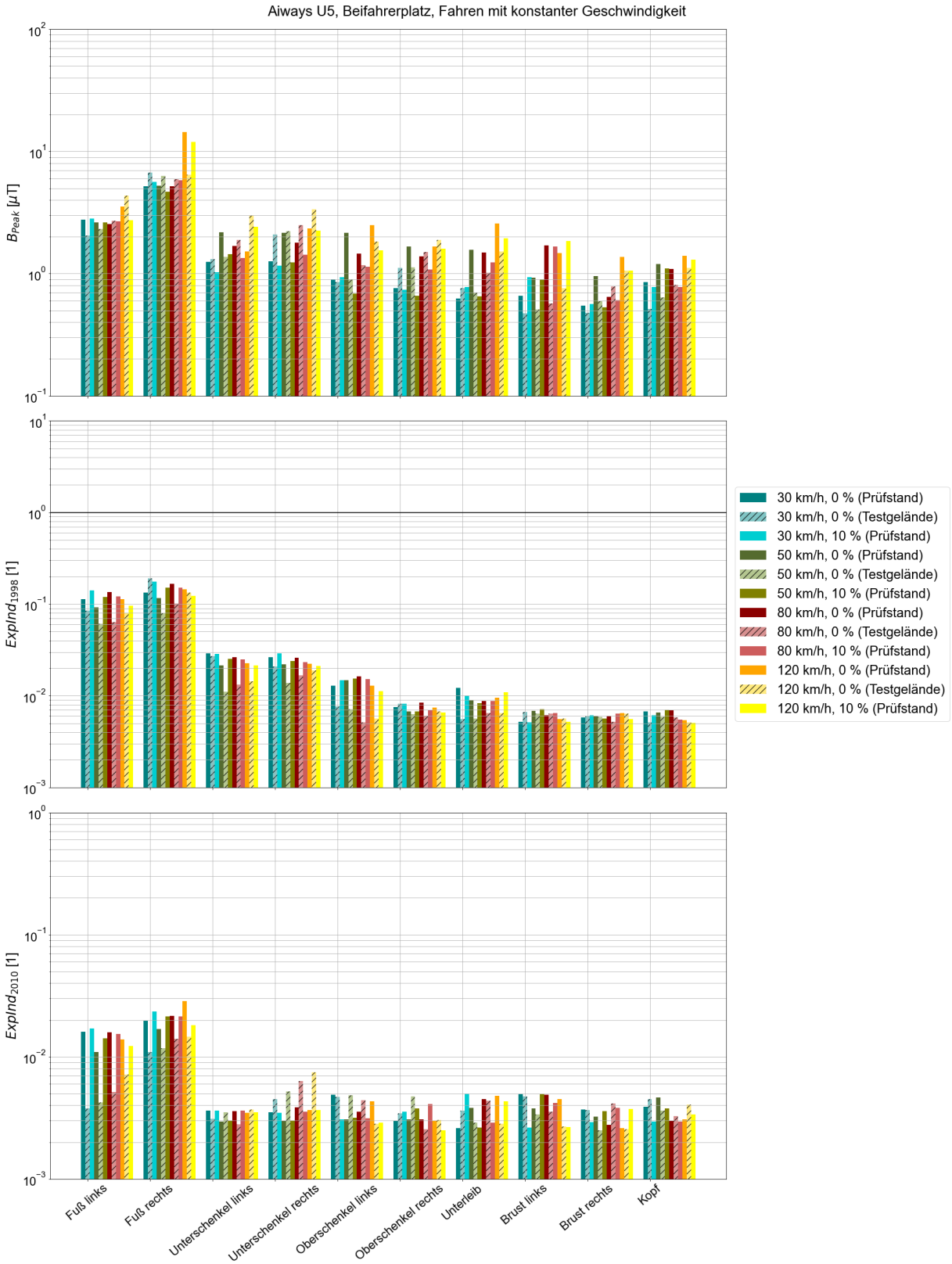


Abbildung 9.165: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

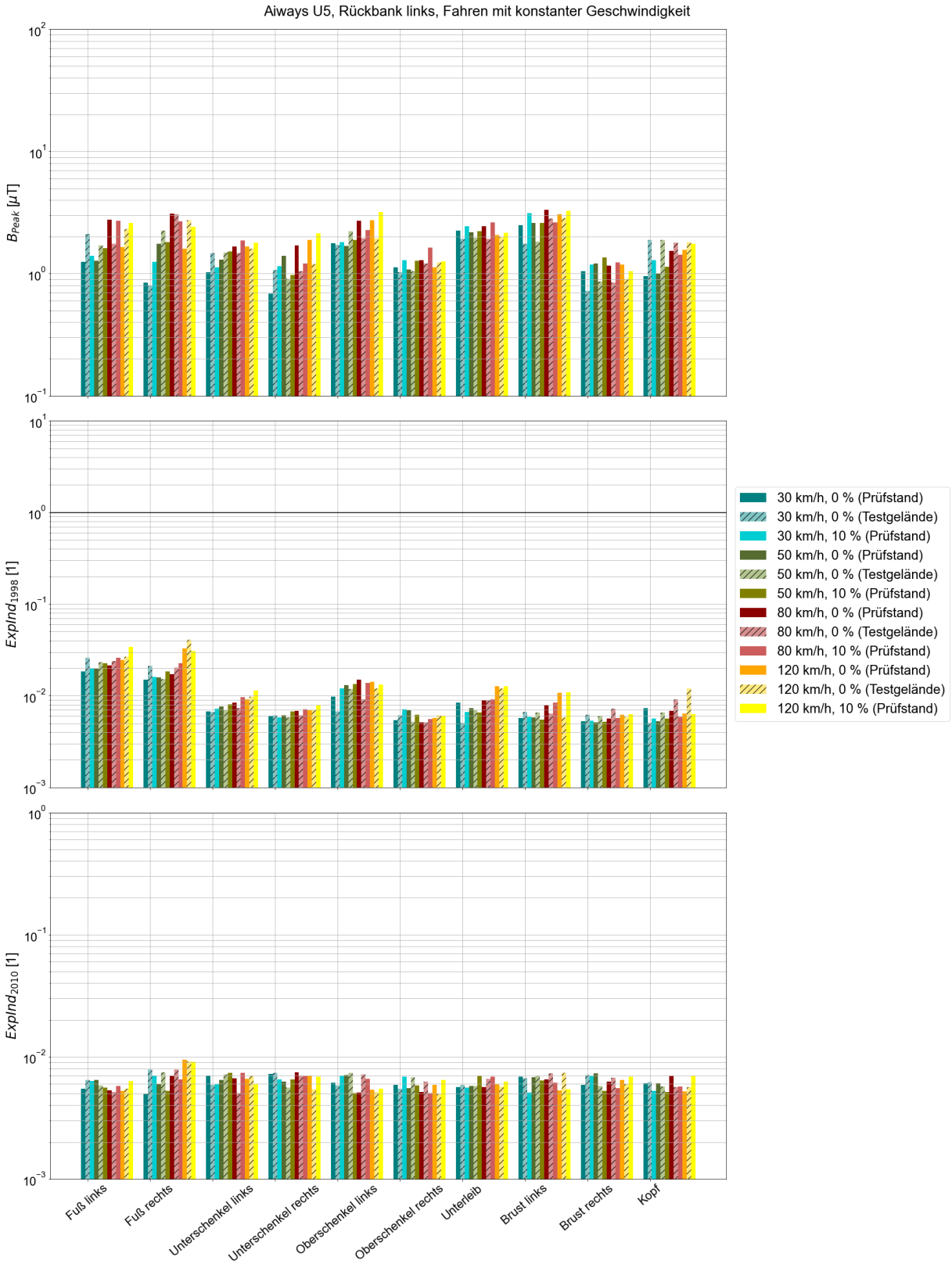


Abbildung 9.166: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

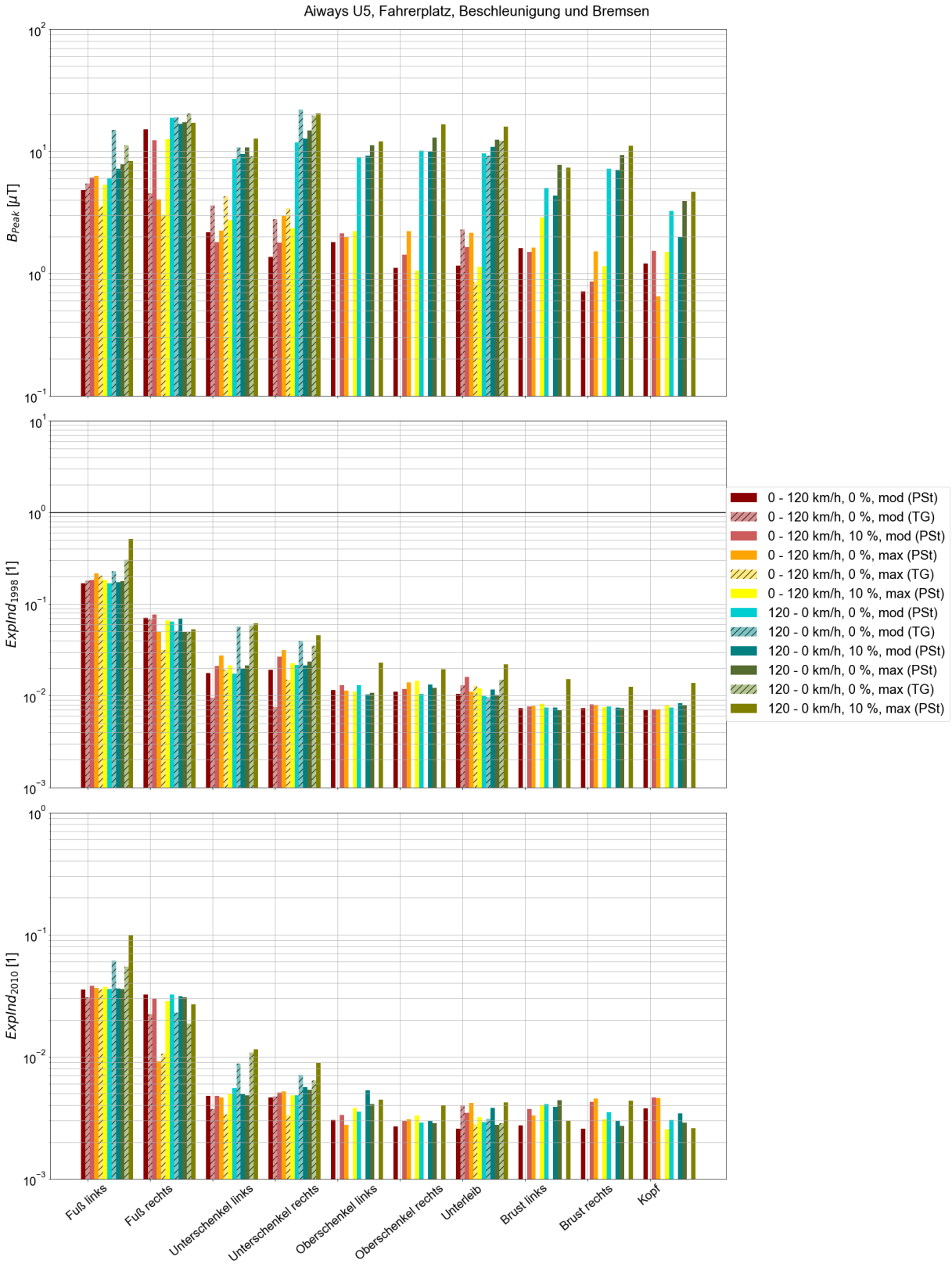


Abbildung 9.167: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

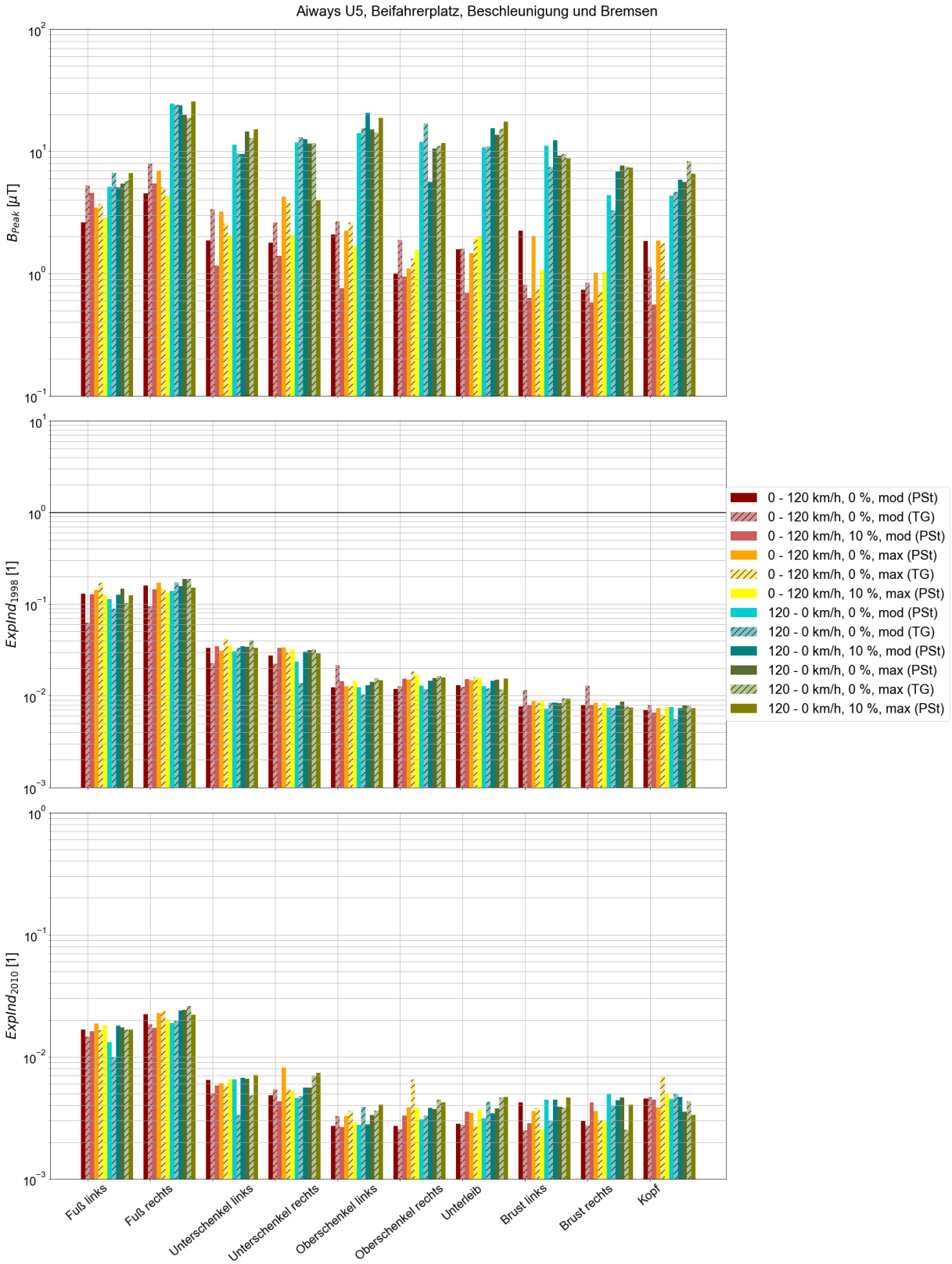


Abbildung 9.168: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

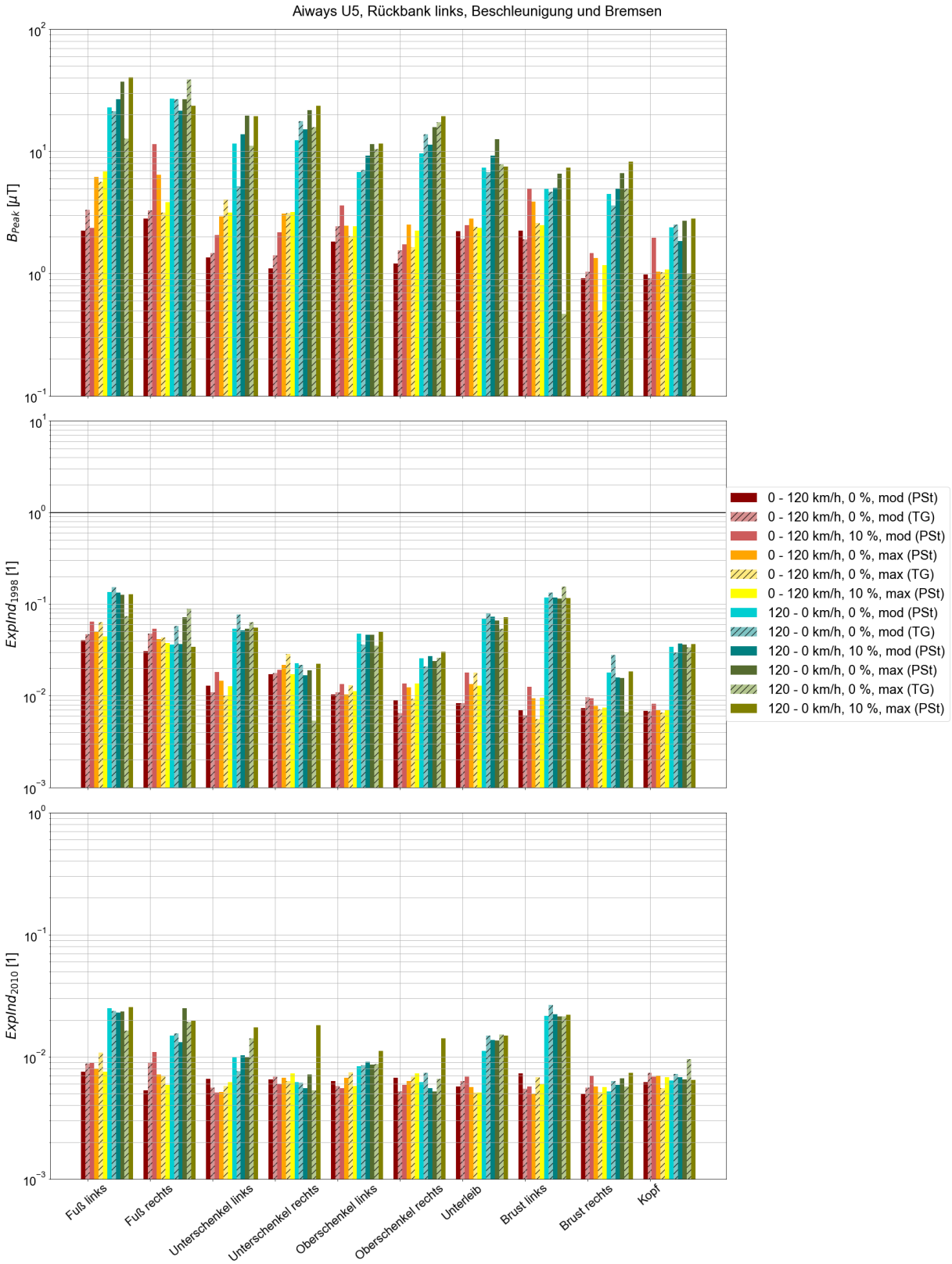


Abbildung 9.169: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Etwas größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit traten beim Beschleunigen und Bremsen auf (Abbildung 9.167 bis Abbildung 9.169). Die höchsten $ExpInd_{1998}$ wurden bei starkem Bremsen erreicht und lagen im linken Fußraum des Fahrers bei ca. 0.51. Im Fußbereich des Beifahrers bzw. am linken Sitzplatz der Rückbank wurden während starkem Bremsen maximale $ExpInd_{1998}$ von ca. 0.19 bzw. 0.15 erreicht.

9.4.8.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.170 und Abbildung 9.172 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer. Interessant dabei ist die Tatsache, dass der $ExpInd_{1998}$ im Fußbereich in den Phasen mit höherer mittlerer Geschwindigkeit (t > ca. 1000 s beim WLTC bzw. t > 2500 s bei der Realfahrt) auffallend geringer war als in den Phasen mit geringerer Geschwindigkeit, während die B_{PEAK}-Werte diesen Trend nicht zeigten. D.h., das Frequenzspektrum der Immissionen im Fußbereich zeigte offensichtlich deutliche Unterschiede zwischen diesen Phasen.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.171 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.173 und Abbildung 9.174 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.175 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

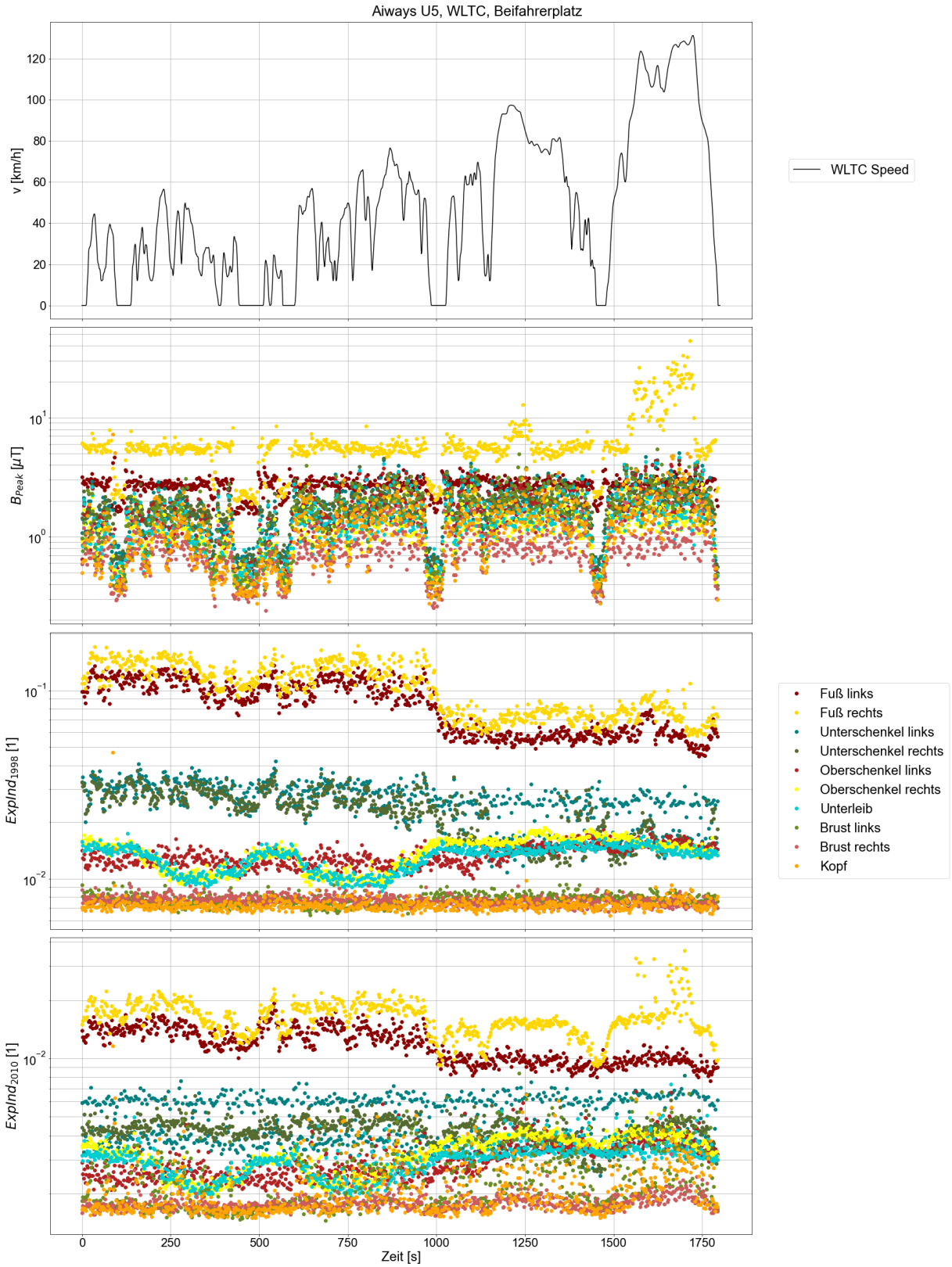


Abbildung 9.170: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

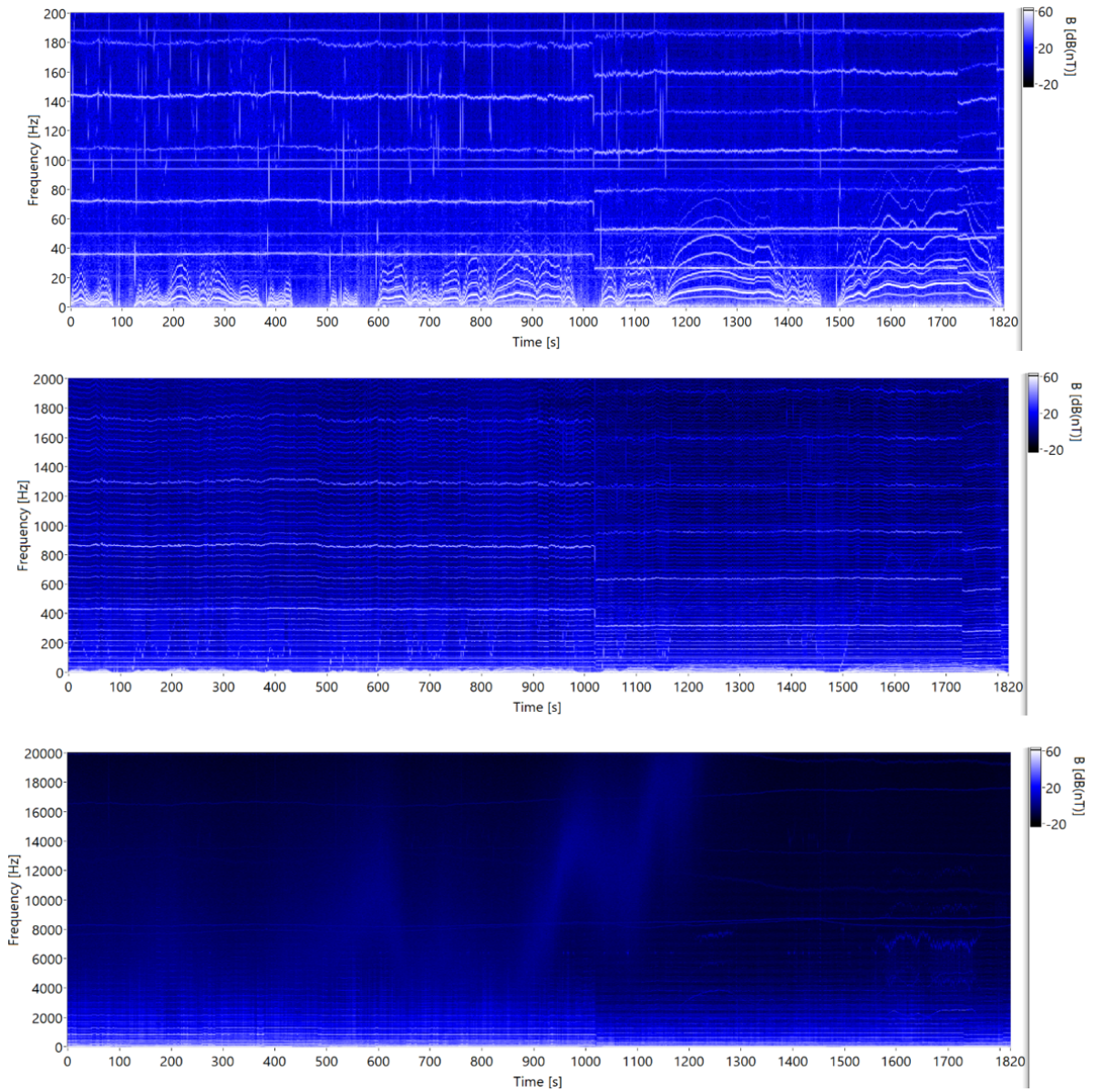


Abbildung 9.171: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Aiways U5 am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

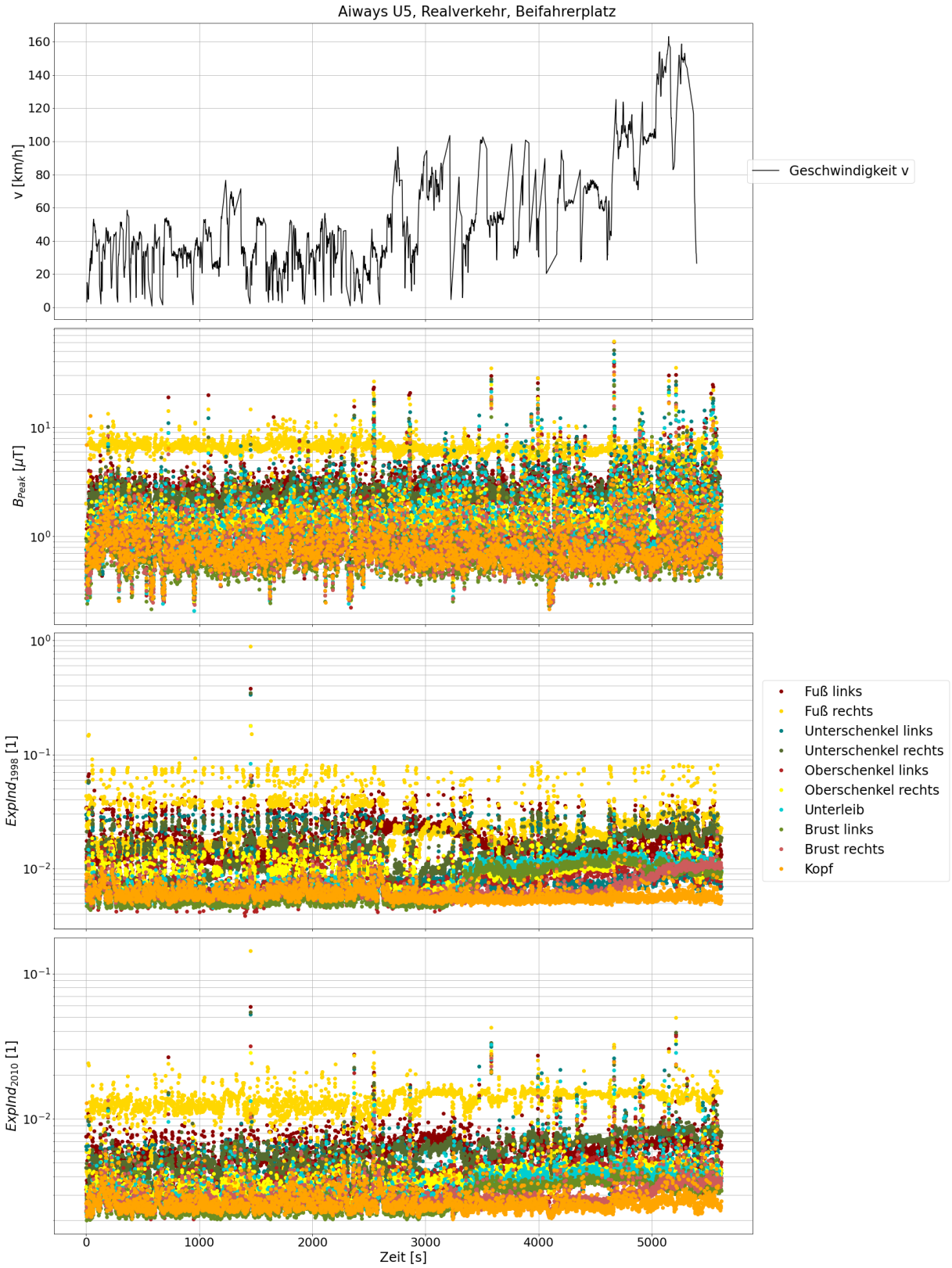


Abbildung 9.172: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

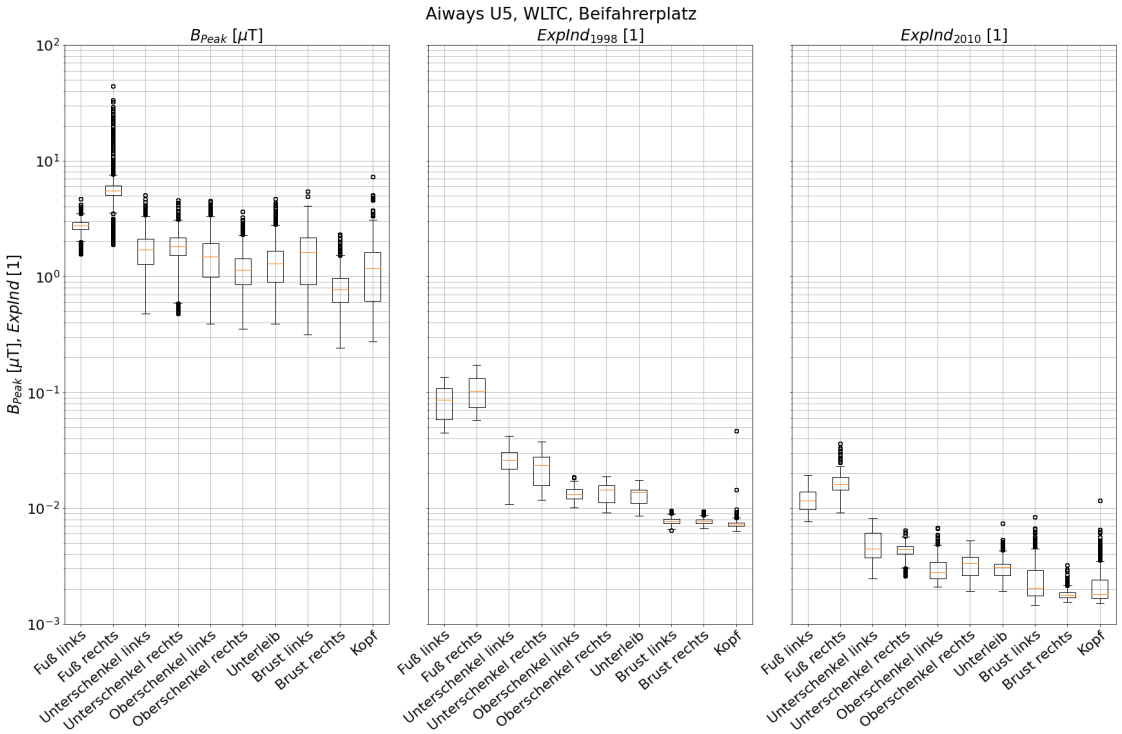


Abbildung 9.173: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

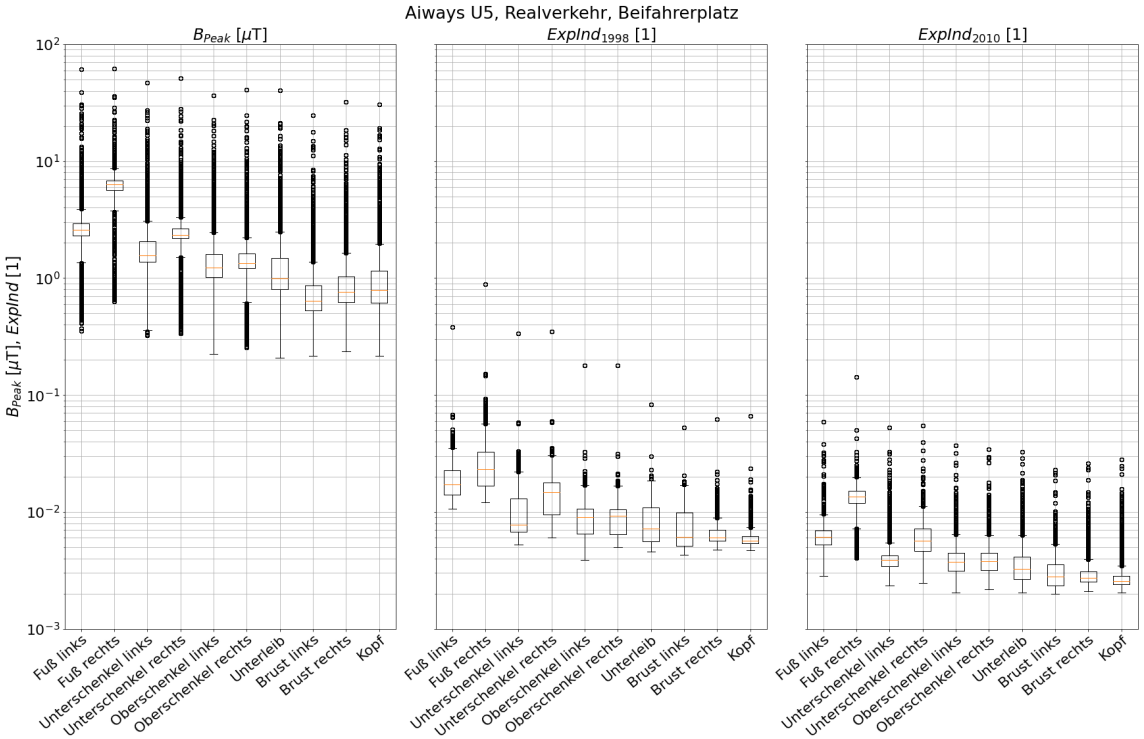


Abbildung 9.174: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

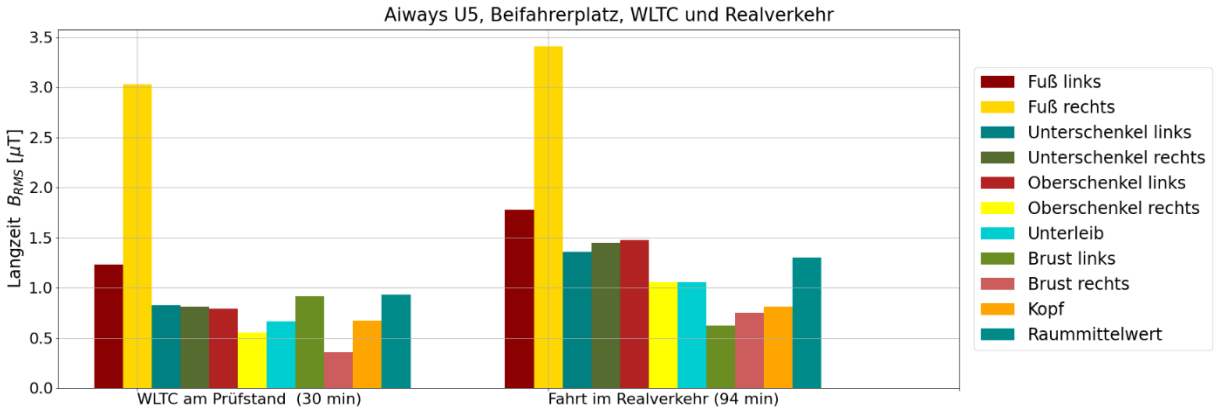


Abbildung 9.175: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.8.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 2.4 im Bereich des linken Fußes am Beifahrerplatz) und beim Betätigen des Bremspedals im Stillstand ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 0.9 im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz) auf. Abbildung 9.176 zeigt den Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs.

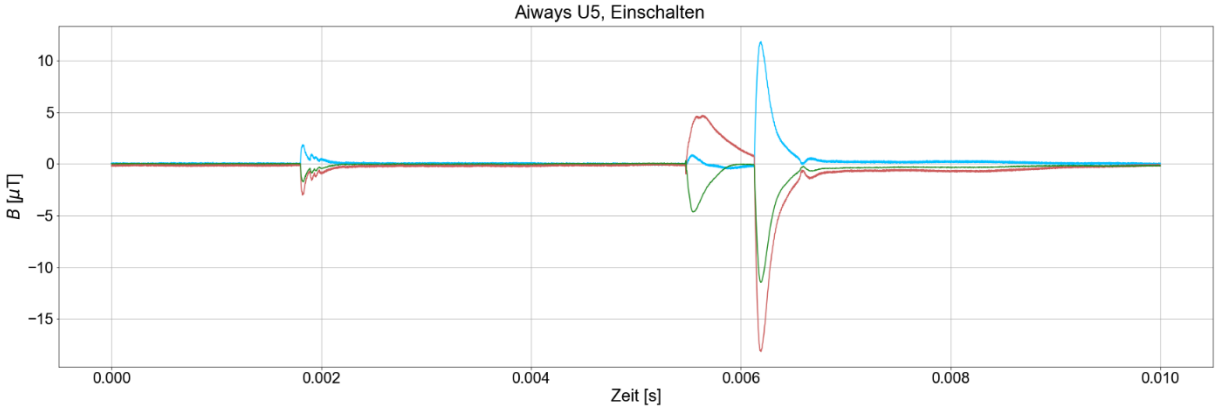


Abbildung 9.176: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im linken Fußbereich des Beifahrerplatzes.

Abbildung 9.177 bis Abbildung 9.179 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

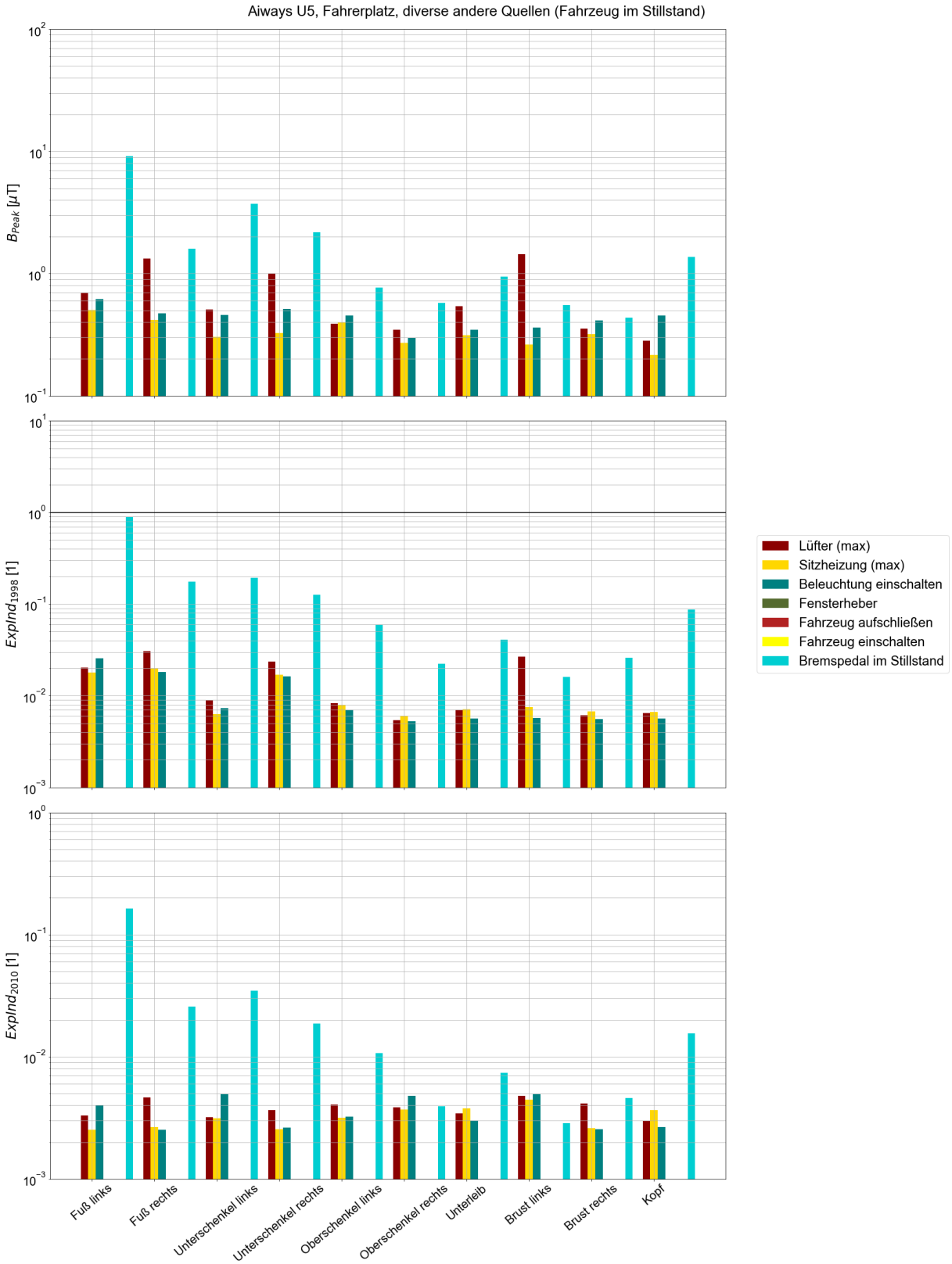


Abbildung 9.177: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Fensterheber, Fahrzeug aufschließen bzw. Fahrzeug einschalten wurden an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

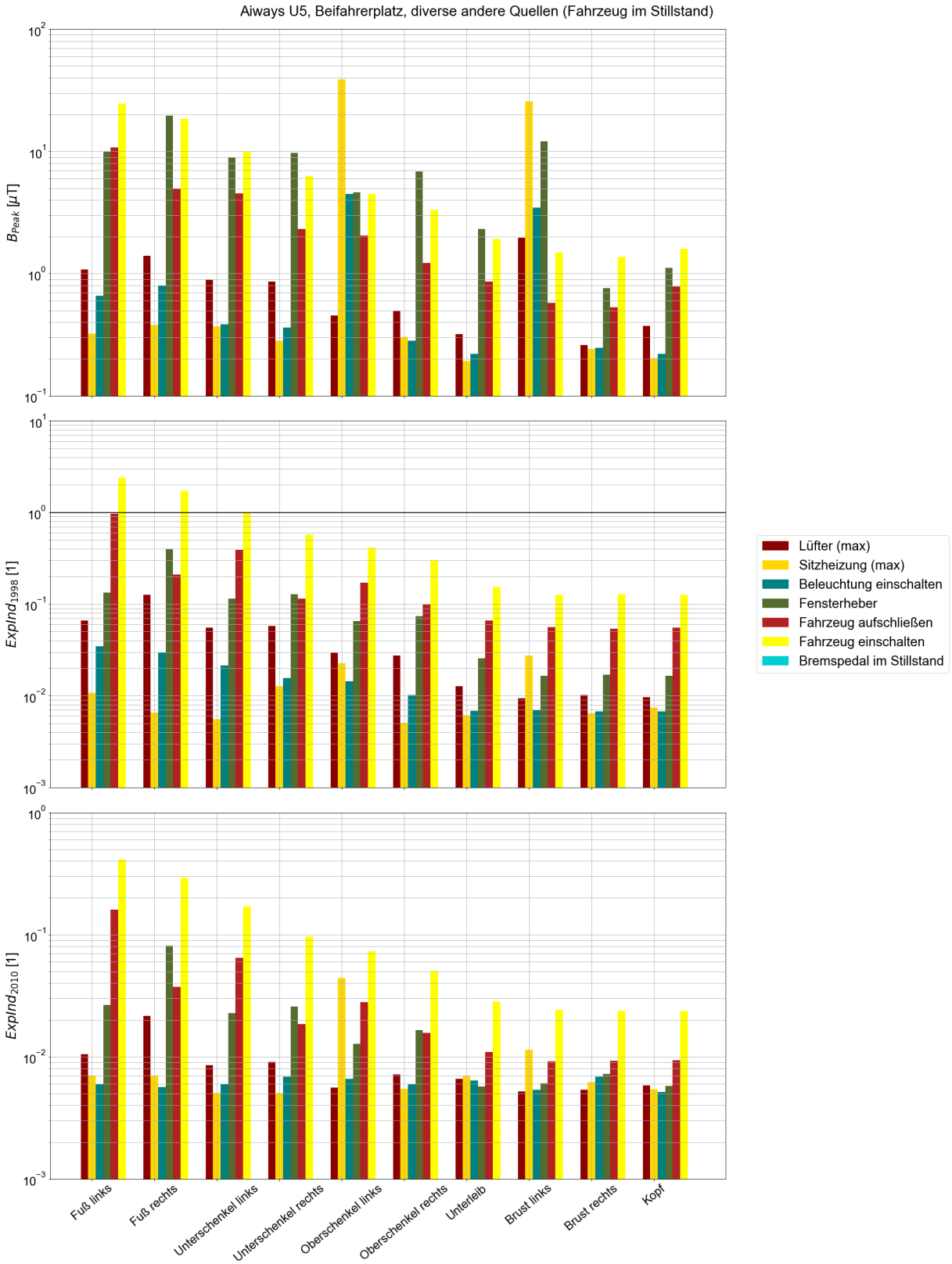


Abbildung 9.178: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Die Betätigung des Bremspedals im Stillstand wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

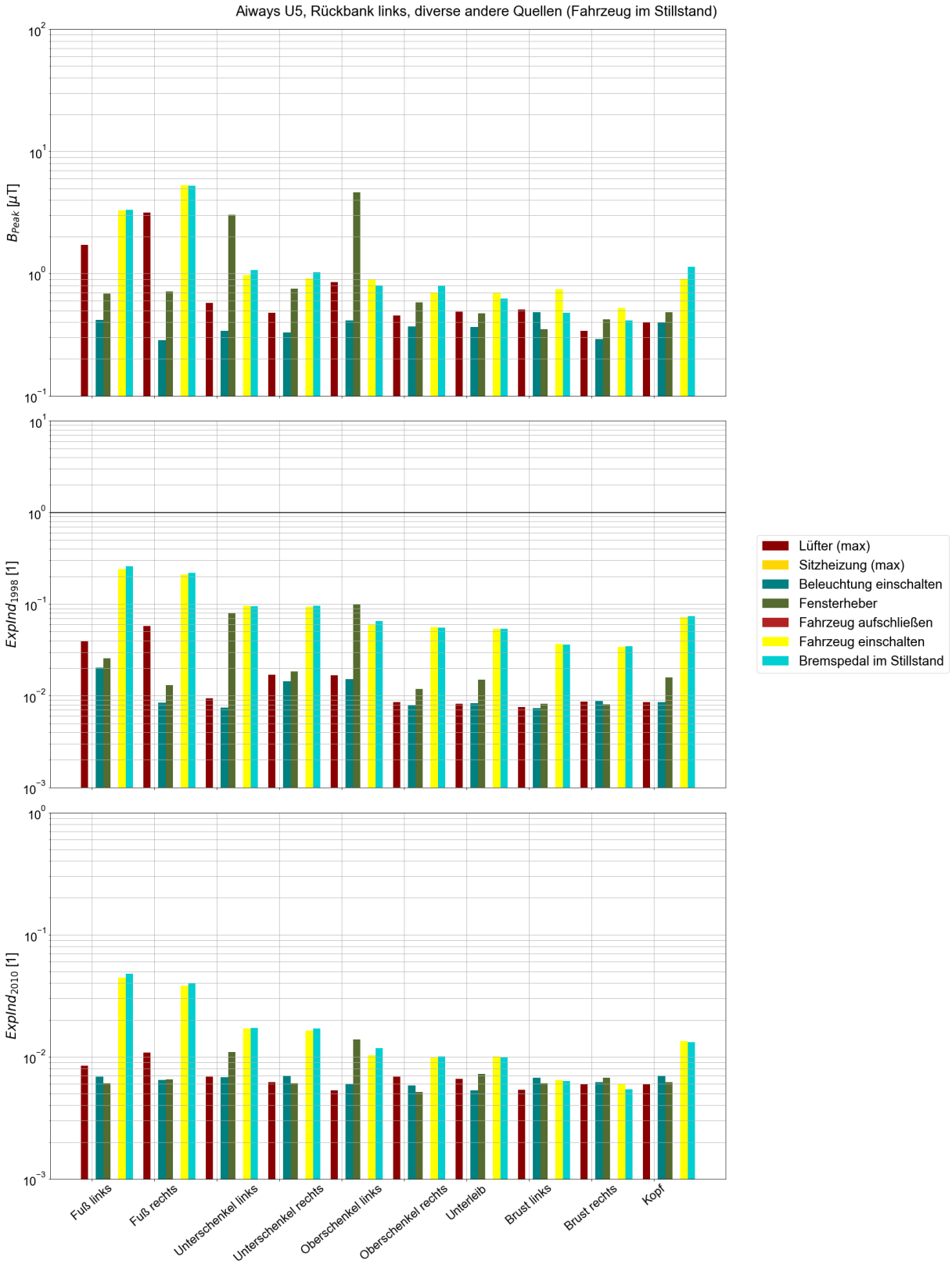


Abbildung 9.179: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Die Sitzheizung und Fahrzeug aufschließen wurden an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

9.4.9 Hyundai Ioniq 5



Abbildung 9.180: Ein Exemplar desuntersuchten Fahrzeugmodells Hyundai Ioniq 5 (https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/hyundai/hyundai-ioniq-5/).

9.4.9.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Hyundai Ioniq 5

Baujahr: 2021

Motorleistung: 225 kW

Batteriekapazität: 77 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.180 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.181).

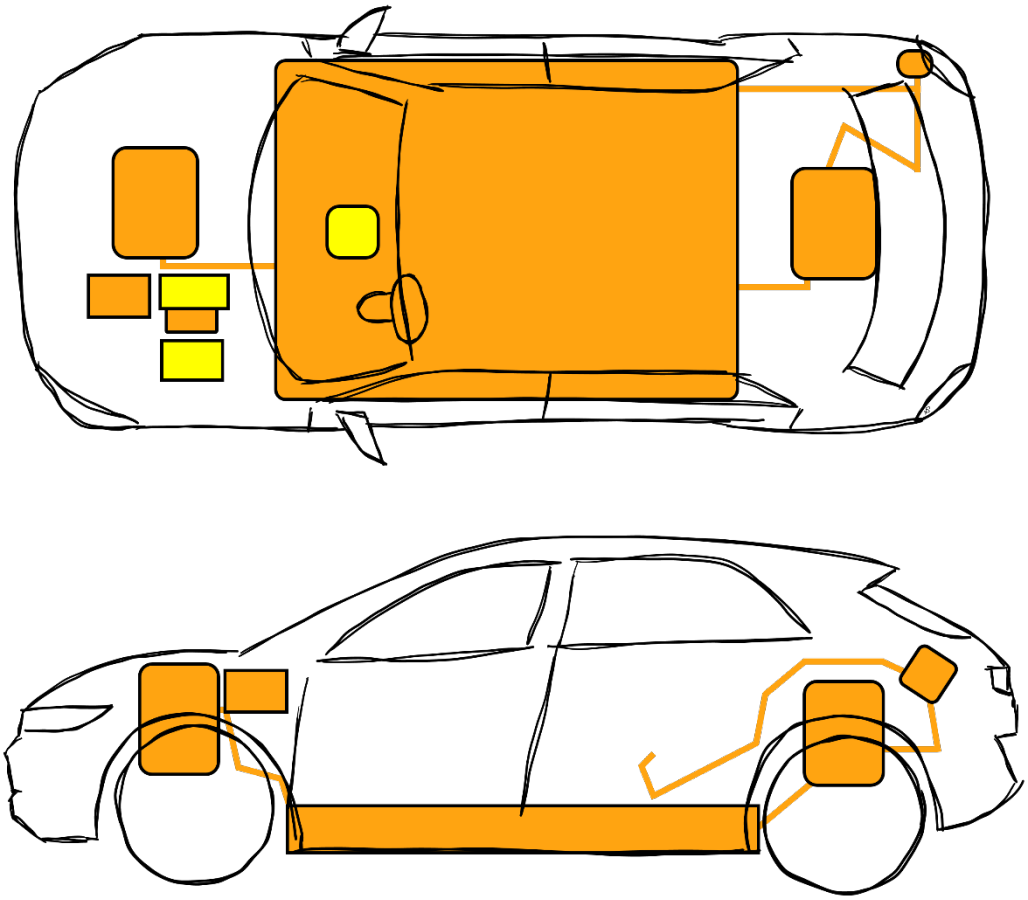


Abbildung 9.181: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Hyundai Ioniq 5 (modifiziert nach https://dmassets.hyundai.com/is/content/hyundaiautoever/hyundai-ioniq-5-rettungsdatenblattpdf).

9.4.9.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.182 bis Abbildung 9.187 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.182 bis Abbildung 9.184) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im rechten Fußbereich des Beifahrers im Ausmaß von ca. 0.06 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei dort ein Anteil von ca. 0.01 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. In Körperregionen ab den Oberschenkeln aufwärts lagen die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit an allen untersuchten Plätzen bei weniger als 0.02.

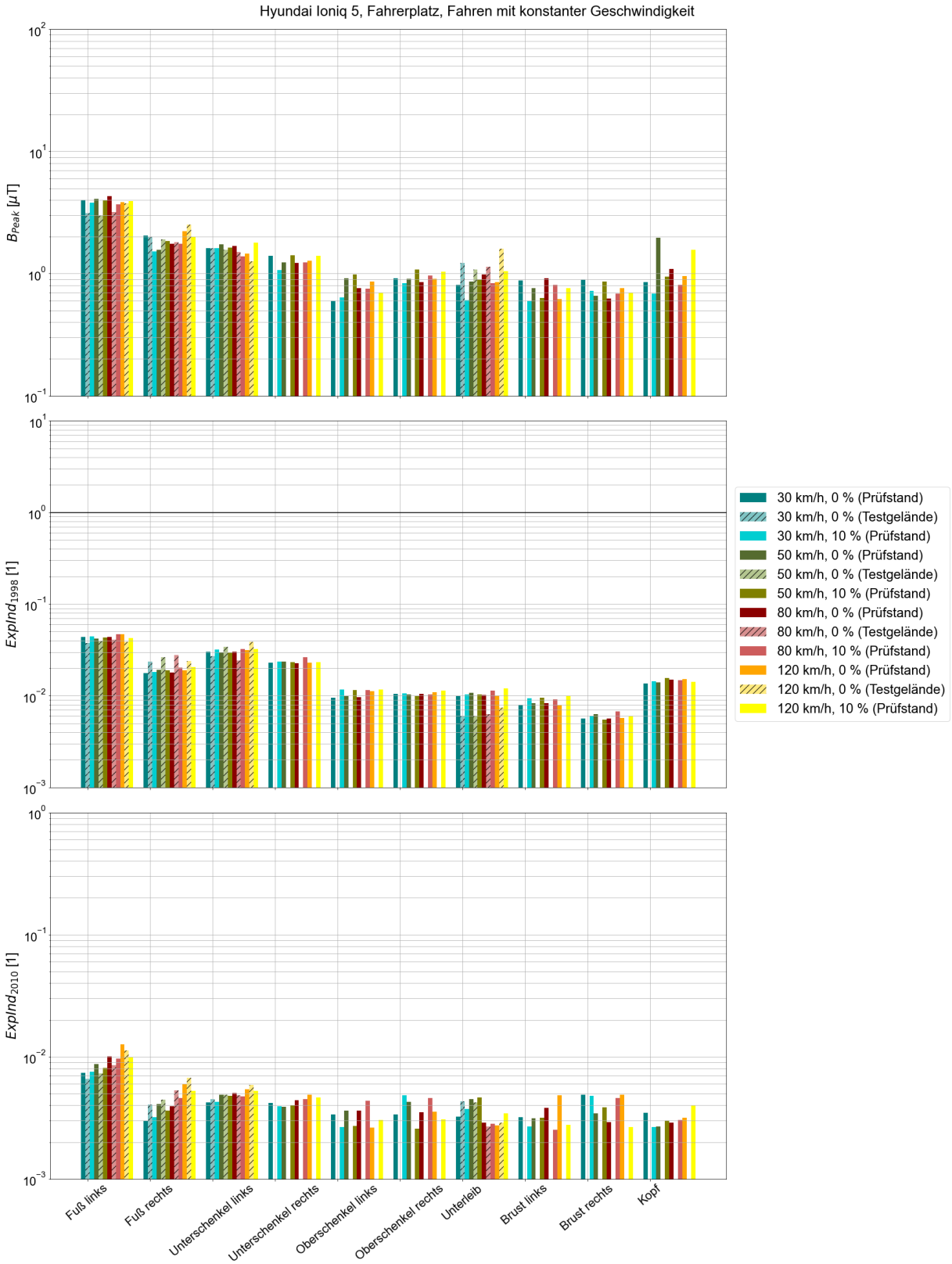


Abbildung 9.182: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

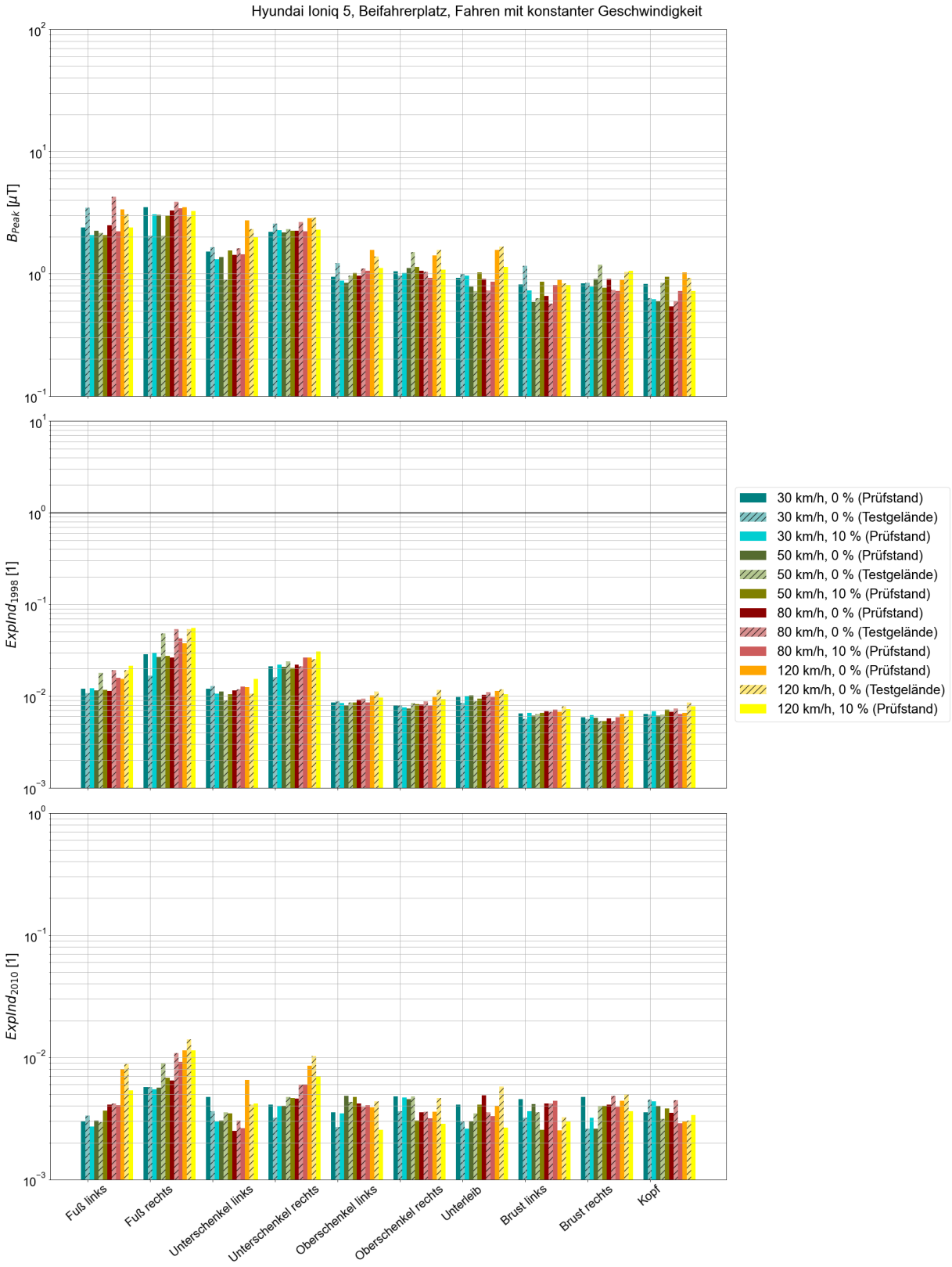


Abbildung 9.183: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

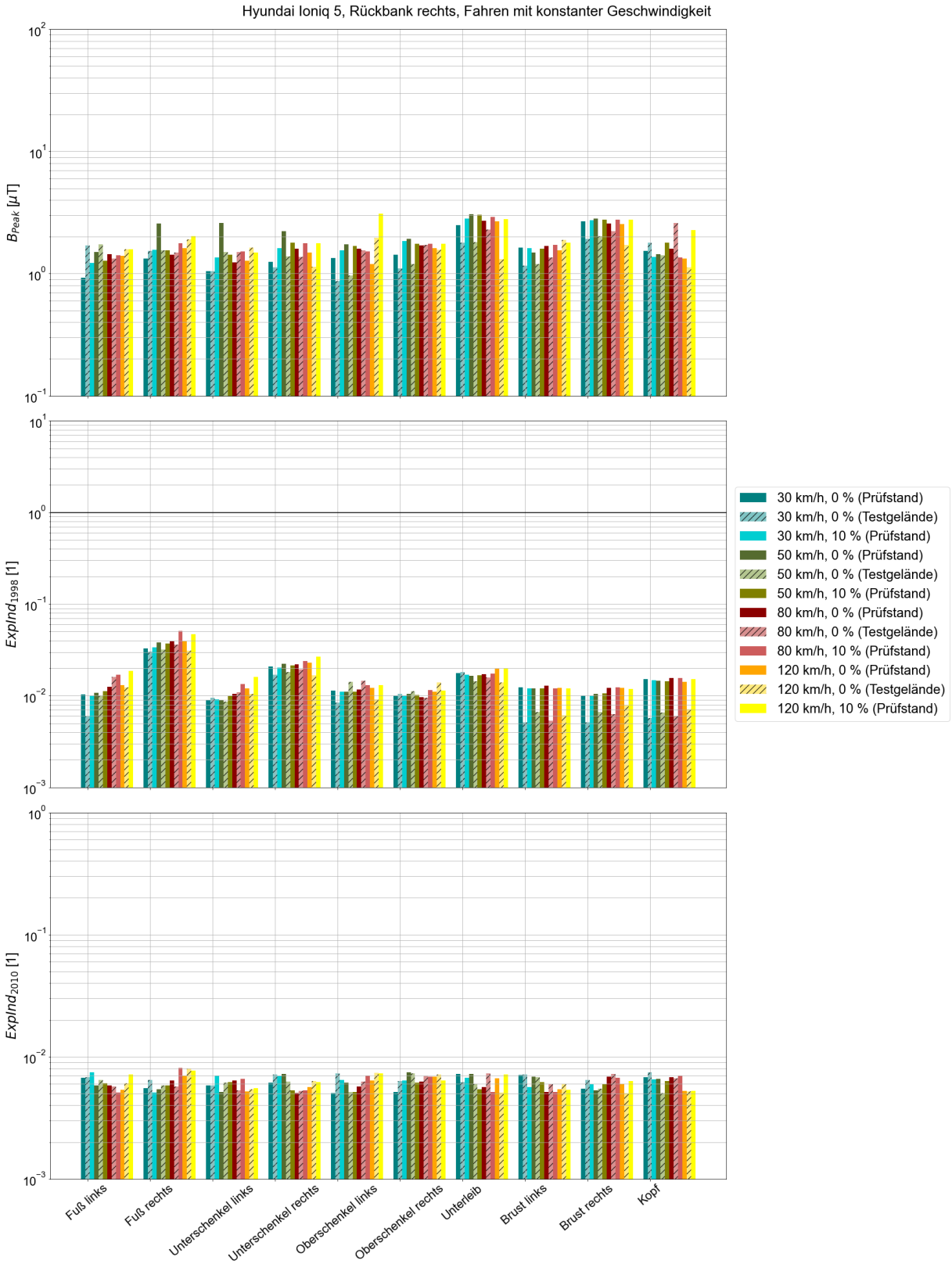


Abbildung 9.184: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

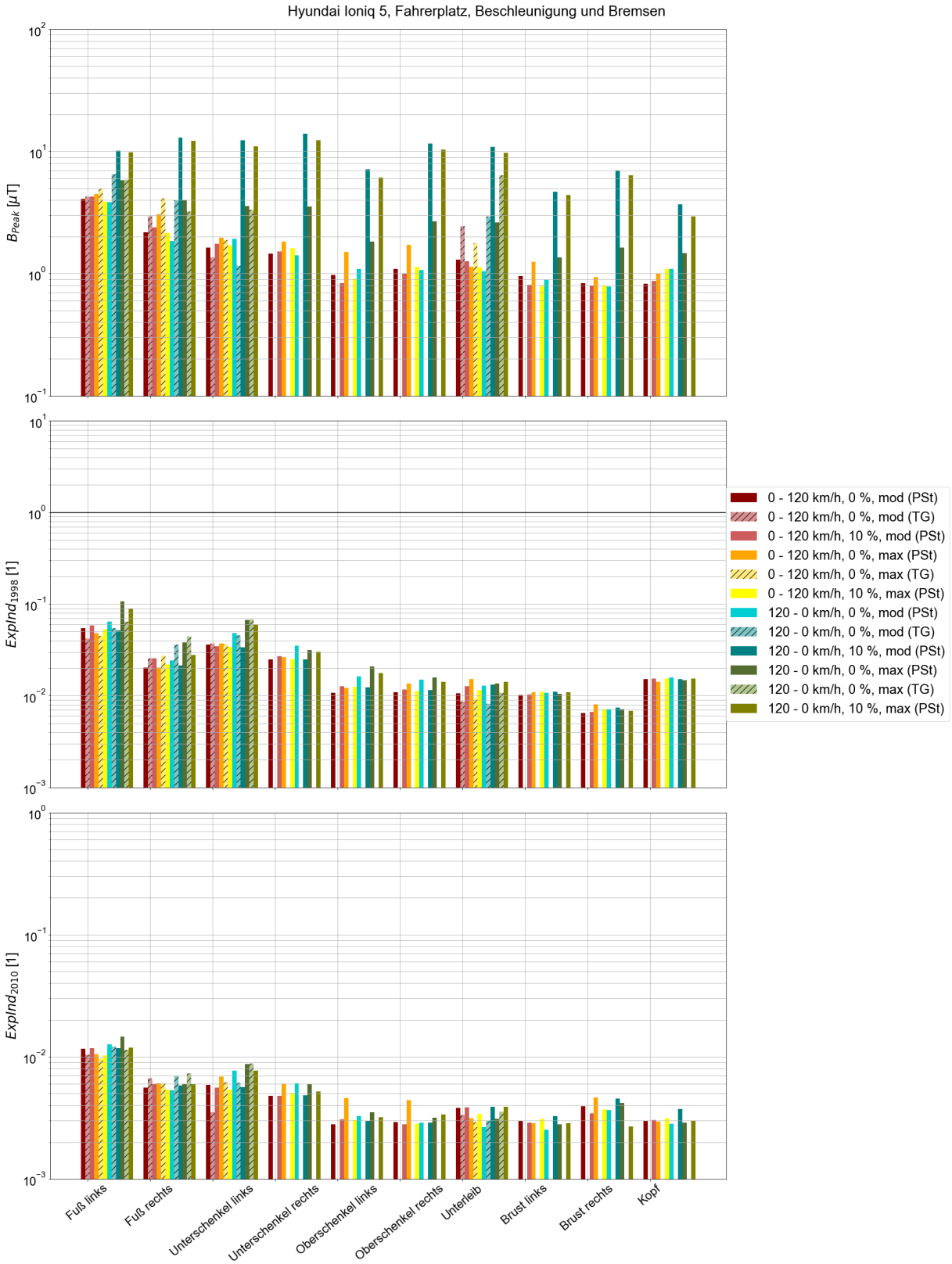


Abbildung 9.185: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

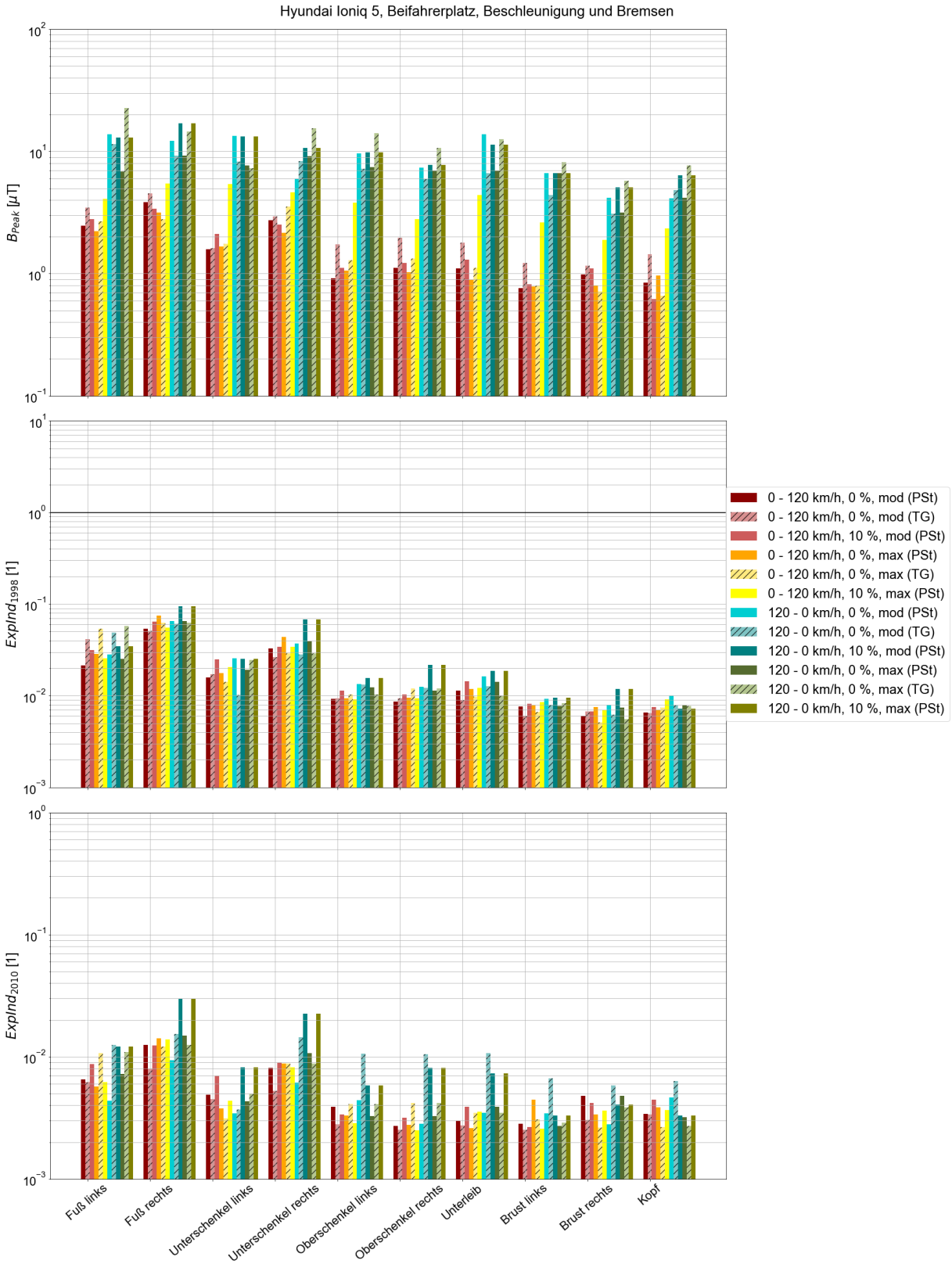


Abbildung 9.186: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

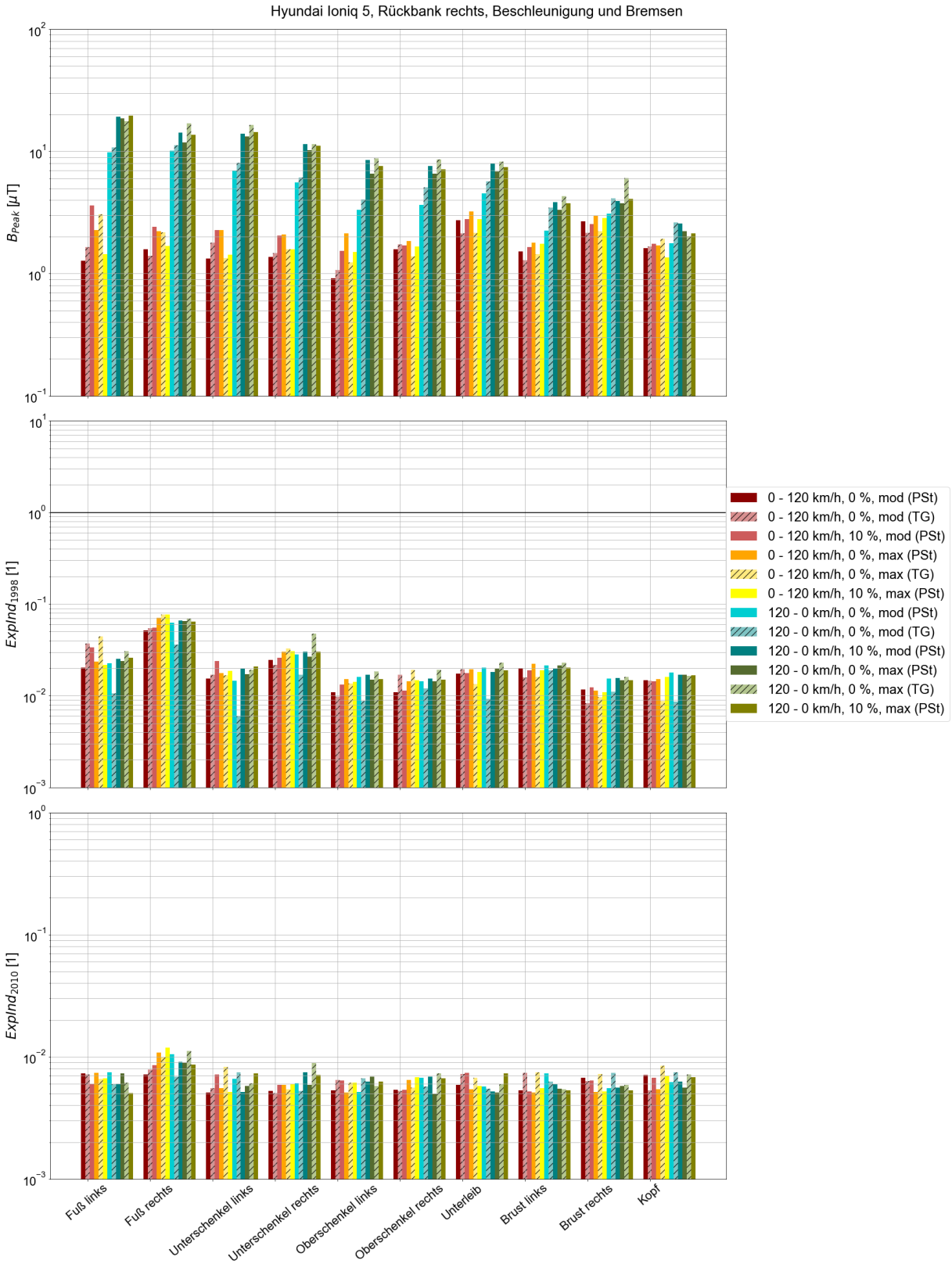


Abbildung 9.187: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.185 bis Abbildung 9.187) zeigten sich etwas höhere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, die im Fußraum von Fahrer und Beifahrer beim Bremsen Werte bis ca. 0.1 ($ExpInd_{1998}$) erreichten.

9.4.9.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.188 und Abbildung 9.190 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer. Dabei fällt auf, dass die Wertebereiche der Expositionsindizes beim WLTC mit den aus den systematischen Messungen am Prüfstand stammenden Daten übereinstimmten. Bei der Fahrt im Realverkehr traten jedoch im Unter- und Oberschenkelbereich Expositionsindizes auf, die etwas größer waren, als dies auf Basis der Messungen am Prüfstand (systematische Messungen und WLTC) erwartet wurde. Als Grund dafür konnten steilflankige Spikes der magnetischen Flussdichte mit einem räumlichen Maximum im Oberschenkelbereich identifiziert werden, die bei den Messungen am Prüfstand nicht gefunden wurden (Abbildung 9.191). Diese Spikes traten in Zusammenhang mit Bremsmanövern auf.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.189 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

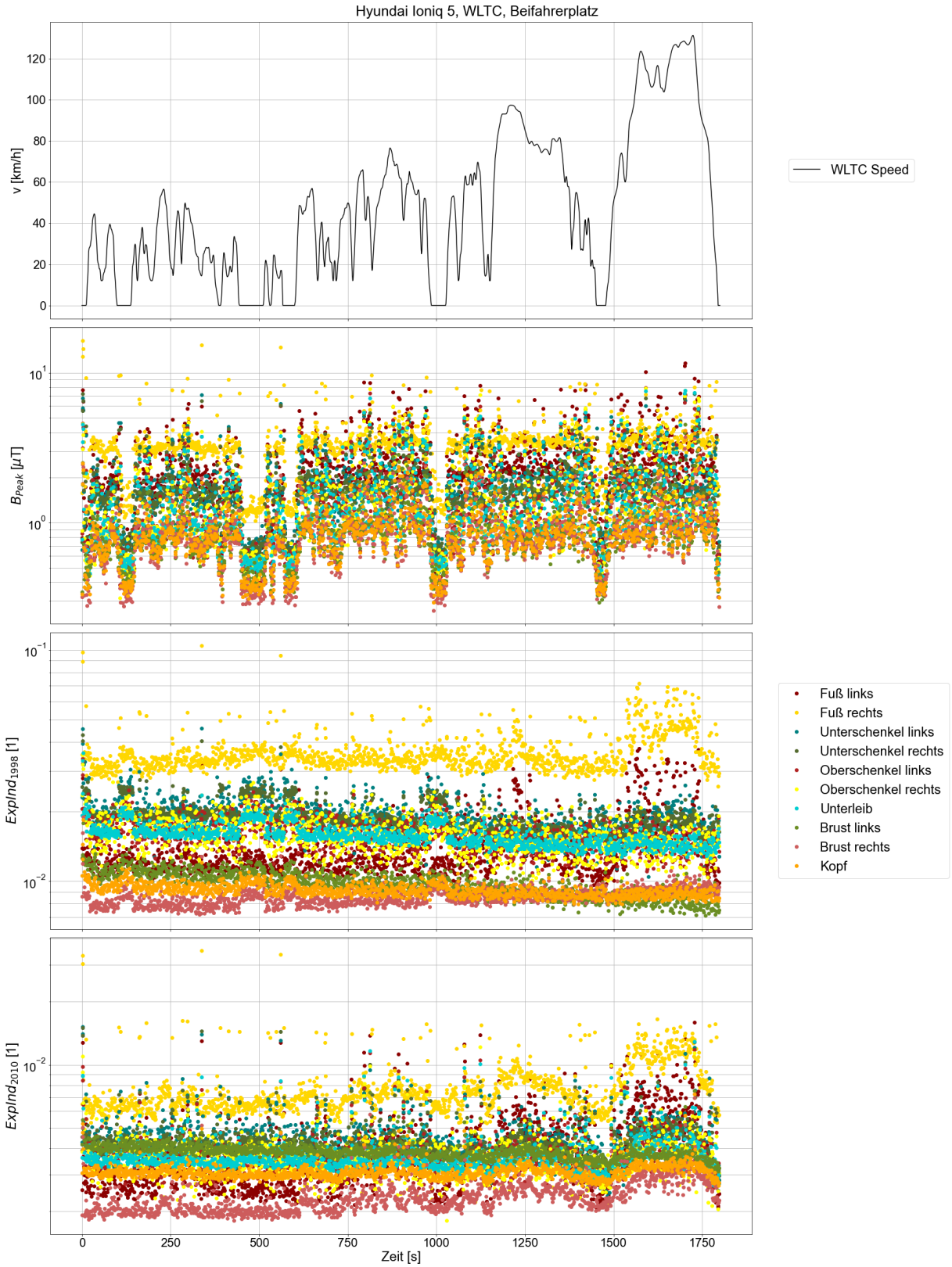


Abbildung 9.188: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

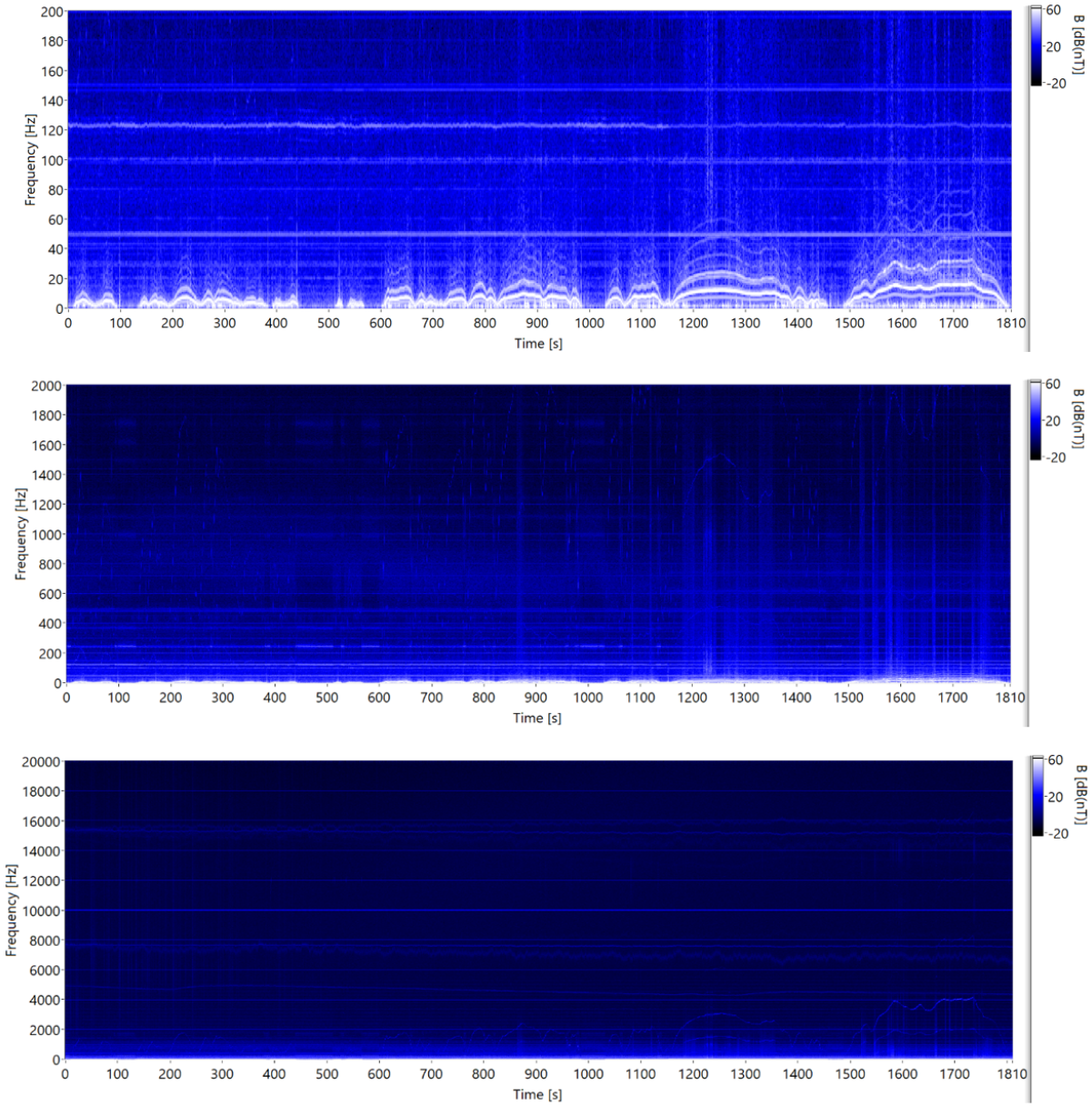


Abbildung 9.189: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Hyundai Ioniq 5, am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

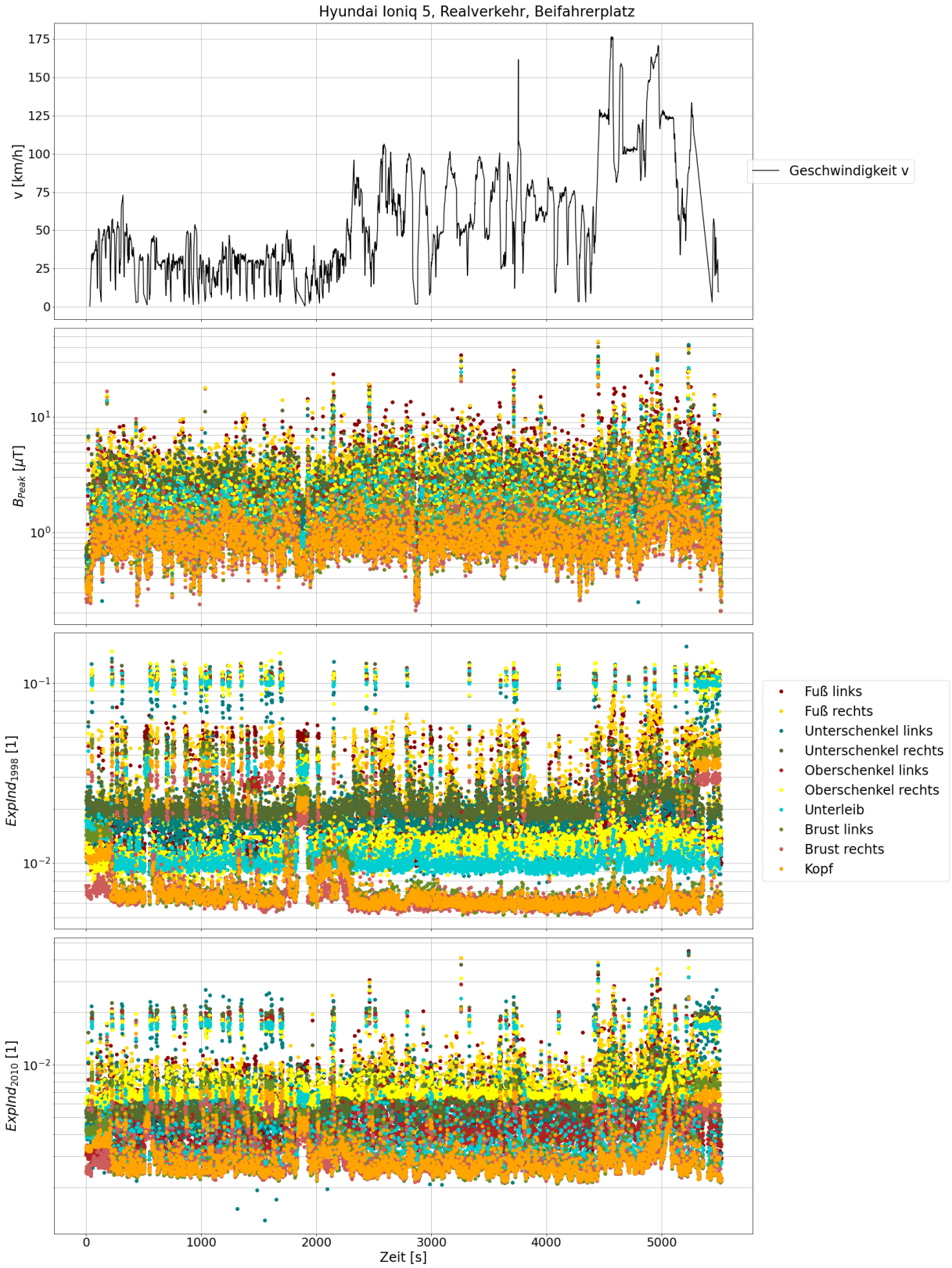


Abbildung 9.190: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

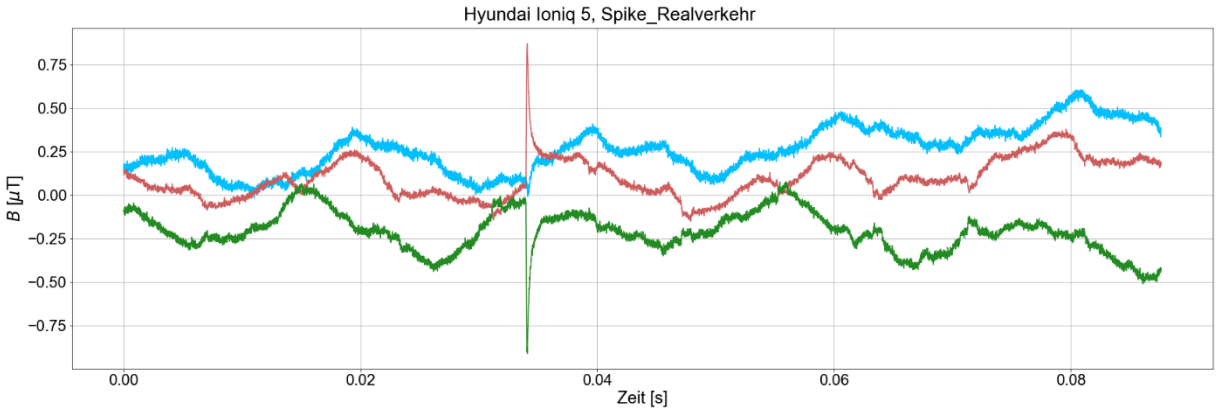


Abbildung 9.191: Steilflankige Spikes in Zusammenhang mit Bremsmanövern, gemessen im Oberschenkelbereich am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr, die am Prüfstand und am Testgelänge nicht gefunden werden.

Abbildung 9.192 und Abbildung 9.193 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.194 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

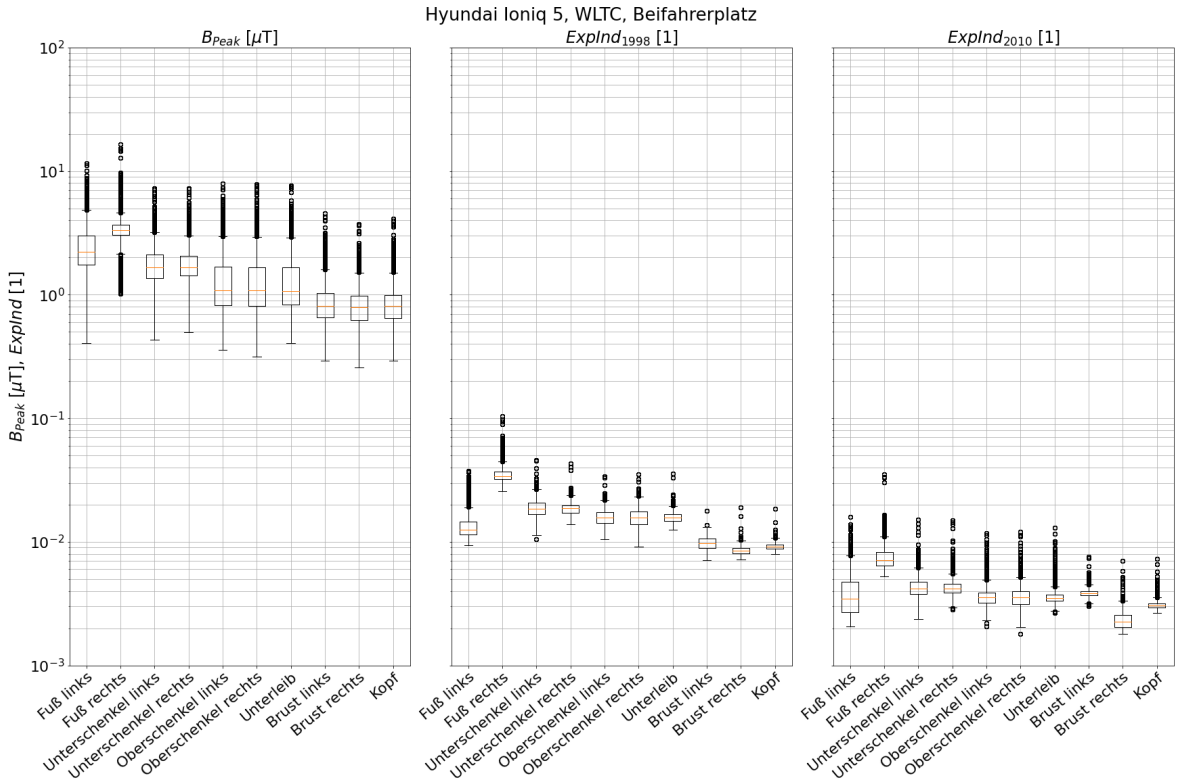


Abbildung 9.192: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

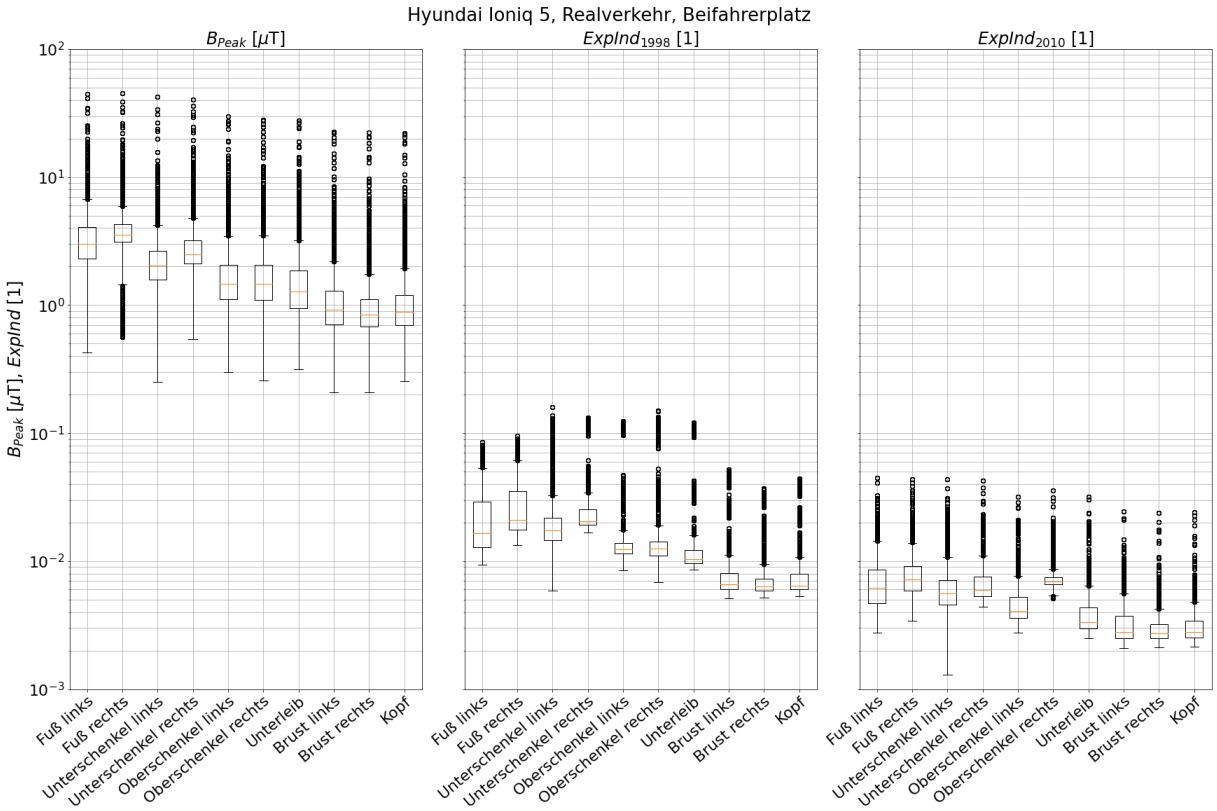


Abbildung 9.193: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

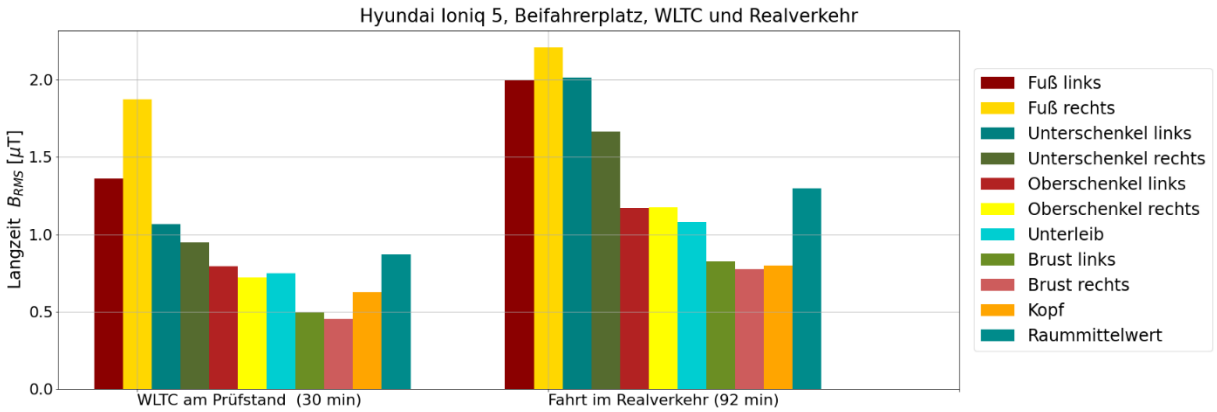


Abbildung 9.194: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.9.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 1.7 im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz) auf. Abbildung 9.195 zeigt den zugehörigen Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte.

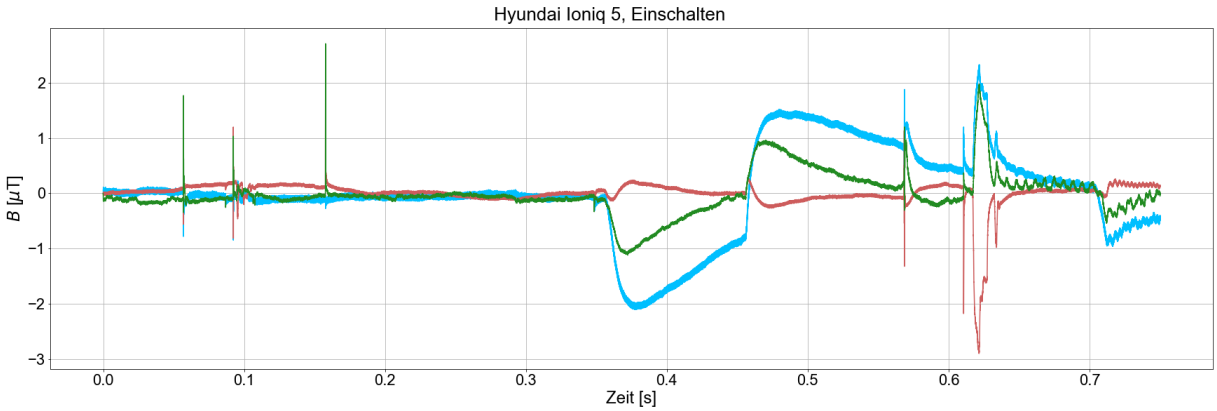


Abbildung 9.195: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes.

Abbildung 9.196 bis Abbildung 9.198 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

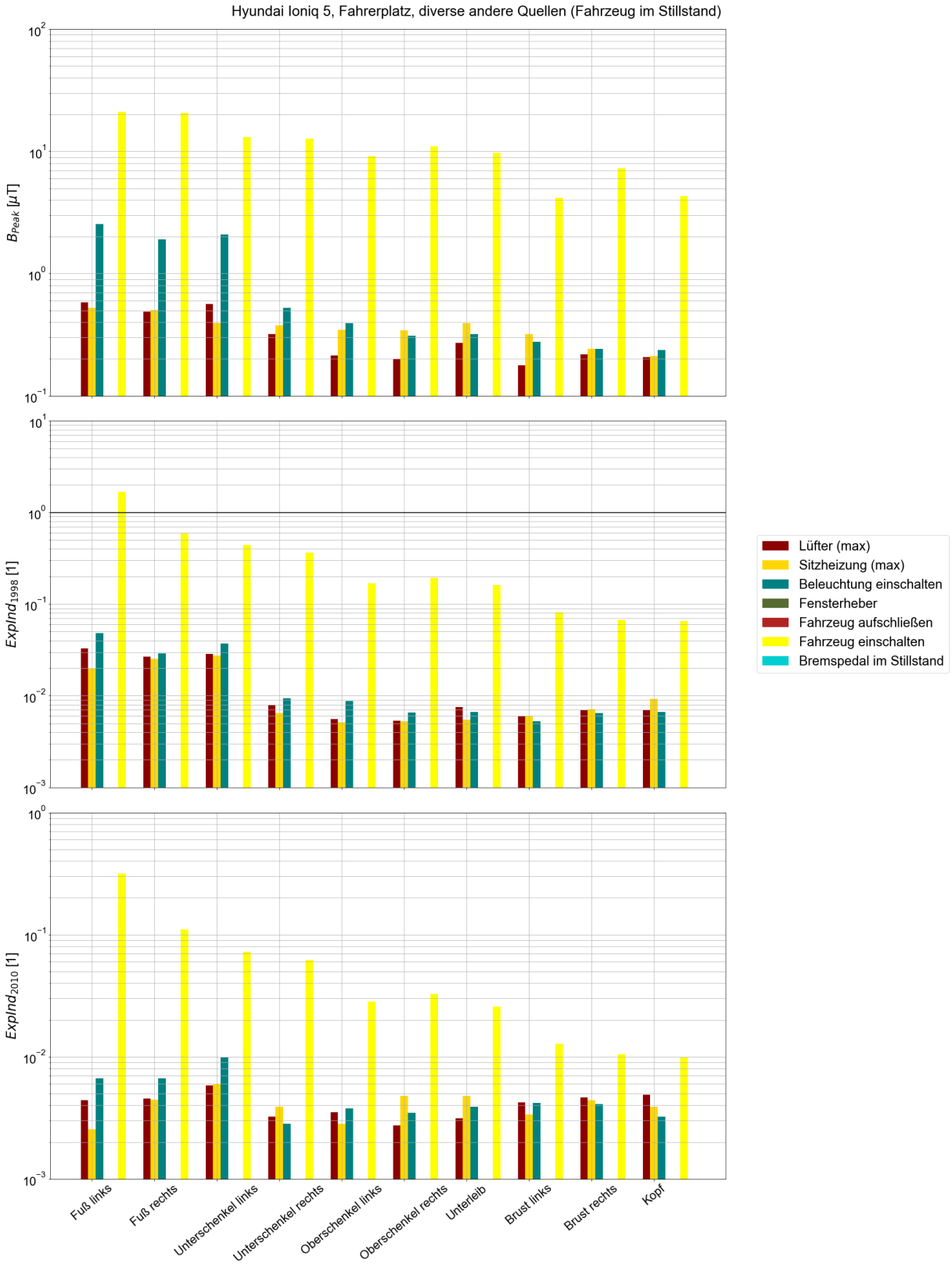


Abbildung 9.196: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

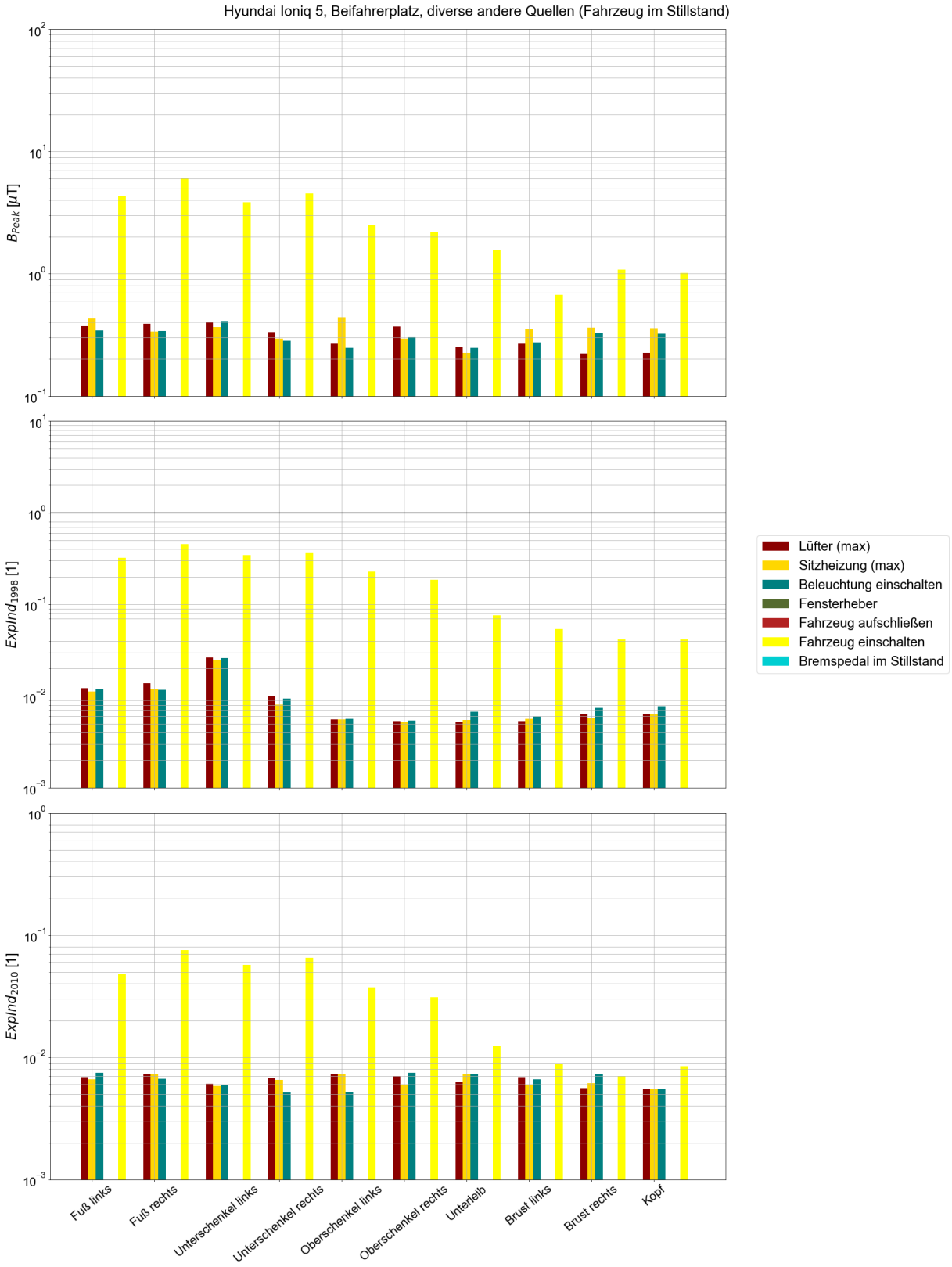


Abbildung 9.197: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

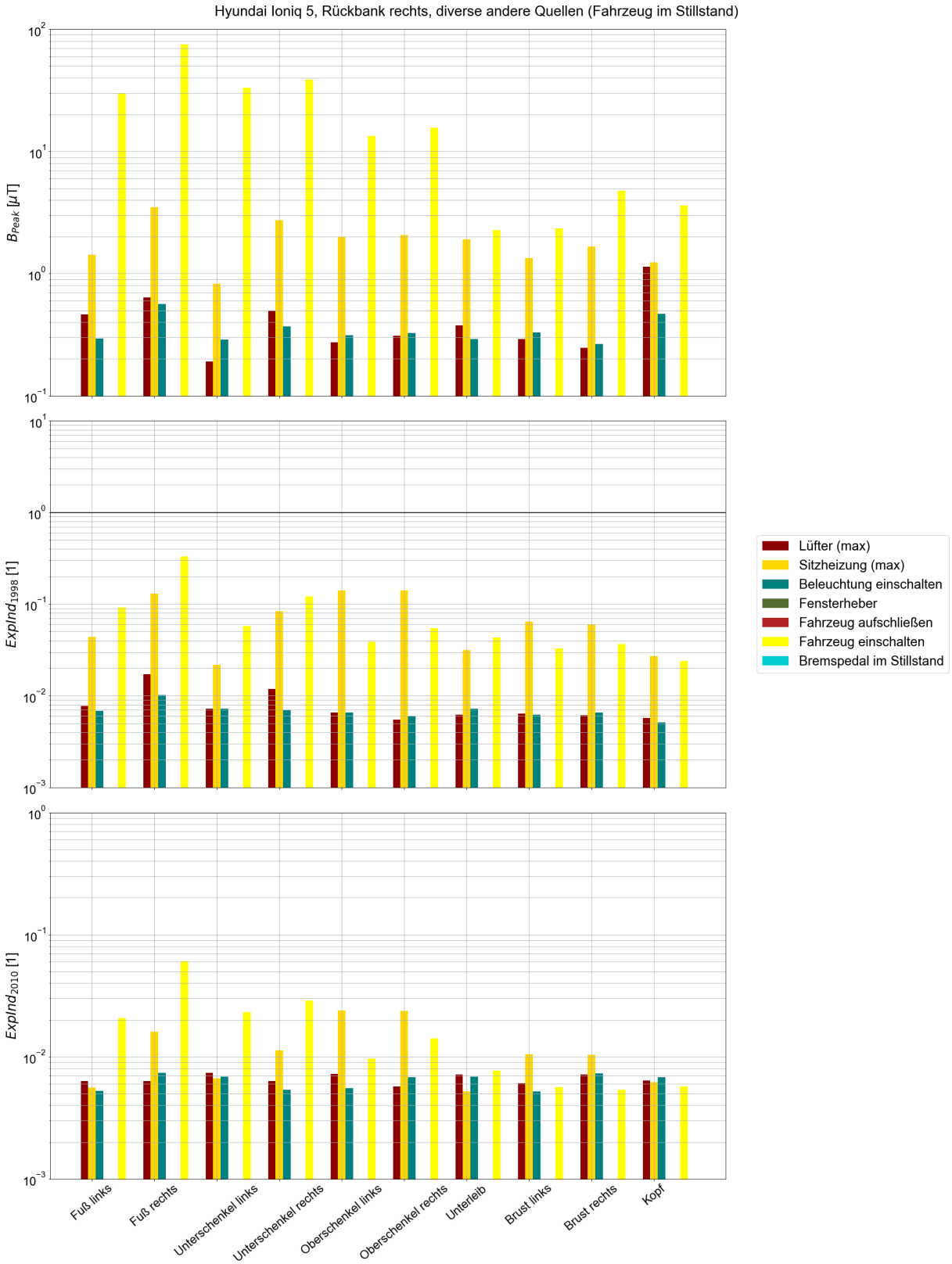


Abbildung 9.198: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

9.4.10 Fiat 500e



Abbildung 9.199: Untersuchter Fiat 500e auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.10.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Fiat 500e

Baujahr: 2021

Motorleistung: 87 kW

Batteriekapazität: 42 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.199 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.200).

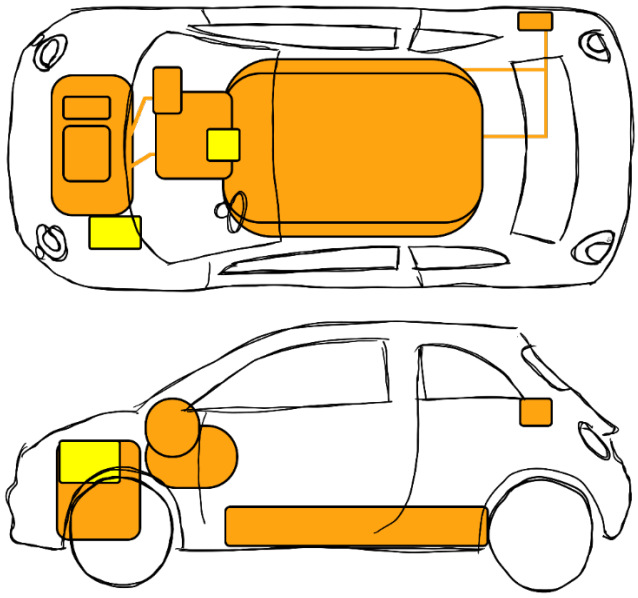


Abbildung 9.200: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Fiat 500e (modifiziert nach https://www.fiat.de/rettungsdatenblaetter).

9.4.10.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.201 bis Abbildung 9.206 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.201 bis Abbildung 9.203) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im rechten Fußbereich des Fahrers im Ausmaß von bis zu ca. 0.62 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei dort kein relevanter Anteil der Reifenmagnetisierung vorlag (< 0.005). Auffallend dabei ist, dass diese vergleichsweise hohen Expositionsindizes nur am Testgelände, nicht jedoch am Prüfstand gefunden wurden. Die Ursache dafür sind die notwendigerweise unterschiedlichen Positionen der Messsonden im rechten Fußbereich des Fahrerplatzes bei den Messungen am Prüfstand und am Testgelände. Bei den Messungen am Prüfstand (Hartschaum-Dummy am Fahrersitz) lag die Messsonde am Fahrzeugboden unmittelbar vor dem Gaspedal, um die Bedienung des Gaspedals (mittels Stange vom Beifahrerplatz aus) nicht zu behindern. Beim Fahren am Testgelände wurde die Messsonde am Rist des rechten Fußes des Fahrers montiert und damit ca. 20 cm höher und 20 cm weiter vorne im Fußraum. Offensichtlich herrscht in diesem Raumbereich eine stark oberwellenbehaftete Feldkomponente eines Schaltreglers, mit einem starken Feldgradienten. In allen anderen untersuchten Positionen[33] im Fahrzeug blieben die Expositionsindizes beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit unterhalb von 0.1.

[33] Für den Kopfbereich und teilweise für den Bereich des linken Unterschenkels liegen aufgrund eines während der Messungen aufgetretenen Defekts an den entsprechenden Messkanälen keine Daten vor.

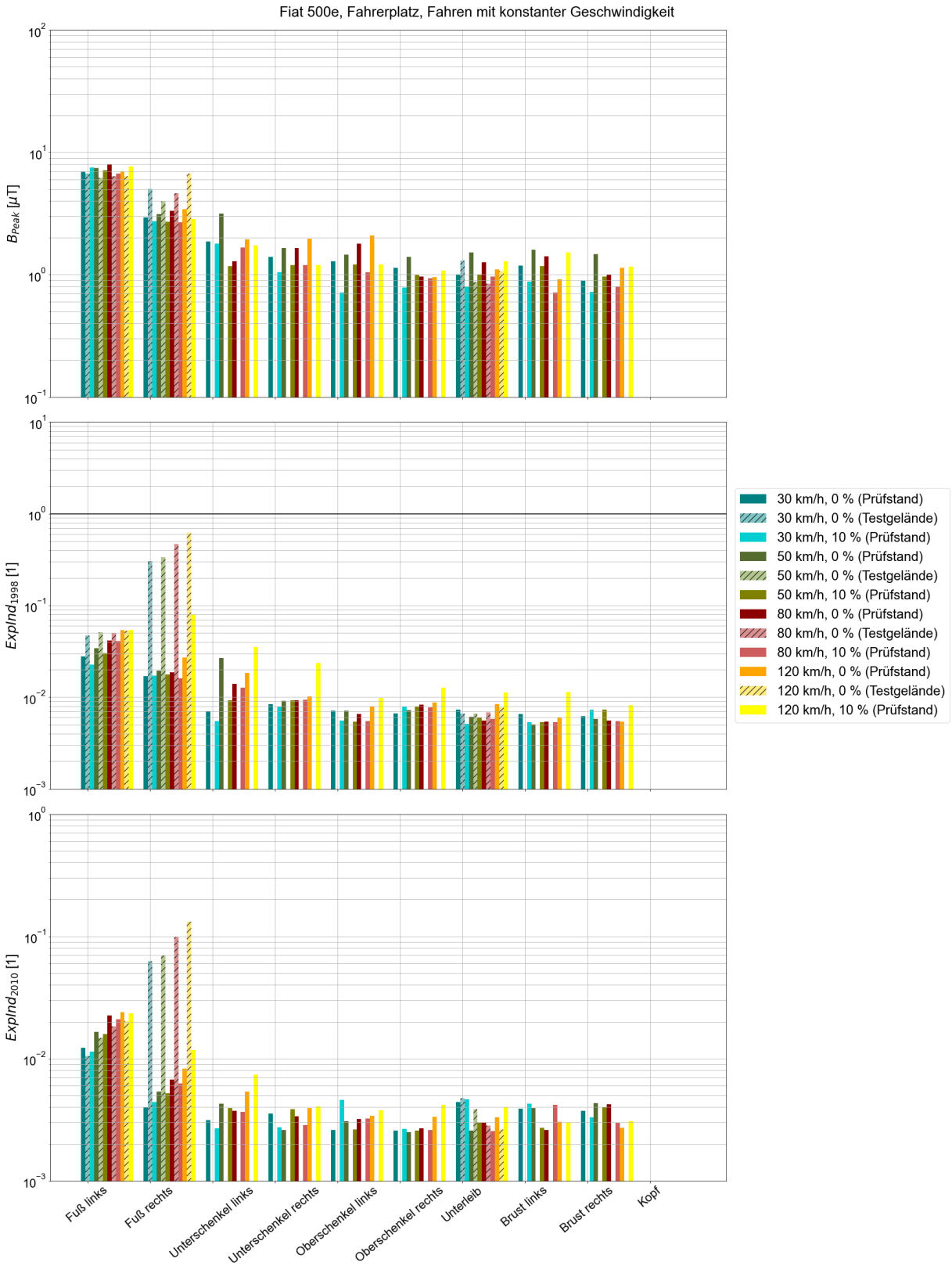


Abbildung 9.201: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

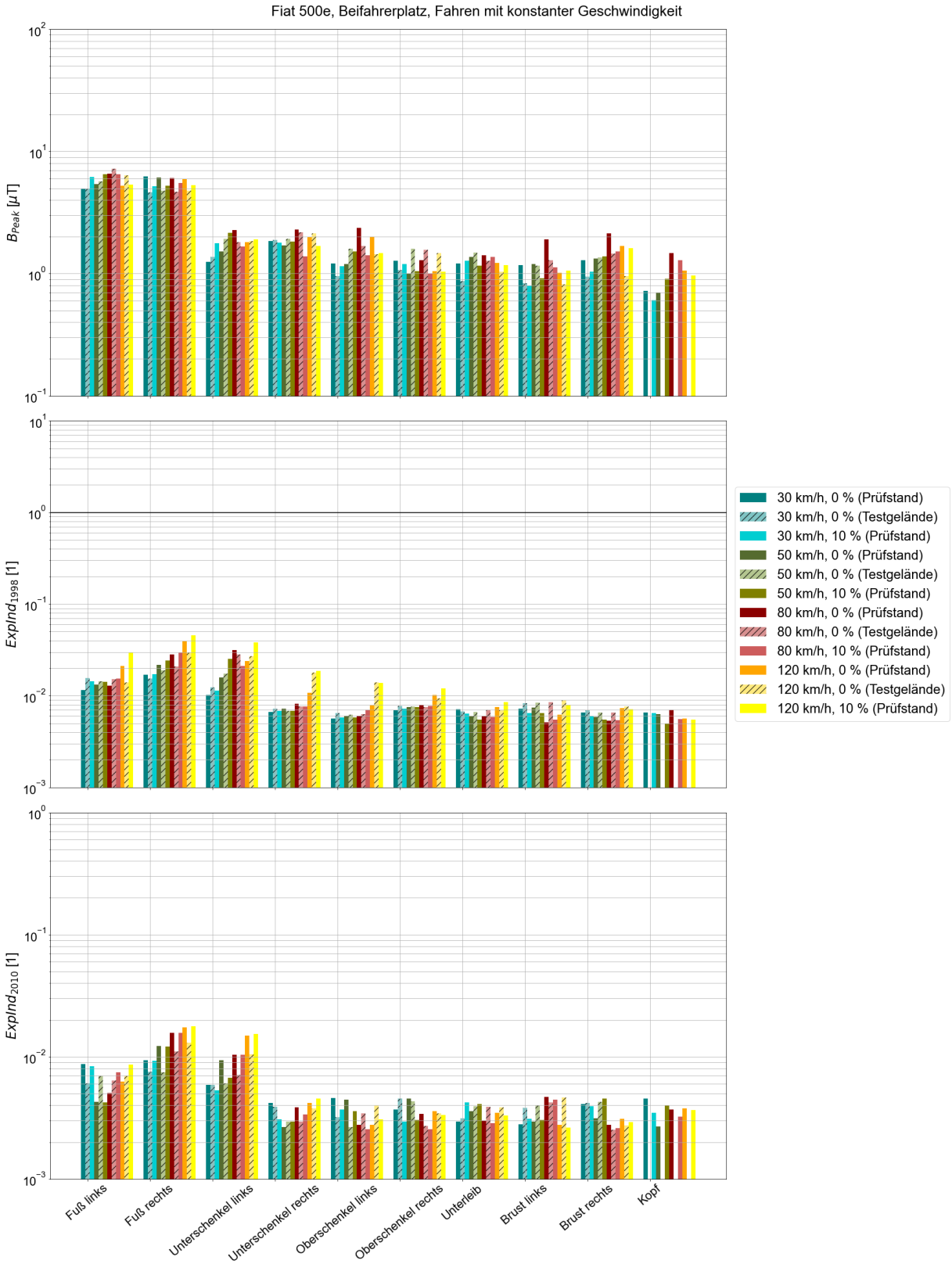


Abbildung 9.202: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

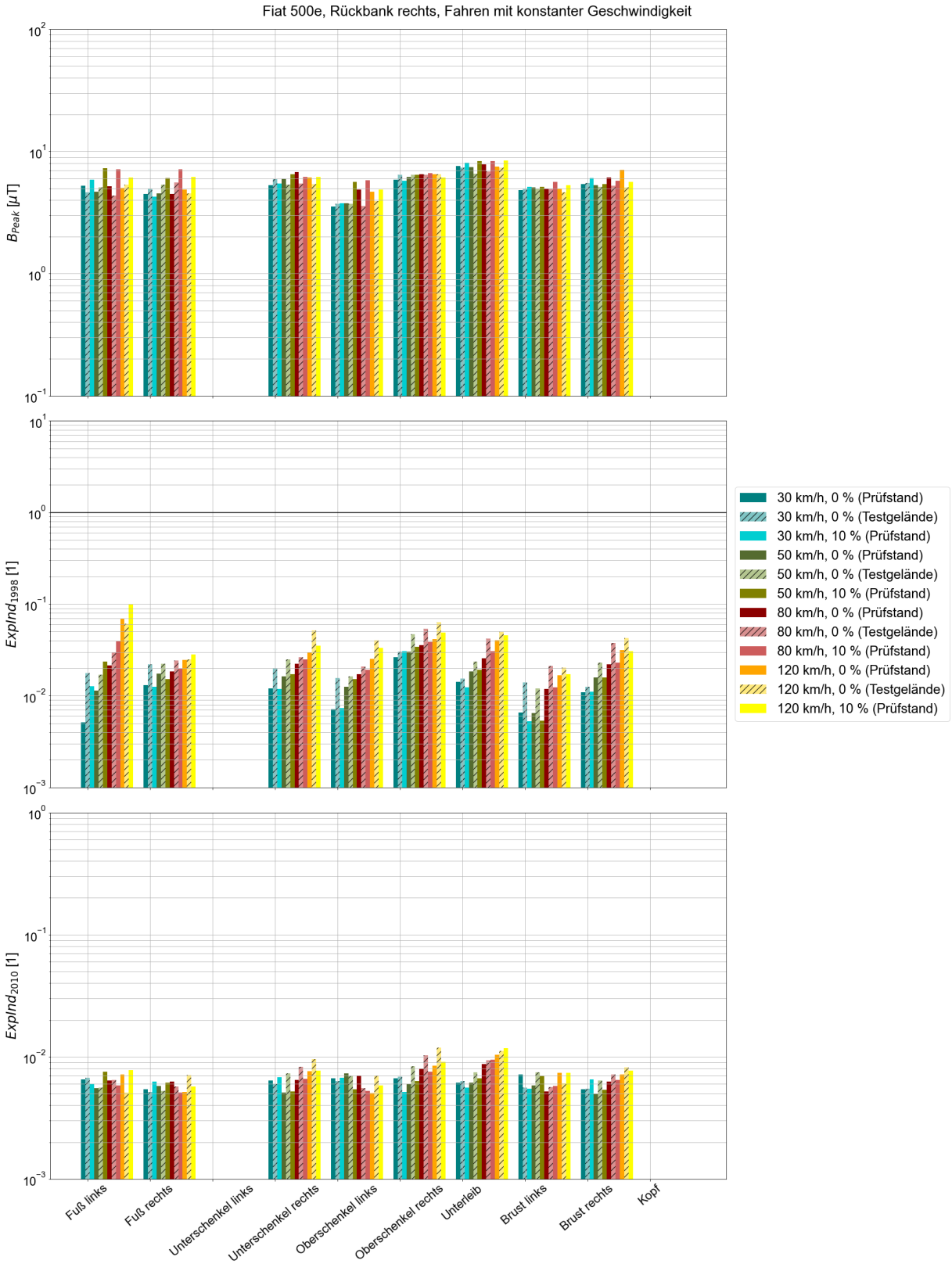


Abbildung 9.203: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Für den Kopfbereich und teilweise für den Bereich des linken Unterschenkels liegen aufgrund eines während der Messungen aufgetretenen Defekts an den entsprechenden Messkanälen keine Daten vor.

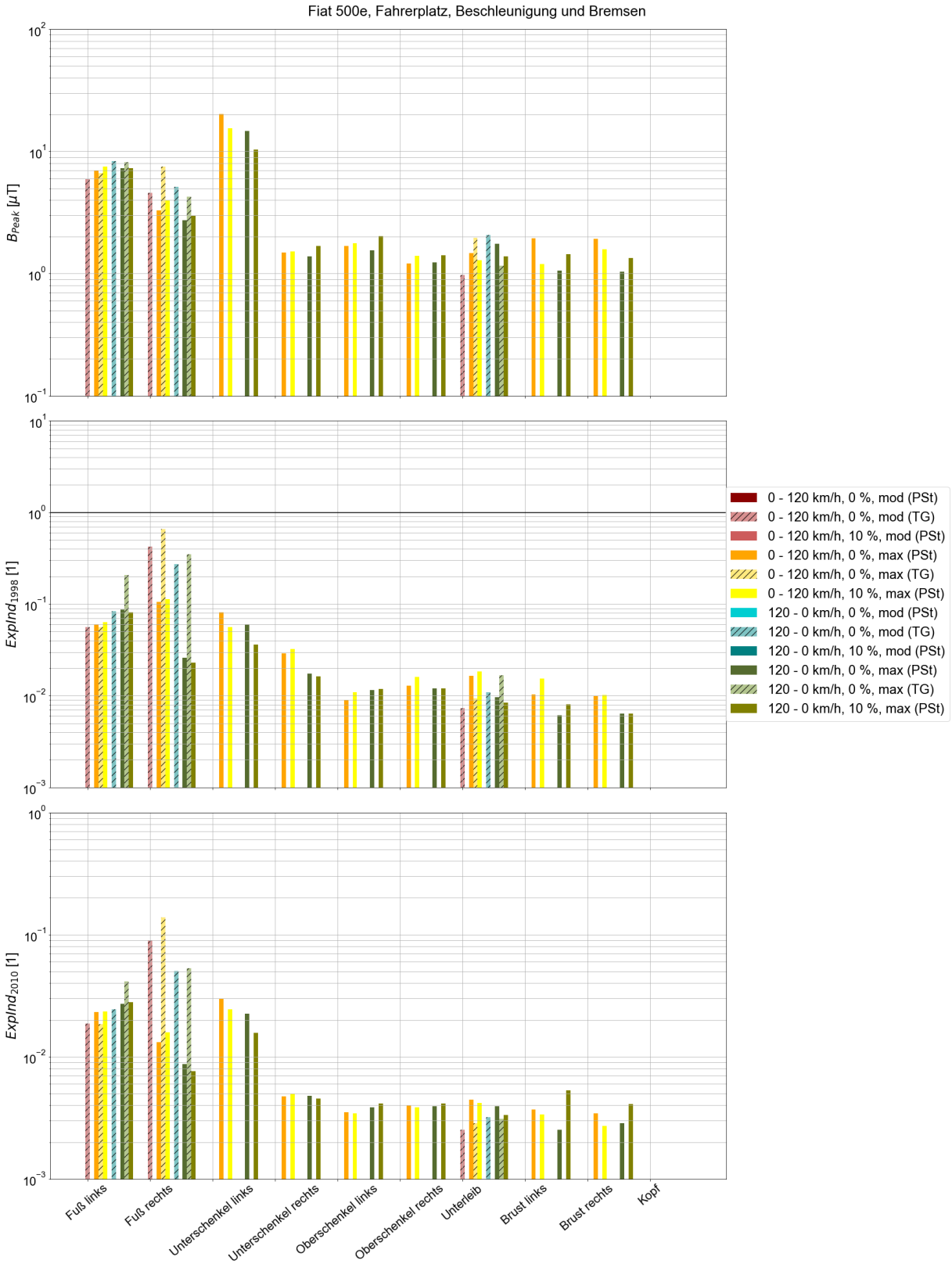


Abbildung 9.204: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

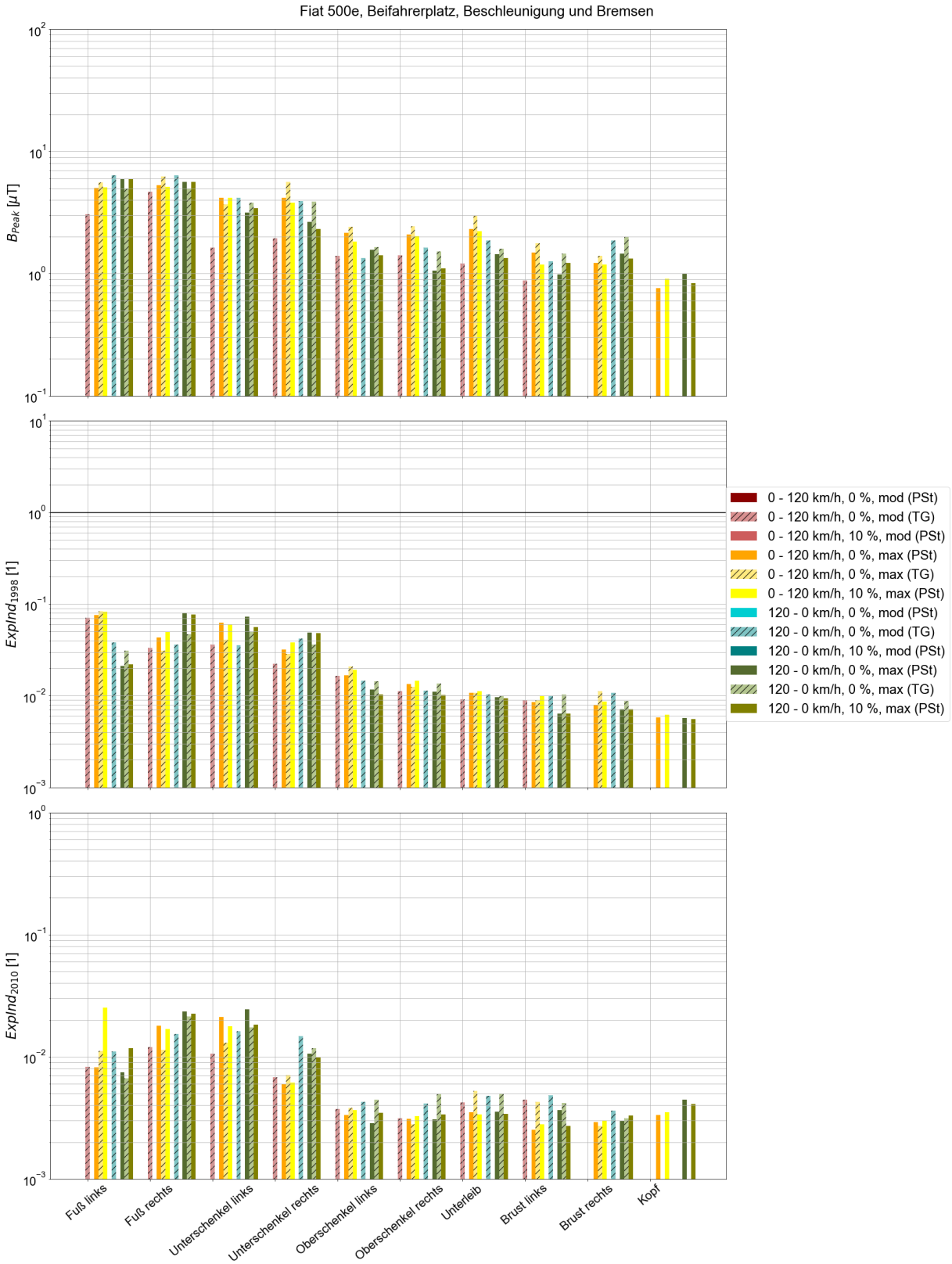


Abbildung 9.205: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

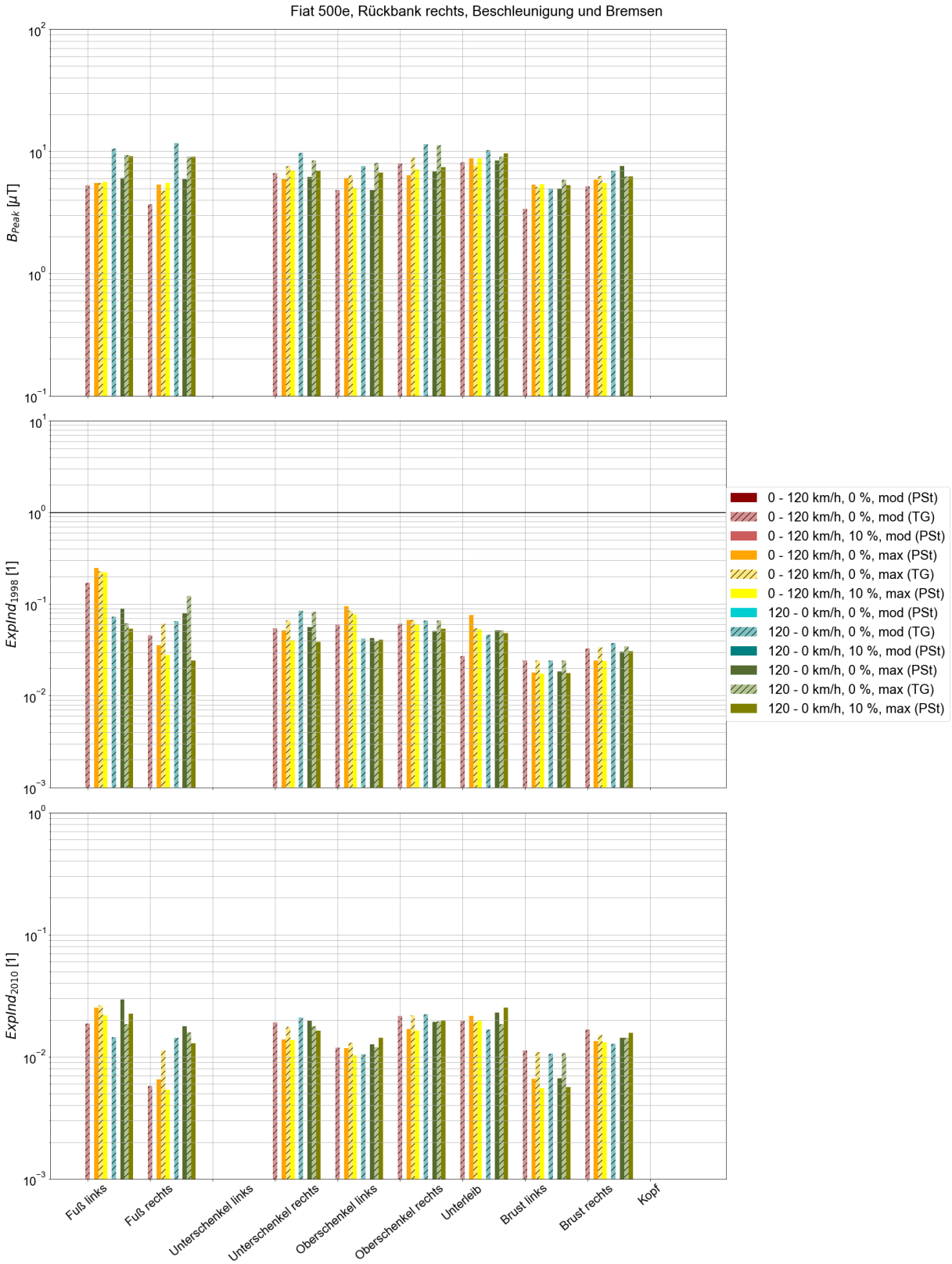


Abbildung 9.206: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand. Für den Kopfbereich und teilweise für den Bereich des linken Unterschenkels liegen aufgrund eines während der Messungen aufgetretenen Defekts an den entsprechenden Messkanälen keine Daten vor.

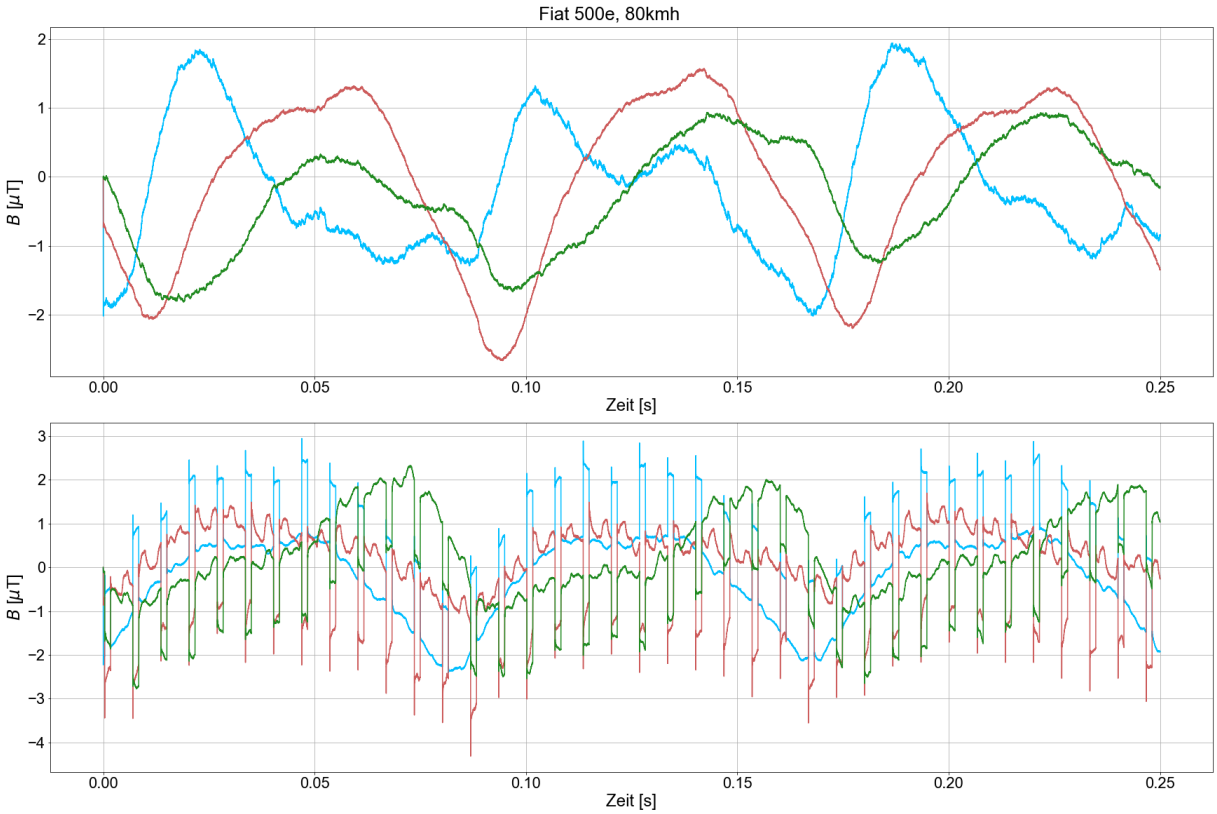


Abbildung 9.207: Vergleich von Zeitverläufen der magnetischen Flussdichte im rechten Fußbereich des Fahrerplatzes bei 80 km/h, gemessen am Prüfstand (oben, Messsonde am Fahrzeugboden unmittelbar vor dem Gaspedal) und am Testgelände (unten, Messsonde am Rist des rechten Fußes des Fahrers montiert).

Der stark oberwellenbehaftete Feldanteil im rechten Fußbereich des Fahrers blieb auch beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.204 bis Abbildung 9.206) dominant und führte daher auch unter diesen Bedingungen zum größten $ExpInd_{1998}$ (0.66), nur geringfügig größer als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit.

9.4.10.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.208 und Abbildung 9.210 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ auf der Rückbank (rechts) über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.209 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.211 und Abbildung 9.212 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.213 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

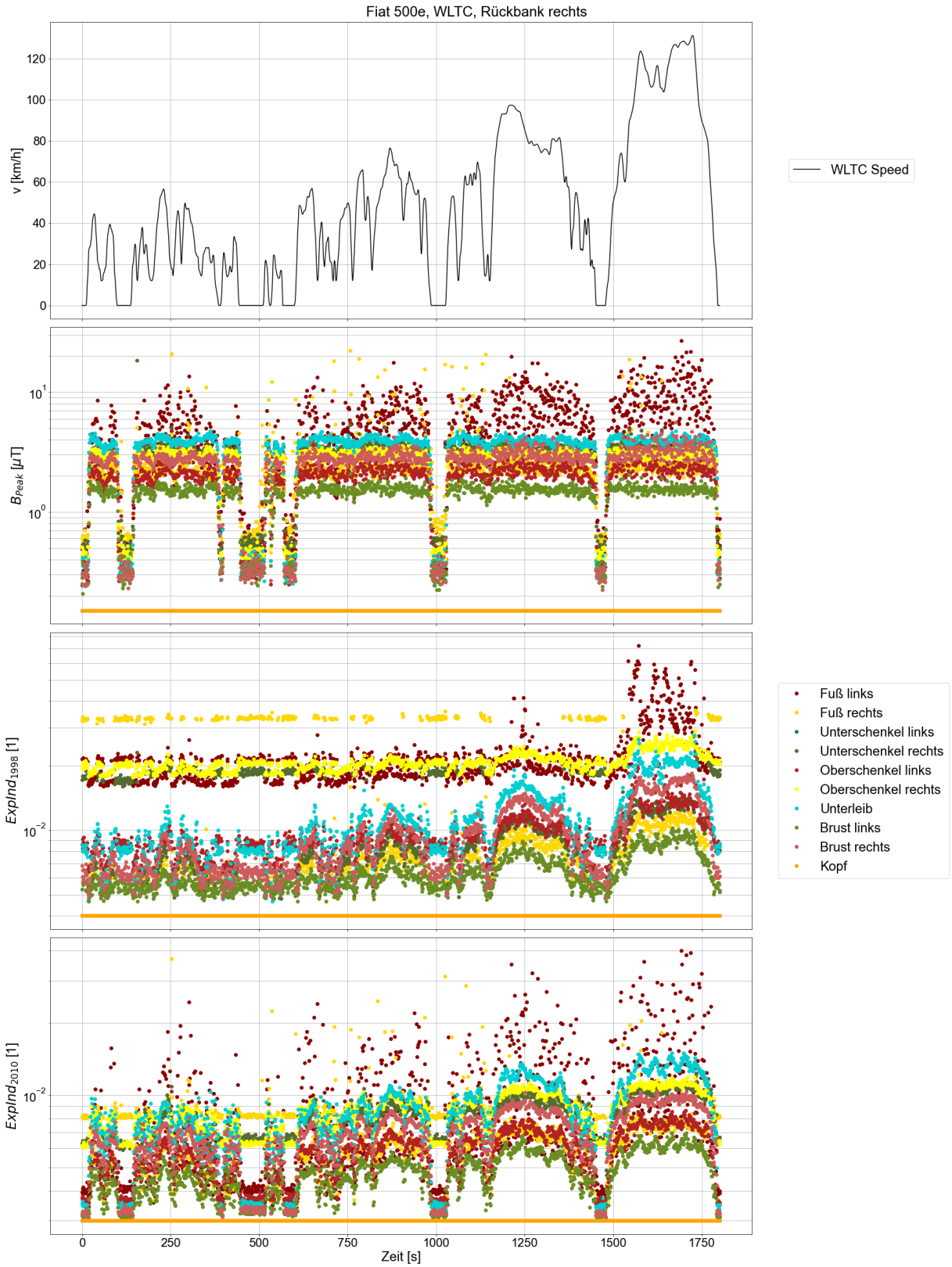


Abbildung 9.208: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechts Sitzplatz) während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

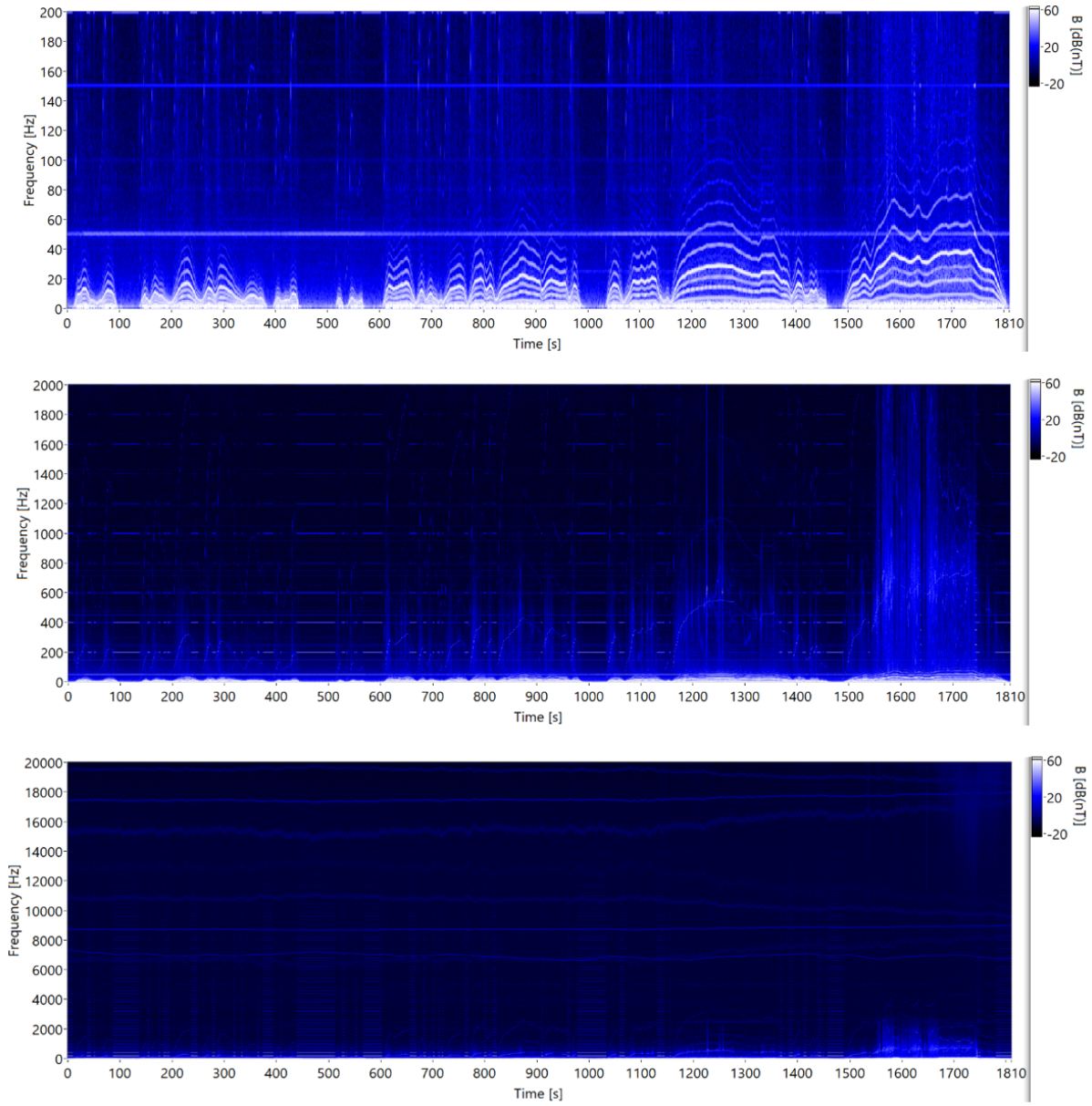


Abbildung 9.209: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Fiat 500e, am rechten Sitzplatz der Rückbank in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 - 200 Hz, Mitte: 0 - 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

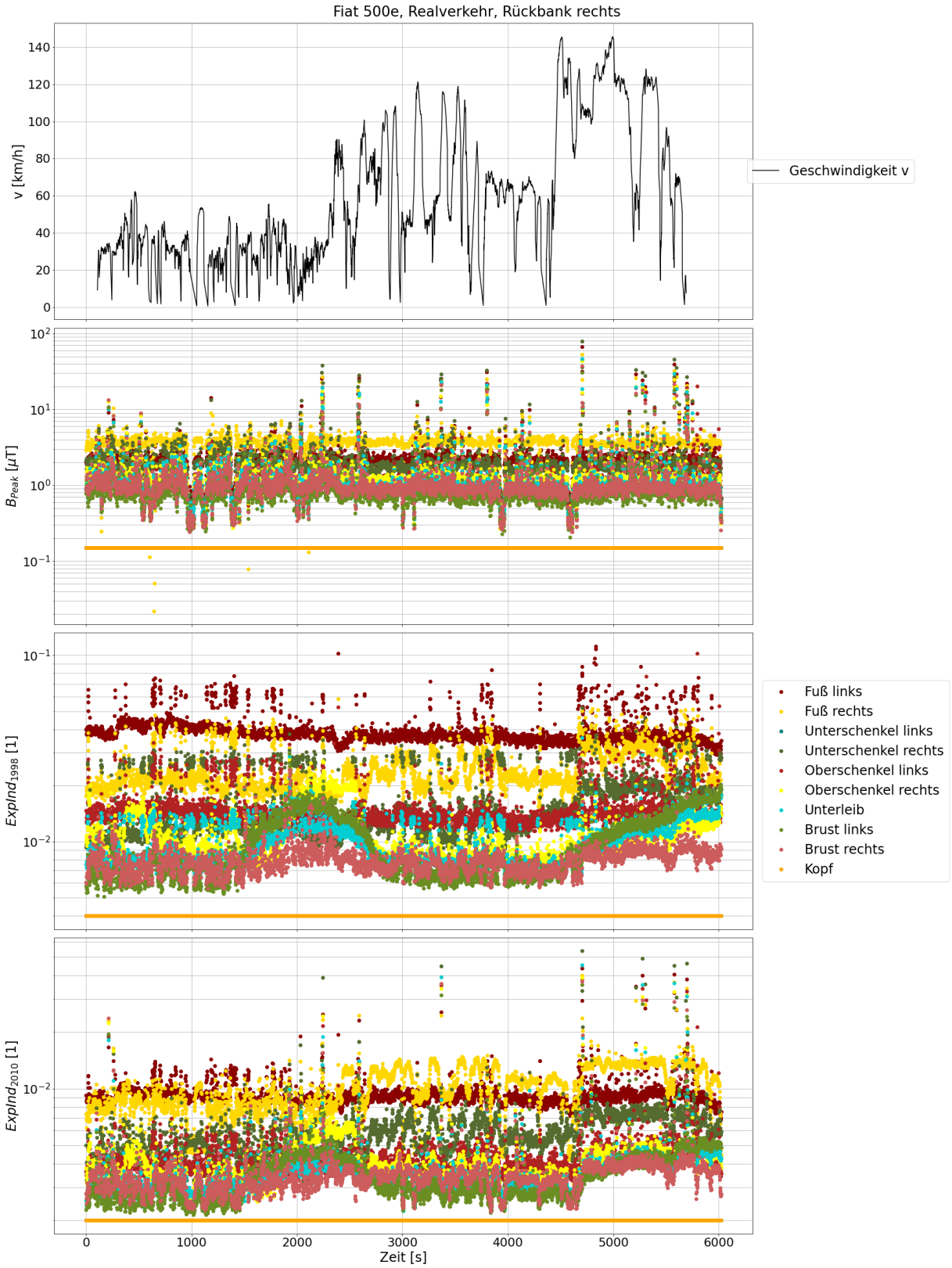


Abbildung 9.210: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechts Sitzplatz) während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

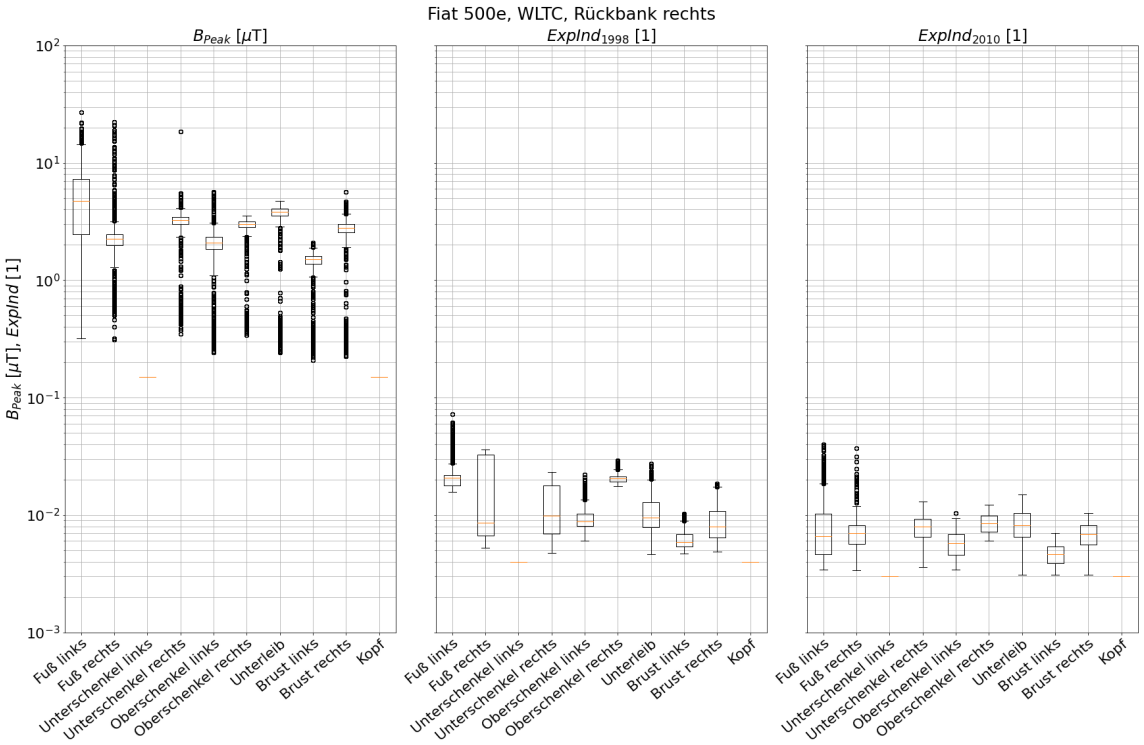


Abbildung 9.211: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

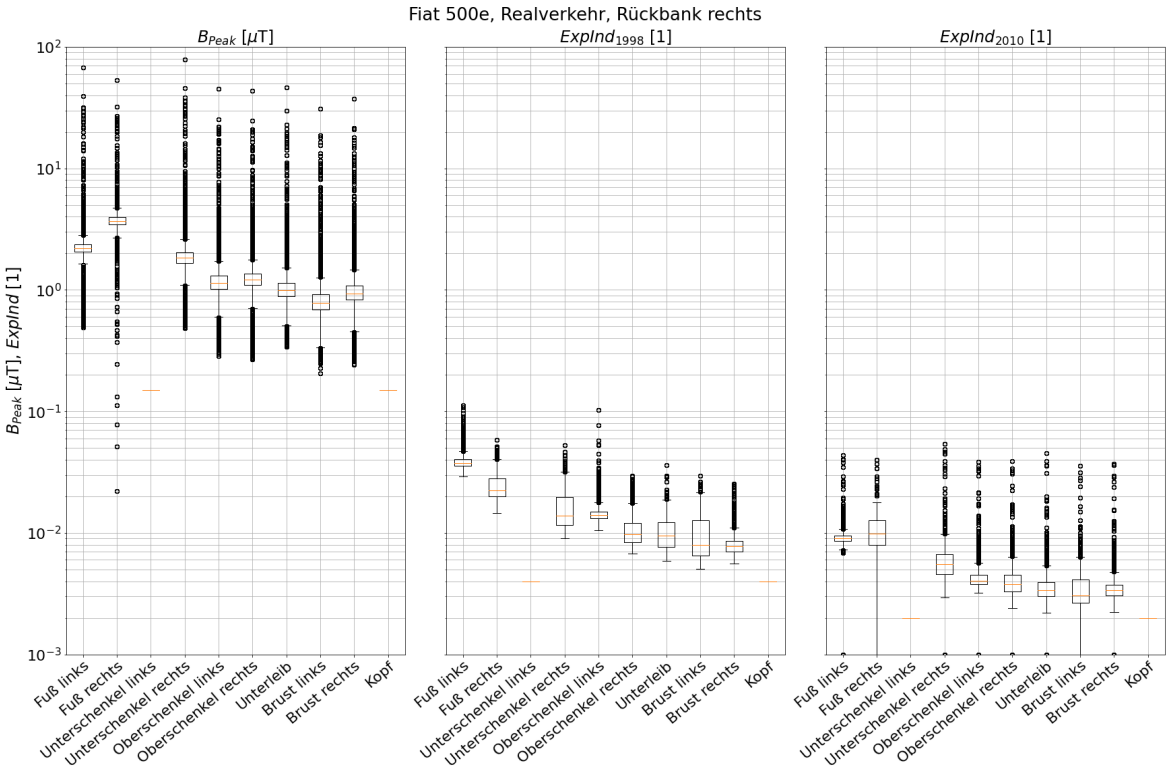


Abbildung 9.212: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

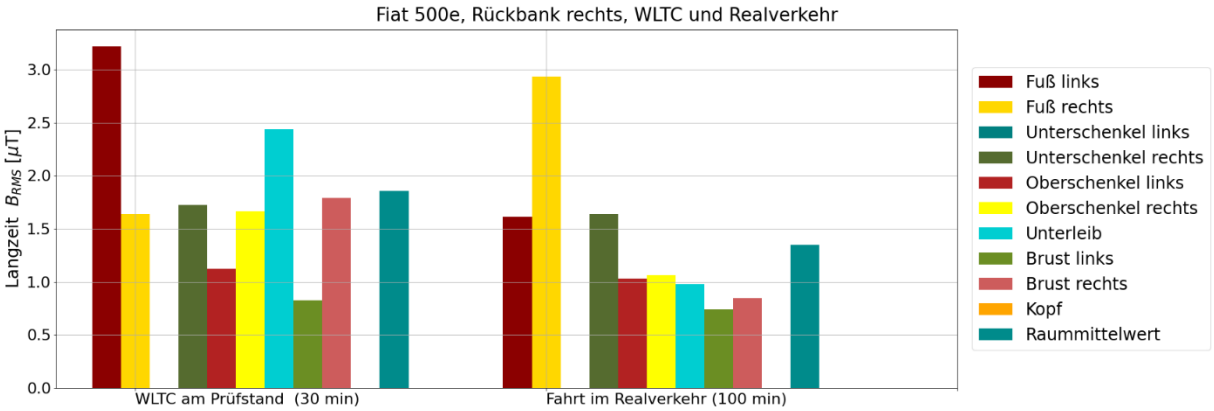


Abbildung 9.213: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr. Aufgrund der Tatsache, dass in den Raummittelwert keine Messdaten für den Kopfbereich enthalten sind, ist davon auszugehen, dass der im Diagramm gezeigte Raummittelwert die tatsächlichen Verhältnisse geringfügig überschätzt.

9.4.10.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs ($ExpInd_{1998}$ von bis zu 1.66 im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz) auf. Abbildung 9.214 zeigt den zugehörigen Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte.

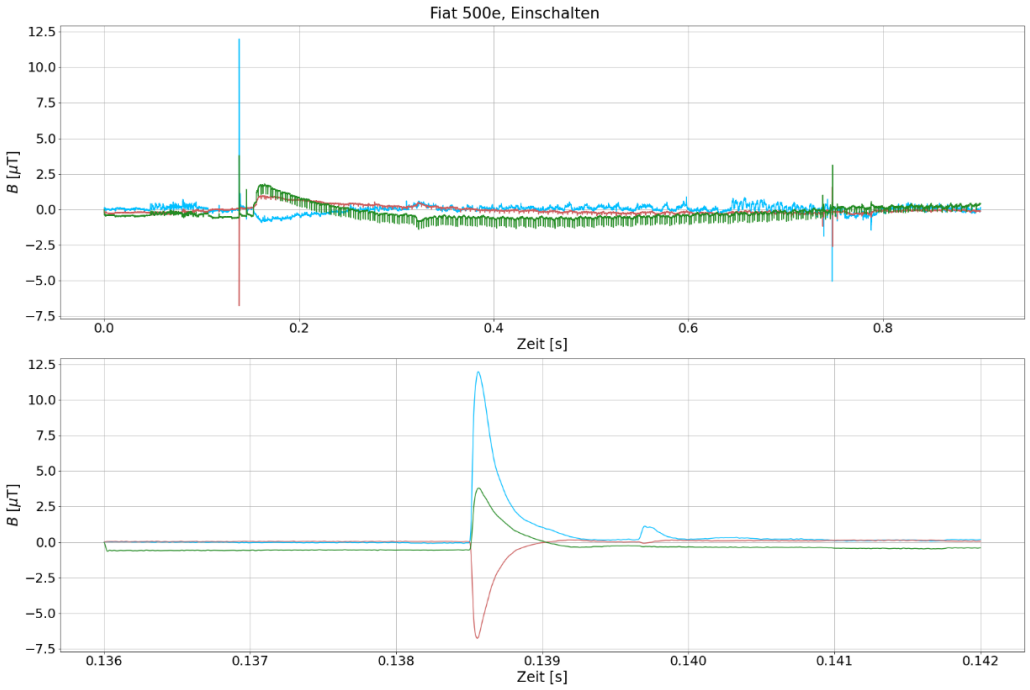


Abbildung 9.214: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes.

Abbildung 9.215 bis Abbildung 9.217 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen (nicht an jedem betrachteten Sitzplatz wurden die Immissionsbeiträge aller Quellen erfasst).

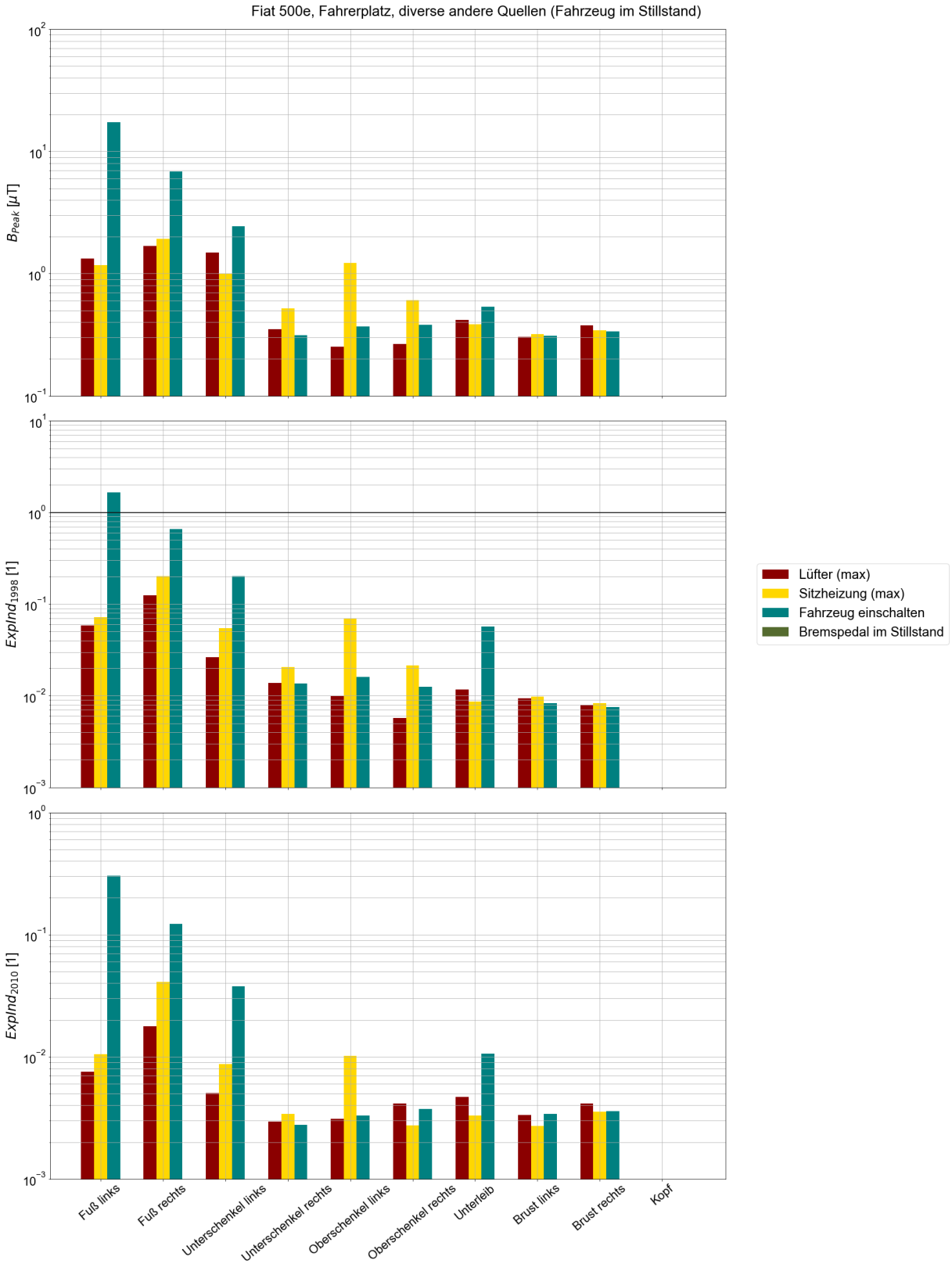


Abbildung 9.215: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bremspedal im Stillstand wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

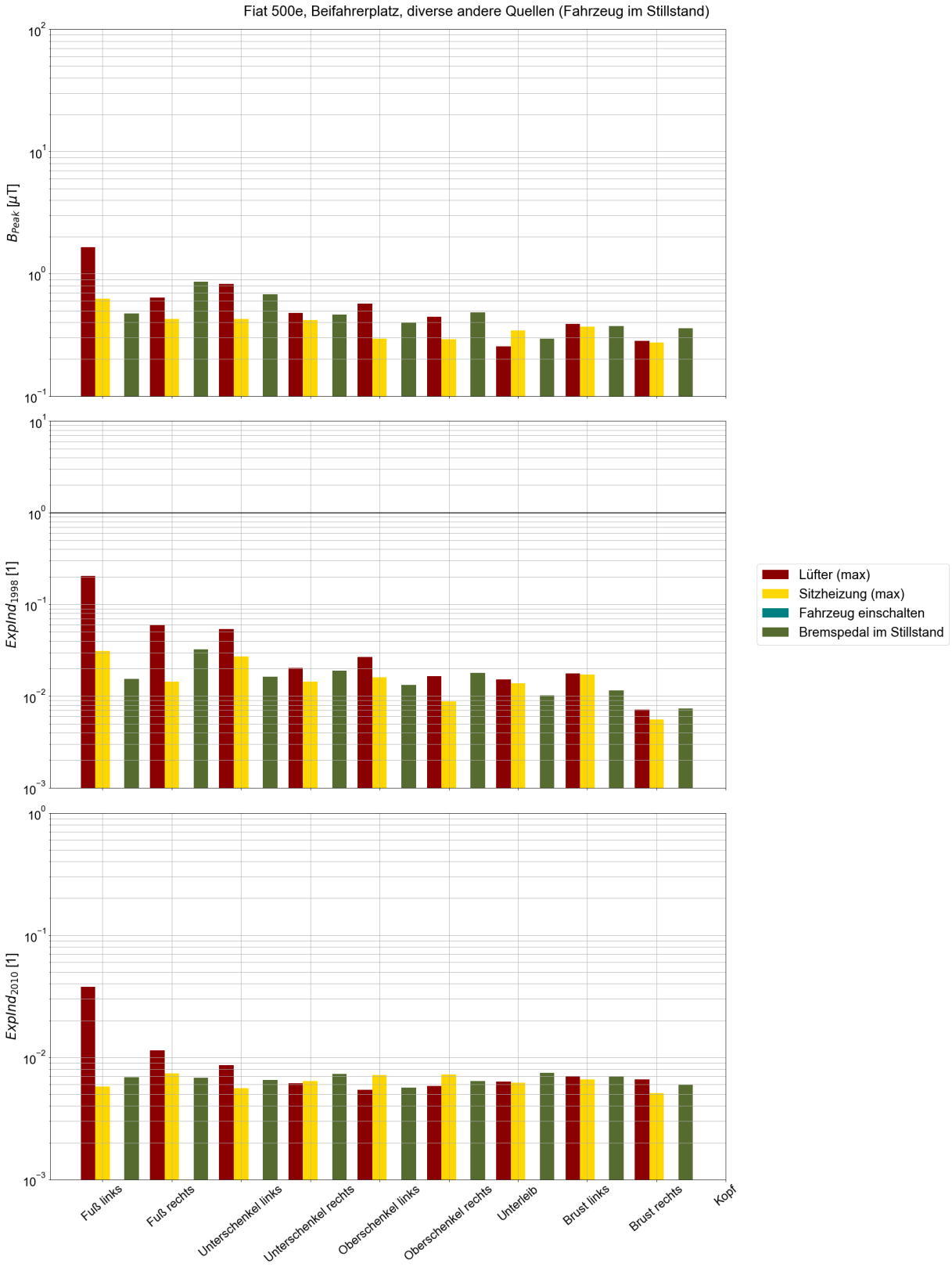


Abbildung 9.216: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Fahrzeug einschalten wurde an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

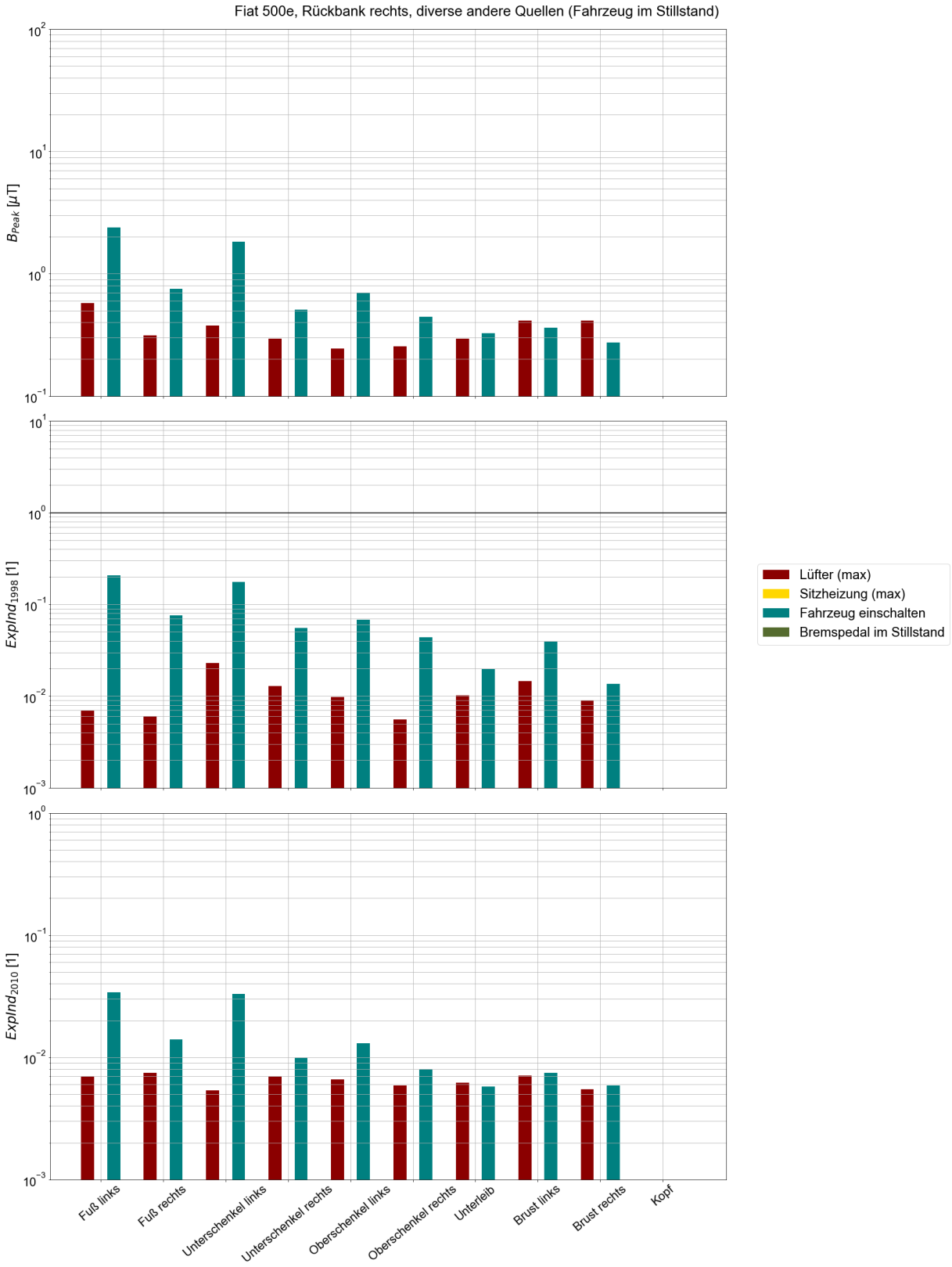


Abbildung 9.217: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Die Sitzheizung und Bremspedal im Stillstand wurden an diesem Sitzplatz nicht gemessen.

9.4.11 Opel Corsa Electric



Abbildung 9.218: Ein Exemplar des untersuchten Fahrzeugmodells Opel Corsa Electric (https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/marken-modelle/opel/opel-corsa-electric/).

9.4.11.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Opel Corsa Electric

Baujahr: 2021

Motorleistung: 100 kW

Batteriekapazität: 50 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.218 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.219).

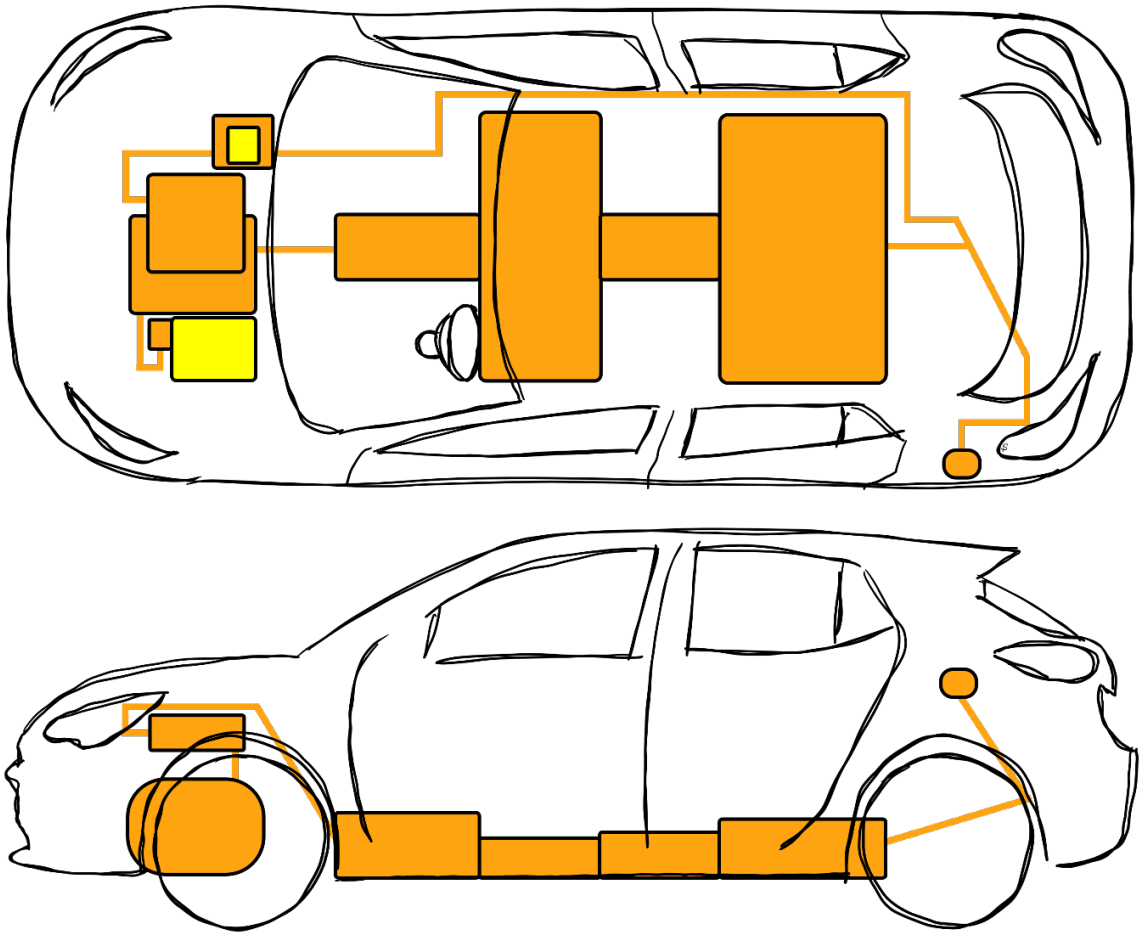


Abbildung 9.219: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Opel Corsa Electric (modifiziert nach https://www.ifz-berlin.de/ret_deu_pdf/deu_ov_corsa_e_f_5.pdf).

9.4.11.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.220 bis Abbildung 9.225 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.220 bis Abbildung 9.222) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im linken Fußbereich des Fahrers im Ausmaß von ca. 0.15 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei in diesem Raumbereich ein Anteil von weniger als ca. 0.01 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. In allen anderen untersuchten Positionen blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit unterhalb von ca. 0.08 (linker Fuß am Beifahrerplatz) bzw. unterhalb von 0.02 (Rückbank)[34].

[34] Für den Kopfbereich liegen aufgrund eines während der Messungen aufgetretenen Defekts am entsprechenden Messkanal keine Daten vor.

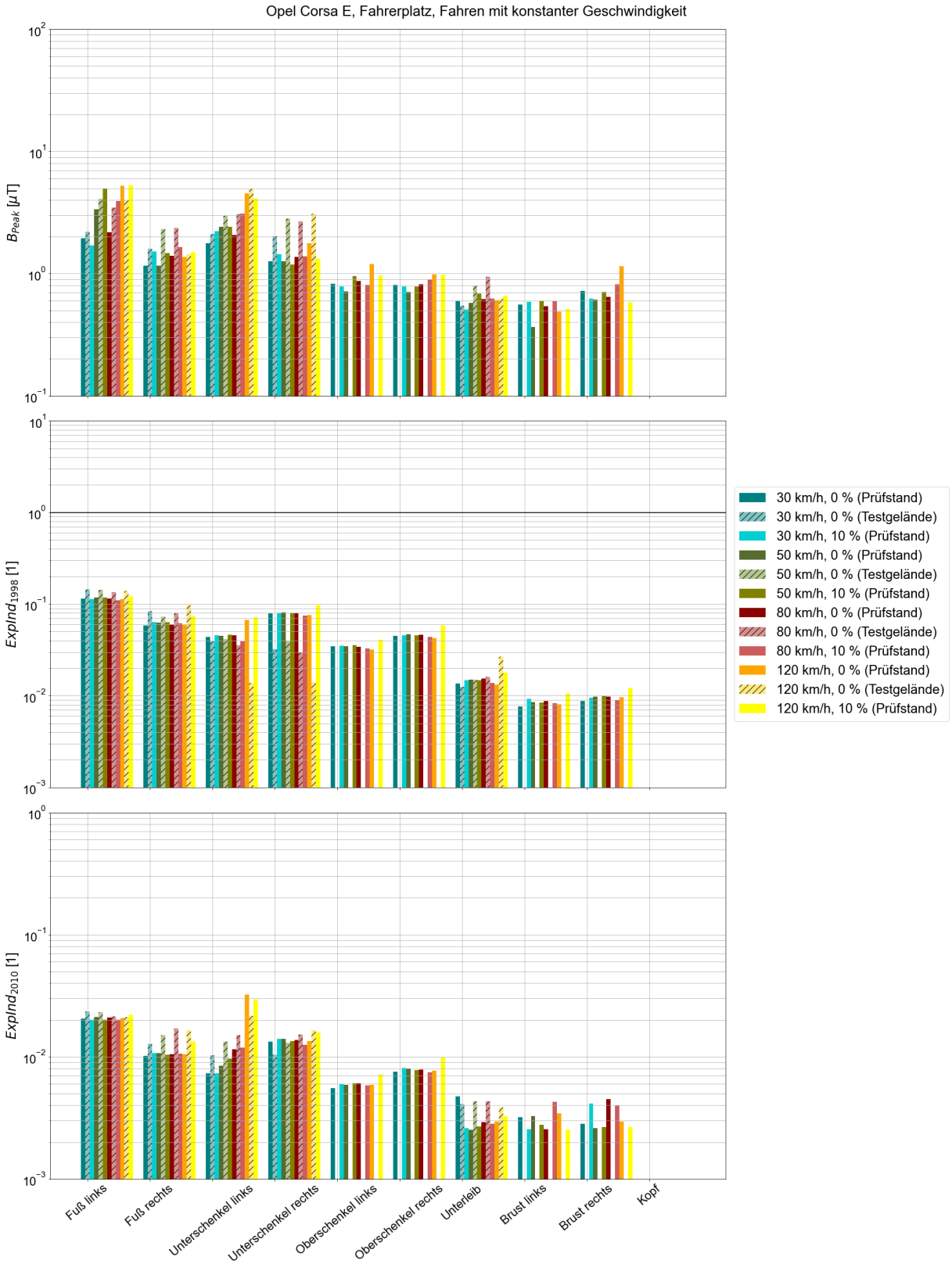


Abbildung 9.220: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

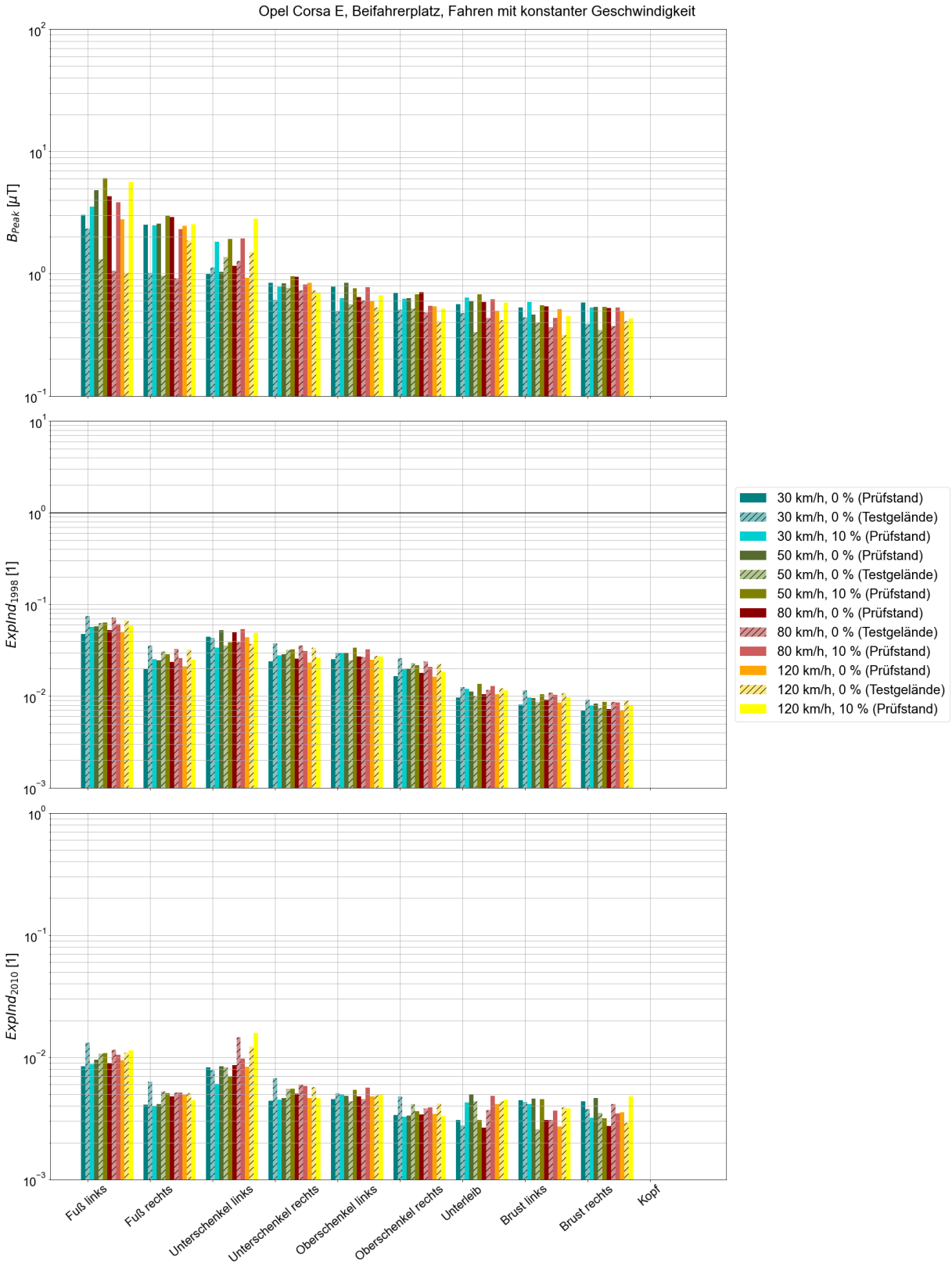


Abbildung 9.221: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

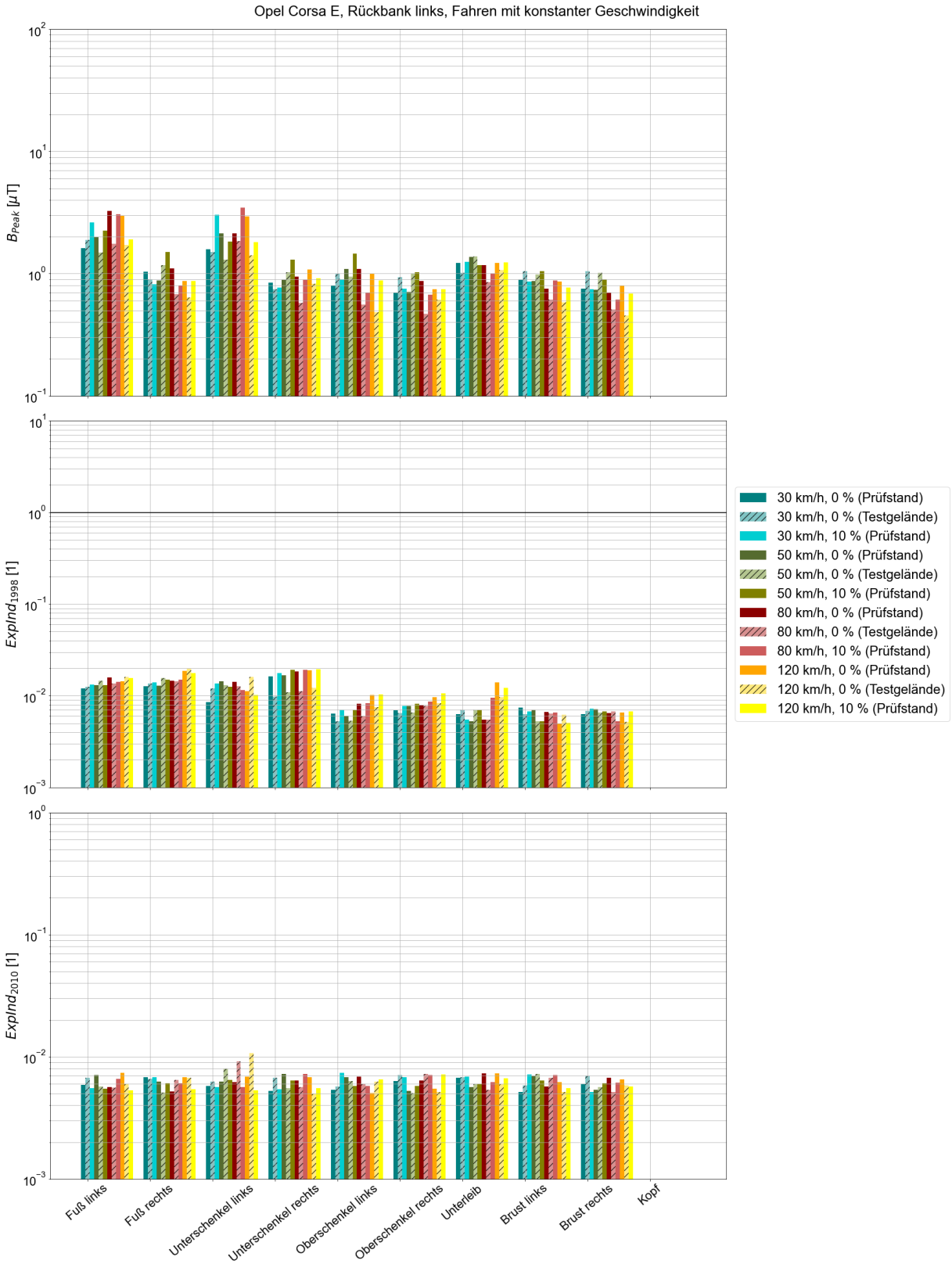


Abbildung 9.222: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

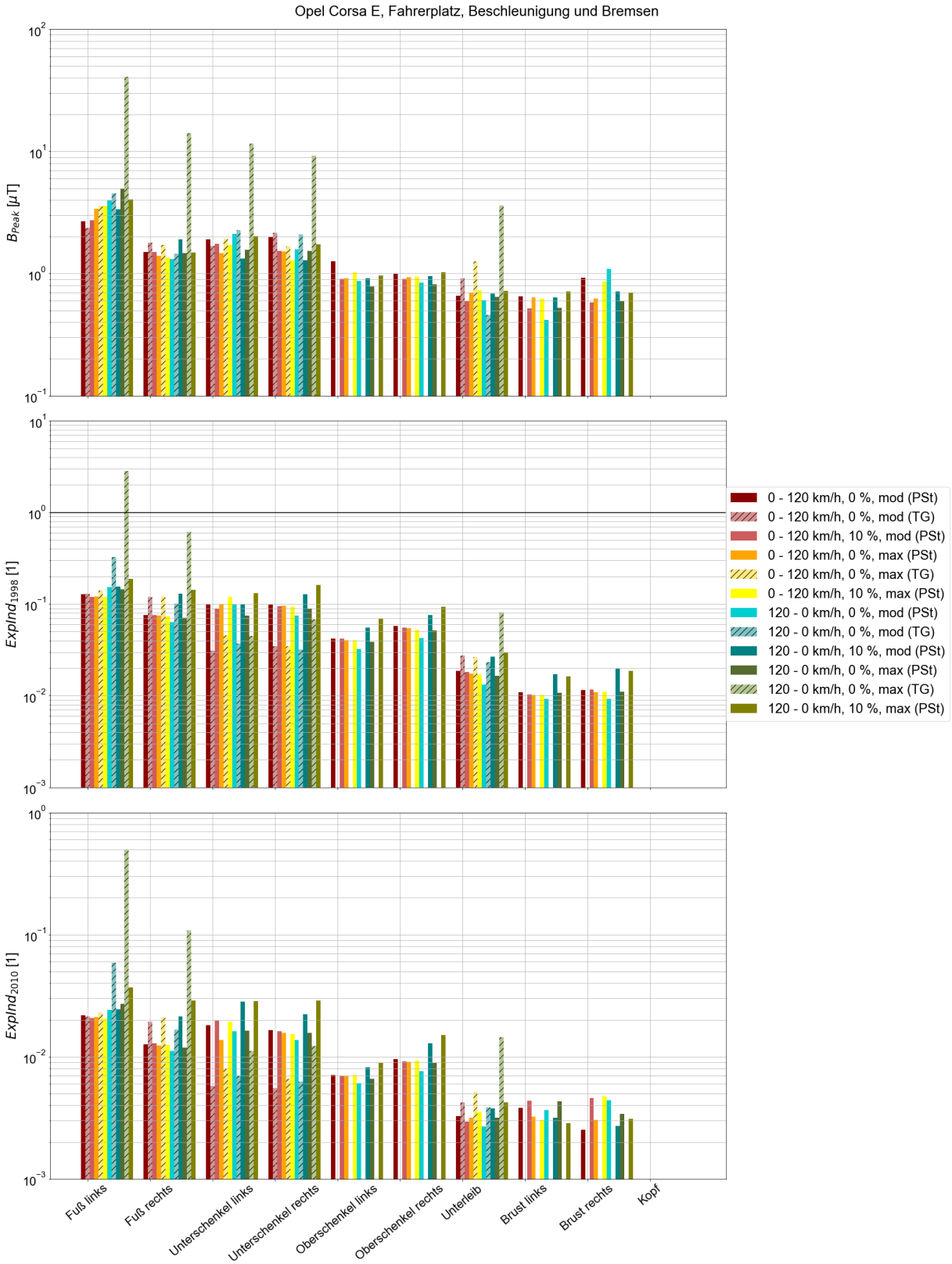


Abbildung 9.223: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

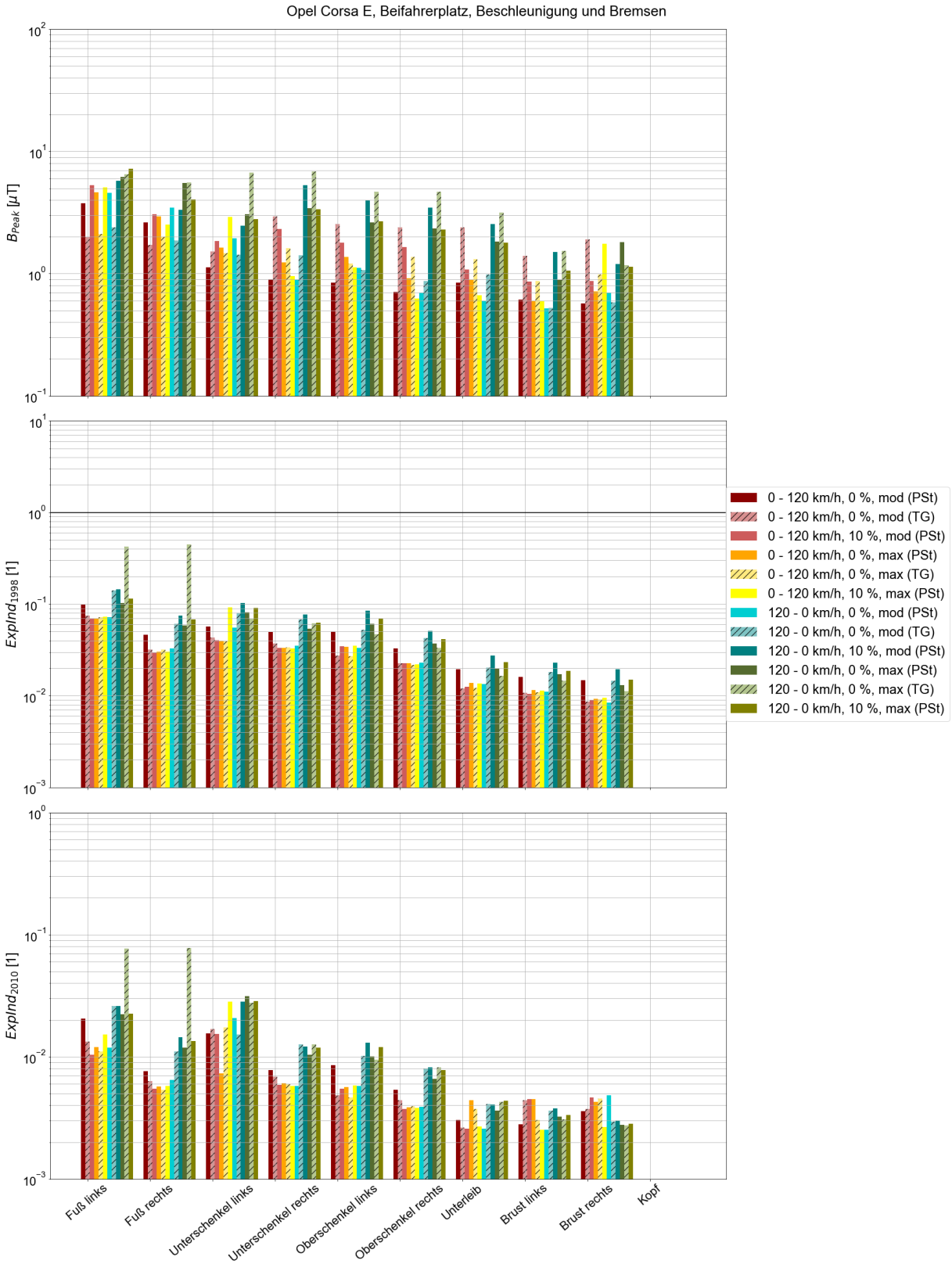


Abbildung 9.224: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

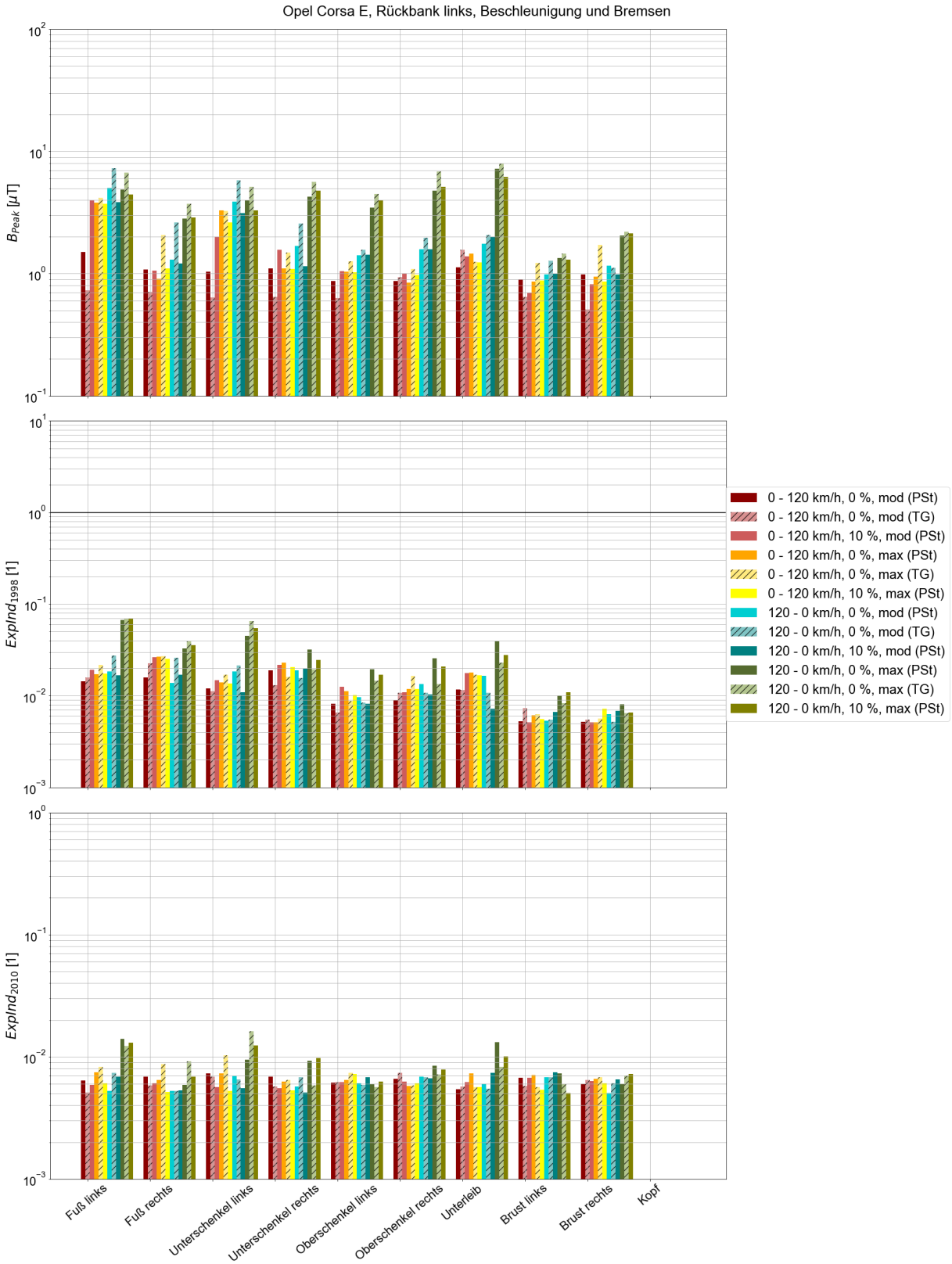


Abbildung 9.225: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ ebenfalls im linken Fußbereich des Fahrers. Bei starkem Bremsen betrugen die $ExpInd_{1998}$ in dieser Position bis zu ca. 2.8, verursacht durch einen transienten Vorgang in Zusammenhang mit der Einleitung des Bremsmanövers bzw. dem Betätigen des Bremspedals (Abbildung 9.226). Dieser hohe $ExpInd_{1998}$ (und der verursachende transiente Vorgang) wurde jedoch nur bei starkem Bremsen auf dem Testgelände gefunden.

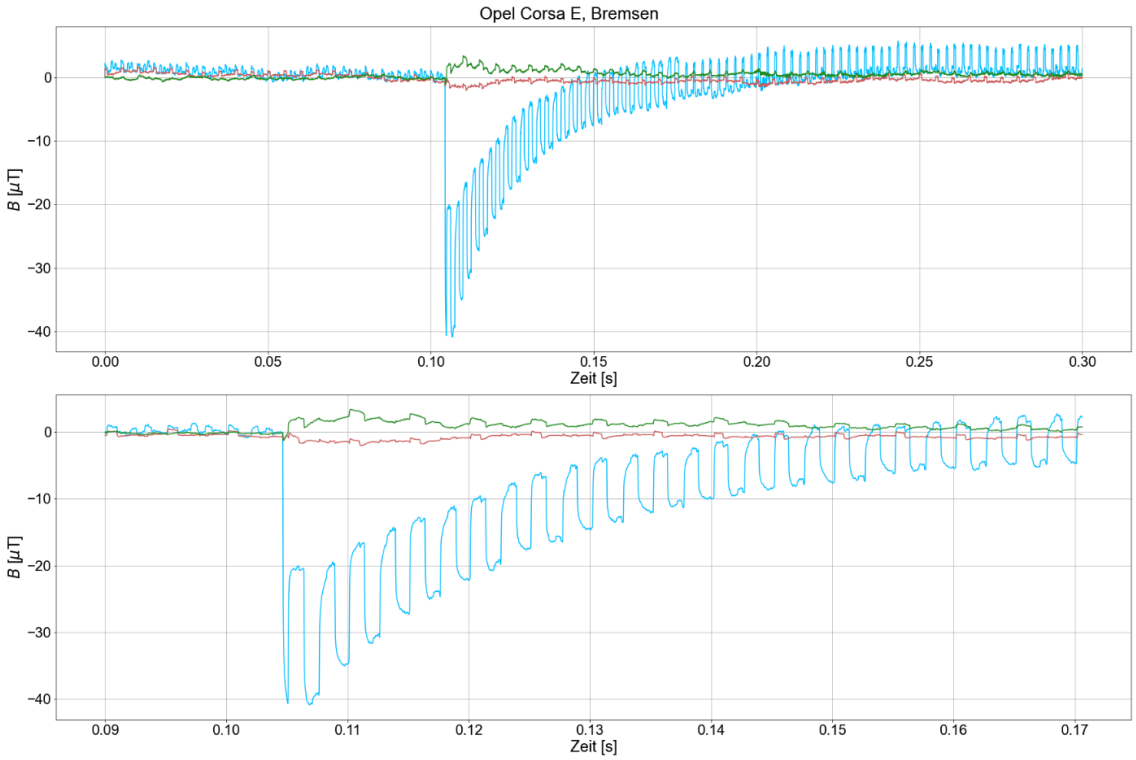


Abbildung 9.226: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte am Beginn eines starken Bremsmanövers (Betätigen des Bremspedals), gemessen am Testgelände im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz.

9.4.11.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.227 und Abbildung 9.229 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer[35].

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.228 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.230 und Abbildung 9.231 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.232 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

[35] Für den Kopfbereich und für den Bereich des linken Unterschenkels liegen aufgrund eines während der Messungen aufgetretenen Defekts an den entsprechenden Messkanälen keine Daten vor.

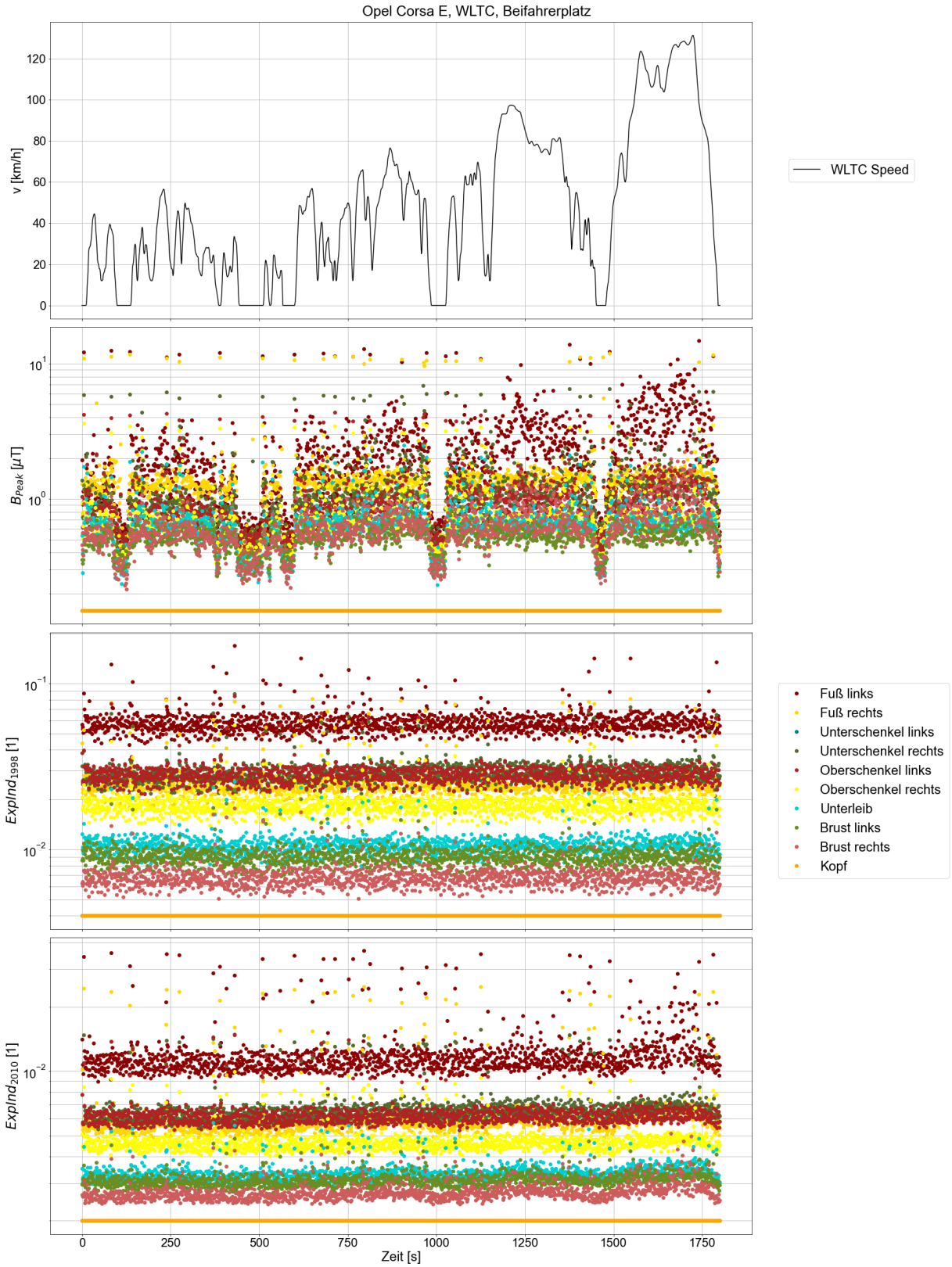


Abbildung 9.227: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

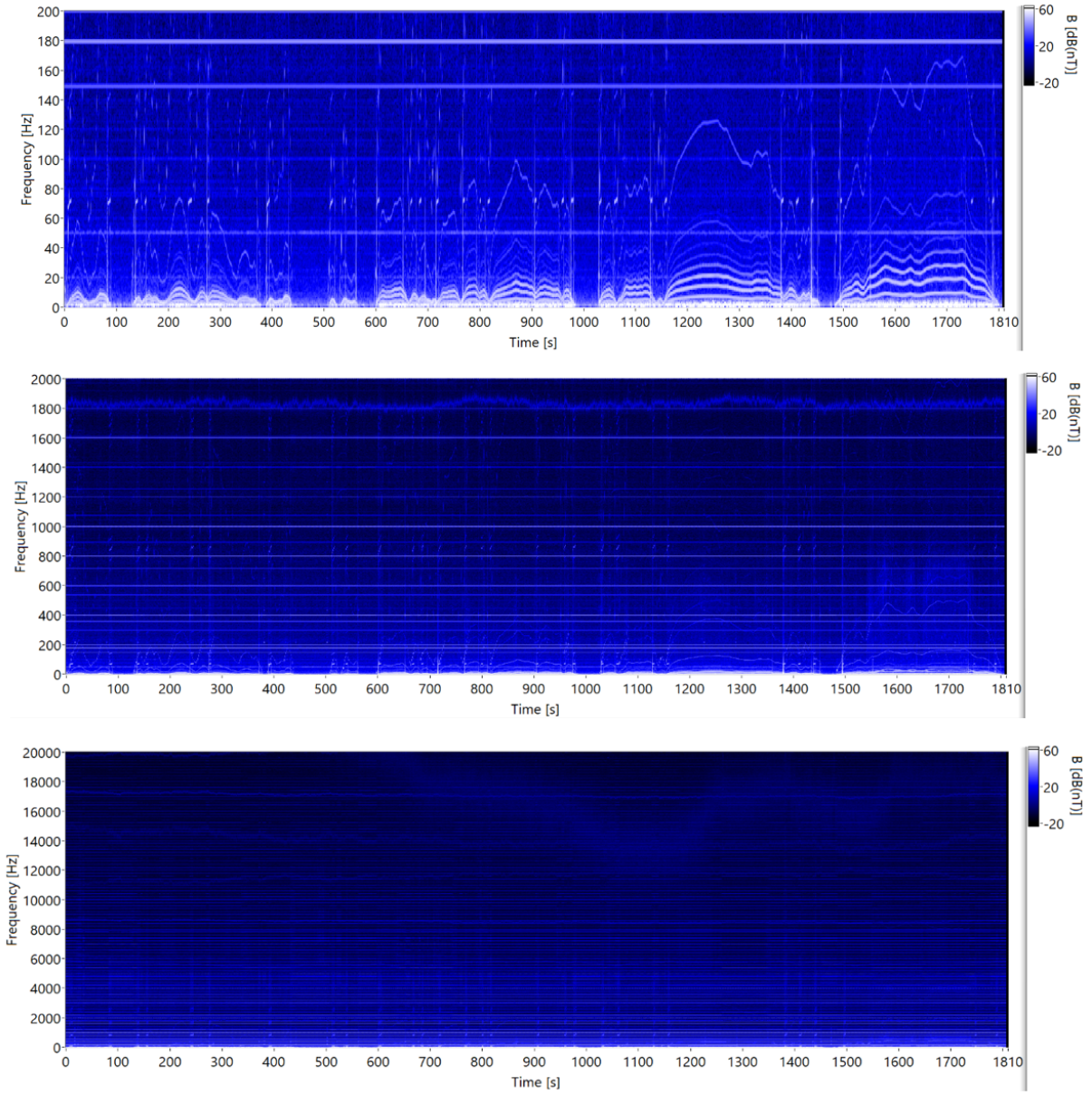


Abbildung 9.228: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Opel Corsa E, am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 – 200 Hz, Mitte: 0 – 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

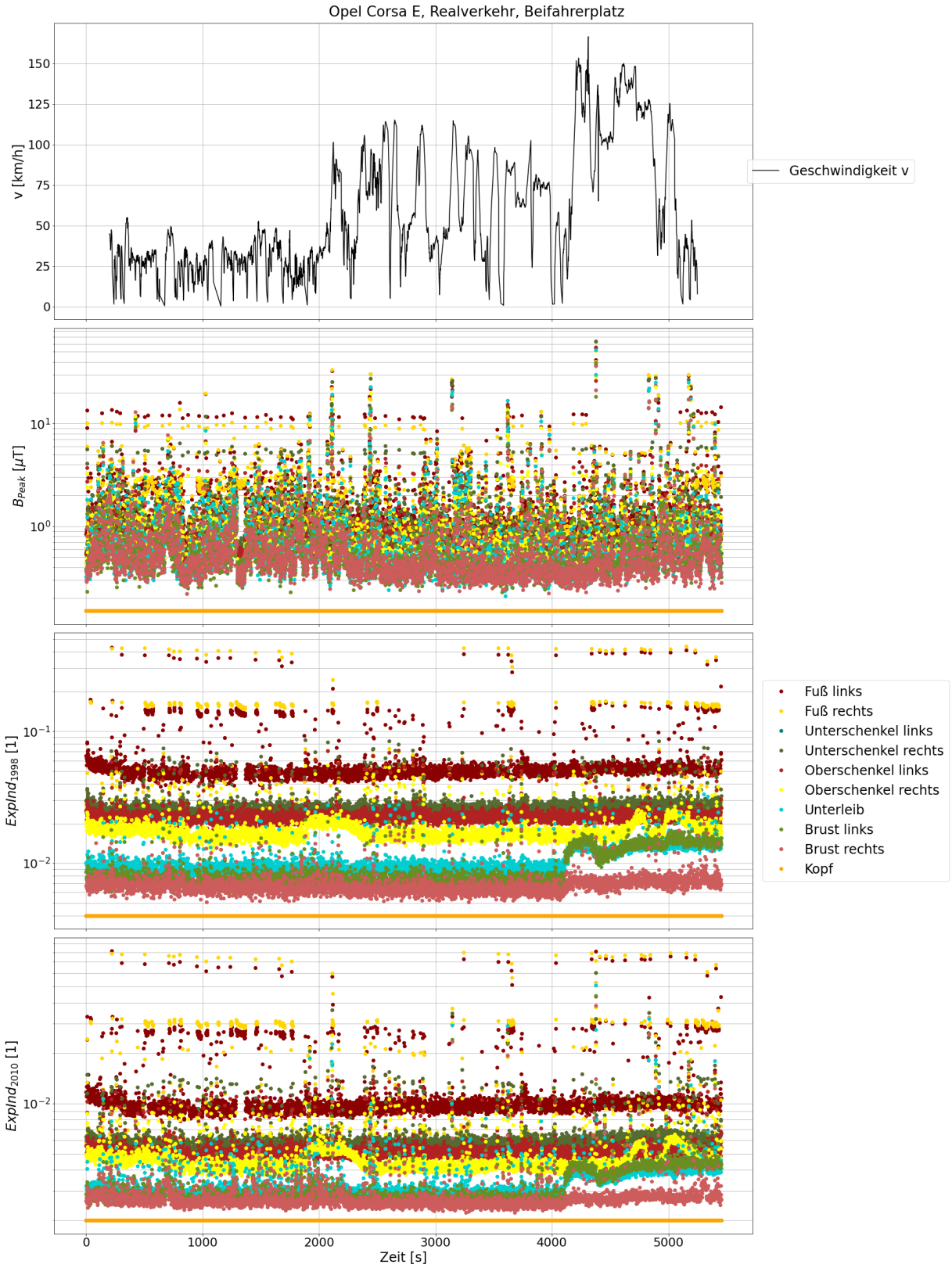


Abbildung 9.229: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

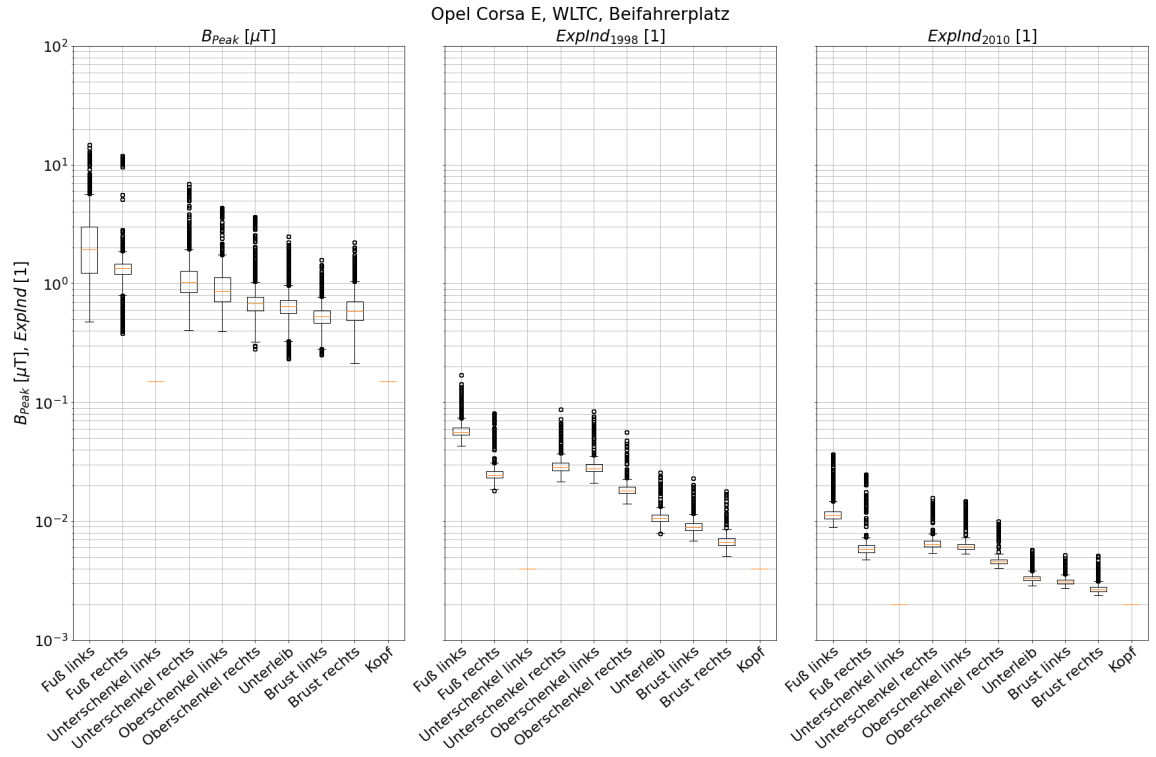


Abbildung 9.230: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

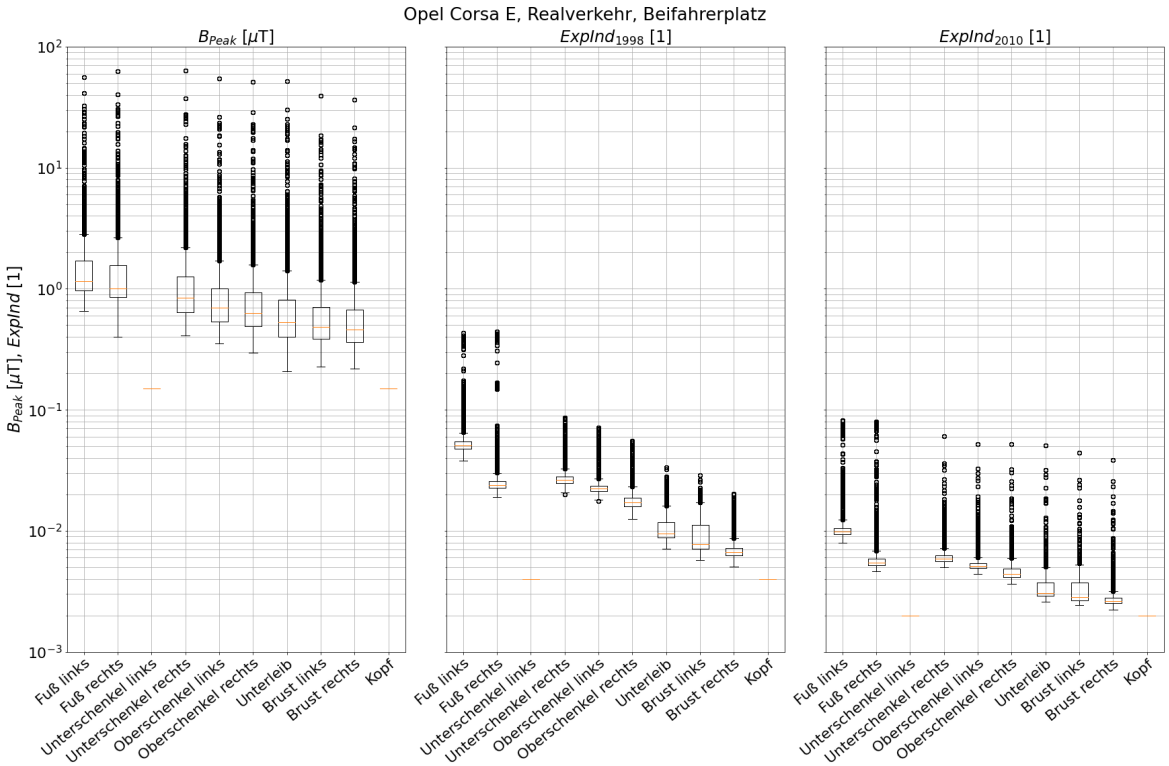


Abbildung 9.231: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

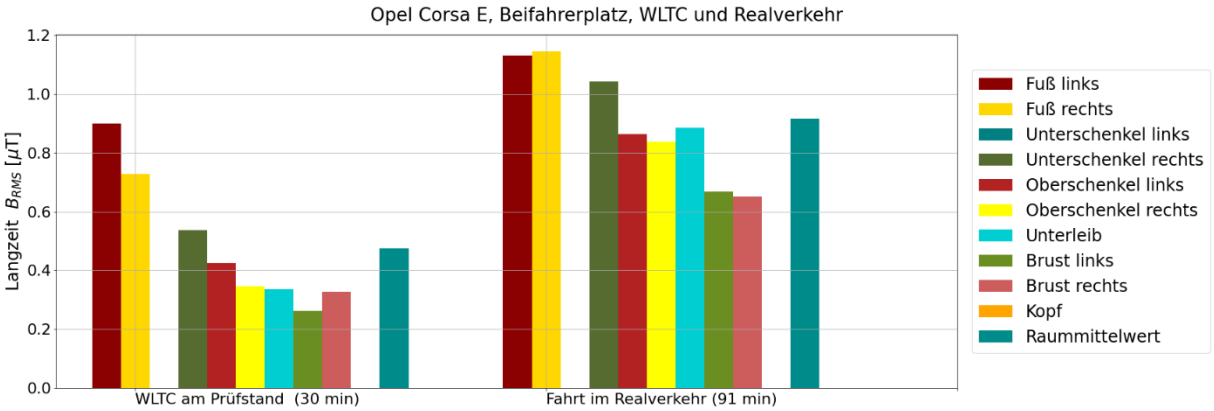


Abbildung 9.232: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr. Aufgrund der Tatsache, dass in den Raummittelwert keine Messdaten für den Kopfbereich enthalten sind, ist davon auszugehen, dass der im Diagramm gezeigte Raummittelwert die tatsächlichen Verhältnisse geringfügig überschätzt.

9.4.11.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 4.3 im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz) und beim Betätigen des Bremspedals im Stillstand ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 0.82 im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz) auf.

Abbildung 9.233 bis Abbildung 9.235 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

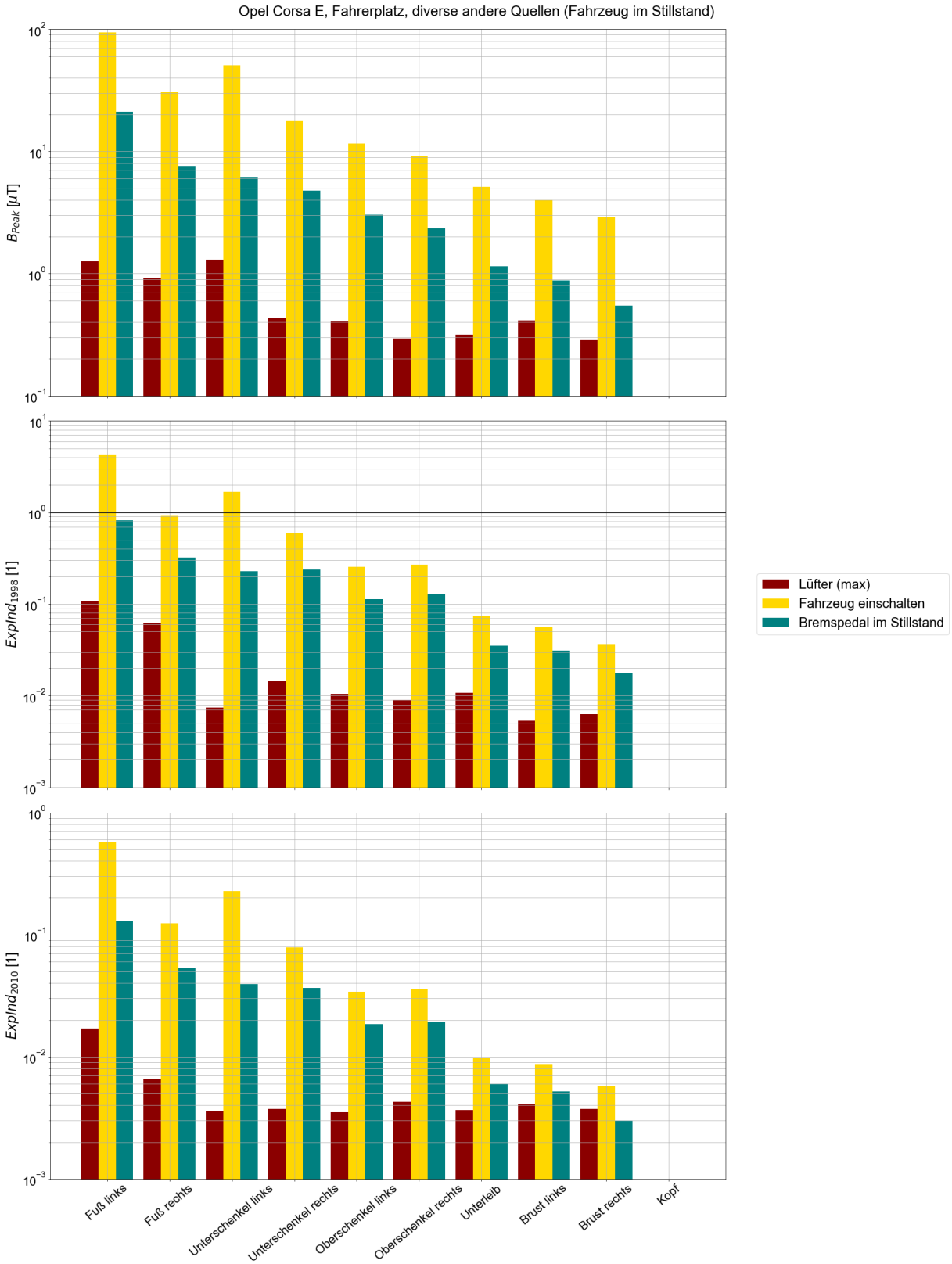


Abbildung 9.233: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

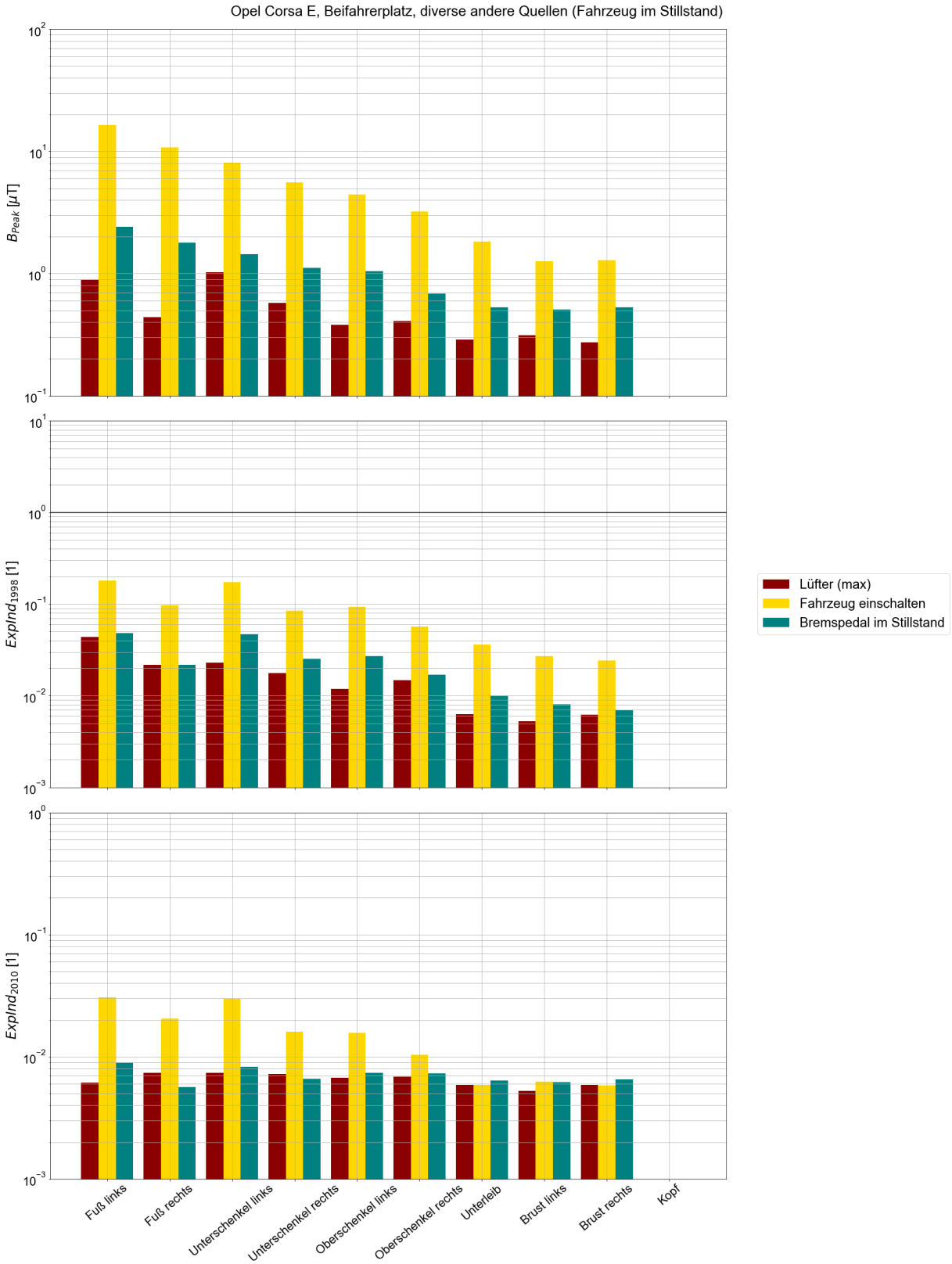


Abbildung 9.234: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

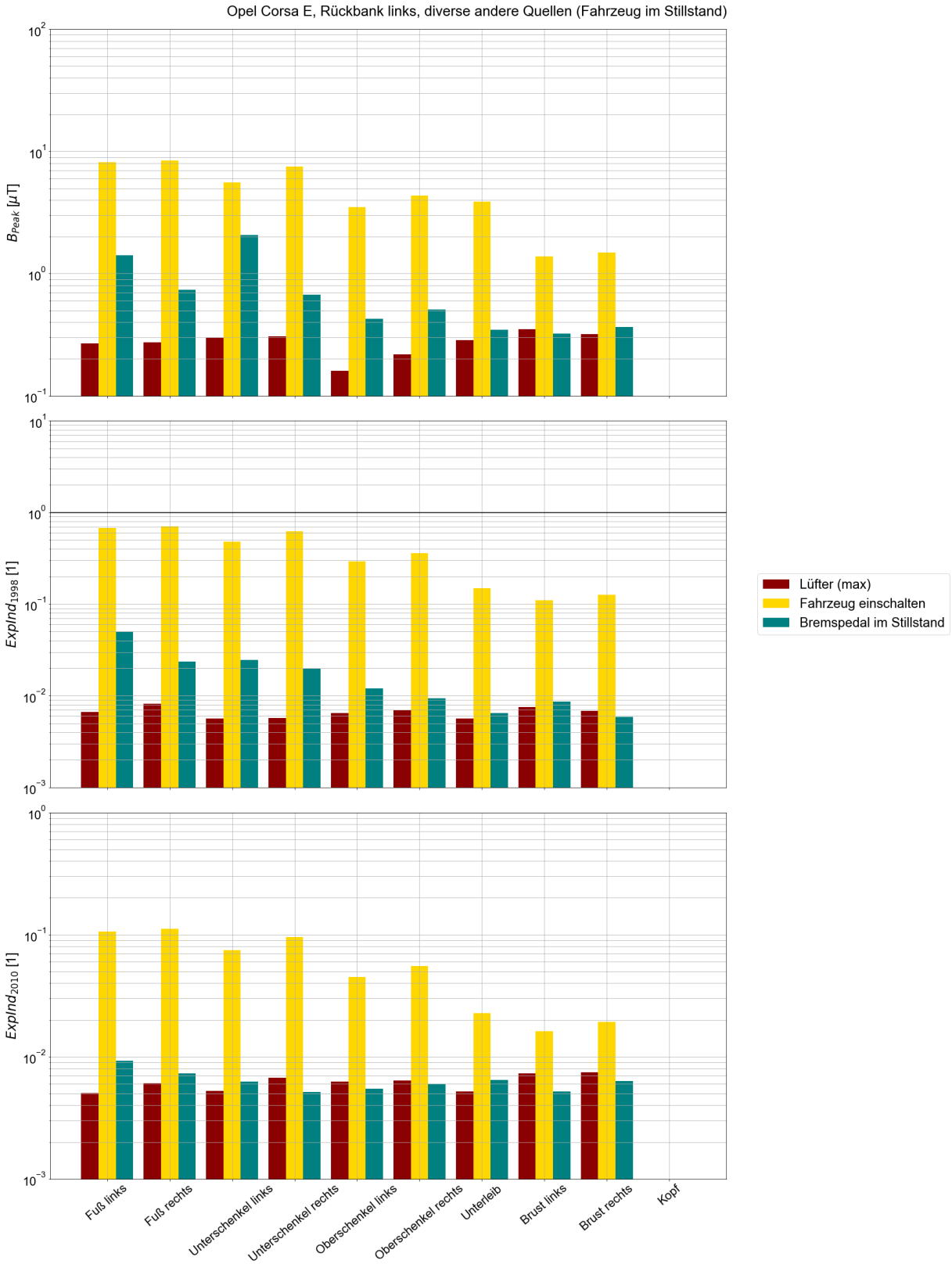


Abbildung 9.235: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

9.4.12 Volkswagen Passat PHEV



Abbildung 9.236: Untersuchter Volkswagen Passat PHEV auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.12.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: VW Passat PHEV

Baujahr: 2021

Motorleistung: 160 kW (Elektro: 85 kW, Verbrenner: 115 kW)

Batteriekapazität: 10.4 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.236 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.237).

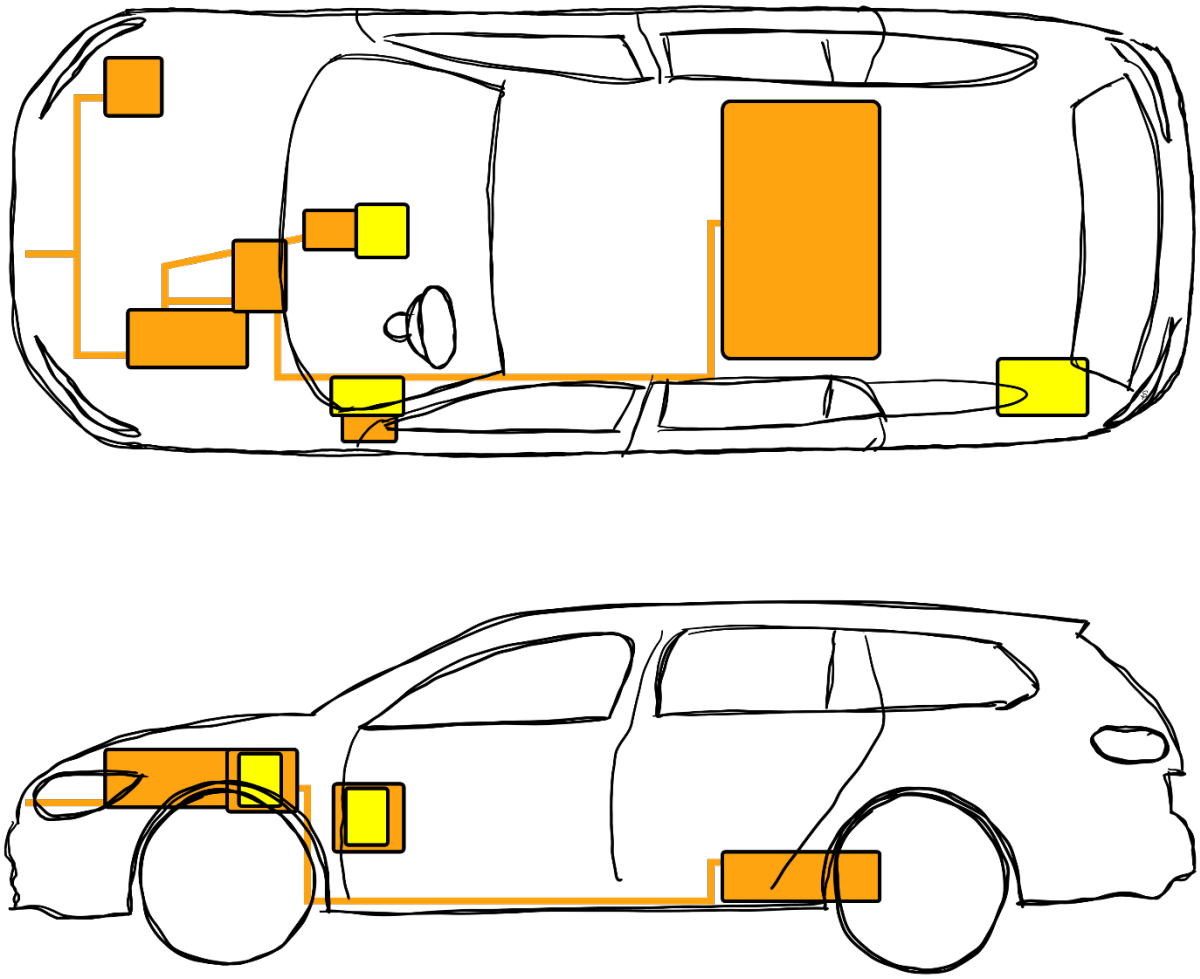


Abbildung 9.237: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im VW Passat PHEV (modifiziert nach https://rettungskarten-service.de/wp-content/uploads/volkswagen_passat_gte_stationwagon_2019_4d_hybrid-gasoline_de-3.pdf).

9.4.12.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.238 bis Abbildung 9.243 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken)[36].

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.238 bis Abbildung 9.240) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ in den Fußbereichen von Fahrer und Beifahrer im Ausmaß von bis zu ca. 0.25-0.30, bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei dort ein Anteil von ca. 0.01-0.02 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. Außerhalb der Fußbereiche (von Unterschenkeln aufwärts) blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in der vorderen Sitzreihe kleiner als 0.08. Auf der Rückbank zeigten sich $ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 0.12.

[36] Am Fahrerplatz erfolgten in diesem Fahrzeug keine Messungen am Testgelände.

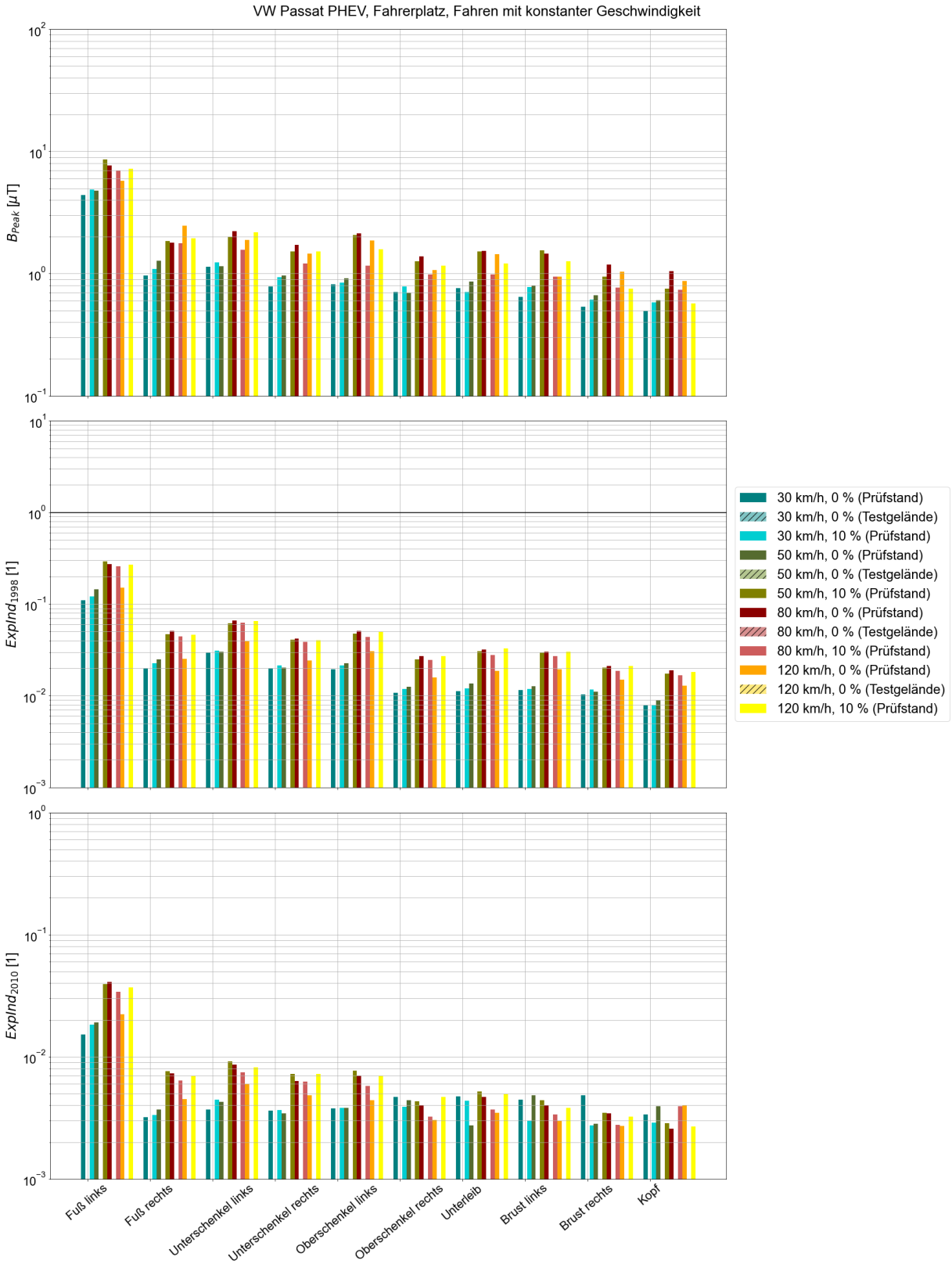


Abbildung 9.238: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Am Fahrerplatz erfolgten in diesem Fahrzeug keine Messungen am Testgelände.

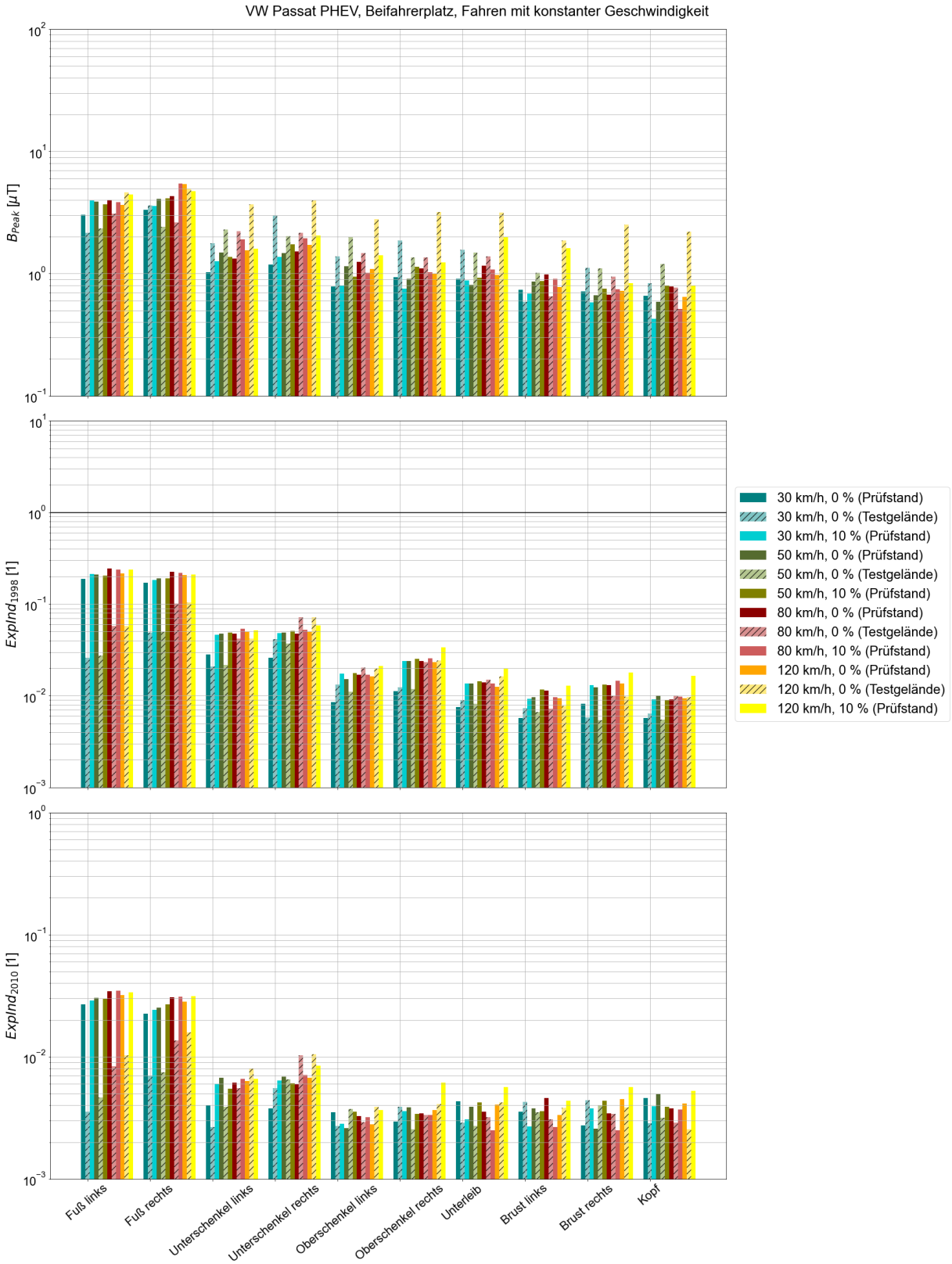


Abbildung 9.239: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

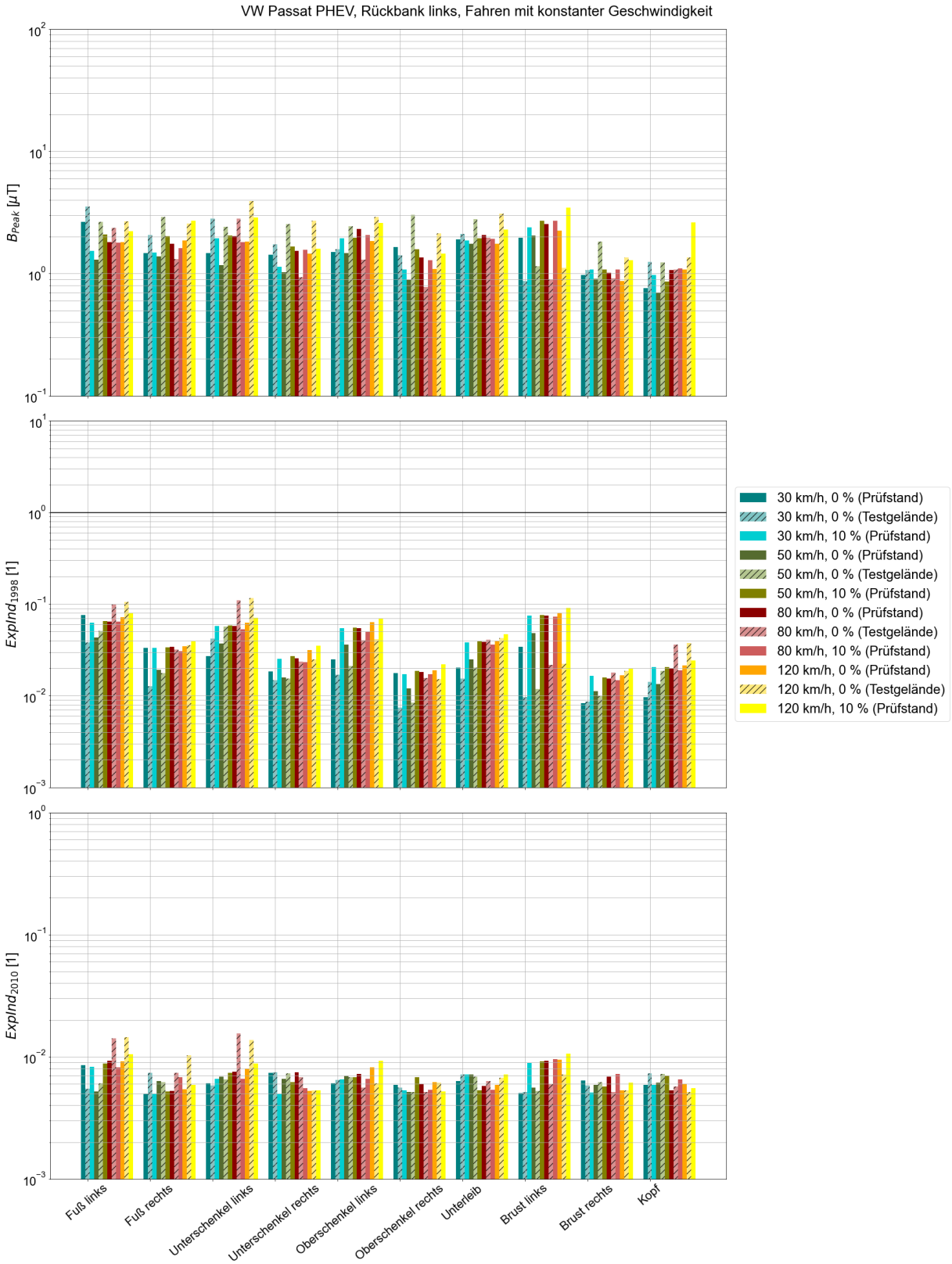


Abbildung 9.240: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

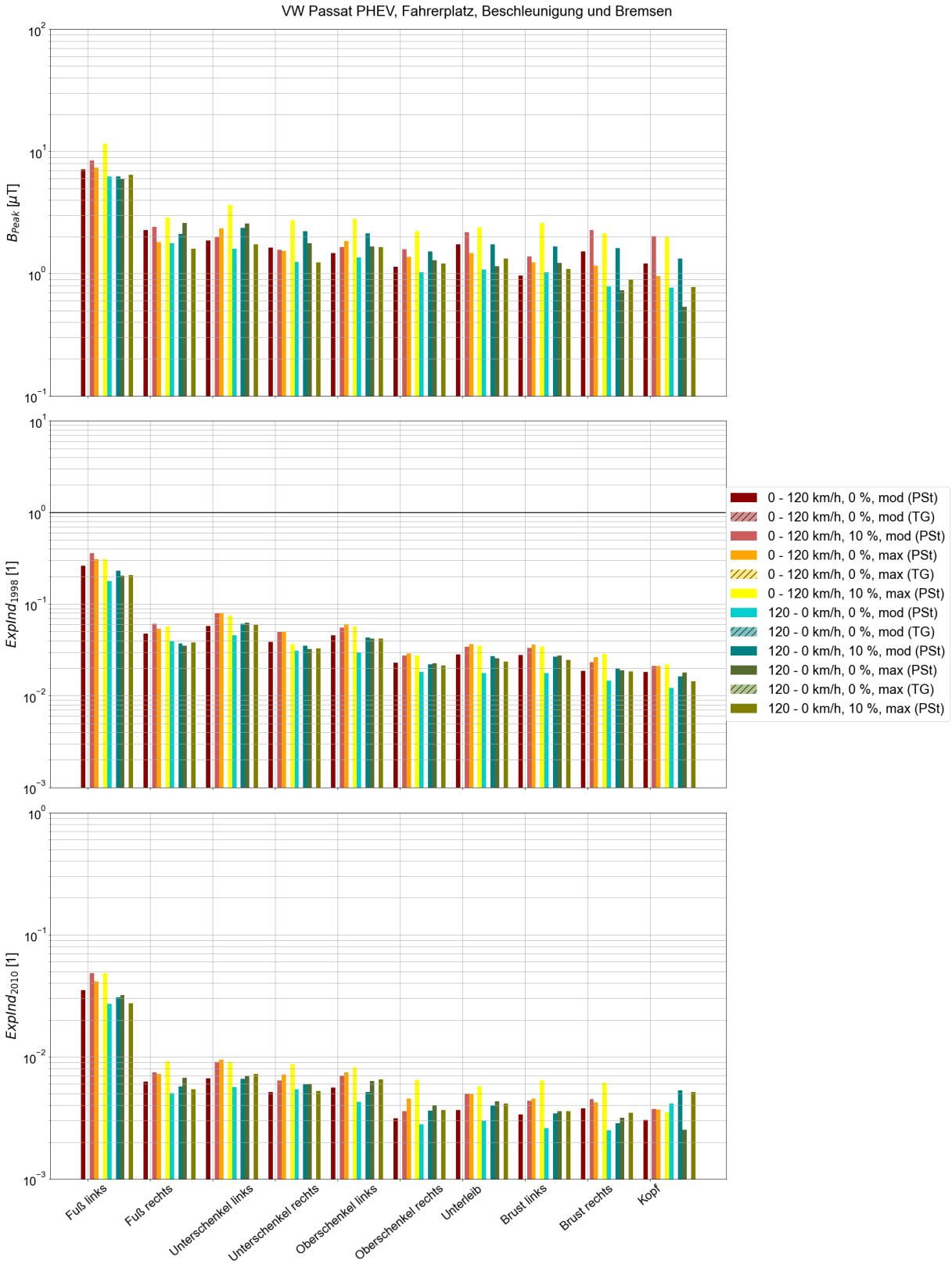


Abbildung 9.241: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Am Fahrerplatz erfolgten in diesem Fahrzeug keine Messungen am Testgelände.

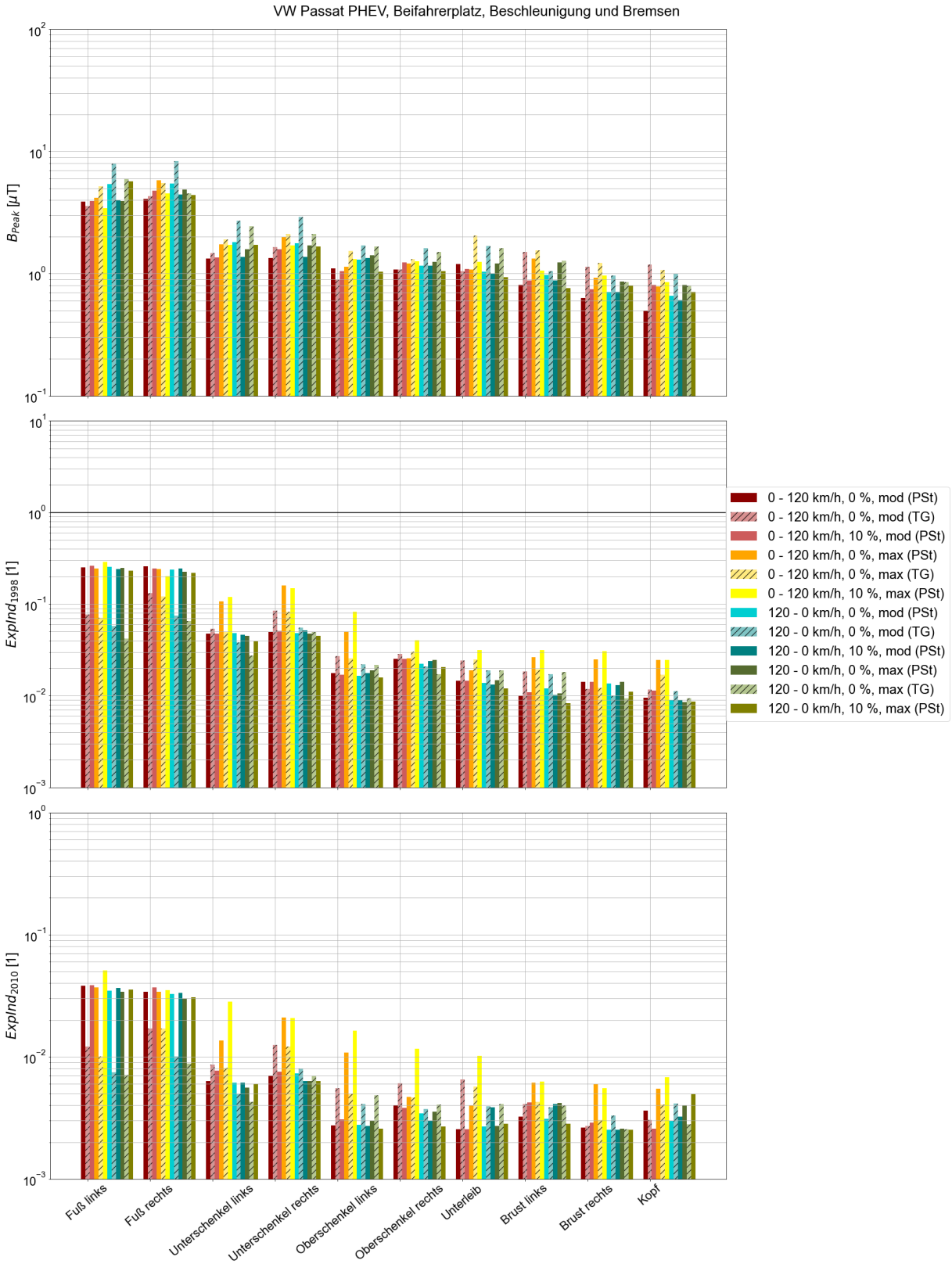


Abbildung 9.242: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

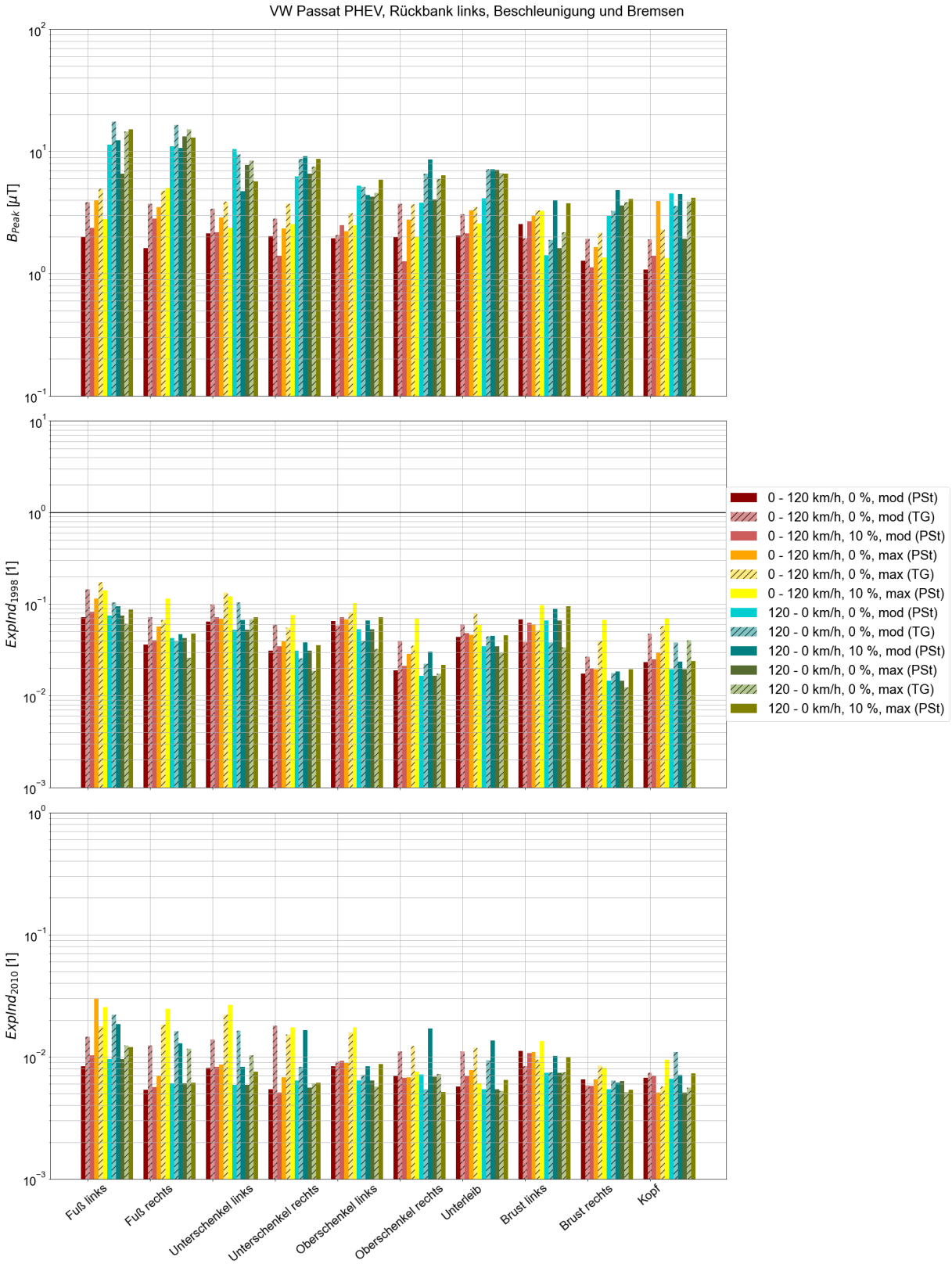


Abbildung 9.243: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim Beschleunigen und Bremsen (Abbildung 9.241 bis Abbildung 9.243) zeigten sich geringfügig größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit. Die größten $ExpInd_{1998}$ lagen im Bereich zwischen 0.3-0.4 in den Fußbereichen von Fahrer und Beifahrer. Auf der Rückbank blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Bremsen und Beschleunigen unterhalb von 0.17.

9.4.12.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.244 und Abbildung 9.246 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.245 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.247 und Abbildung 9.248 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.249 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

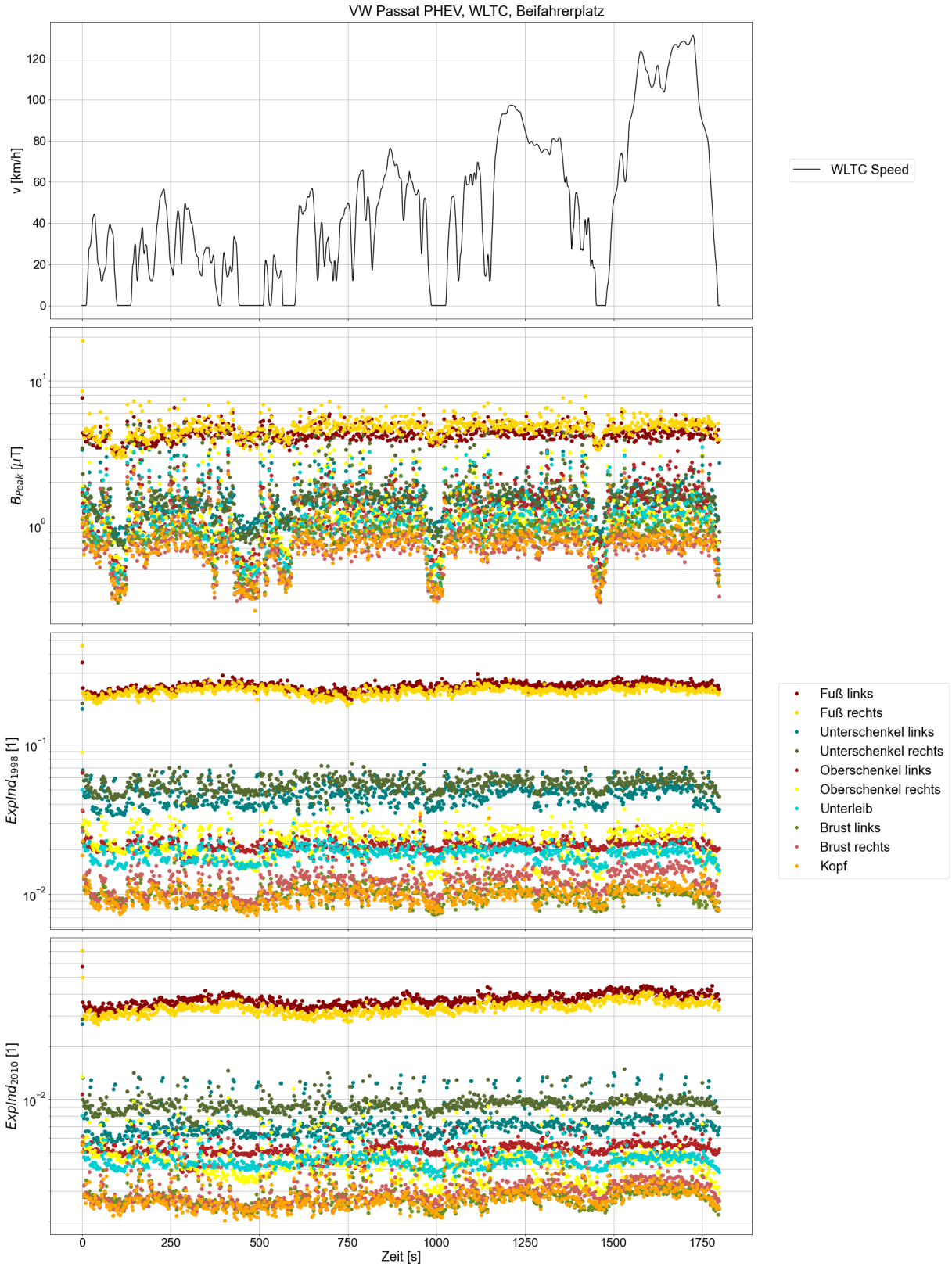


Abbildung 9.244: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

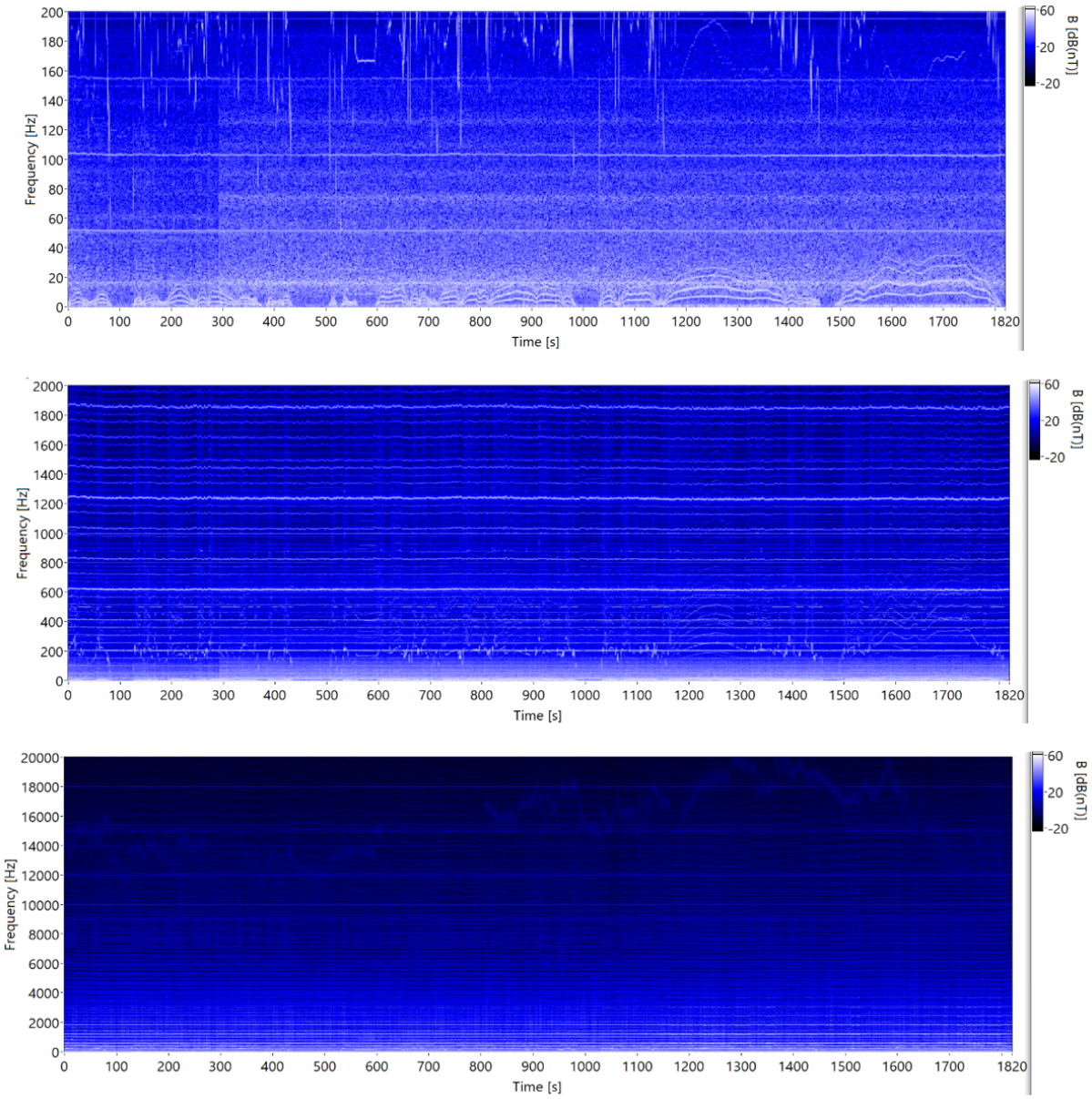


Abbildung 9.245: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im VW Passat PHEV, am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 – 200 Hz, Mitte: 0 – 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

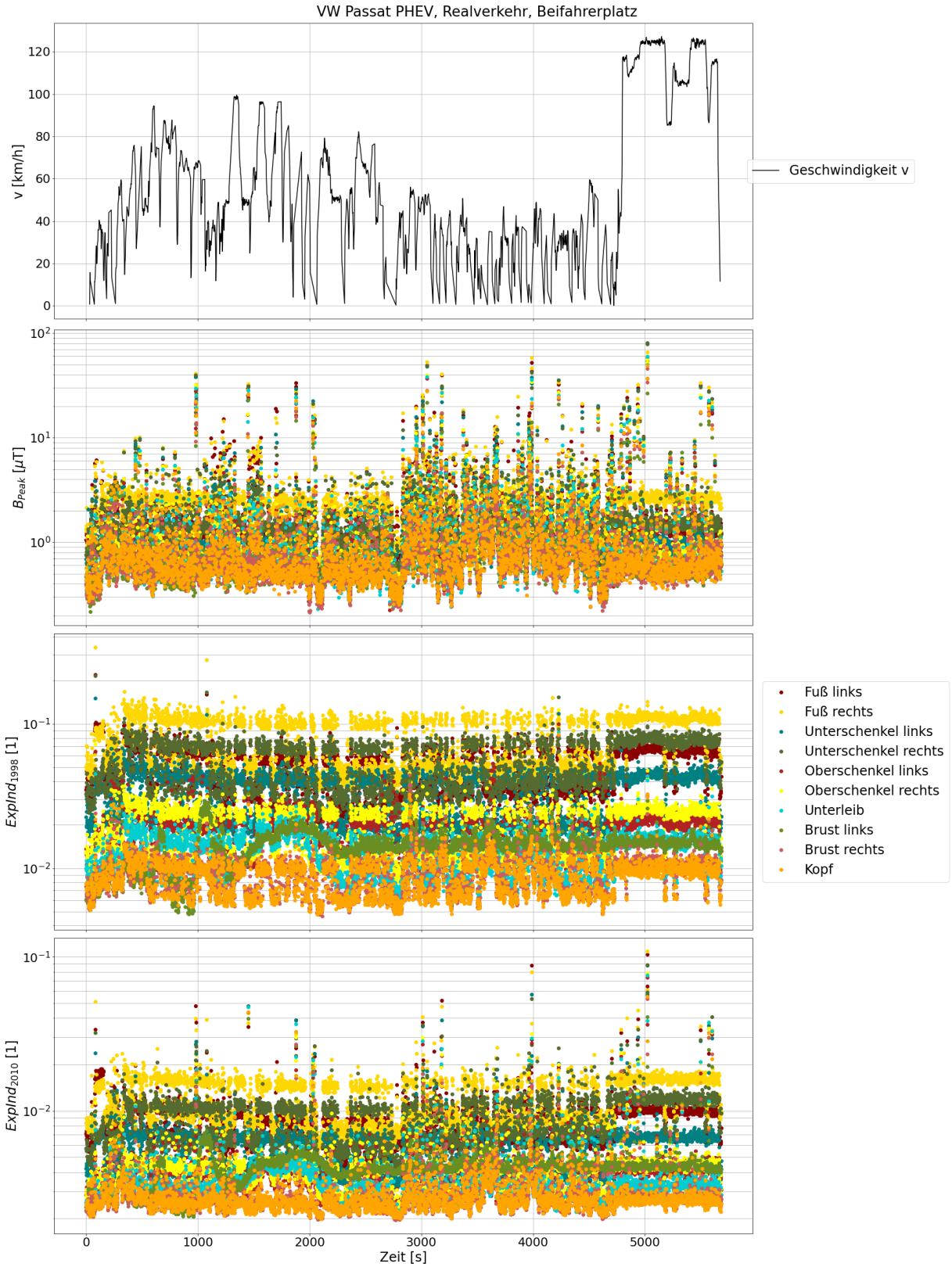


Abbildung 9.246: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

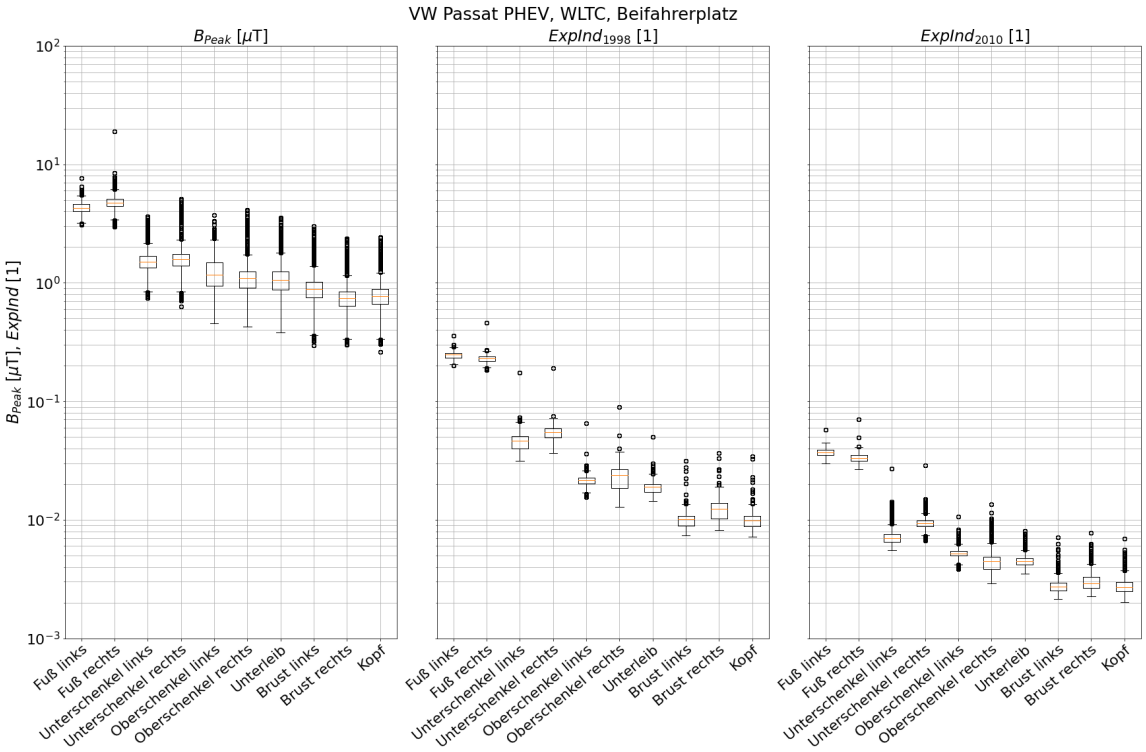


Abbildung 9.247: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

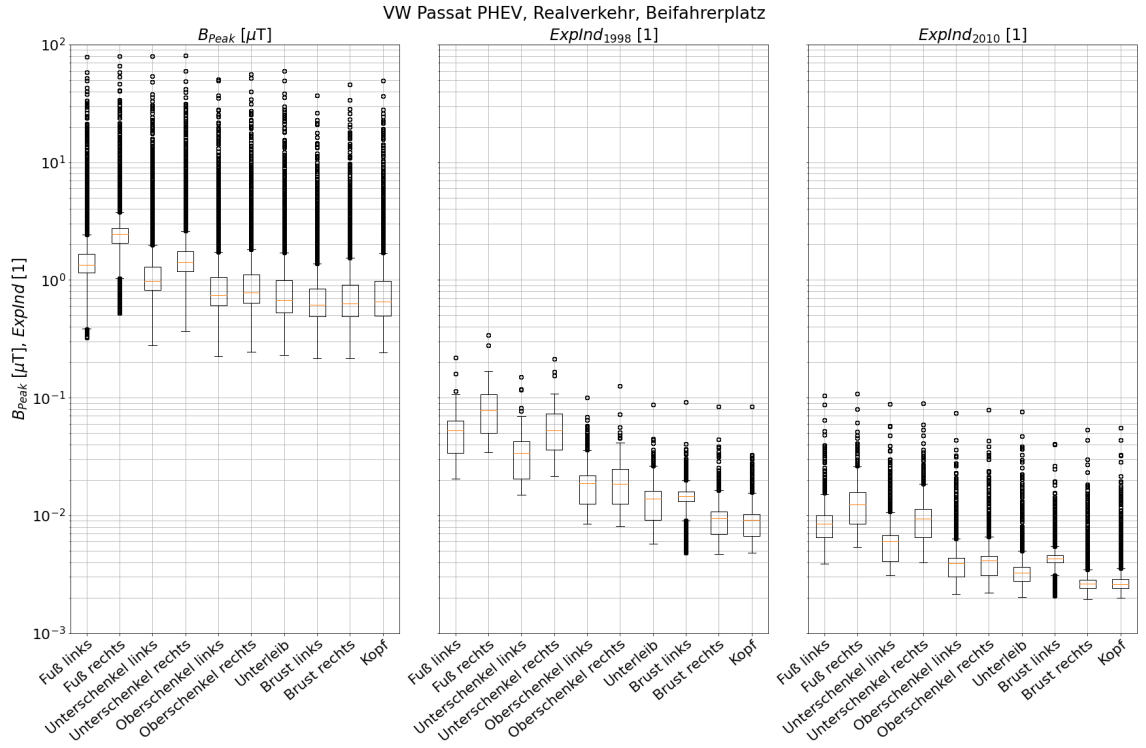


Abbildung 9.248: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

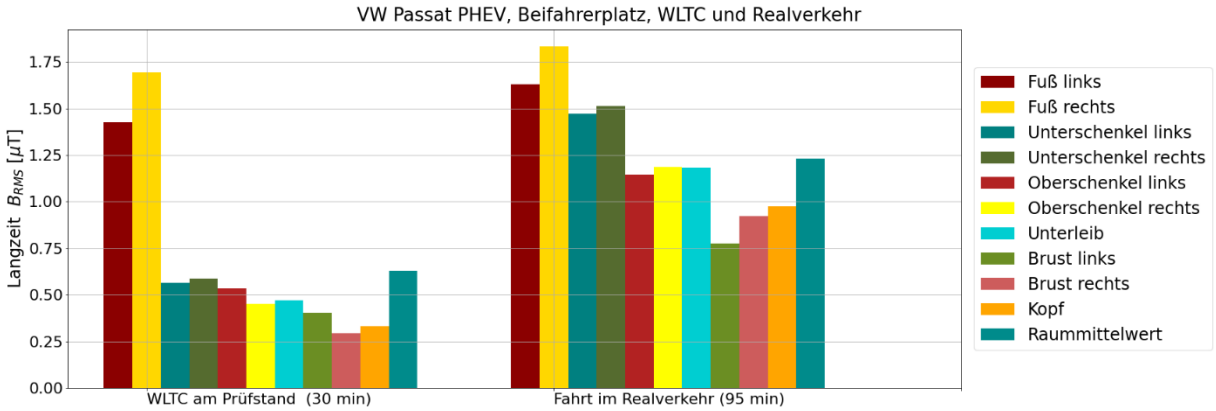


Abbildung 9.249: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.12.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ in diesem Fahrzeug traten mit großer Wahrscheinlichkeit[37] beim Einschalten des Fahrzeugs im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 3.0). Abbildung 9.250 zeigt den zugehörigen Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte.

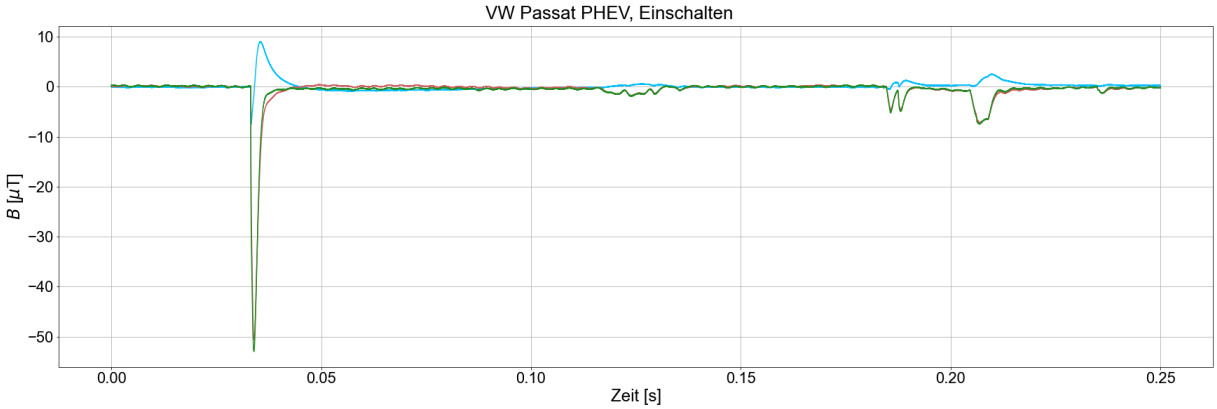


Abbildung 9.250: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes.

Abbildung 9.251 bis Abbildung 9.253 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

[37] Bei diesem Fahrzeug wurden hinsichtlich der Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten nur das Einschalten des Fahrzeuges untersucht.

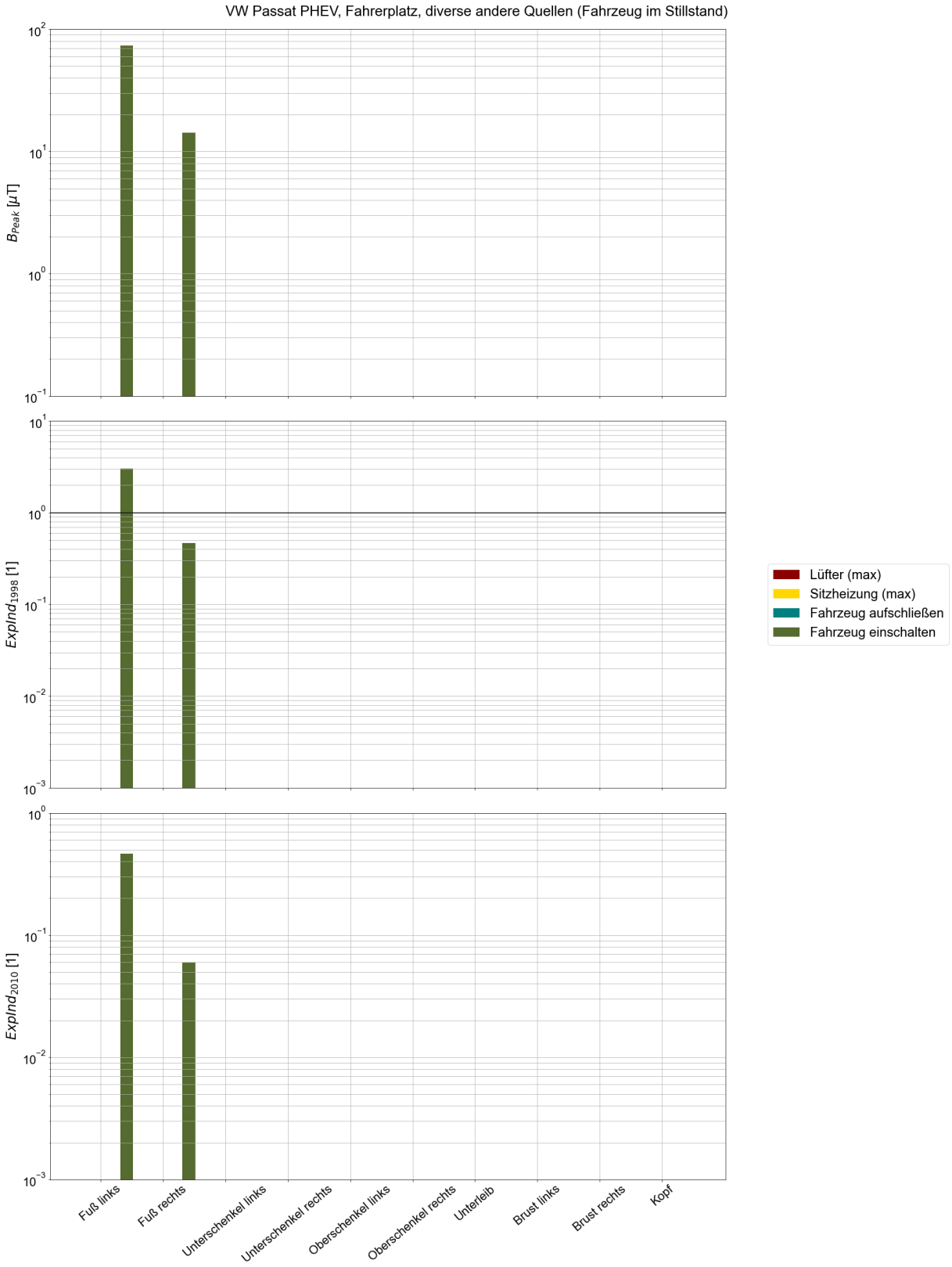


Abbildung 9.251: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Lüfter (Klimaanlage), Sitzheizung und Fahrzeug aufschließen wurden an diesem Sitzplatz nicht gemessen. Außerdem wurden nur zwei von zehn Sonden eingesetzt.

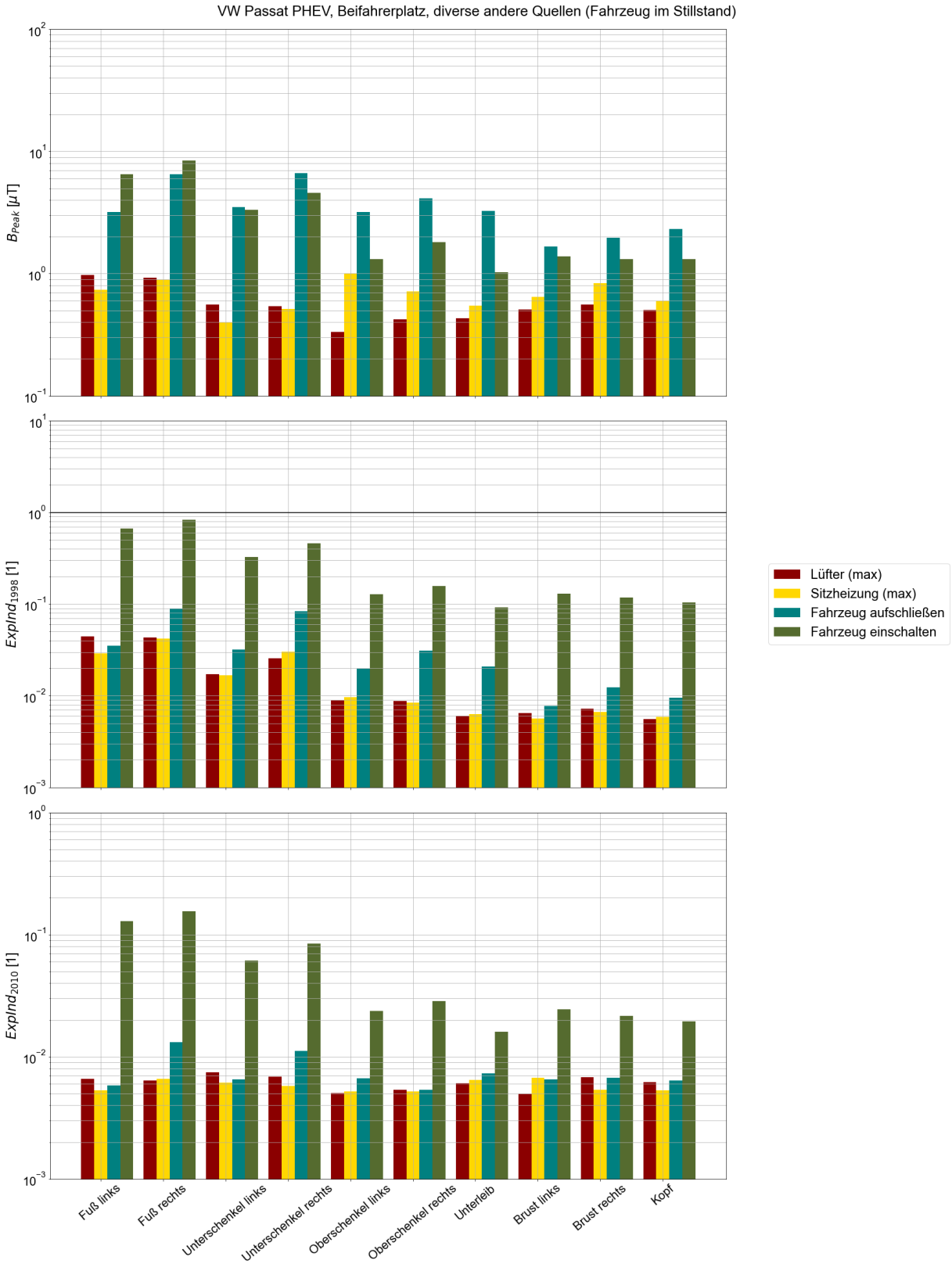


Abbildung 9.252: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

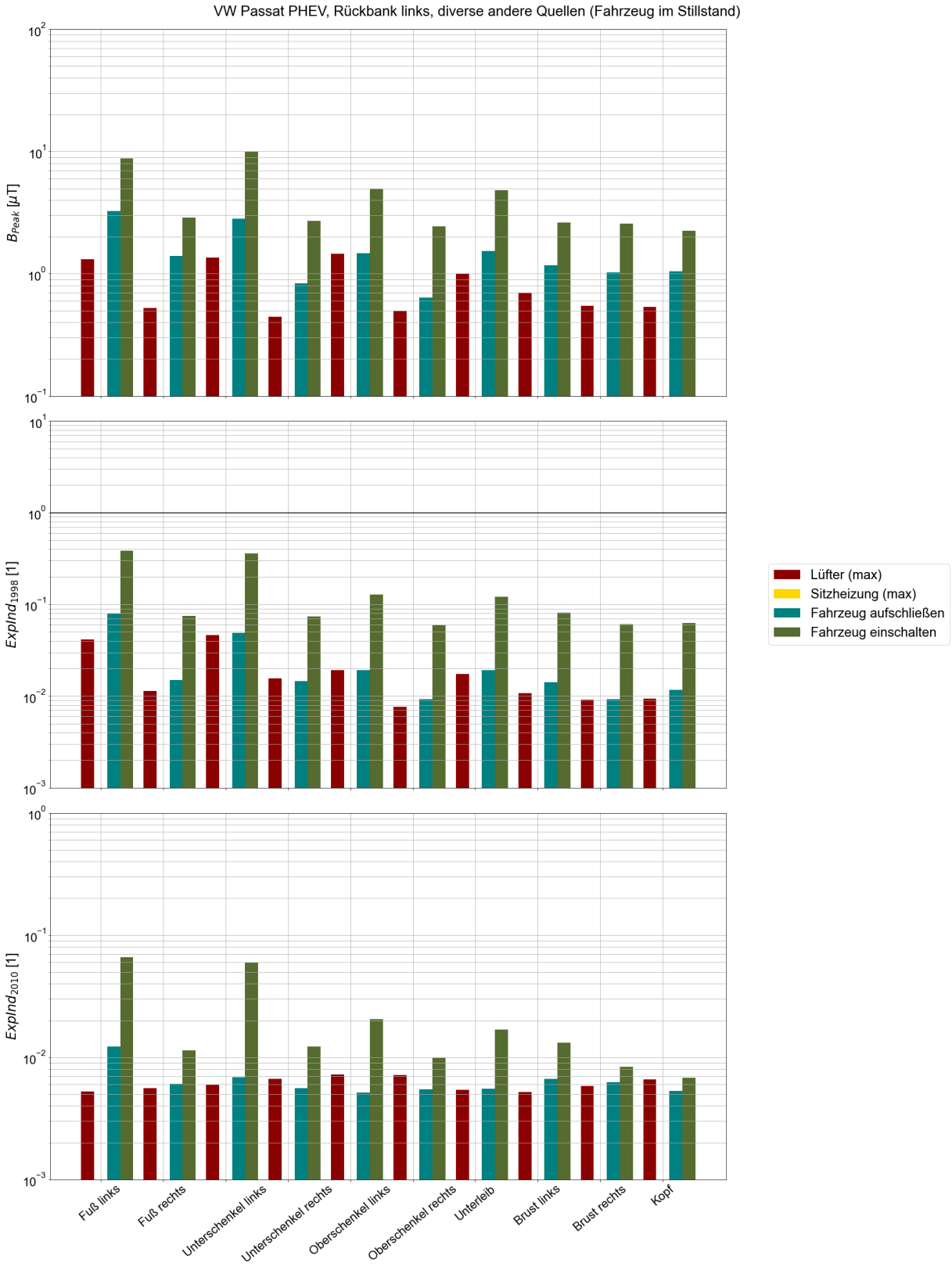


Abbildung 9.253: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Die Sitzheizung wurde an diesem Sitzplatz nicht untersucht.

9.4.13 Mercedes GLE 350 de PHEV



Abbildung 9.254: Untersuchter Mercedes GLE 350 de PHEV auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.13.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Mercedes GLE 350 de PHEV

Baujahr: 2021

Motorleistung: 235 kW (Elektro: 100 kW, Verbrenner: 143 kW)

Batteriekapazität: 13.5 kWh

Die ungefähre Lage der elektrischen Hauptkomponenten des in Abbildung 9.254 gezeigten, untersuchten Fahrzeugs kann aus der Rettungskarte des Fahrzeuges abgeleitet werden (Abbildung 9.255).

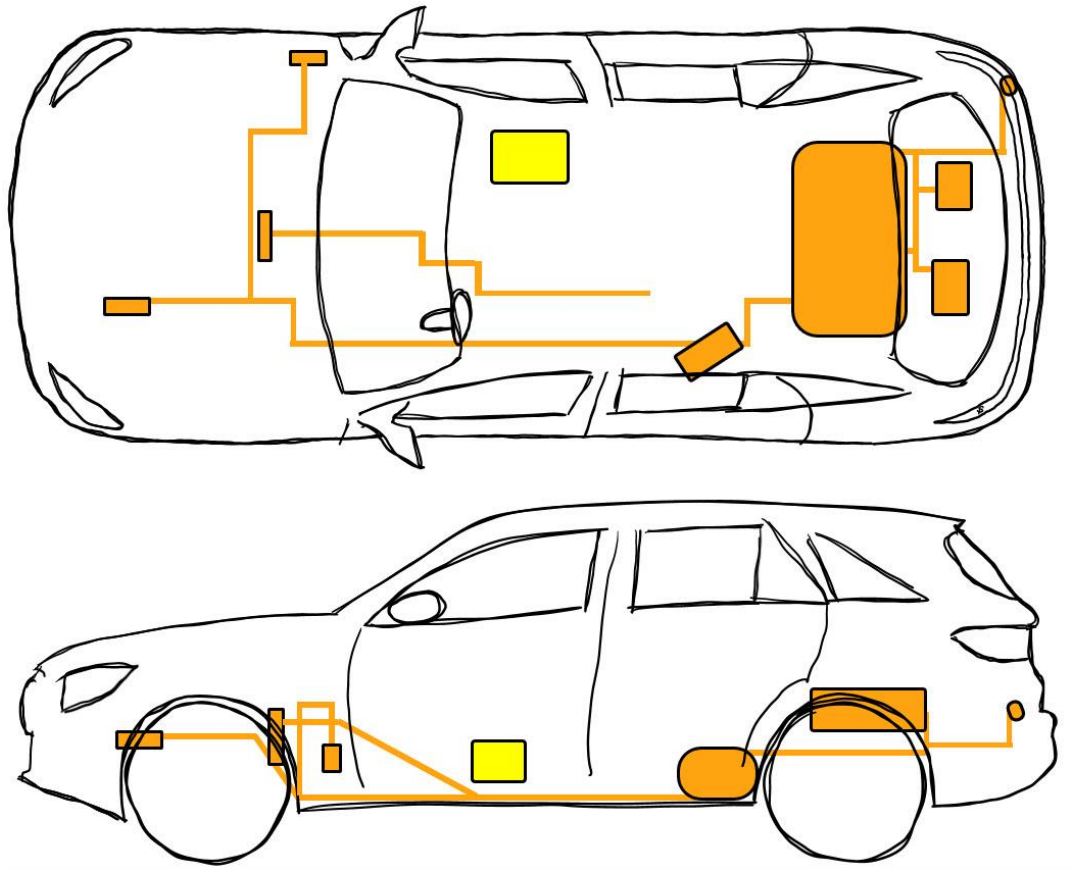


Abbildung 9.255: Lage der elektrischen Komponenten (orange = Hochvoltkomponenten; gelb = 12 V-Komponenten) im Mercedes GLE 350 PHEV (modifiziert nach https://rettungskarten-service.de/wp-content/uploads/GLE-Klasse-HYBRID-PLUS-SUV-Typ166-ab-2015.pdf).

9.4.13.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.256 bis Abbildung 9.261 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am rechten Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen. Die Ergebnisse der Messungen am Testgelände sind dabei direkt den entsprechenden am Prüfstand ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt (schraffierte Balken).

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.256 bis Abbildung 9.258) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ in den Fußbereichen von Fahrer und Beifahrer, im Wertebereich von ca. 0.8 – 1.0, wobei ein Anteil von nicht mehr als ca. 0.01 – 0.02 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war. Anzumerken ist, dass in diesem Fahrzeug bereits unmittelbar nach dem Aktivieren (nach dem Aufschließen, jedoch noch vor dem Einschalten des Fahrzeugs) in den Fußbereichen von Fahrer und Beifahrer ungewöhnlich hohe $ExpInd_{1998}$ von bis zu 0.11 erreicht wurden. Der Einschaltvorgang selbst führte zu $ExpInd_{1998}$ von bis zu 15.0 in den Fußbereichen von Fahrer und Beifahrer (siehe auch Kapitel 9.4.13.4).

Auf der Rückbank blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit unterhalb von ca. 0.15.

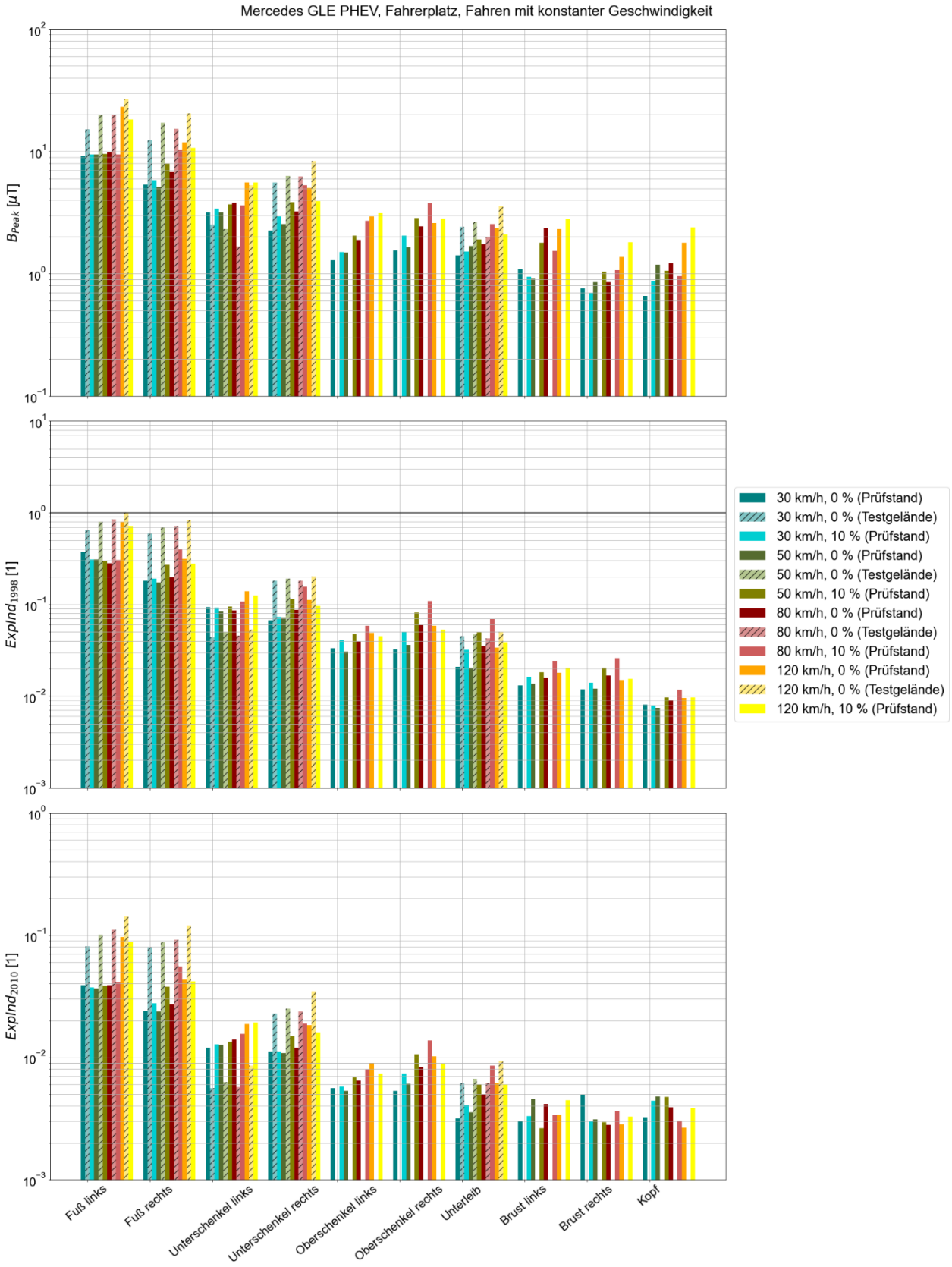


Abbildung 9.256: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

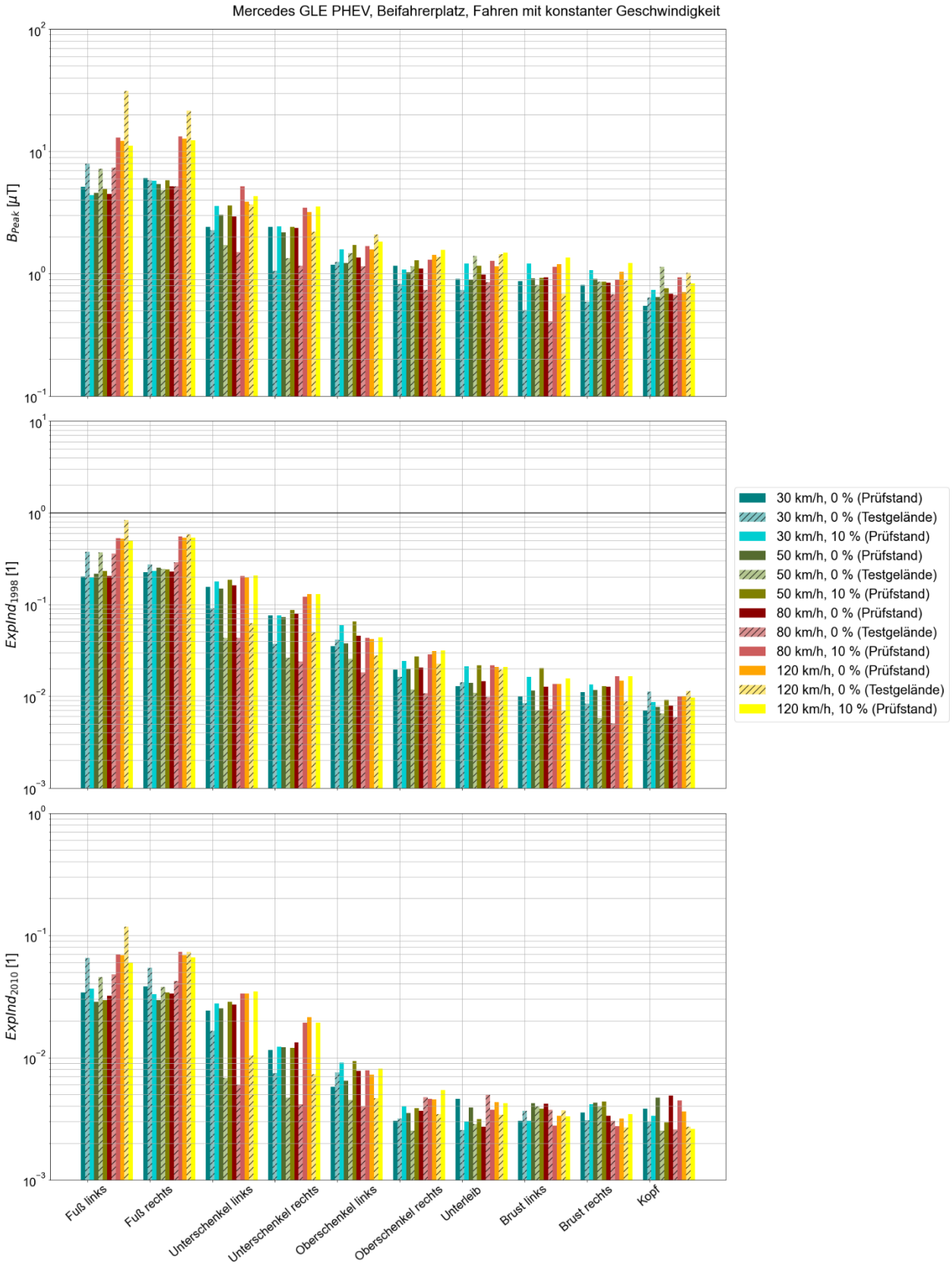


Abbildung 9.257: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

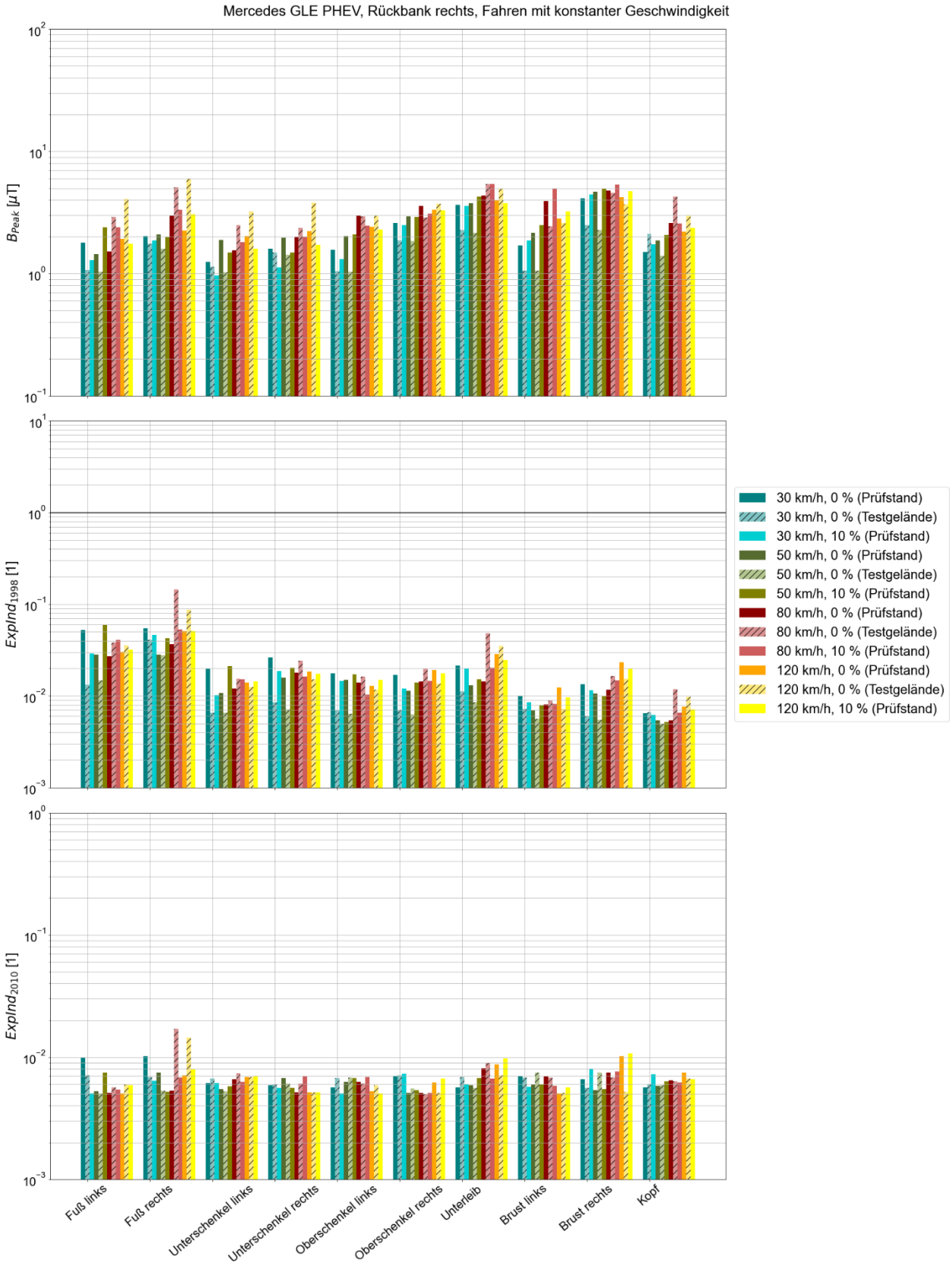


Abbildung 9.258: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

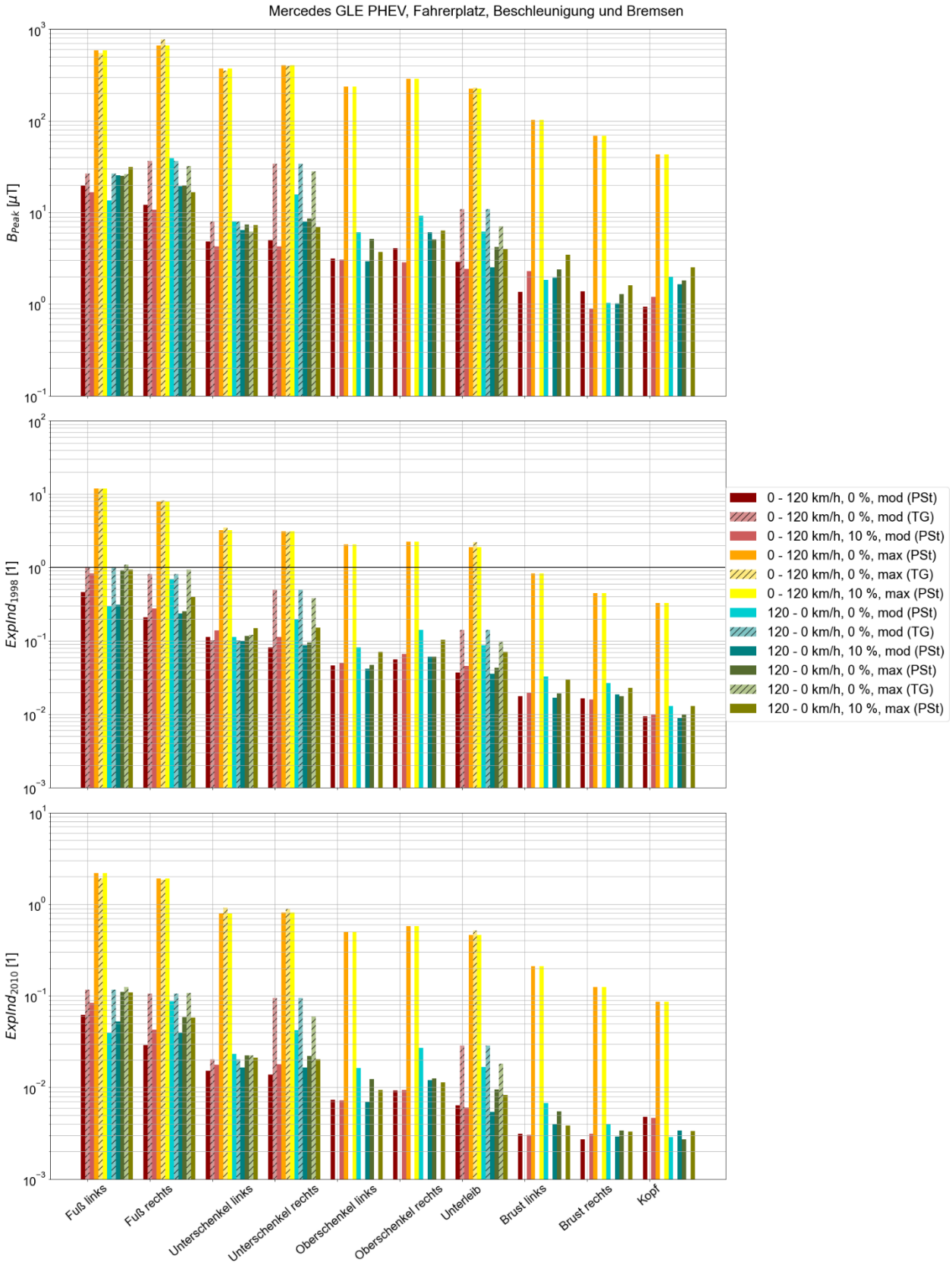


Abbildung 9.259: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrersitz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

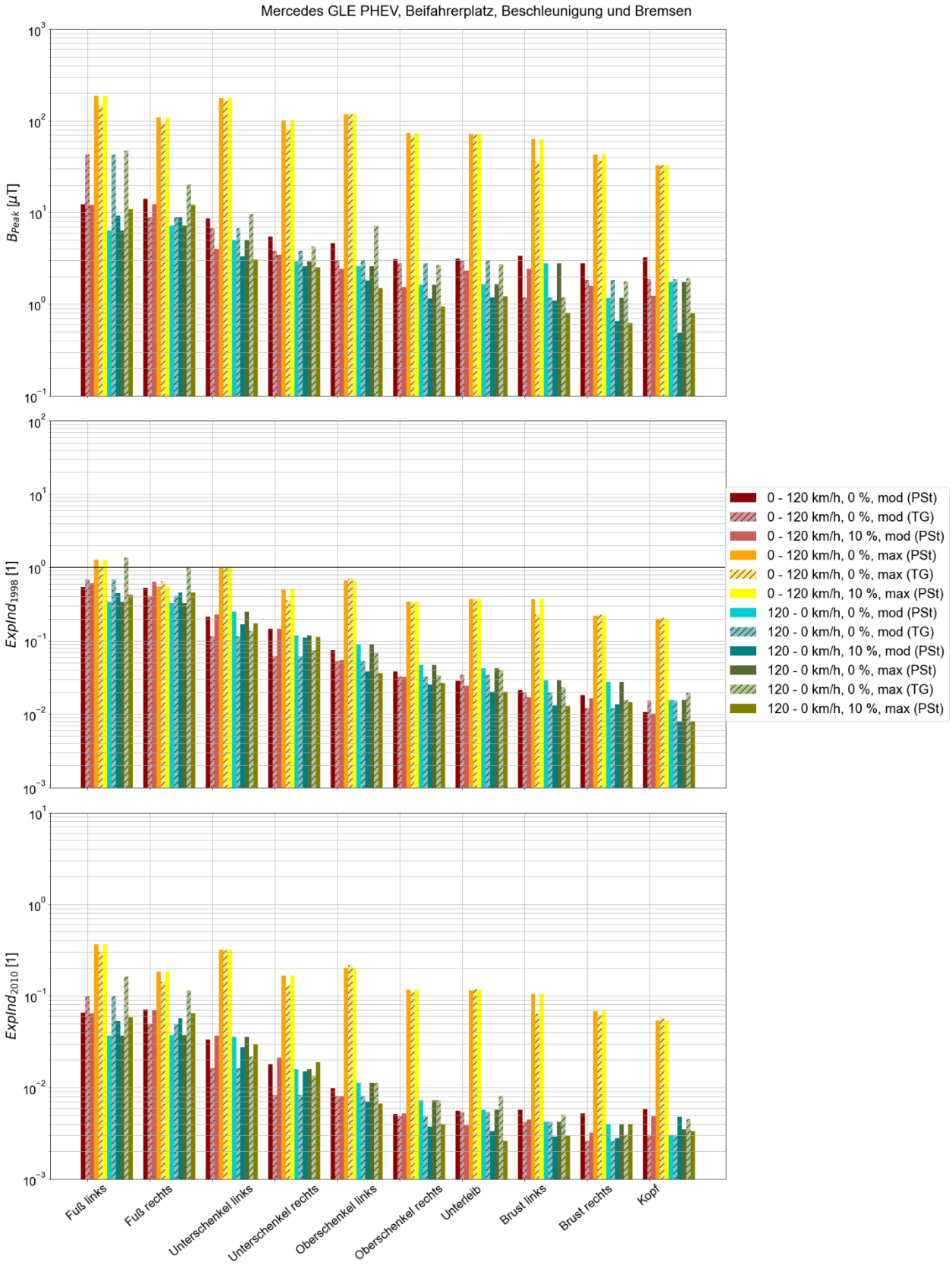


Abbildung 9.260: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

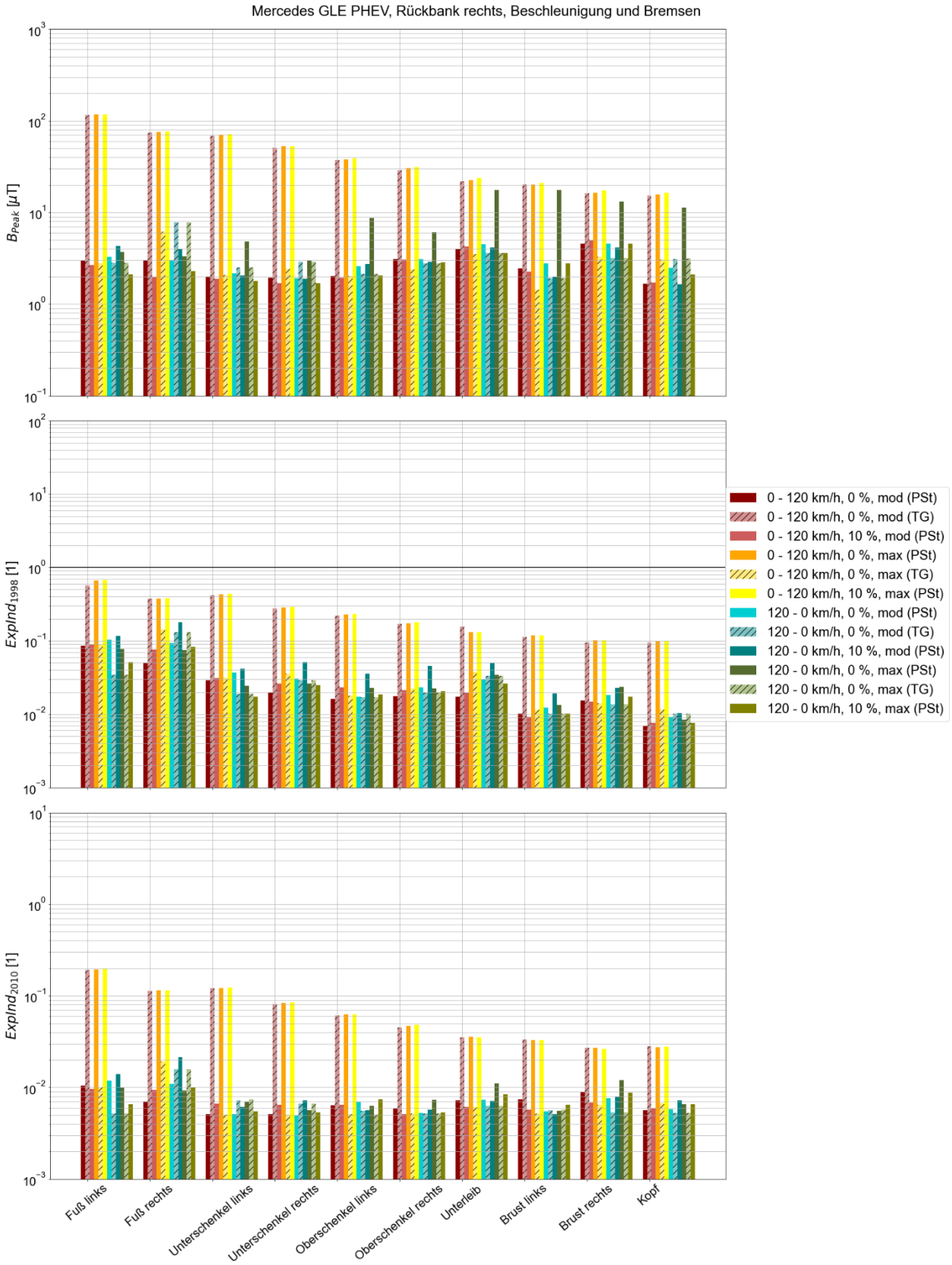


Abbildung 9.261: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) beim Beschleunigen (0-120 km/h) und Bremsen (120-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand.

Beim moderaten Beschleunigen und beim Bremsen (Abbildung 9.259 bis Abbildung 9.261) zeigten sich ähnliche bzw. nur geringfügig größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit. Jedoch führte der transiente Vorgang in Zusammenhang mit dem Zuschaltens des Verbrennungsmotors, das bei starker Beschleunigung immer erfolgt, zu deutlich größeren Expositionsindizes, die im Fußraum des Fahrerplatzes bis zu ca. 12.0 erreichten. Die dadurch verursachten $ExpInd_{1998}$ lagen am Fahrerplatz erst in Körperregionen oberhalb des Gesäßes unterhalb von 1.0.

Interessant erscheint auch die Tatsache, dass sich im Bereich von Fahrer- und Beifahrersitz im Zustand mit eingeschaltetem Verbrennungsmotor deutlich höhere Expositionsindizes ergaben als bei rein elektrischem Fahren.

Abbildung 9.262 zeigt Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte beim rein elektrischen Fahren (vor dem Zuschalten des Verbrennungsmotors), während des Zuschaltens des Verbrennungsmotors und nach dem Zuschalten des Verbrennungsmotors (mit laufendem Verbrennungsmotor, d.h. Hybrid-Antrieb), gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes bei ca. 80 km/h. Abbildung 9.263 zeigt die zugehörigen Frequenzspektren während des rein elektrischen Fahrens und des Hybrid-Fahrens.



Abbildung 9.262: Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte, gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes bei ca. 80 km/h, während des rein elektrischen Fahrenens (oben, $ExpInd_{1998}$ = 0.3), während des Zuschaltens des Verbrennungsmotors (Mitte, $ExpInd_{1998}$ = 11.8) und nach dem Zuschalten des Verbrennungsmotors (unten, $ExpInd_{1998}$ = 0.8).

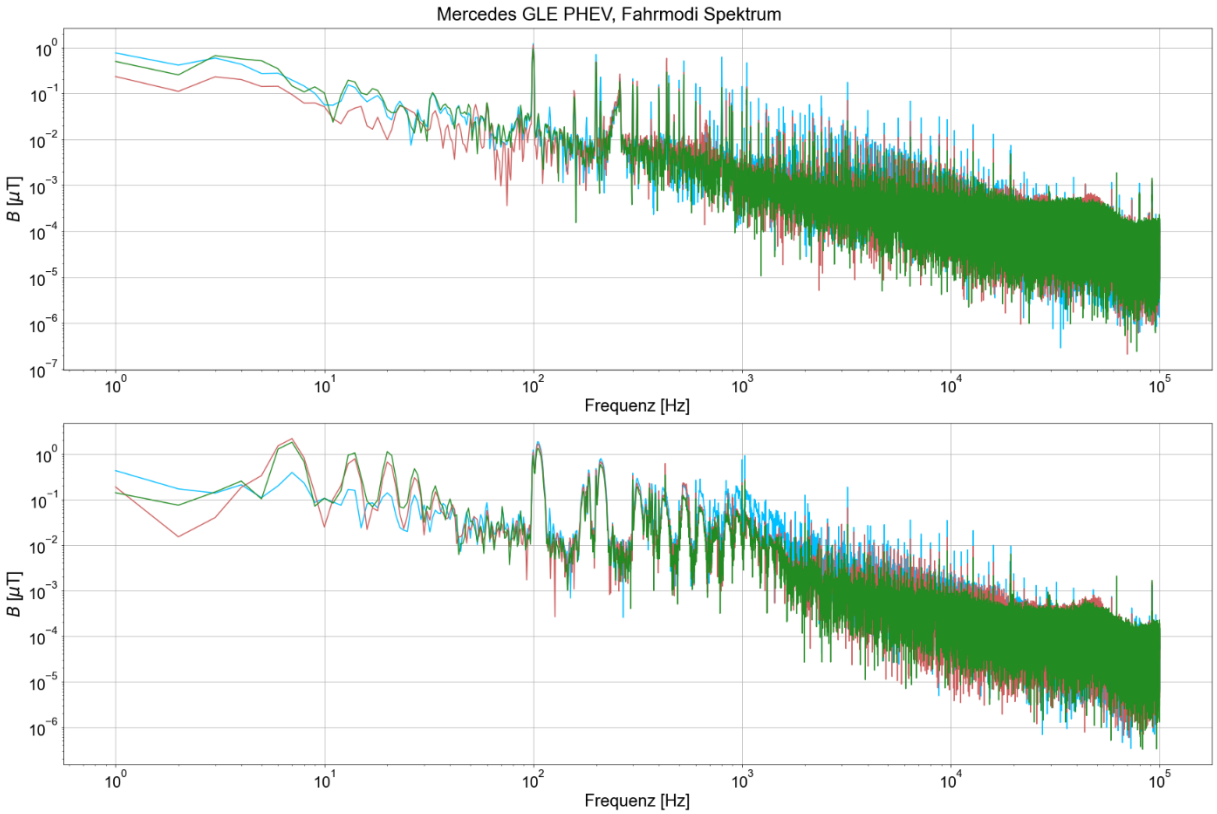


Abbildung 9.263: Frequenzspektren der magnetischen Flussdichte, gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes bei ca. 80 km/h, während des rein elektrischen Fahrens (oben, ExpInd1998 = 0.3) und nach dem Zuschalten des Verbrennungsmotors (unten, ExpInd1998 = 0.8).

9.4.13.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC und im Realverkehr

Abbildung 9.264 und Abbildung 9.266 zeigen die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.265 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.267 und Abbildung 9.268 zeigen eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.269 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

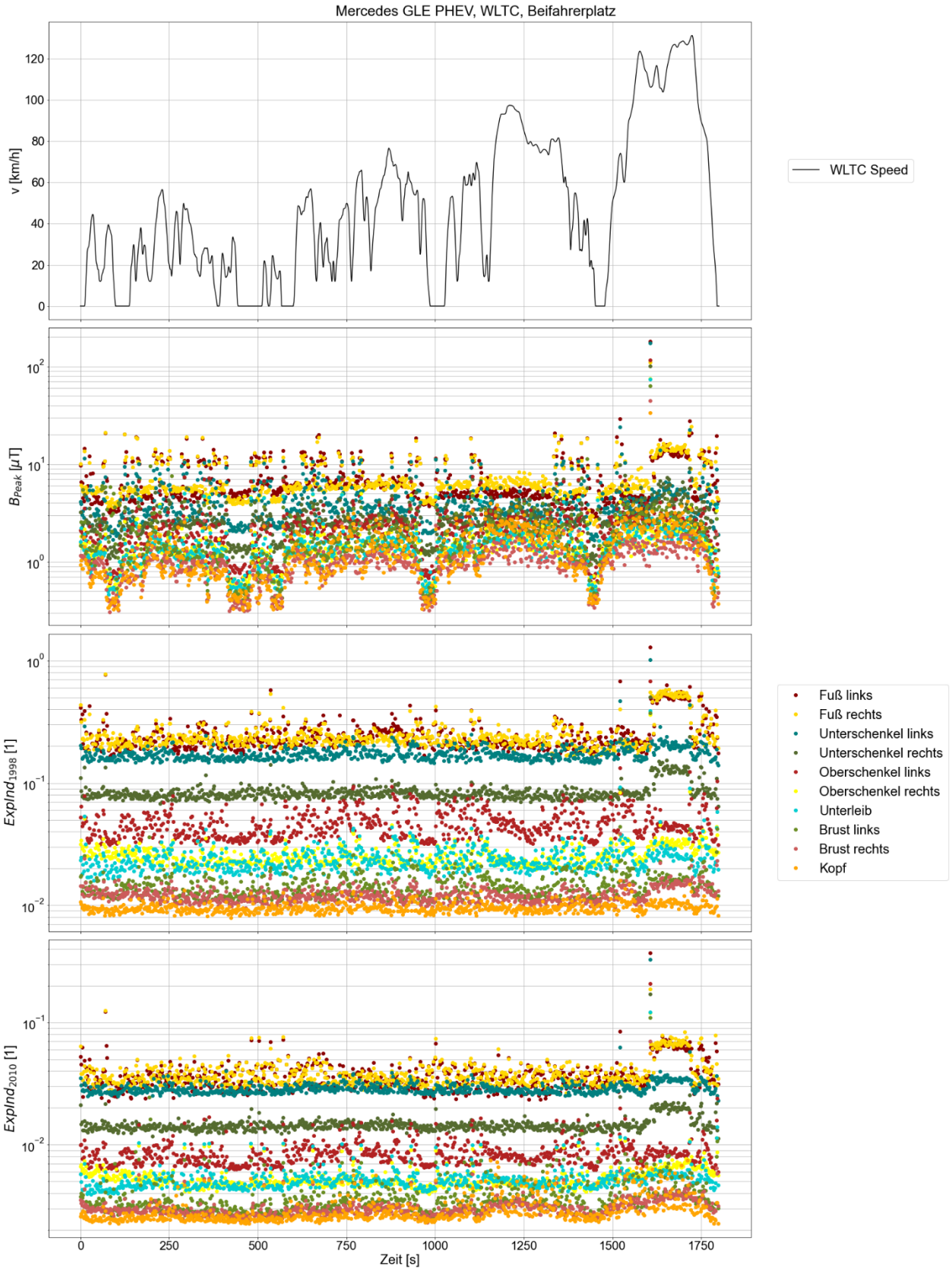


Abbildung 9.264: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

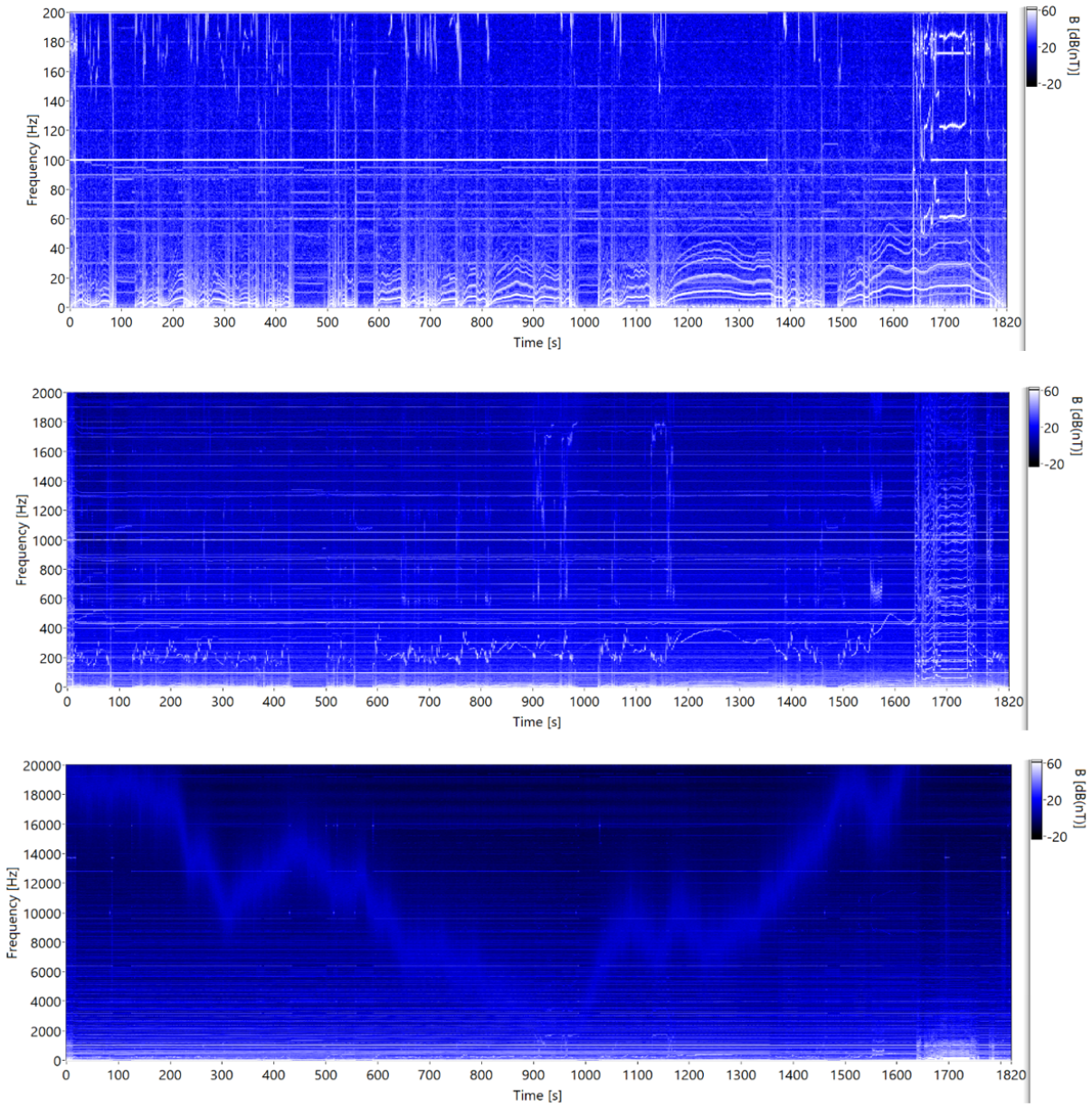


Abbildung 9.265: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Mercedes GLE PHEV, am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 – 200 Hz, Mitte: 0 – 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

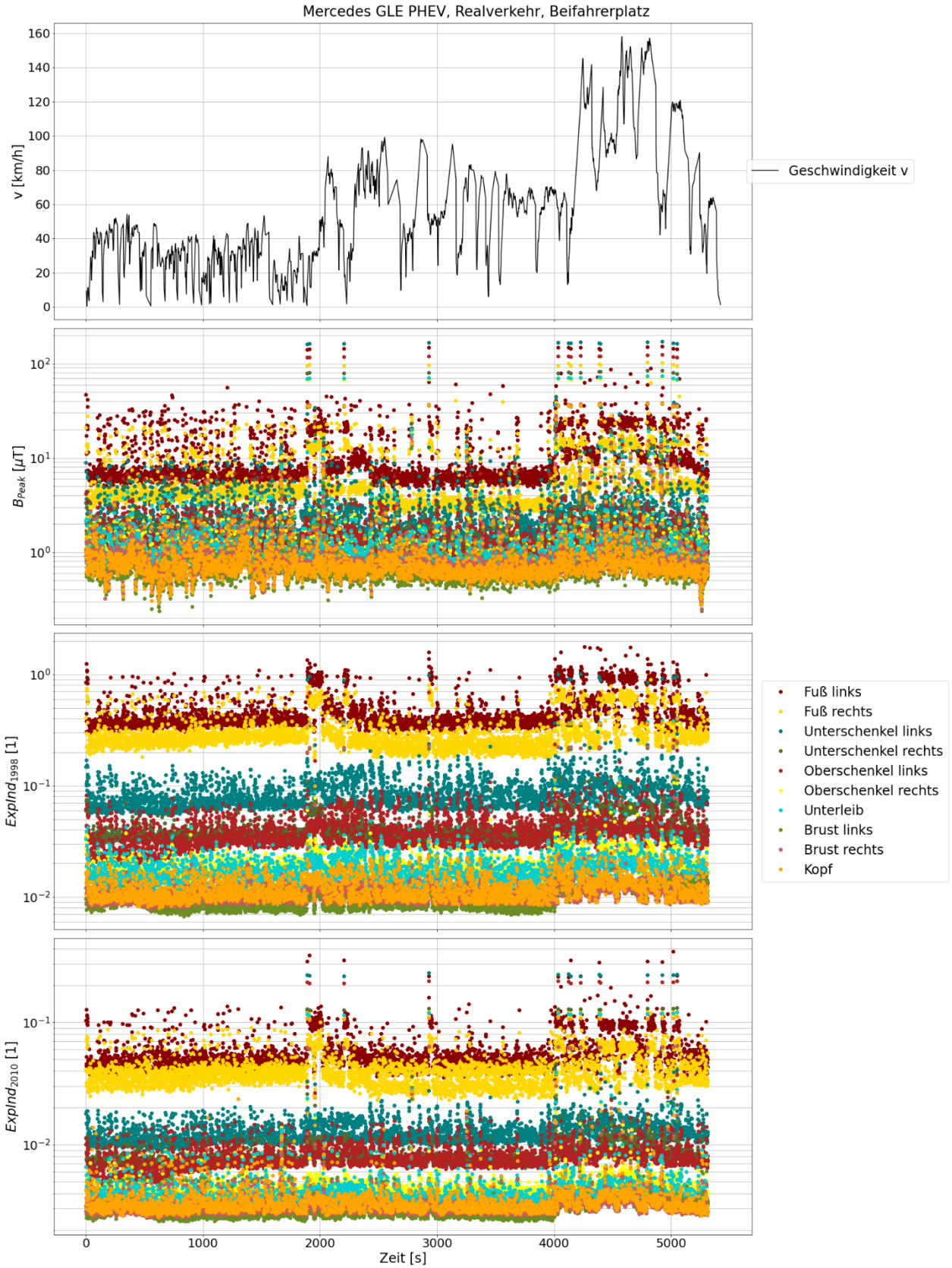


Abbildung 9.266: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während der Fahrt im Realverkehr in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

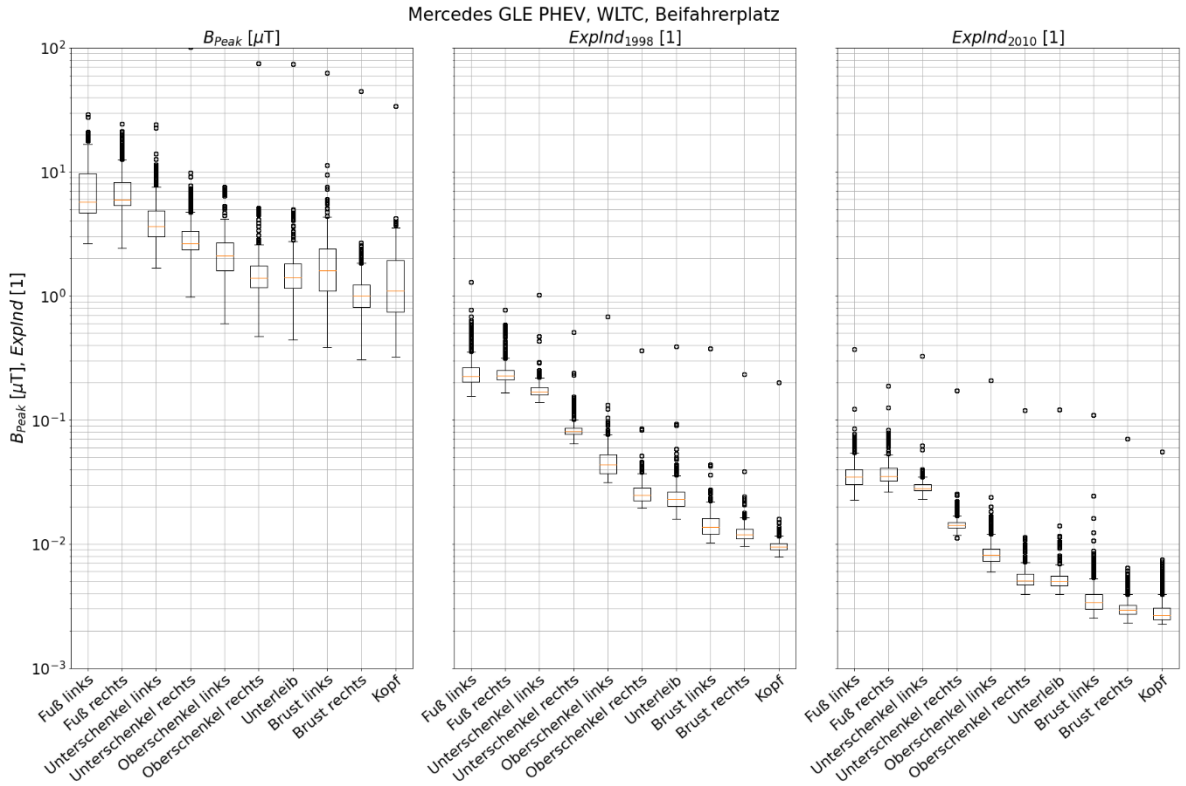


Abbildung 9.267: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

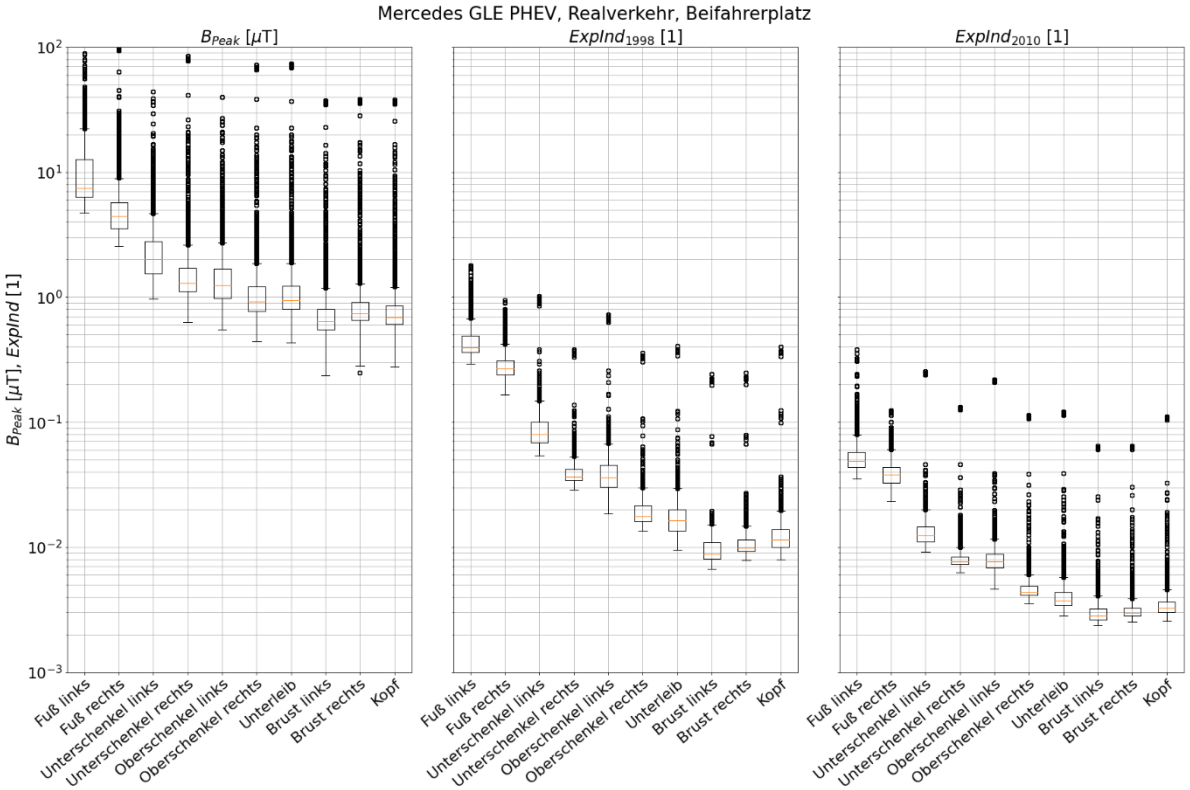


Abbildung 9.268: Statistische Auswertung der Fahrt im Realverkehr in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

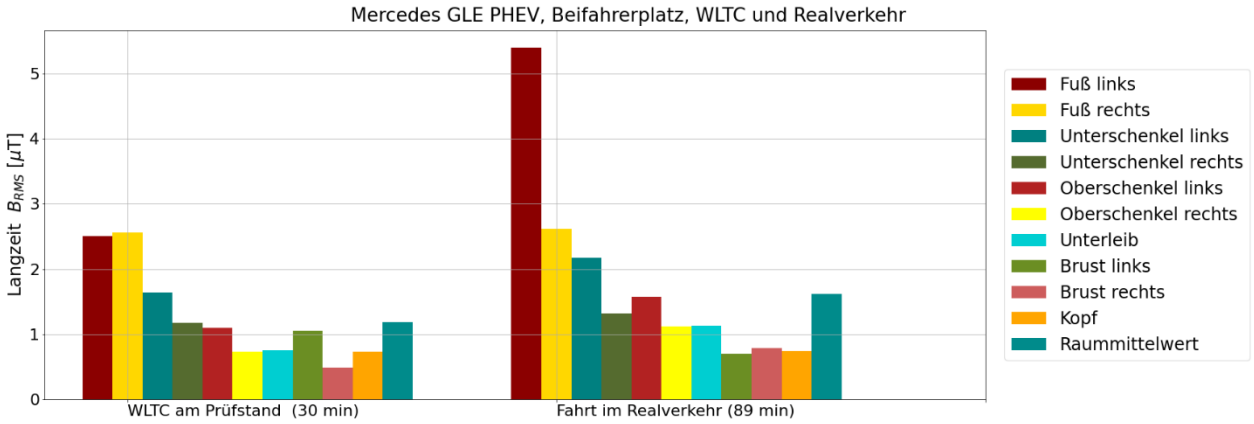


Abbildung 9.269: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand und der Fahrt im Realverkehr.

9.4.13.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 12.0 im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz bzw. bis zu ca. 15.0 im Bereich des linken Fußes am Beifahrerplatz) auf.

Abbildung 9.270 zeigt den zugehörigen Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte.

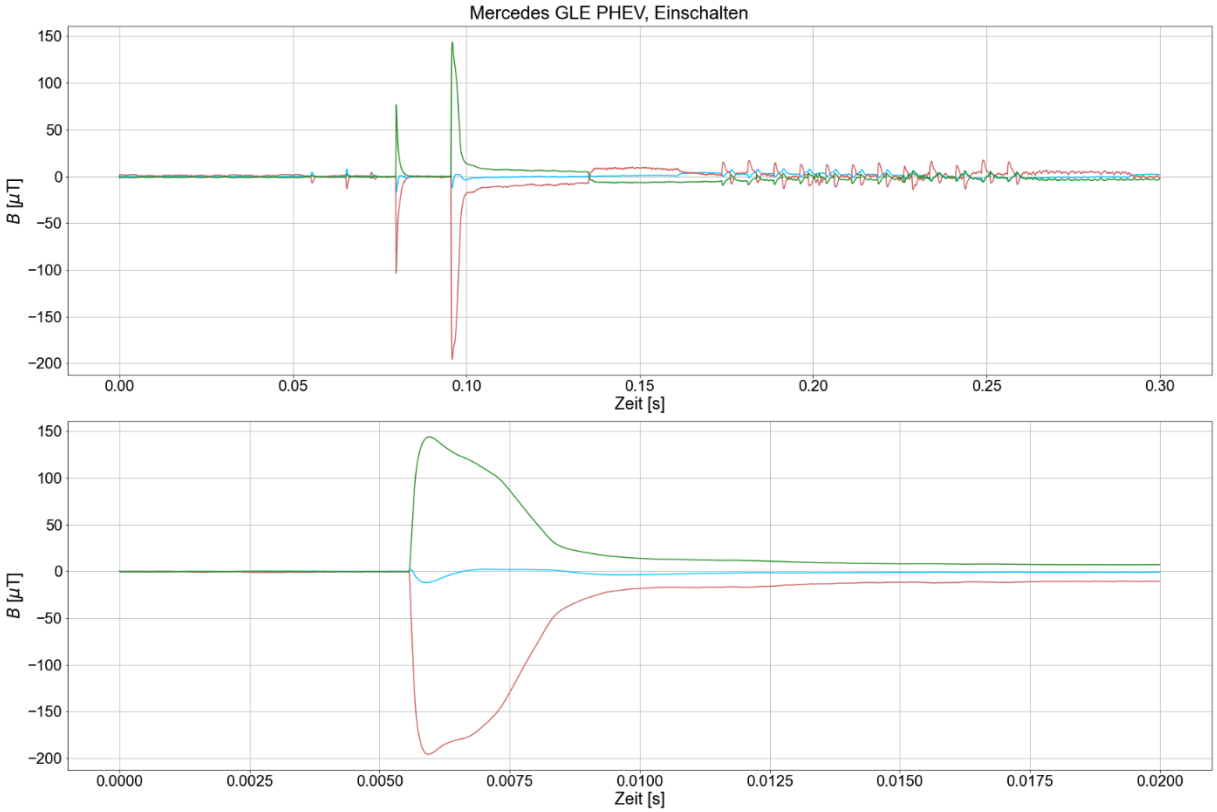


Abbildung 9.270: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im linken Fußbereich des Beifahrerplatzes.

Abbildung 9.271 bis Abbildung 9.273 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

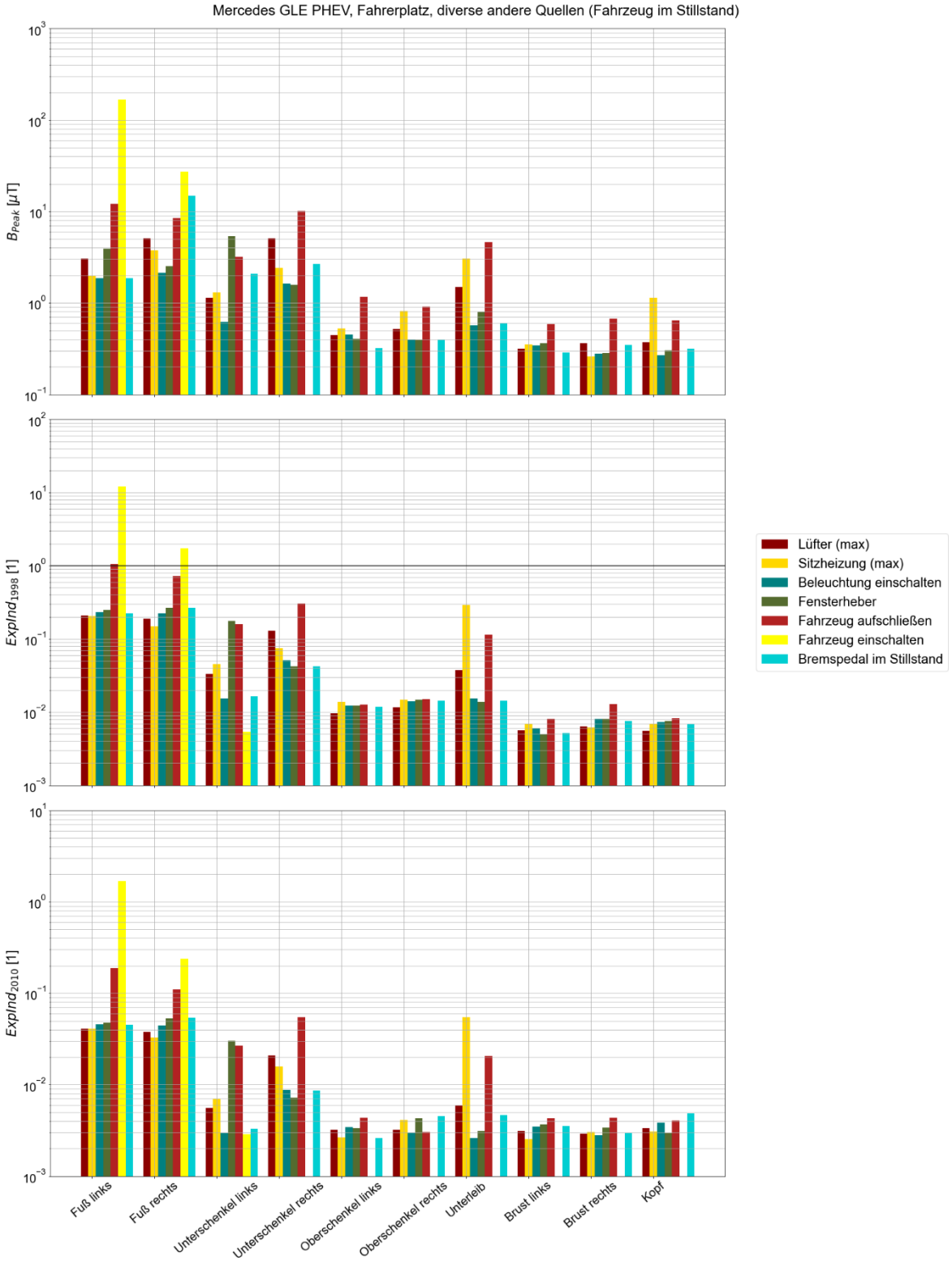


Abbildung 9.271: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Fahrzeug einschalten wurde am Fahrerplatz nur an zwei von 10 Messpositionen untersucht.

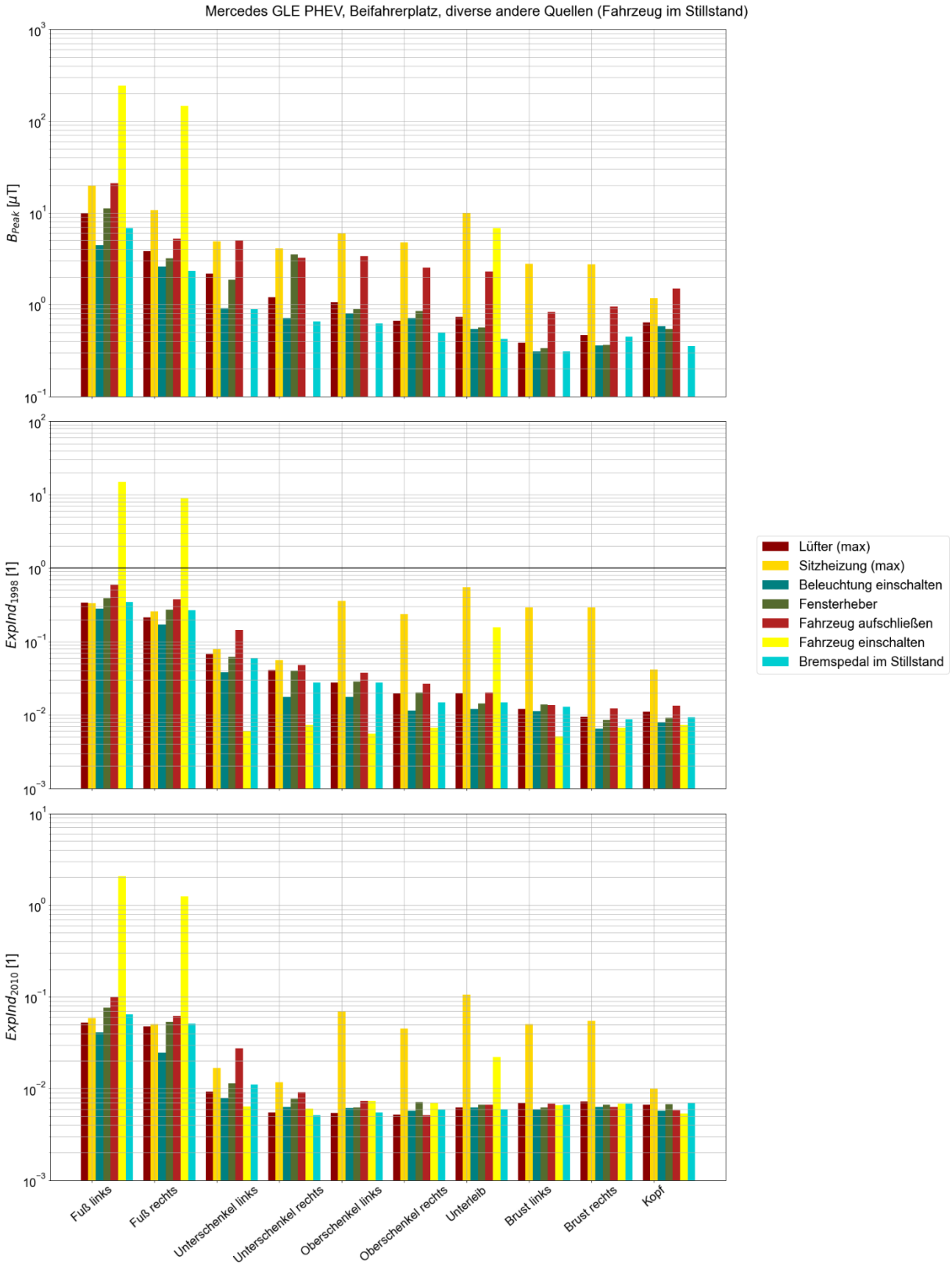


Abbildung 9.272: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Fahrzeug einschalten wurde am Fahrerplatz nur an drei von 10 Messpositionen untersucht.

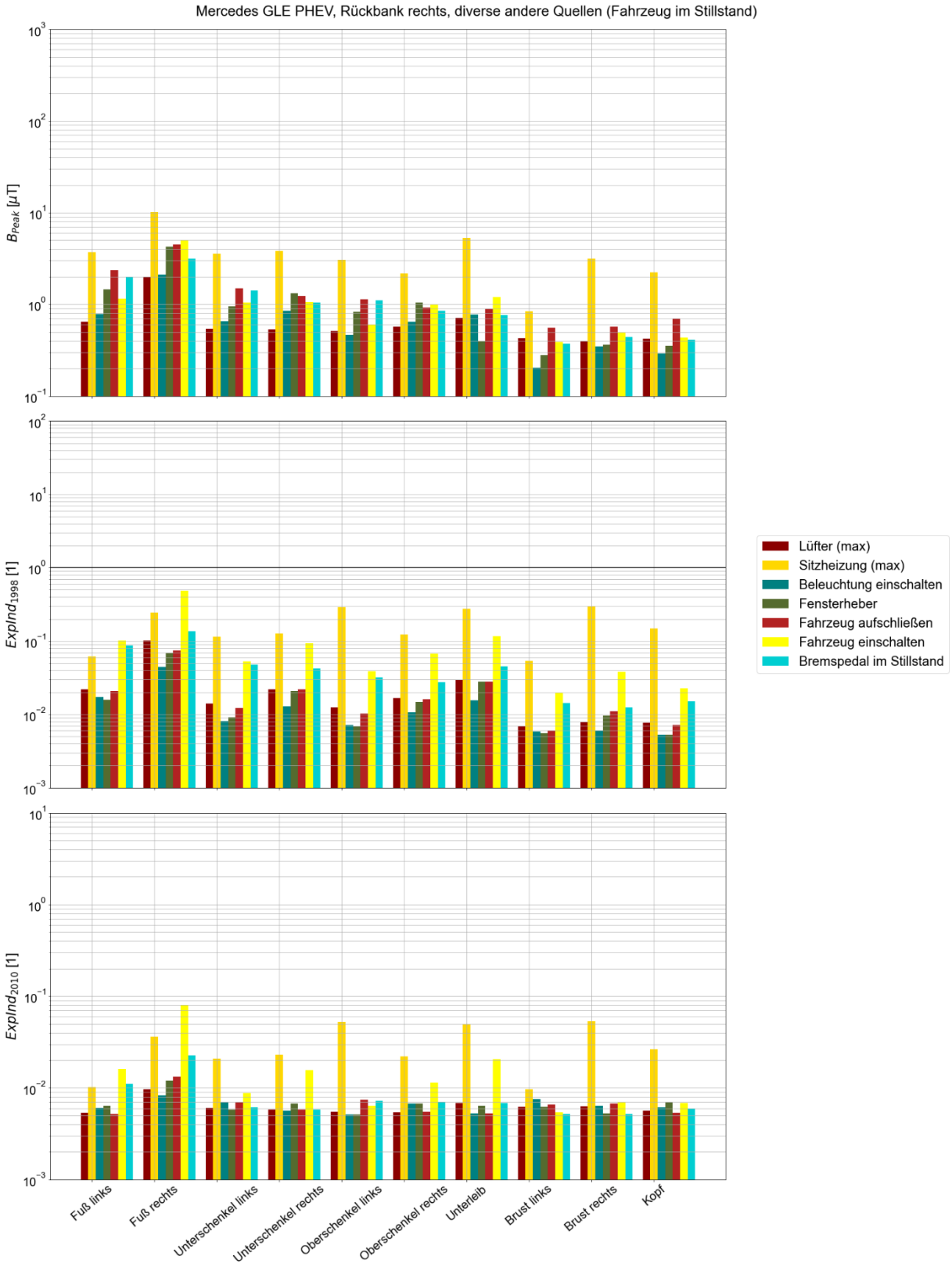


Abbildung 9.273: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (rechter Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

9.4.14 Opel Corsa mit Verbrennungsmotor (CE … Combustion Engine)



Abbildung 9.274: Untersuchter Opel Corsa auf dem Rollenprüfstand Horiba Vulcan II.

9.4.14.1 Fahrzeugdaten

Fahrzeugbezeichnung: Opel Corsa

Baujahr: 2021

Motorleistung: 74 kW

Das in Abbildung 9.274 gezeigte Fahrzeug wurde zum Zweck eines Direktvergleichs zwischen elektrisch betriebenen und nicht-elektrisch (d.h. mit Verbrennungsmotor) betriebenen Fahrzeugen untersucht. Bezüglich des Fahrgestells ist dieses Fahrzeugmodell identisch mit der rein elektrisch betriebenen und in Kapitel 9.4.11 präsentierten Fahrzeugvariante. Die verwendete Untersuchungsmethode war grundsätzlich identisch mit der vorher beschriebenen, jedoch mit etwas reduziertem Aufwand (Messungen nur bei zwei unterschiedlichen Steigungen) und beschränkt auf den Prüfstand, d. h. es fanden keine Messungen am Testgelände und keine Messungen während einer Fahrt im Realverkehr statt. Zusätzlich wurde nur eine reduzierten Anzahl von Messpositionen untersucht. Da es sich beim untersuchten Fahrzeug um ein Modell mit Schaltgetriebe handelte, konnte das Fahrzeug für die Messungen nicht vom Beifahrerplatz aus bedient werden. Deshalb erfolgten die

Messungen am Fahrerplatz nicht mit dem Hartschaum-Dummy, sondern mit fünf Messsonden (Positionen wie in Abbildung 9.275 gezeigt).



Abbildung 9.275: Anordnung der Messsonden für die Messungen am Fahrerplatz bei den Messungen mit dem Opel Corsa mit konventionellem Verbrennungsmotor-Antrieb (Sonde Nr. 1: Fuß links, Nr. 2: Fuß rechts, Nr. 3: Oberschenkel links, Nr.4: Oberschenkel rechts, Nr. 7: Unterleib (zwischen den Oberschenkeln).

9.4.14.2 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 9.276 bis Abbildung 9.281 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit bei unterschiedlichen Lastmomenten und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen.

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 9.276 bis Abbildung 9.278) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im linken Fußbereich des Fahrers im Ausmaß von ca. 0.24

bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998, wobei dort ein Anteil von ca. 0.06 auf die Reifenmagnetisierung zurückzuführen war[38]. Am Beifahrerplatz und auf der Rückbank blieben die $ExpInd_{1998}$ unterhalb von 0.06 und 0.04, wobei der $ExpInd_{1998}$ von 0.04 im Unterleibs- und Brustbereich auf der Rückbank einen Anteil von ca. 0.03 zufolge der Reifenmagnetisierung enthielt. Insofern waren beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit die maximal auftretenden Expositionsindizes im Fahrzeug mit Elektroantrieb und im konventionellen Fahrzeugmodell sehr ähnlich.

Beim Beschleunigen zeigten sich am Fahrerplatz des konventionellen Fahrzeugs sogar deutlich höhere maximale Expositionsindizes als im Fahrzeugmodell mit elektrischem Antrieb (bis zu ca. 0.8 im konventionellen Fahrzeug, bis zu ca. 0.15 im Elektroauto). Grund dafür waren „Spikes“ am Beginn des Beschleunigungsvorganges (bei ca. 3-4 km/h, Abbildung 9.282). Am Beifahrerplatz und auf der Rückbank waren die Expositionsindizes beim Beschleunigen im konventionellen und elektrischen Fahrzeugmodell ähnlich. Die beim Bremsen gemessenen maximalen Magnetfelder führten im elektrischen Fahrzeug jedoch zu höheren Expositionsindizes als im konventionellen Fahrzeug (bis zu ca. 1.1 im konventionellen Fahrzeug, bis zu ca. 2.8 im elektrischen Fahrzeug). Grund für den unerwartet hohen Expositionsindex beim Bremsen im konventionellen Fahrzeug war das Einsetzen eines offensichtlich von einem Schaltregler erzeugten Signals beim Einleiten des Bremsvorganges (Abbildung 9.283), das in ähnlicher Weise auch im elektrisch betriebenen Fahrzeug auftrat (vgl. Abbildung 9.226 mit Abbildung 9.283).

Bezüglich der Langzeit-Effektivwerte zeigten sich beim Corsa mit Verbrennungsmotor deutlich größere Messewerte (je nach Messposition um einen Faktor 2 bis 10) als im Fahrzeugmodell mit Elektroantrieb. Dieser Effekt war jedoch hauptsächlich der deutlich stärkeren Reifenmagnetisierung beim Fahrzeug mit Verbrennungsmotor zuzuschreiben. Im Hinblick auf die praktische Aussagekraft der Langzeit-Effektivwerte zeigt dies deutlich, dass diese stark von der Reifenmagnetisierung abhängen können und damit im Allgemeinen nicht zwingend mit den elektrischen Komponenten des Antriebssystems in Zusammenhang gebracht werden können.

[38] Am Fahrerplatz erfolgten im Unterschenkel-, Brust- und Kopfbereich keine Messungen, und am Beifahrersitz und auf der Rückbank erfolgten im Kopfbereich keine Messungen.

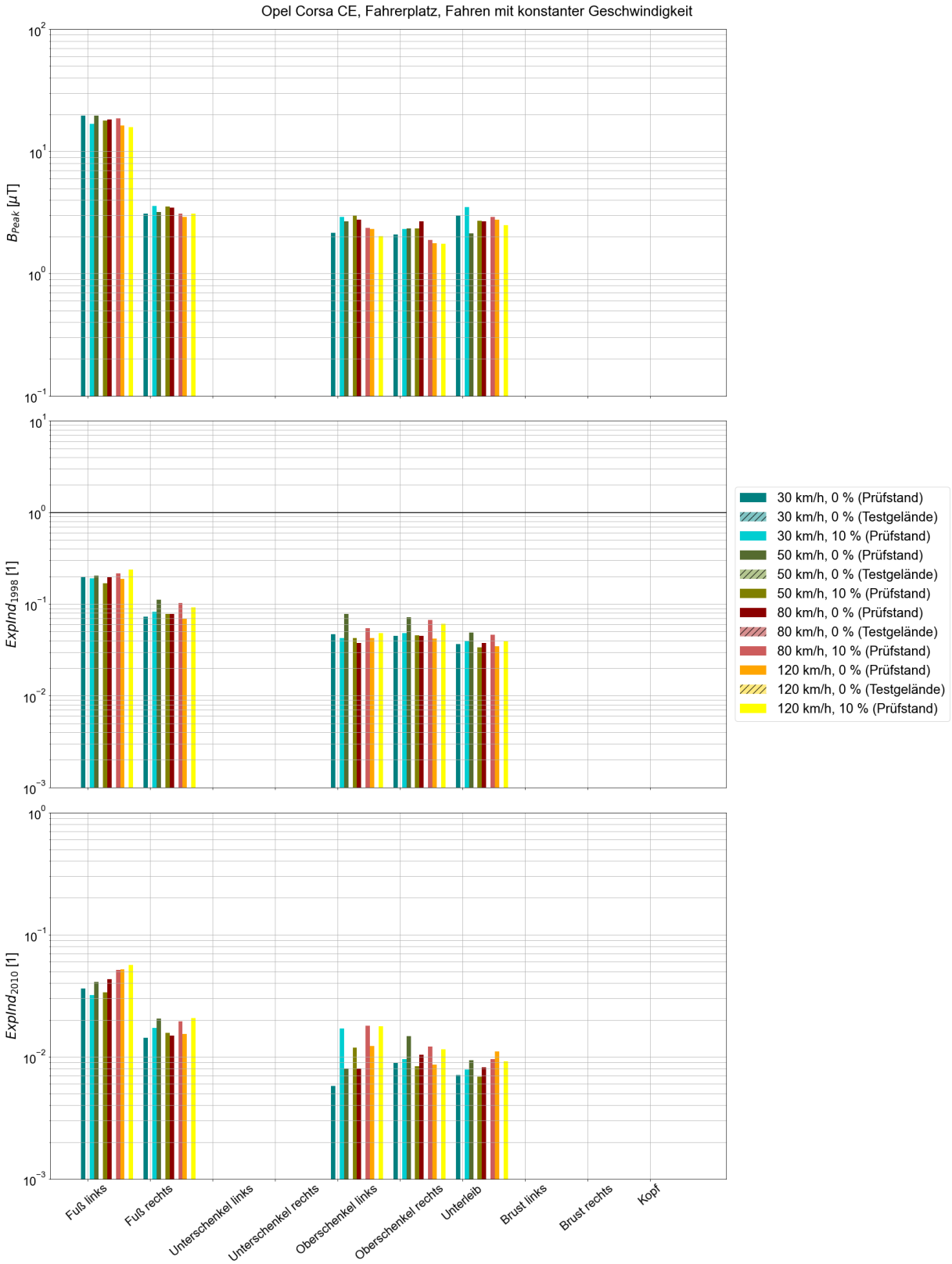


Abbildung 9.276: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Keine Messungen am Testgelände. Am Fahrerplatz erfolgten im Unterschenkel-, Brust- und Kopfbereich keine Messungen.

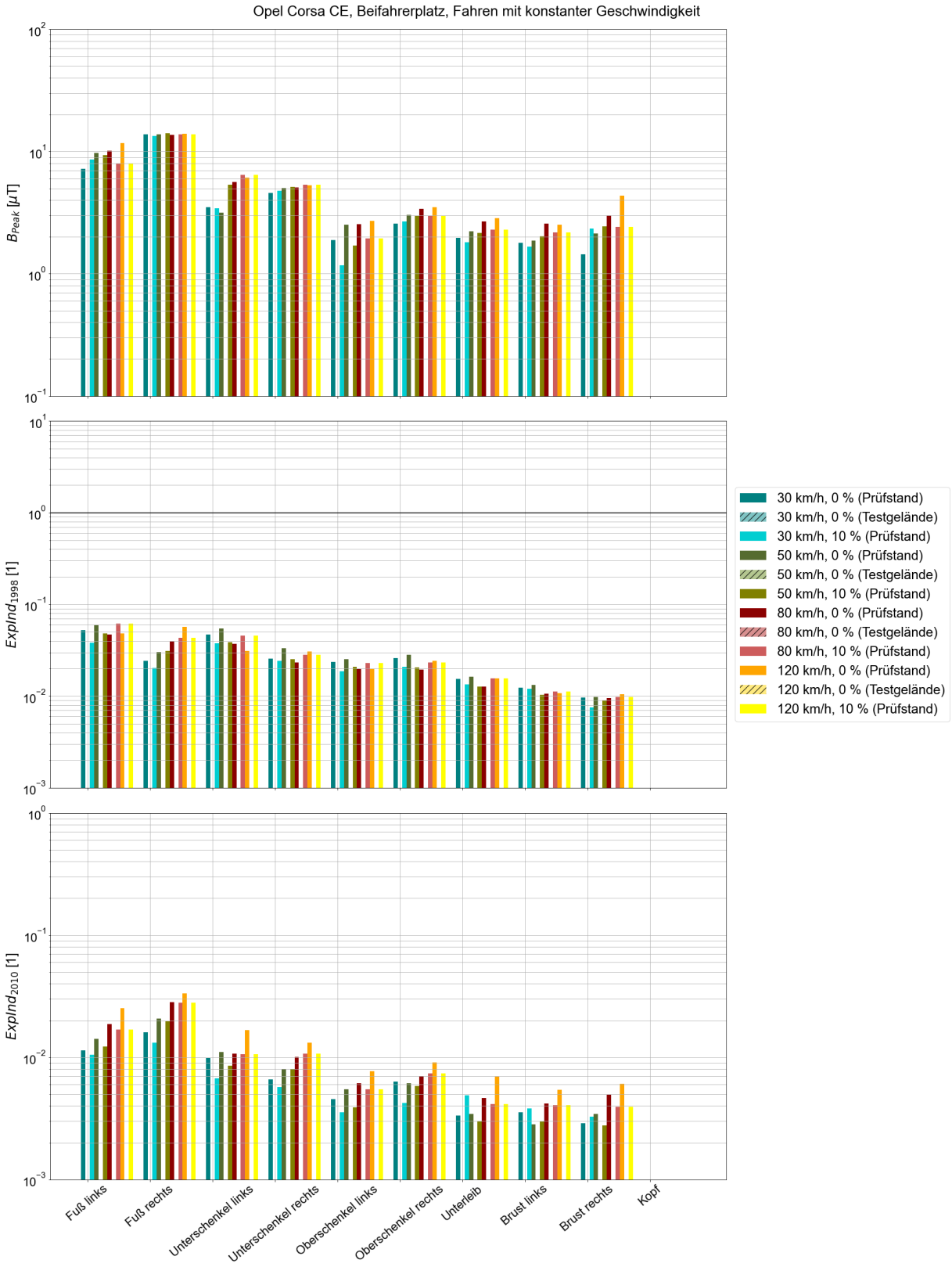


Abbildung 9.277: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Keine Messungen am Testgelände und keine Messungen im Kopfbereich.

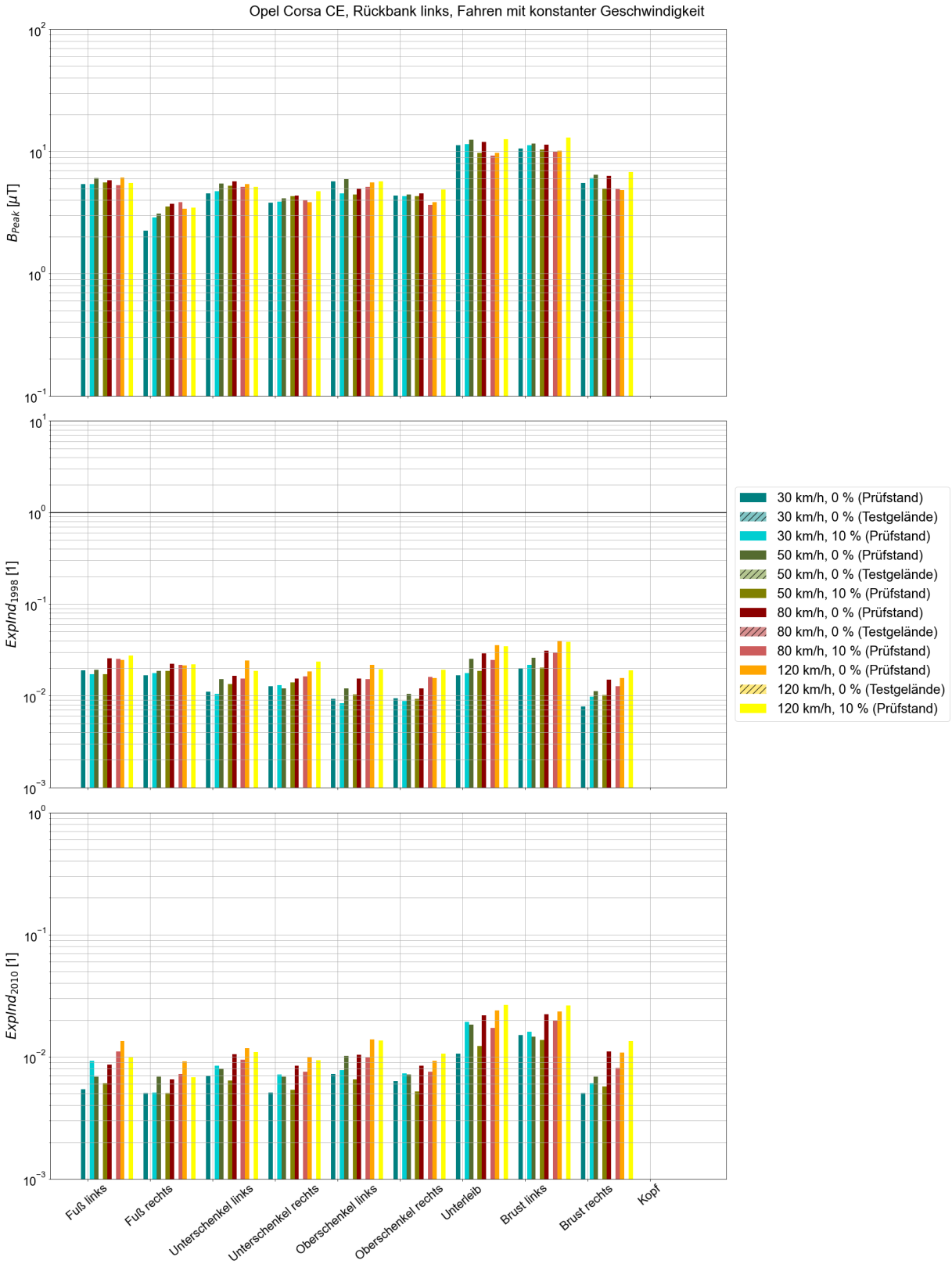


Abbildung 9.278: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Keine Messungen am Testgelände und keine Messungen im Kopfbereich.

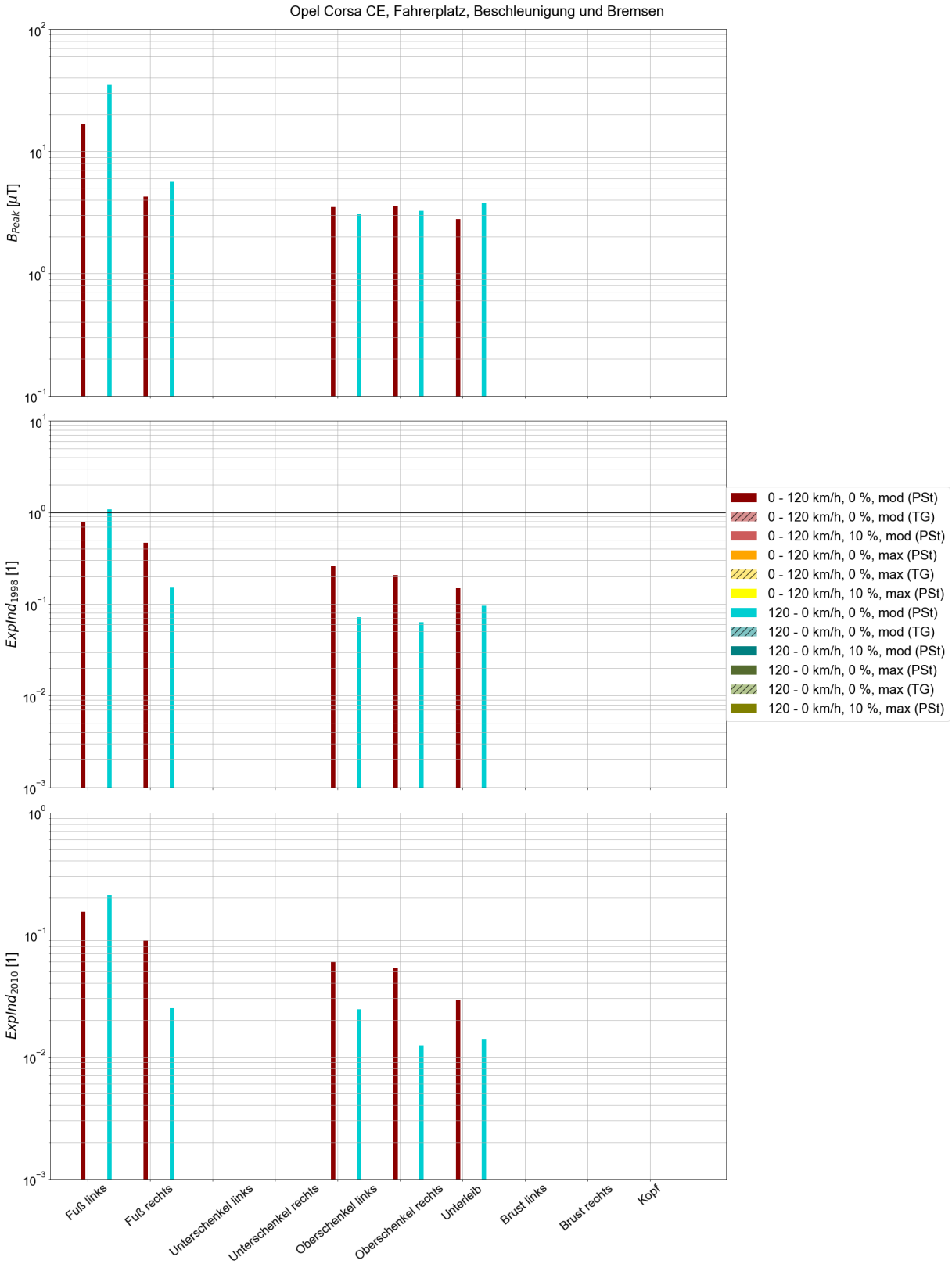


Abbildung 9.279: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen und Bremsen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

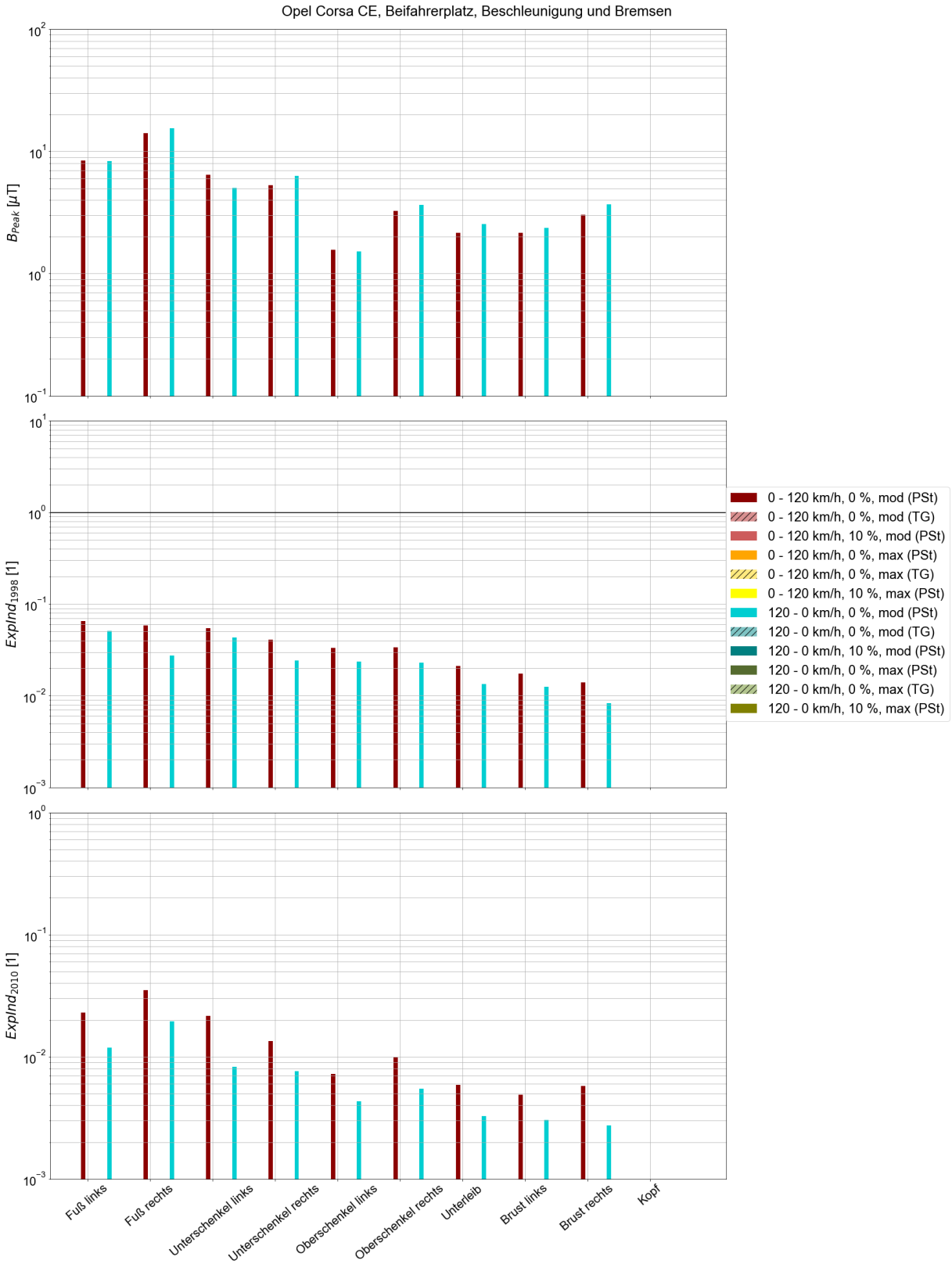


Abbildung 9.280: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz beim Beschleunigen und Bremsen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

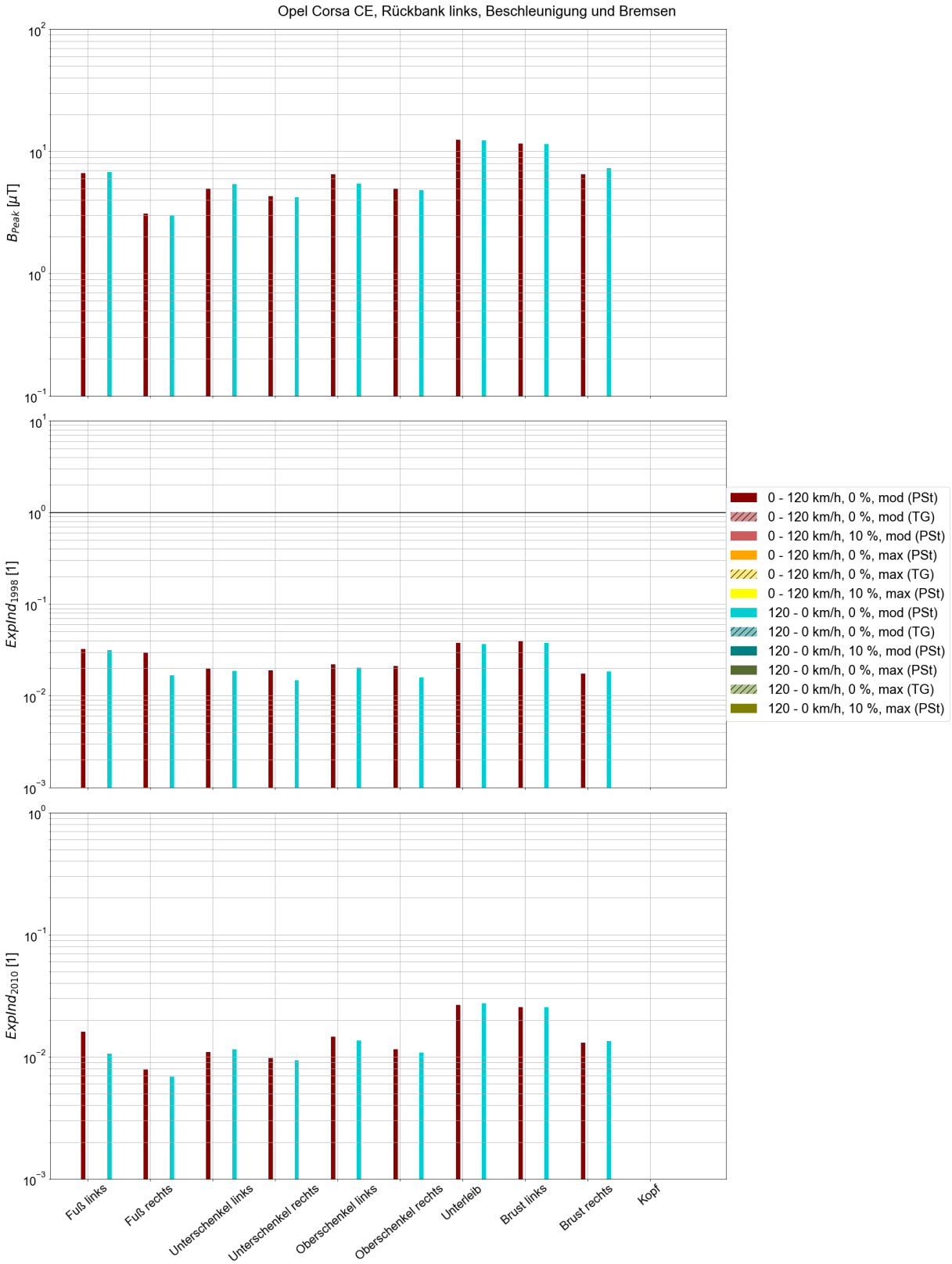


Abbildung 9.281: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) beim Beschleunigen und Bremsen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

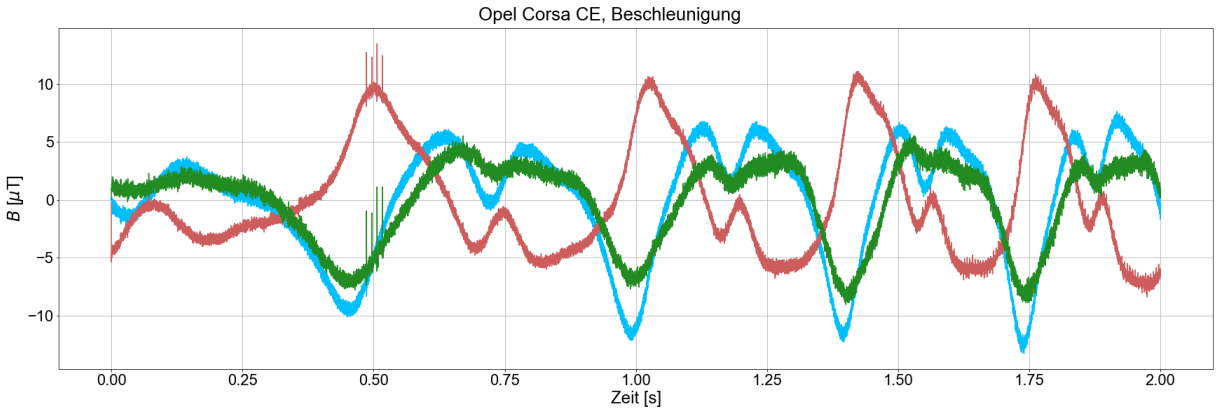


Abbildung 9.282: Verlauf der magnetischen Flussdichte in der ersten Phase des Beschleunigungsvorganges (bei ca. 3-4 km/h), gemessen im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz. Die bei Sekunde 0.5 sichtbaren Spikes im Signalverlauf verursachen einen $ExpInd_{1998}$ von ca. 0.8).

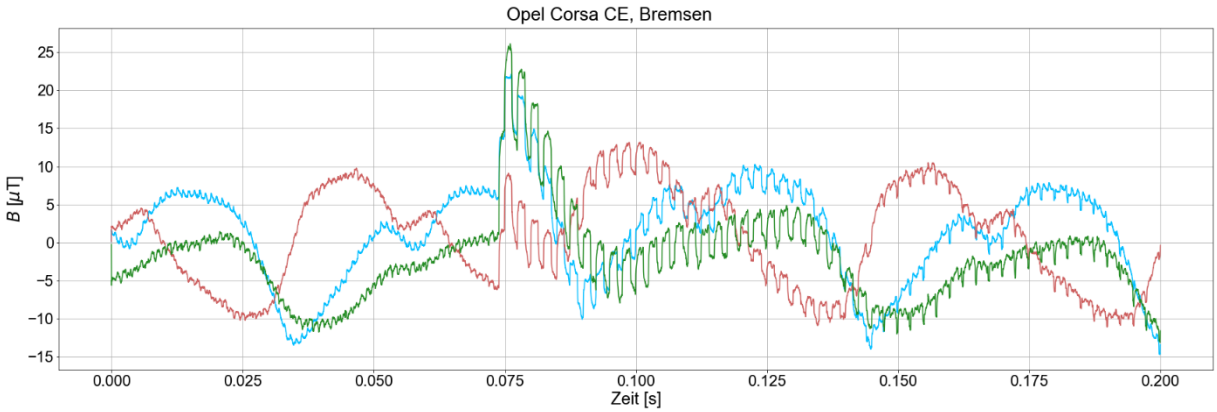


Abbildung 9.283: Verlauf der magnetischen Flussdichte während des Einleitens des Bremsvorganges, gemessen im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz.

9.4.14.3 Magnetfeldimmissionen beim WLTC

Abbildung 9.284 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der WLTC-Fahrt am Prüfstand in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ am Beifahrerplatz über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

Zusätzlich zeigt Abbildung 9.285 ein Spektrogramm aus den Messungen während des WLTC.

Abbildung 9.286 zeigt eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 9.287 zeigt schließlich die aus den Messungen resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert. Aufgrund eines Defekts liegen keine Messdaten für die Bereiche linker Unterschenkel und Kopf vor.

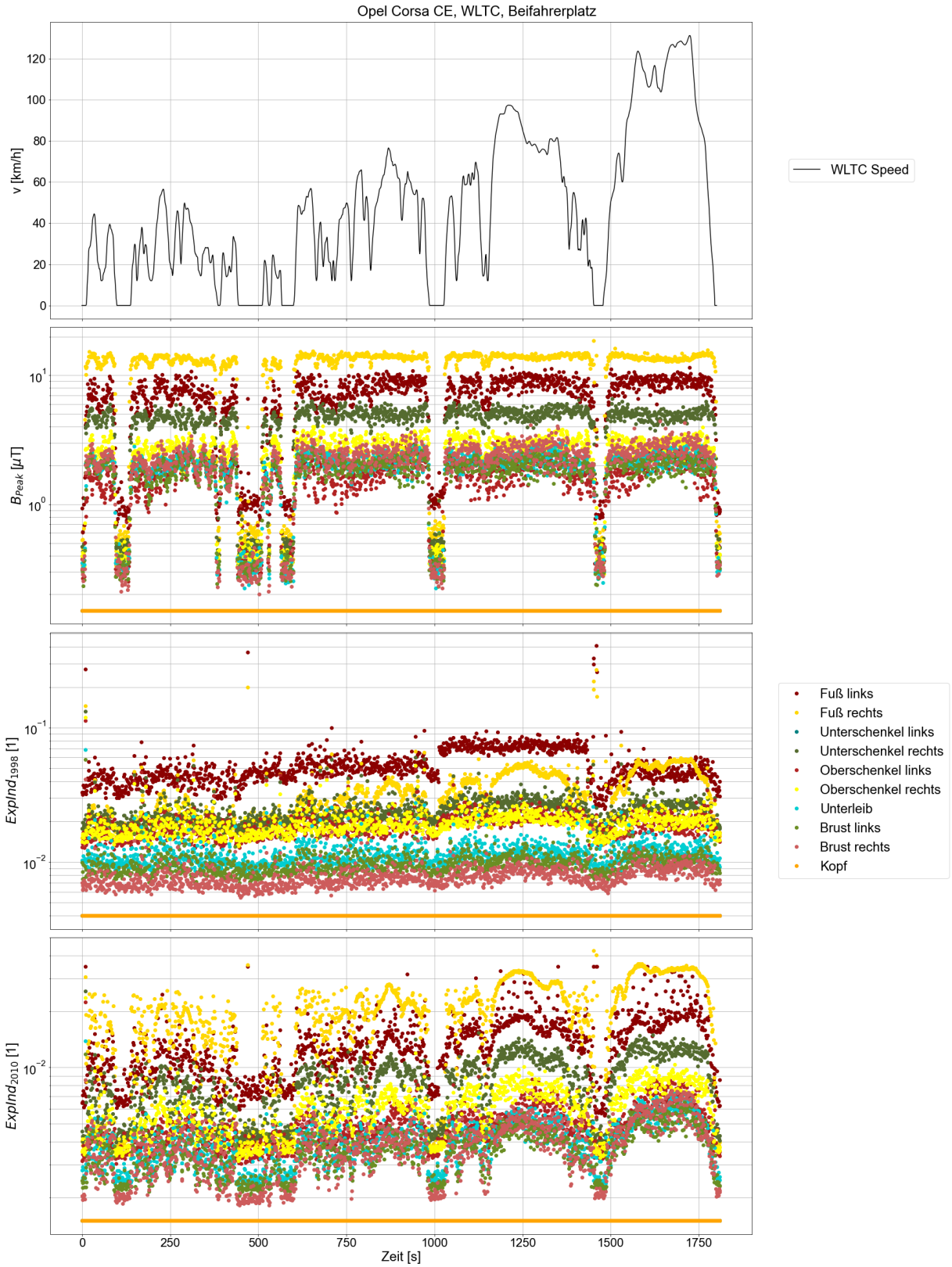


Abbildung 9.284: Von oben nach unten: Verlauf der Geschwindigkeit über die Zeit; Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz während des WLTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK}, Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 und gemäß ICNIRP 2010.

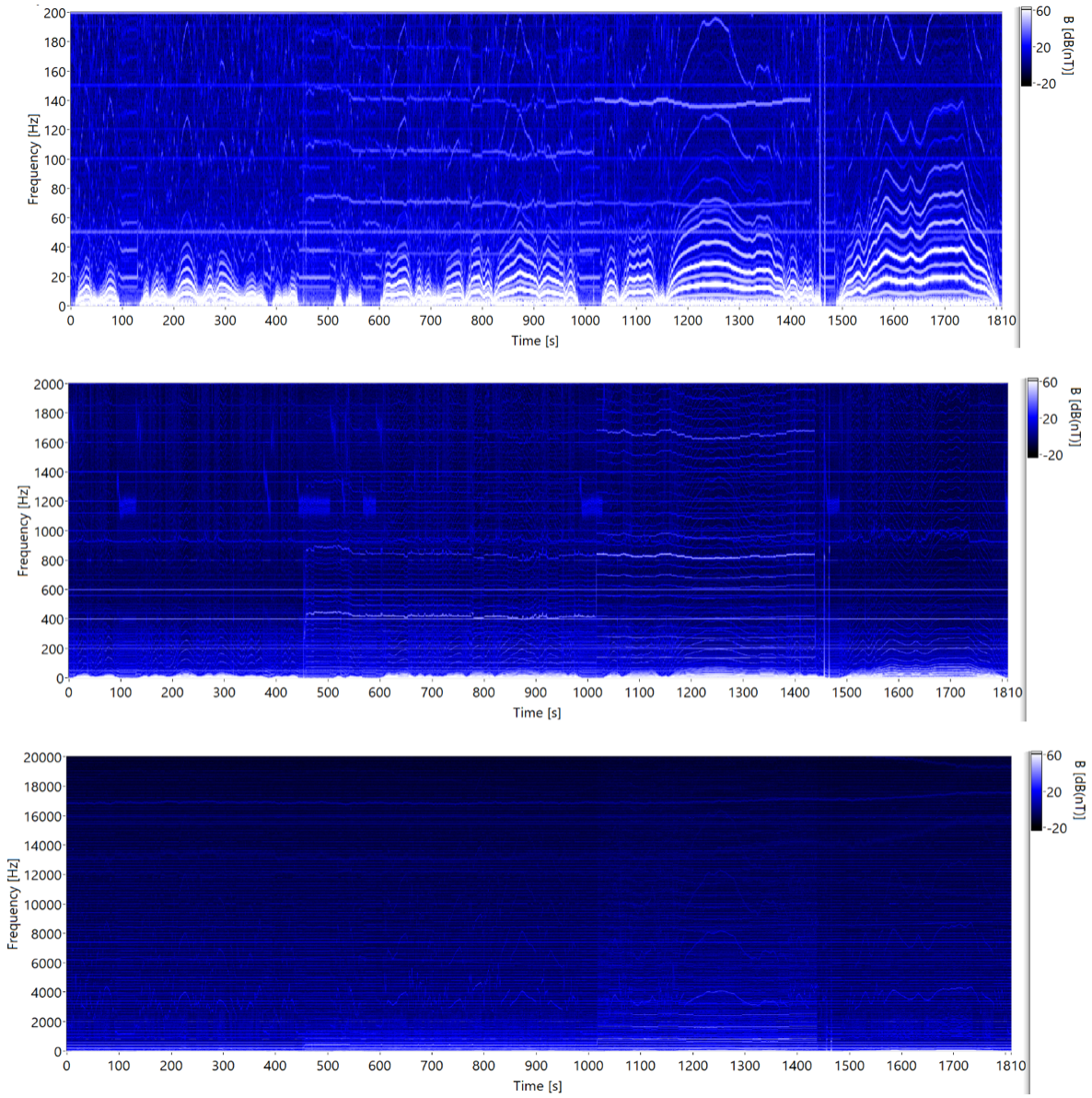


Abbildung 9.285: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) während des WLTC, gemessen im Opel Corsa mit Verbrennungsmotor, am Beifahrerplatz in Messposition P1 (linker Fuß), in drei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 – 200 Hz, Mitte: 0 – 2 kHz, unten: 0 – 20 kHz).

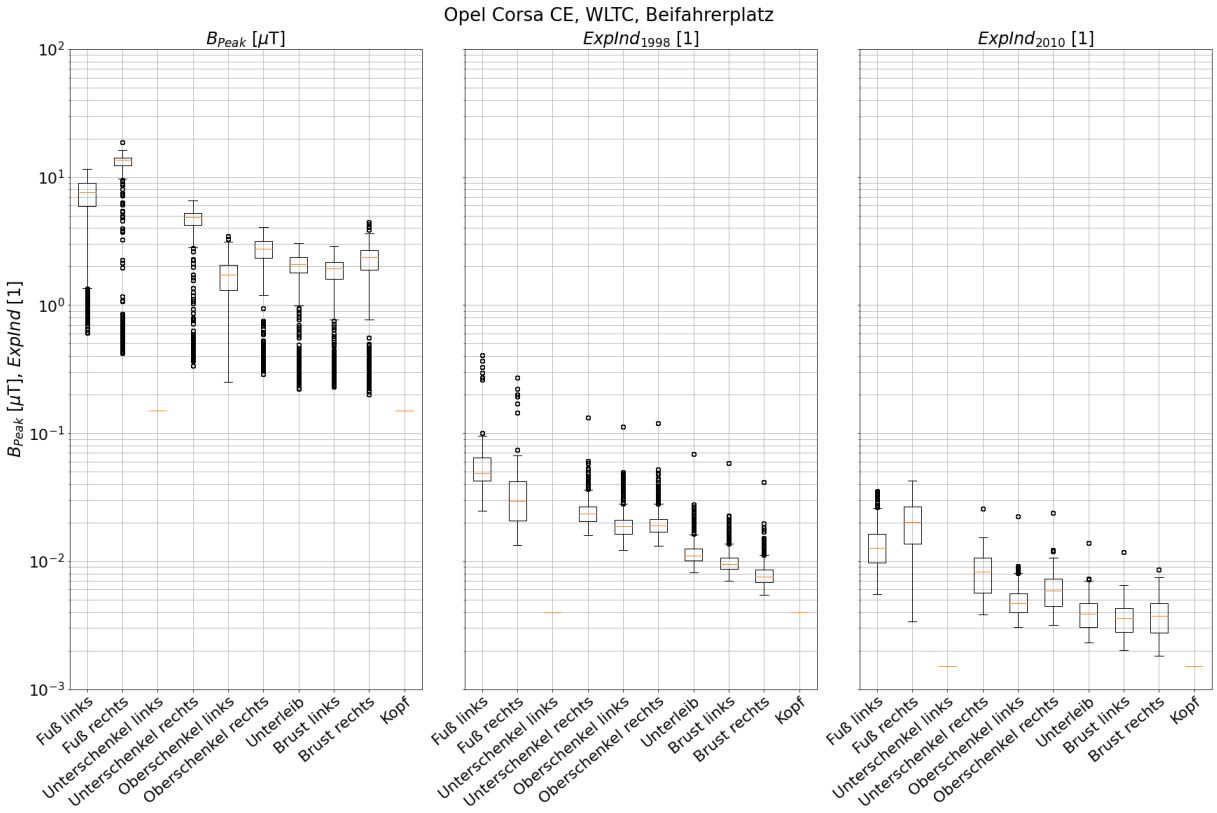


Abbildung 9.286: Statistische Auswertung der WLTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

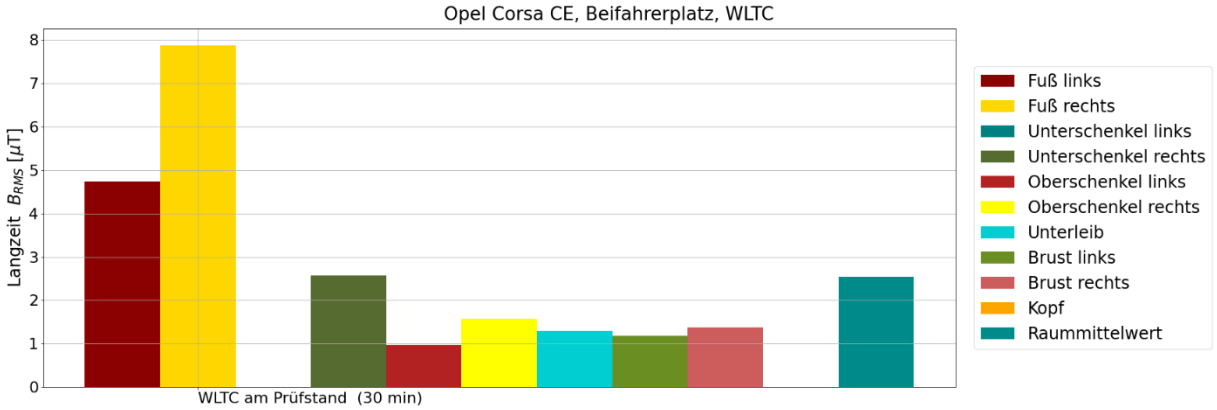


Abbildung 9.287: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WLTC-Fahrt am Prüfstand. Aufgrund der Tatsache, dass in den Raummittelwert keine Messdaten für den Kopfbereich enthalten sind, ist davon auszugehen, dass der im Diagramm gezeigte Raummittelwert die tatsächlichen Verhältnisse geringfügig überschätzt.

Aufgrund der deutlich stärkeren Magnetisierung des rechten Vorderrades beim konventionellen Fahrzeugmodell im Vergleich zum untersuchten Fahrzeug mit Elektroantrieb sind die in den beiden Fahrzeugmodellen gemessenen Langzeit-Effektivwerte, zumindest in den unteren Körperregionen nicht direkt vergleichbar.

9.4.14.4 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, verursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Ähnlich wie im elektrischen Fahrzeugmodell traten die höchsten $ExpInd_{1998}$ beim Einschalten des Fahrzeugs ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 5.7 im Bereich des linken Fußes am Fahrerplatz) auf, wobei zwei unterschiedliche Signalformen nach dem Drücken des Einschaltknopfs gemessen werden konnten (Abbildung 9.288). Auf Basis der Beobachtungen während der Messungen dürfte es sich bei Signalform A (führt zu $ExpInd_{1998}$ von 5.7) um jene handeln, die auftritt, wenn das Fahrzeug über einen längeren Zeitraum abgeschaltet war, während Signalform B (führt zu $ExpInd_{1998}$ von 2.8) des Öfteren während zwischenzeitlichem Aus- und Einschalten der Zündung beobachtet werden konnte. Dies konnte jedoch nicht eindeutig festgestellt werden.

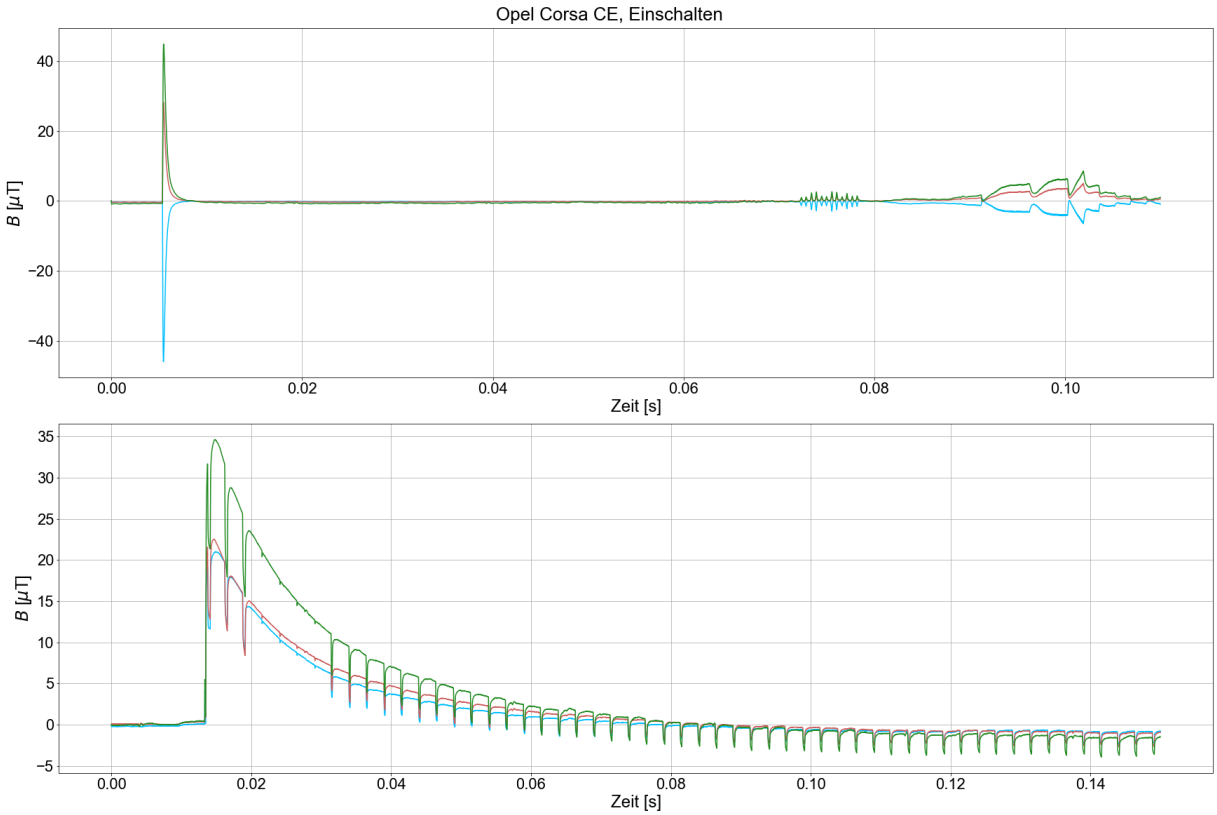


Abbildung 9.288: Zwei unterschiedliche Zeitverläufe A (oben) und B (unten) der magnetischen Flussdichte, die im Zusammenhang mit dem Einschalten des Fahrzeugs auftreten, gemessen im linken Fußbereich des Fahrerplatzes.

Abbildung 9.289 bis Abbildung 9.291 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz, Beifahrerplatz und am linken Sitzplatz der Rückbank im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

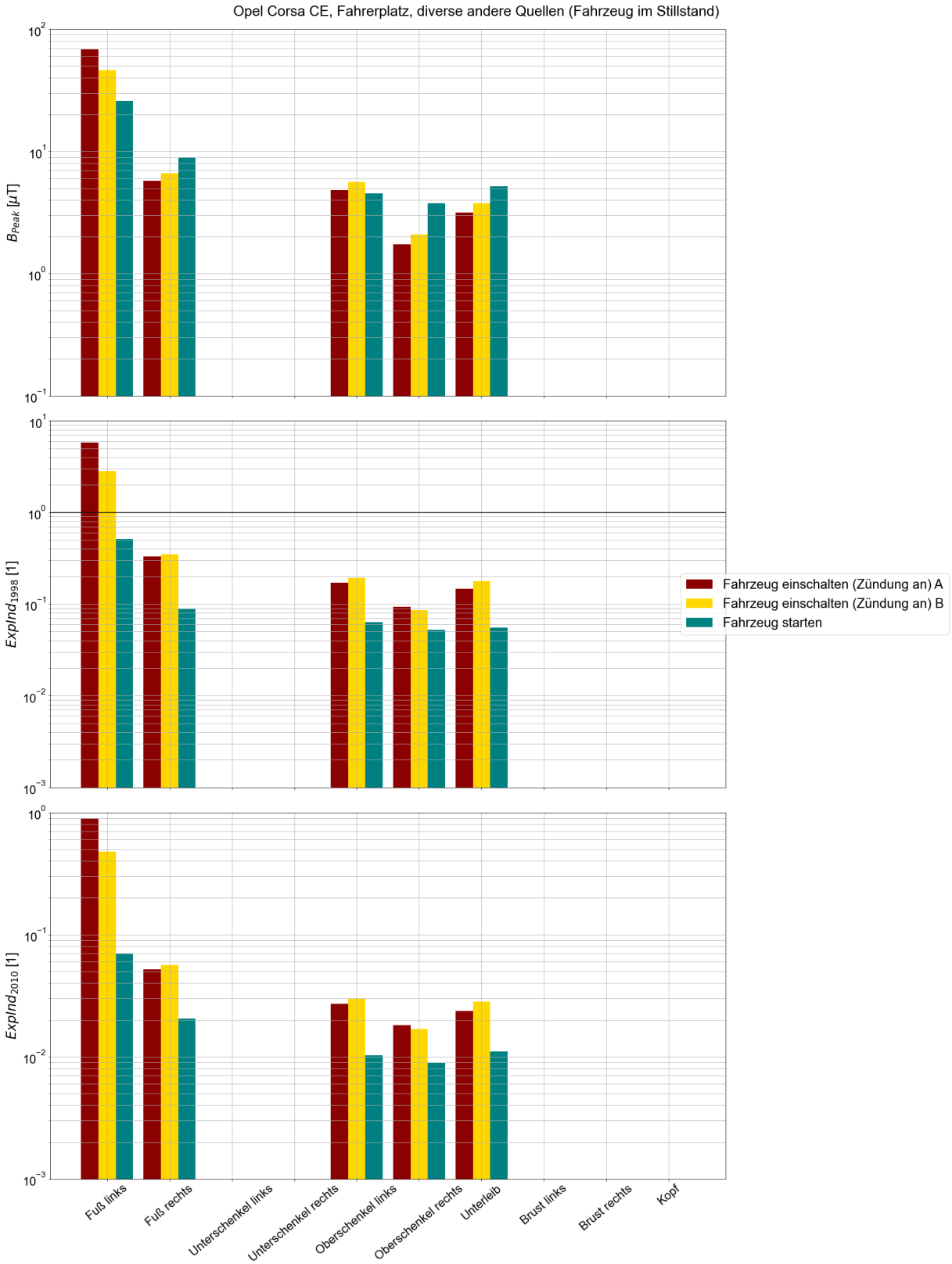


Abbildung 9.289: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

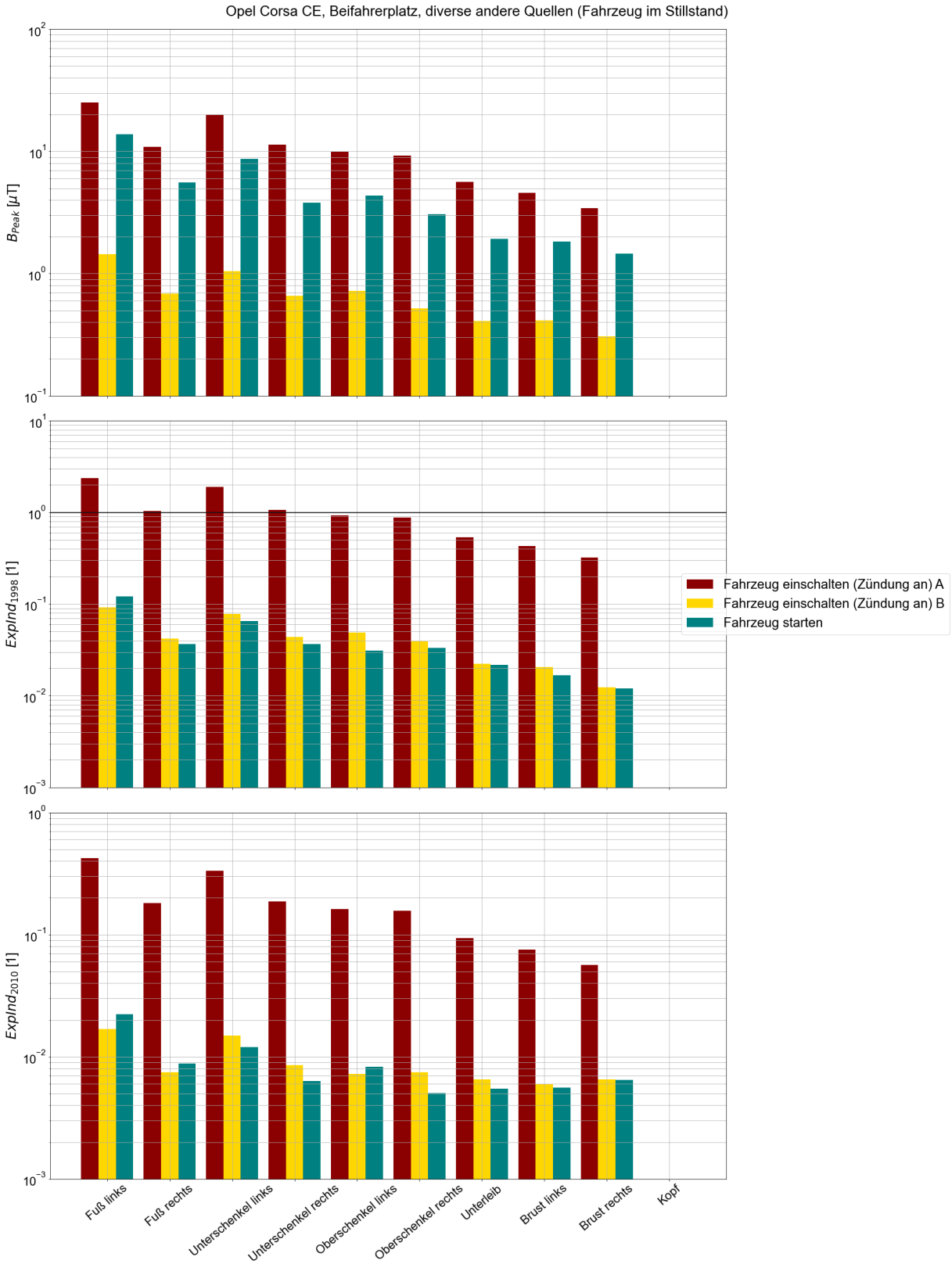


Abbildung 9.290: Magnetfeldimmissionen am Beifahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

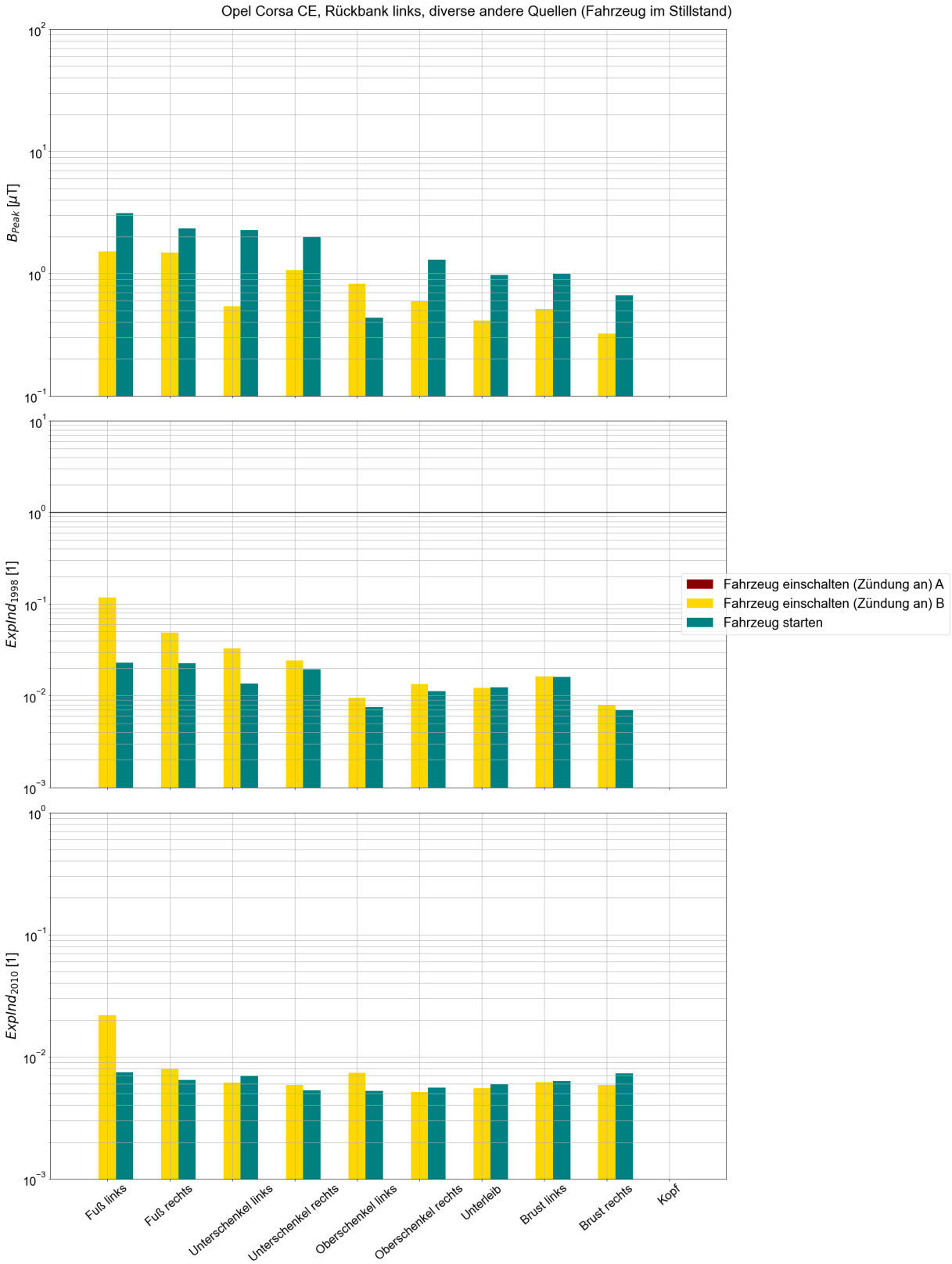


Abbildung 9.291: Magnetfeldimmissionen auf der Rückbank (linker Sitzplatz) zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). „Fahrzeug einschalten A“ wurde auf der Rückbank nicht untersucht.

9.5 Diskussion der Messergebnisse

9.5.1 Gemessene magnetische Flussdichtewerte und Expositionsindizes

Tabelle 9.4 fasst die wichtigsten Daten hinsichtlich der während des Fahrens und im Stillstand maximal gemessenen magnetischen Immissionen in allen untersuchten Fahrzeugen zusammen.

Tabelle 9.5 enthält weitere Details hinsichtlich der unmittelbar mit dem Fahren in Zusammenhang stehenden Immissionen. Während des Fahrens traten die Maximalimmissionen erwartungsgemäß in allen Fahrzeugen entweder während des Beschleunigens oder des Bremsens auf (niemals während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit). Es zeigt sich für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in den meisten Fällen auch der erwartbare Trend geringfügig höherer Immissionen bei größerer Steigung. Beim Bremsen ist dieser Trend nicht eindeutig erkennbar, da die Stärke der möglichen Rekuperation vom Fahrzeugtyp und vom Batterieladezustand abhängt. In den meisten Fällen wurden die während des Fahrens auftretenden maximalen Immissionen durch transiente Vorgänge während des Bremsens verursacht. In sechs der 14 untersuchten Fahrzeuge lagen die maximalen, während des Beschleunigens oder Bremsens gemessenen $ExpInd_{1998}$ oberhalb von 1.0 (auch im Fahrzeug mit Verbrennungsmotor). Der höchste lokal gemessene $ExpInd_{1998}$ lag bei 12.0 und wurde durch das Zuschalten des Verbrennungsmotors während des Beschleunigens in einem PHEV verursacht. Bezüglich der Immissionen während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit wird angemerkt, dass im Rahmen dieses Vorhabens Messungen nur mit Geschwindigkeiten bis maximal 120 km/h durchgeführt wurden. Aus den Detaildarstellungen der Messergebnisse (Kapitel 9.4) ist ersichtlich, dass es in den meisten Fahrzeugen einen Trend ansteigender Expositionsindizes mit zunehmender Geschwindigkeit gibt (nicht jedoch bezüglich B_{PEAK}). Insofern ist anzunehmen, dass während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit > 120 km/h die Expositionsindizes auch größer sein können als in Tabelle 9.5 zusammengefasst. Es erscheint jedoch unwahrscheinlich, dass die Expositionsindizes beim Fahren mit konstanten Geschwindigkeiten > 120 km/h größer werden als die während des Bremsens und/oder Beschleunigens gemessenen Maximalwerte.

Deutlich höhere Expositionsindizes als jene während des Fahrens vom elektrischen Antriebssystem verursachten, wurden in allen untersuchten Fahrzeugen jedoch durch transiente Vorgänge verursacht (Tabelle 9.4), die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem elektrischen Antriebssystem stehen. In zwölf der 14 untersuchten Fahrzeuge verursachte das Einschalten des Fahrzeugs lokale $ExpInd_{1998}$ größer als 1.0, mit einem Maximalwert von 15.0. Anzumerken ist jedoch, dass die in Tabelle 9.4 zusammengefassten Immissionen, verursacht durch Feldquellen, die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem elektrischen Antriebssystem stehen, nur bedingt für einen Vergleich der unterschiedlichen Fahrzeugmodelle verwendet werden können, da nicht bei allen Fahrzeugen alle Feldquellen betrachtet und nicht an allen Sitzplätzen gemessen wurde. Auch wurden die nicht vom Antriebssystem stammenden Immissionen an den Sitzplätzen, an denen gemessen wurde, in einigen Fahrzeugen nicht in allen Körperregionen gemessen.

Allgemein zeigen die Daten große Streubreiten über die untersuchten Fahrzeugmodelle und innerhalb eines Fahrzeugmodells große räumliche Variationen der Immissionen neben den Variationen durch die unterschiedlichen Fahrzustände.

Tabelle 9.4: Tabellarische Zusammenfassung der während der Messungen in den zweispurigen Fahrzeugen aufgetretenen Maximalwerte der magnetischen Flussdichte B_{PEAK} sowie der Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$. Die Ergebnisse sind getrennt für die Situation während des Fahrens und im Stillstand aufgelistet. Expositionsindizes > 1 sind in Fettdruck dargestellt.

			Renault ZOE	Tesla Model 3	BMW i3 BEV	VW ID.3	Audi e-tron quattro	Peugeot e-208	Porsche Taycan	Aiways U5	Hyundai Ioniq 5	Fiat 500e	Opel Corsa Electric	Volkswagen Passat PHEV	Mercedes GLE 350 de PHEV	Opel Corsa (Verbrennungsmotor)
Fahren	Max. B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	15.2	133	74.6	23.7	52.0	16.4	85.3	40.3	22.6	20.3	40.9	17.5	768	35.0
		Sitzplatz	R_L	R_R	B	R_M	R_M	R_R	R_R	R_L	B	F	F	R_L	F	F
		Position	F_R	F_R	F_L	F_L	F_R	U_L	U_L	F_L	F_L	U_L	F_L	F_L	F_R	F_L
		Zustand/Ereignis	$-a_{max}$	$-a_{max}$	$-a_{max}$	$-a_{max}$	$-a_{mod}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$-a_{mod}$	$+a_{ma}$	$-a_{mod}$
	Max. $ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.91	0.63	0.30	0.19	**1.23**	**1.27**	**3.20**	0.51	0.11	0.66	**2.82**	0.36	**12.0**	**1.09**
		Sitzplatz	B	B	R_R	F	B	F	B	F	F	F	F	F	F	F
		Position	F_R	F_L	UL	F_R	U_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L
		Zustand/Ereignis	$-a_{mod}$	$+a_{ma}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$-a_{mod}$	$-a_{max}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$+a_{mo}$	$+a_{ma}$	$-a_{mod}$
	Max. $ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.16	0.17	0.05	0.04	0.28	0.20	0.28	0.10	0.03	0.14	0.49	0.05	**2.18**	0.21
		Sitzplatz	B	F	R_R	F	B	F	B	F	B	F	F	B	F	F
		Position	F_R	F_R	UL	F_R	U_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L
		Zustand/Ereignis	$-a_{mod}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$-a_{mod}$	$-a_{max}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$-a_{max}$	$+a_{ma}$	$+a_{ma}$	$-a_{mod}$
	Langzeit B_{RMS} Raummittel[1] WLTC [µT]		0.54	1.20	1.13	0.69	1.06	0.55	1.61	0.93	0.87	1.85	0.47	0.63	1.19	2.54
	Langzeit B_{RMS} Raummittel[1] Realverkehr [µT]		0.49	2.00	1.63	0.92	1.40	0.99	1.96	1.30	1.30	1.43	0.92	1.23	1.62	-
Andere Quellen / nicht Antrieb, im Stillstand[2]	Max. B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	25.8	77.8	12.4	9.33	9.90	42.0	48.8	38.7	74.9	17.3	94.2	73.2	243	68.3
		Sitzplatz	R_L	R_R	B	F	B	B	B	B	R_R	F	F	F	B	F
		Position	F_L	F_R	UL	F_L	U_L	F_R	F_R	O_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L	F_L
		Zustand/Ereignis/Quelle	E/A	Bre	SH[3]	SH[3]	E/A	FH[3]	E/A	SH[3]	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A
	Max. $ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	**1.10**	**7.04**	0.57	**1.80**	**1.12**	**1.89**	**1.72**	**2.42**	**1.68**	**1.66**	**4.25**	**3.05**	**15.0**	**5.76**
		Sitzplatz	F	B	B	B	B	F	B	B	F	F	F	F	B	F
		Position	F_L	F_R	UL	F_R	U_L	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L	F_L	F_L	F_L
		Zustand/Ereignis/Quelle	SH[3]	E/A	SH[3]	E/A	E/A	Bre	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A
	Max. $ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.20	**1.07**	0.08	0.33	0.26	0.38	0.24	0.41	0.32	0.30	0.57	0.46	**2.01**	0.89
		Sitzplatz	F	B	B	B	B	F	B	B	F	F	F	F	B	F
		Position	F_L	F_R	F_R	F_R	U_L	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L	F_L	F_L	F_L
		Zustand/Ereignis/Quelle	SH[3]	E/A	E/A	E/A	E/A	Bre	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A	E/A

Legende

Sitzplätze: F…Fahrerplatz, B…Beifahrerplatz, R_L…Rückbank links, R_M…Rückbank Mitte, R_R…Rückbank rechts
Position: F_L…Fuß links, F_R…Fuß rechts, U_L…Unterschenkel links, U_R…Unterschenkel rechts, O_L…Oberschenkel links, O_R…Unterschenkel rechts, UL…Unterleib
Zustand/Ereignis/Quelle: v_x…Fahren konst. Geschw. x, $\pm a_{mod}$…moderat Beschleunigen (+) oder Bremsen (-), $\pm a_{max}$ …maximal Beschl. (+) oder Bremsen (-), E/A…Ein-/Ausschalten des Fahrzeugs, SH…Sitzheizung, Lü…Lüfter (Klimaanlage), KGo…KeylessGo, Bli…Blinker, Bel…Beleuchtung, Tür…Türverriegelung, Bre…Betätigung Bremspedal im Stillstand, FH … Fensterheber

Anmerkungen

[1)] Details zur Berechnung, siehe Kapitel 9.4

[2)] Da nicht in allen Fahrzeugen alle genannten Quellen untersucht wurden, ist die Vergleichbarkeit der angegebenen Maximalwerte nur eingeschränkt gegeben.

[3)] Nicht alle der betrachteten Sitzplätze bzw. Messpositionen wurden bezüglich dieses/dieser Zustandes/Ereignisse/Quelle betrachtet, d.h. höhere Werte an anderen Positionen im Fahrzeug können nicht ausgeschlossen werden, wodurch die Fahrzeugmodelle nur bedingt miteinander verglichen werden können.

Tabelle 9.5: Tabellarische Zusammenstellung der während des Fahrens in den zweispurigen Fahrzeugen aufgetretenen Maximalwerte der magnetischen Flussdichte B_{PEAK} sowie der Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$. Die Ergebnisse sind getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigen und Bremsen aufgelistet. Expositionsindizes > 1 sind in Fettdruck dargestellt.

			Renault ZOE	Tesla Model 3	BMW i3 BEV	VW ID.3	Audi e-tron quattro	Peugeot e-208	Porsche Taycan	Aiways U5	Hyundai Ioniq 5	Fiat 500e	Opel Corsa Electric	Volkswagen Passat PHEV	Mercedes GLE 350 de PHEV	Opel Corsa (Verbrennungsmotor)
max. elektr, Antriebsleistung [kW]			100	377	135	150	300	100	300	150	225	87	100	85	100	-
Fahren mit konstanter Geschwindigkeit	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	2.65	13.1	12.9	6.03	8.80	5.73	17.0	14.9	4.03	8.41	6.04	8.63	31.4	19.6
		Sitzplatz	F	B	B	F	F	F	R_R	B	F	R_R	B	F	B	F
		Position	F_L	F_R	F_R	U_L	F_L	F_L	UL	F_R	F_L	U_L	F_L	F_L	F_L	F_L
	$ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.06	0.17	0.11	0.09	0.08	0.07	0.18	0.19	0.06	0.62	0.14	0.29	**1.01**	0.24
		Sitzplatz	F	B	R_R	F	B	F	B	B	B	F	F	F	F	F
		Position	F_L	F_R	UL	F_L	F_L	F_L	F_L	F_R	F_R	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L
	$ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.01	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.04	0.03	0.01	0.13	0.03	0.04	0.14	0.06
		Sitzplatz	F	B	B	F	F	F	R_R	F	B	F	F	F	F	F
		Position	F_L	F_R	F_R	F_L	F_L	F_L	B_R	F_R	F_R	F_R	U_L	F_L	F_L	F_L
Beschleunigen	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	4.96	35.0	15.0	16.9	36.8	5.01	85.3	15.2	5.47	20.3	5.31	11.6	768	16.6
		Sitzplatz	F	R_R	B	F	R_M	R_R	R_R	F	B	F	B	F	F	F
		Position	F_L	F_L	F_R	F_R	F_L	UL	U_L	F_R	F_R	U_L	F_L	F_L	F_R	F_L
	$ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.47	0.63	0.30	0.11	**1.23**	0.08	**1.05**	0.22	0.07	0.66	0.14	0.36	**12.0**	0.79
		Sitzplatz	F	B	R_R	F	B	F	B	F	B	F	F	F	F	F
		Position	F_L	F_L	UL	F_L	U_L	F_R	O_L	F_L	F_R	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L
	$ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.09	0.12	0.05	0.02	0.28	0.01	0.24	0.04	0.01	0.14	0.03	0.05	**2.18**	0.15
		Sitzplatz	F	B	R_R	F	B	F	B	F	B	F	B	B	F	F
		Position	F_L	F_L	UL	F_L	U_L	F_R	O_L	F_L	F_R	F_R	U_L	F_L	F_L	F_L
Bremsen	B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	15.2	133	74.6	23.7	52.0	16.4	69.3	40.3	22.6	14.7	40.9	17.5	47.2	35.0
		Sitzplatz	R_L	R_R	B	R_M	R_M	R_R	B	R_L	B	F	F	R_L	B	F
		Position	F_R	F_R	F_L	F_L	F_R	U_L	F_L	F_L	F_L	U_L	F_L	F_L	F_L	F_L
	$ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	0.91	0.36	0.30	0.19	0.77	**1.27**	**3.20**	0.51	0.11	0.35	**2.82**	0.26	**1.37**	**1.09**
		Sitzplatz	B	B	B	F	R_M	F	B	F	F	F	F	B	B	F
		Position	F_R	F_R	F_R	F_R	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L
	$ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.16	0.17	0.05	0.04	0.09	0.20	0.28	0.10	0.03	0.05	0.49	0.03	0.13	0.21
		Sitzplatz	B	F	R_R	F	R_M	F	B	F	B	F	F	B	F	F
		Position	F_R	F_R	UL	F_R	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_R	F_L	F_L	F_L	F_L

Legende
Sitzplätze: F…Fahrerplatz, B…Beifahrerplatz, R_L…Rückbank links, R_M…Rückbank Mitte, R_R…Rückbank rechts
Position: F_L…Fuß links, F_R…Fuß rechts, U_L…Unterschenkel links, U_R…Unterschenkel rechts, O_L…Oberschenkel links, O_R…Unterschenkel rechts, UL…Unterleib, B_R…Brust rechts

Klar erkennbar ist, dass die größten Expositionsindizes entweder in den Fußbereichen oder vereinzelt auch im Unterleibsbereich der Rückbank auftreten. Dies ist insofern plausibel, als wesentliche Teile der Verkabelung im Fahrzeugboden und/oder nahe den Fußbereichen

verbaut sind bzw. die Füße am Fahrer- und Beifahrerplatz auch sehr nahe am Antriebsmotor bzw. Inverter liegen können.

Vergleichsweise große Expositionsindizes im Unterleibsbereich der Rückbank traten typischerweise dann auf, wenn die Batterieanschlussklemmen bzw. die dort angeklemmten Kabel in diesen Bereichen nahe an der Rückbank liegen bzw. tendenziell auch in kleineren Fahrzeugen, da dort geringere Distanzen zu den felderzeugenden Komponenten durch die räumliche Limitierung erzwungen werden als in größeren Fahrzeugen.

Die Ermittlung der konkreten Ursachen für die beobachteten, teilweise überraschend großen Expositionsindizes, d. h. die Identifikation der verursachenden Fahrzeugkomponente sowie die elektrischen Vorgänge im Fahrzeug, welche diese Expositionsindizes verursachten, waren nicht Gegenstand des Vorhabens. Dazu wäre einerseits die Kenntnis der exakten Positionen aller relevanten Fahrzeugkomponenten erforderlich (ohne Zerlegung des Fahrzeuges nicht eruierbar) und andererseits die Mitwirkung der Fahrzeughersteller (war aus Gründen der Unabhängigkeit des Vorhabens von vornherein ausgeschlossen).

In einzelnen Fällen konnten jedoch auf Grundlage der in den Rettungskarten der Fahrzeuge vorhandenen Informationen plausible Erklärungen für die ermittelten Expositionsindizes abgeleitet werden. Beispielsweise dürften die mit Abstand höchsten gemessenen $ExpInd_{1998}$ von 12 und 15 im Fußbereich des Mercedes GLE 350 de PHEV von einer dort im Hinblick auf die Exposition ungünstig untergebrachten Verkabelung verursacht werden (vgl. Abbildung 9.255).

Die über Körperdimensionen räumlich gemittelten Langzeit-RMS-Werte der magnetischen Flussdichte liegen zwischen 0.47 und 2.54 µT. Bemerkenswert erscheint hierbei die Tatsache, dass der Maximalwert von 2.54 µT im Fahrzeug mit Verbrennungsmotor gemessen wurde. Diese Tatsache konnte auf den Umstand zurückgeführt werden, dass die Reifenmagnetisierung bei diesem Fahrzeug auffallend groß war und zu außergewöhnlich hohen RMS-Werten im Fußbereich führte.

Interessant erscheint auch die Frage, ob sich ein Trend zu größerer Magnetfeldexposition bei größerer maximaler elektrischer Antriebsleistung aus den Messdaten ableiten lässt. Dazu sind die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse in Tabelle 9.6 zusammengefasst.

Aus den in der Tabelle gezeigten Korrelationskoeffizienten ist zunächst klar zu erkennen, dass es offensichtlich keine nennenswerte Korrelation zwischen den maximal aufgetretenen Expositionsindizes und der maximalen Antriebsleistung der Fahrzeuge gibt ($r < 0.2$). Im Hinblick auf eine Expositionsbewertung auf Grundlage der ICNIRP-Empfehlungen ist daher die maximale Antriebsleistung der Fahrzeuge kein sinnvoller Prädiktor. Jedoch zeigen sich Korrelationskoeffizienten im Bereich zwischen 0.75 und 0.80 bezüglich des Zusammenhangs zwischen maximaler Antriebsleistung und der maximal gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte B_{PEAK}, wenn die Daten des offensichtlich als Ausreißer wirkenden Mercedes GLE 350 de PHEV aus der Analyse eliminiert werden. Bemerkenswert ist auch die Tatsache einer nur geringen Korrelation ($r = 0.35 – 0.39$) zwischen den während des WLTC gemessenen Langzeit B_{RMS} Werten mit der maximalen Antriebsleistung, während die Korrelation zwischen den während der Realfahrten gemessenen Langzeit B_{RMS} Werten mit der maximalen Antriebsleistung deutlich größer ist ($r = 0.71 – 0.72$). Diese Tatsache kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die verfügbare Antriebsleistung während des WLTC deutlich weniger ausgeschöpft wird als während Fahrten im Realverkehr.

Tabelle 9.6: Zusammenfassung der Ergebnisse einer Korrelationsanalyse zur Frage, ob in Fahrzeugen mit größerer installierter maximaler Antriebsleistung tendenziell auch eine größere Magnetfeldexposition während des Fahrens auftritt. Angegeben sind die Korrelationskoeffizienten r der betrachteten Bewertungsgrößen bezüglich der maximalen Antriebsleistungen in den Fahrzeugen.

Korrelationen der Bewertungsgrößen mit maximaler elektrischer Antriebsleistung (Korrelationskoeffizienten r)			
	alle Fahrzeuge EV + PHEV	alle Fahrzeuge EV + PHEV, außer Mercedes	nur EV
max. B_{PEAK}	-0.08	0.79	0.77
max. $ExpInd_{1998}$	-0.16	0.16	0.11
max. $ExpInd_{1998}$	-0.18	0.12	0.05
Langzeit B_{RMS} Raummittel WLTC	0.35	0.39	0.35
Langzeit B_{RMS} Raummittel Realfahrt	0.63	0.71	0.72

9.5.2 Vergleich mit bisher publizierten Daten

Ein direkter Vergleich der in diesem Forschungsvorhaben ermittelten Messergebnisse mit bisher publizierten Daten erweist sich aus den bereits in Kapitel 4.2.3 genannten Gründen als schwierig, da bei den in der Literatur berichteten Messergebnissen für die jeweilige Erfassung der Messdaten nicht nur unterschiedliche Messgeräte mit unterschiedlichen Messfrequenzbereichen bzw. Messbandbreiten und Messzeitintervallen verwendet wurden, sondern die Ergebnisse auch in unterschiedlicher Form (Spitzenwerte, RMS-Werte, Expositionsindizes, räumliche Maximalwerte, räumliche Mittelwerte etc.) berichtet wurden. Zudem weichen auch die betrachteten Fahrzeugzustände und die untersuchten Messpositionen teilweise von jenen in diesem Forschungsvorhaben ab.

Die wesentliche und aus allen bisher veröffentlichten Arbeiten übereinstimmend ableitbare Erkenntnis, nämlich dass bei Elektrofahrzeugen die größten magnetischen Flussdichten lokal im Bereich der Füße (Fahrersitz, Beifahrersitz und Rücksitze), d. h. in der Nähe der Verkabelung zwischen Batterie, Motor und Inverter und der Batterie selbst, während der Beschleunigungs- und/oder Rekuperationsphasen auftraten, ist jedenfalls in Übereinstimmung mit den Erkenntnissen des gegenständlichen Forschungsvorhabens.

Sofern man nur Magnetfeldimmissionen während stationärer Betriebszustände betrachtet, kann grundsätzlich auch darin Übereinstimmung der in diesem Forschungsvorhaben erzielten Erkenntnisse mit bisher publizierten Ergebnissen festgestellt werden, dass die maximalen $ExpInd_{1998}$ typischerweise im zweistelligen Prozentbereich liegen.

Eine wesentliche und bedeutsame neue Erkenntnis der im Rahmen dieses Forschungsvorhabens durchgeführten Messungen ist die Tatsache, dass die maximalen lokalen Expositionsindizes deutlich oberhalb von 1 liegen können und typischerweise von transienten Vorgängen verursacht werden. Dass dies in den bisher publizierten Daten nicht berichtet wurde, liegt mit großer Wahrscheinlichkeit an der in diesem Forschungsvorhaben verwendeten umfassenden Messmethode. In keiner der bisher veröffentlichten Arbeiten erfolgten systematische Messungen an so vielen Messpositionen, bei so vielen unterschiedlichen Betriebszuständen der Fahrzeuge, wie im gegenständlichen

Forschungsvorhaben. Zudem ist die hier verwendete simultane Magnetfeldmessung an bis zu 10 unterschiedlichen Positionen und die Möglichkeit der kontinuierlichen Messung des Zeitverlaufes der magnetischen Flussdichte ein Alleinstellungsmerkmal diese Forschungsvorhabens. Insgesamt vermindert die in diesem Forschungsvorhaben verwendete umfassende Messmethodik die Wahrscheinlichkeit des „Übersehens“ kurzzeitig auftretender Magnetfeldspitzen deutlich gegenüber den in den bisher publizierten Arbeiten angewendeten Methoden, was gleichzeitig auch als Erklärung dient, warum in der Literatur bisher keine ähnlich hohen Expositionsindizes berichtet wurden, wie im Rahmen dieses Forschungsvorhabens festgestellt.

9.5.3 Mehrfachexposition durch unterschiedliche Quellen

Die in Kapitel 9.4 dokumentierten Messergebnisse stellen die Immissionen getrennt nach solchen, die dem Antriebssystem zugeordnet werden können und solchen, die von anderen elektrischen Komponenten in den Fahrzeugen verursacht werden dar. Dies eröffnet die berechtigte Frage, ob durch Überlagerung der Immissionsbeiträge unterschiedlicher Quellen, die resultierende Exposition in relevantem Ausmaß steigen kann. Grundsätzlich kann diese Frage nicht verneint werden, wie beispielsweise die Ergebnisse der Messungen am Beifahrerplatz des Porsche Taycan zeigen. Der dort im linken Fußbereich während des Bremsens gemessene $ExpInd_{1998}$ beträgt 3.2, und der dort durch die Aktivierung der Sitzheizung verursachte $ExpInd_{1998}$ beträgt 0.8. Während des Bremsens bei aktivierter Sitzheizung ist davon auszugehen, dass sich diese Immissionsanteile im ungünstigsten Fall zeitlich überlagern und dadurch die resultierende Exposition tatsächlich in relevantem Ausmaß erhöht wird. Der transiente Charakter der zu den hohen Expositionsindizes führenden Ereignisse sollte dabei jedoch nicht außer Acht gelassen werden. In diesem Forschungsvorhaben waren definitionsgemäß die Immissionsbeiträge von Komponenten des Antriebssystems und anderen elektrischen Komponenten getrennt zu erfassen. Für eine umfassende und konservative Bewertung der Gesamtexposition im Inneren von Fahrzeugen ist daher jedoch zu empfehlen, dass während der Messungen alle elektrischen Verbraucher des Fahrzeuges aktiviert werden. Auf Basis der in Kapitel 9.4 gezeigten Messergebnisse, erscheinen in diesem Zusammenhang vor allem Sitzheizung, Blinker, Lüfter für den Innenraum und Fensterheber als mögliche relevante Quellen zusätzlich zum elektrischen Antriebssystem.

9.5.4 Anmerkung hinsichtlich Gefährdung von Personen mit aktiven Implantaten

Eine ebenfalls relevante Frage betrifft die Möglichkeit von Störbeeinflussungen von elektronischen Körperhilfsmittel (Implantaten) durch die in den Fahrzeugen auftretenden magnetischen Felder. Zur deren Beantwortung kann ein Vergleich der gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte mit den entsprechenden Schwellenwerten gemäß Forschungsbericht FB 451 (BMAS, 2015) erfolgen. Als besonders sensibel im Hinblick auf elektromagnetische Störbeeinflussungen werden dabei kardiale Implantate gesehen (Herzschrittmacher und implantierbare Cardioverter Defibrillatoren, ICD). Vorauszuschicken ist jedoch, dass selbst kardiale Implantate durch vereinzelt auftretende externe magnetische Felder mit einer Einwirkungsdauer deutlich kürzer als eine Herzperiode im Allgemeinen zu keinen gesundheitlich relevanten Störbeeinflussungen führen. Im Hinblick auf die Festlegung der Schwellenwerte in FB 451 ist anzumerken, dass diese frequenzabhängig als Spitzenwerte sinusförmiger Größen definiert sind. Im Frequenzbereich bis 500 kHz variieren die Schwellenwerte für die magnetische Flussdichte (Spitzenwerte), unterhalb der gemäß FB 451 keine unzulässigen Beeinflussungen von aktiven Körperhilfsmittels auftreten, zwischen ca. 700 µT (von 0 bis 10 Hz) und 7 µT, mit einem Minimum von 7 µT bei 1 kHz, wobei zwischen 10 Hz und 1 kHz eine umgekehrt proportionale Abnahme der Schwellenwerte mit der

Frequenz erfolgt. Nimmt man in einfacher und konservativer Weise 7 µT als niedrigste potenzielle Gefährdungsschwelle an und vergleicht diese mit den Messergebnissen in Kapitel 9.4, so zeigt sich, dass in jenen Raumbereichen, in denen kardiale Implantate zu liegen kommen können (oberhalb der Sitzflächen) diese Schwelle nur in einigen Fahrzeugen und dann auch nur kurzzeitig durch transiente Vorgänge während des Bremsens oder während des Beschleunigens überschritten wird. In zwei Fahrzeugen treten auf der Rückbank im Brustbereich Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte oberhalb von 7 µT auch stationär, während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit auf (Porsche Taycan, max. 17 µT und Fiat 500e, max. 8.4 µT). Aufgrund der Tatsache, dass der Hauptteil des Immissions-Frequenzspektrums in diesen beiden konkreten Fällen aber in einem Frequenzbereich liegt in dem die genannten 7 µT als überkonservativ angesehen werden müssen, erscheinen diese Situationen zwar als bemerkenswert, jedoch nicht unmittelbar gefährdend, insbesondere deshalb, weil die Schwellenwerte in FB 451 unter sehr konservativen Annahmen abgeleitet wurden (ungünstige Implantationsvariante, unipolare Signalwahrnehmung und höchste Sensitivität der Signalwahrnehmung im Implantat). Sitzheizungssysteme mit Pulsbreiten-Regelung, insbesondere in Fällen, in denen auch die Rückenlehne beheizt wird (Audi e-tron, Porsche Taycan, Aiways U5), zeigten im Bereich des Oberkörpers von Fahrer und Beifahrer teilweise Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte oberhalb von 7 µT (Aiways U5).

9.6 Numerische Berechnungen von Expositionssituationen

Numerische Berechnungen der im Körper induzierten elektrischen Feldstärke E_i (und teilweise auch der indizierten Stromdichte J) erfolgten für die Feldverhältnisse im Beifahrer-Fußbereich des Porsche Taycan und im Fahrer-Fußbereich des Mercedes GLE 350 de PHEV, da diese während des Fahrens (beim Beschleunigen bzw. Bremsen) auf die größten $ExpInd_{1998}$ führten (vgl. Tabelle 9.4).

Bei der Auswahl der Fahrzeuge bzw. Expositionssituationen wurde das Augenmerk auf Situationen beim Fahren und auf Immissionen verursacht durch Komponenten des elektrischen Antriebssystems gelegt. Hohe Immissionswerte zufolge des Ein-/ Ausschaltens oder zufolge der Sitzheizung wurden bei der Auswahl niedriger gewichtet, da diese offensichtlich nicht charakteristisch für Fahrzeuge mit elektrischem Antrieb sind, sondern auch in konventionell angetriebenen Fahrzeugen auftreten können (vgl. Tabelle 9.4 für den Opel Corsa mit Verbrennungsmotor). Aus diesem Grund wurde die Situation des Einschaltens des Mercedes GLE 350 de PHEV nicht numerisch analysiert, obwohl diese zum absoluten Maximum des $ExpInd_{1998}$ von 15.0 geführt hat. Zusätzlich zeigte sich der Feldgradient bei der Expositionssituation beim Beschleunigen am Fahrerplatz (mit maximalem $ExpInd_{1998}$ = 12.0) geringer als bei der Exposition beim Einschalten am Beifahrerplatz (mit maximalem $ExpInd_{1998}$ = 15.0). Bei Bildung der Raummittelwerte der ExpInd über den Raumbereich eines Fußes ergeben sich für die Situation am Fahrerplatz (beim Beschleunigen) $ExpInd_{1998,mittel}$ = 7.9 bzw. $ExpInd_{2010,mittel}$ = 1.4, während die entsprechenden Werte am Beifahrerplatz (Einschalten) bei $ExpInd_{1998,mittel}$ = 7.7 bzw. $ExpInd_{2010,mittel}$ = 1.1 liegen. Zudem trat bei der Situation am Beifahrerplatz das Feldmaximum in einem Bereich auf, in dem sich typischerweise nur die Zehen befinden (kleinerer Einkoppelquerschnitt). Ab dem Mittelfuß waren die lokalen ExpInd am Fahrerplatz bereits größer als am Beifahrerplatz. Insofern lässt die Expositionssituation der Füße am Beifahrerplatz beim Einschalten des Fahrzeuges induzierte elektrische Feldstärken in einer ähnlichen Größenordnung erwarten, wie die Exposition der Füße beim Beschleunigen am Fahrerplatz.

Die Entscheidung, den $ExpInd_{1998}$ als Grundlage für die Auswahl der mittels numerischer Berechnungen zu untersuchenden Szenarien festzulegen beruht auf der Tatsache, dass auf europäischer Ebene (Ratsempfehlung 1999/519/EG) nach wie vor die Referenzwerte der ICNIRP 1998 zum Schutz der Allgemeinbevölkerung empfohlen werden. Zudem fordern europäische Produktnormen bezüglich Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern eine Bewertung der verursachten Immissionen mit Bezug auf die Ratsempfehlung 1999/519/EG. Zusätzlich fordern viele Fahrzeughersteller in ihren aktuellen OEM-Standards die Einhaltung der ICNIRP 1998 Referenzwerte hinsichtlich der magnetischen Emissionen, die von Fahrzeugkomponenten ausgehen dürfen. Schließlich sei noch angemerkt, dass die Einhaltung der ICNIRP 1998 Referenzwerte gegenwärtig vielfach auch als Kriterium für die Sicherheit von Personen mit elektronischen Implantaten (wie z. B. Herzschrittmacher und ICD) gesehen wird (siehe z.B. ISO 14117:2019).
Aus den Zusammenfassungen der Ergebnisdaten der Messungen an zweispurigen (Tabelle 9.4) und einspurigen (Tabelle 10.2) Fahrzeugen wird zudem ersichtlich, dass eine Reihung nach $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ während des Fahrens auf das gleiche Ergebnis bezüglich der fünf Fahrzeuge (einspurige und zweispurige) mit den größten ExpInd führt (Mercedes GLE PHEV 300, Porsche Taycan, Opel Corsa Electric, Ray 7.7 und Zero SR).
Für die Erstellung und Validierung von numerischen Ersatzfeldquellen waren Detailmessungen in den Fuß- und Unterschenkelbereichen in denen die maximalen ExpInd auftraten, erforderlich, um die Feldverteilung der numerischen Feldquelle entsprechenden Messdaten vergleichen zu können. Im Opel Corsa Electric waren Detailmessungen im Fußbereich des Fahrers während des Bremsens aufgrund der Raumsituation nicht mit ausreichender Genauigkeit durchführbar, wodurch für dieses Fahrzeug auf die Betrachtung im Rahmen der numerischen Berechnungen verzichtet werden musste. Somit verblieben Mercedes GLE 350 PHEV und Porsche Taycan als zweispurige Fahrzeuge, die im Rahmen numerischer Berechnungen betrachtet wurden.

Die genannten Detailmessungen erfolgten entlang eines engen Messrasters (5 cm Schrittweite) mit 3 cm^2 Spulensensoren. Die räumliche Ausrichtung der Sensoren wurde in allen Messpositionen gleichsinnig gewählt, um nicht nur die räumliche Verteilung des Feldvektorbetrages, sondern auch der Feldkomponenten in den drei orthogonalen Hauptachsen korrekt zu erfassen. Bei den Messungen konnten mittels MF-EASY bis zu zehn Messpositionen simultan erfasst werden (Abbildung 9.292). Die verbleibenden vier Fahrzeuge wurden im Rahmen der numerischen Berechnungen betrachtet, darunter die beiden zweispurigen Fahrzeuge Mercedes GLE 350 de PHEV und Porsche Taycan.

Da in den ICNIRP 1998 Empfehlungen keine Basisgrenzwerte für periphere Gewebe festgelegt wurden, sondern nur (in Form der induzierten Stromdichte) für Kopf- und Rumpf zum Schutz des Zentralnervensystems inklusive Rückenmark, und weil die vorgefundenen Feldverteilungen die höchsten induzierten Felder in den Füßen bzw. Unterschenkel erwarten ließen, werden für die Bewertung der Exposition die Basisgrenzwerte der ICNIRP 2010 Empfehlungen für periphere Gewebe herangezogen.

Für eine vollständige Erfassung der Feldverhältnisse in den relevanten Raumbereichen waren daher mehrere möglichst gleichartige Wiederholungen der Beschleunigungs- bzw. Bremsvorgänge erforderlich.

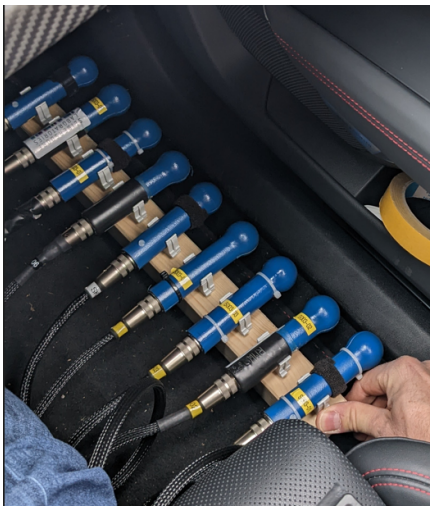


Abbildung 9.292: Beispiel der Sondenanordnung (3 cm^2 Spulensensoren) in 5 cm Abstand während der Detailmessungen im Beifahrer-Fußbereich. Die Sonden sind entlang einer Achse gleichsinnig ausgerichtet auf einem Holzstab montiert. Diese Anordnung wurde vor jedem Beschleunigungs- oder Bremsvorgang bzw. nach jeder Messung in 5 cm Schrittweite nach oben bzw. links verschoben, um ein entsprechend feines Messraster für die Erstellung bzw. Validierung der Ersatzfeldquelle zu erzeugen.

Nach erfolgreicher Validierung der Ersatzfeldquelle erfolgten die numerischen Berechnungen der durch die Ersatzfeldquelle in den relevanten Körperregionen induzierten elektrischen Feldstärken. Alle Berechnungen erfolgten mit einem quasistatischen Lösungsalgorithmus[39] der Simulationsplattform Sim4Life V 7.2.3.12730 und unter Verwendung zweier unterschiedlicher hochaufgelöster anatomischer Körpermodelle (Duke V 3.1.1 und Ella V 3.1) der Virtual Population (IT'IS Foundation, Zürich, Schweiz). Diese Modelle erlauben eine Veränderung der Körperhaltung entsprechend der Sitzhaltung in den betrachteten Fahrzeugen. Die elektrischen Gewebeleitfähigkeiten wurden entsprechend 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 x 1 x 1 mm^3. Die Berechnungen erfolgten bei einer Frequenz von 1 kHz und führen zunächst auf die räumliche Verteilung der im Körper induzierten elektrischen Feldstärke E_i, wie sie durch die reale Feldquelle in der betrachteten Situation verursacht wir, 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 den Fahrzeugen gemessenen Zeitverläufe der magnetischen Induktion zu erhalten. Bei dieser Methode wird zunächst der Maximalwert der Zeitableitung $\max(B'(t)) = \max(dB(t)/dt)$ des einwirkenden Magnetfeldes aus dem gemessenen Signalverlauf B(t) berechnet und danach wird das abgeleitete Zeitsignal B'(t) 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 $E_i(t)_{norm}$ bzw. der im Körper induzierten elektrischen Stromdichte $J(t)_{norm}$ mit einem Spitzenwert von 1 V/m bzw. 1 A/m^2. Auf das auf den Spitzenwert von 1 V/m bzw. 1 A/m^2 skalierte Zeitsignal $E_i(t)_{norm}$ bzw. $J(t)_{norm}$ wird die bekannte WPM für die jeweilige Basisgröße gemäß ICNIRP 2010 bzw. ICNIRP 1998 angewendet, woraus sich normierte Expositionsindizes ergeben. Aus der

[39] Der verwendete Löser basiert auf der *Scalar Potential Finite Element (SPFE)* Methode (FE-Methode für ein kubisches Gitter).

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

Die Ergebnisse werden als Expositionsindex gemäß ICNIRP 2010 bezüglich der maximalen, über ein Volumen von 2 x 2 x 2 mm^3 gemittelten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg}$ angegeben sowie zusätzlich deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil. 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 berechnet.

Bezüglich der angegebenen Perzentile wird angemerkt, dass die Perzentilbildung nur über jene Körperbereiche erfolgte, die innerhalb des grünen Bereiches (Fuß- und Unterschenkelbereich) in den folgenden Abbildungen liegen. Sie dienen lediglich als Indikatoren für die Validität des maximalen $E_{i,avg}$ bzw. des zugehörigen maximalen ExpInd. 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.

9.6.1 Unsicherheiten der numerischen Berechnungen

Neben den Unsicherheiten zufolge einer eingeschränkt genauen numerischen Nachbildung der realen Feldquellen (diese Unsicherheiten in den folgenden Unterabschnitten für die jeweiligen Situationen angeben), 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., 2019b) die Annahme einer Unsicherheit von ca. ± 20 % (k=1) als sinnvoll erscheinen, sofern die räumliche Auflösung der Rechenmodelle hinreichend fein (≤ 1 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. ± 20 % (Schmid et al., 2019b).

9.6.2 Porsche Taycan

Die Feldverteilung im Beifahrer-Fußbereich des Porsche Taycan war bei den gemessenen Maximalimmissionen nicht durch einen Leitungszug oder ähnlich einfache Ersatzquellen anzunähern. Auch die Variation der räumlichen Ausrichtung des Feldvektors war schlecht reproduzierbar. Es wurde daher eine numerische Ersatzquelle durch die Festlegung des Vektorpotenzials (ZMT Zurich MedTech AG, 2024) im relevanten Feldraum gebildet und drei Simulationen mit unterschiedlich (orthogonal zueinander) ausgerichteten Feldvektoren durchgeführt (bei Beibehaltung des tatsächlichen Feldgradienten)[40]. Die Abweichungen zwischen Messung und Feldverteilung der Ersatzquelle betrug < 15 % im relevanten Bereich (linker Fuß).

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke im linken Unterschenkel der betrachteten Körpermodelle.

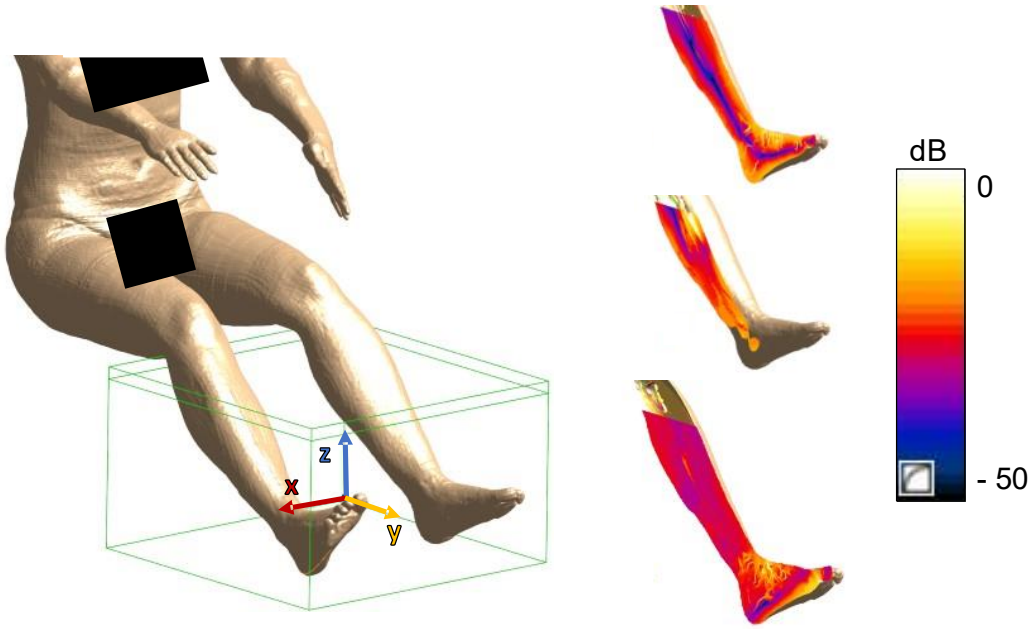


Abbildung 9.293: Position des Körpermodells Ella am Beifahrersitz im Porsche Taycan und resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel bei maximaler Magnetfeldimmission (Bremsen) für unterschiedliche B-Feldrichtungen mit logarithmischer Skalierung (oben: **x** (0 dB = 62 mV/m), Mitte: **y** (0 dB = 41 mV/m), unten: **z** (0 dB = 62 mV/m)). Das Maximum der über 2 x 2 x 2 mm^3 gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg}$ befindet sich im kortikalen Knochengewebe des linken Vorderfußes und tritt bei x-gerichtetem Magnetfeld auf.

[40] Im Falle komplexer Feldverteilungen (Kombination starker Gradienten des Betrages mit kleinräumigen Variationen der Feldvektorausrichtung) erweist sich die Erstellung numerischer Ersatzquellen als nicht-trivial. Eine Abhilfe schafft dabei die Annahme unveränderlicher Feldvektorausrichtung im Feldraum unter Beibehaltung des Feldgradienten. Durch mehrere Simulationen mit derartigen Ersatzquellen mit unterschiedlich ausgerichtetem Feldvektor kann eine Abschätzung der induzierten elektrischen Feldstärken in der tatsächlichen Situation erfolgen. Reihensimulationen mit homogener Befeldung des Fuß- und Unterschenkelbereiches der verwendeten Körpermodelle und Variation der Feldvektororientierung in 15°-Schritten um alle drei Hauptachsen zeigten, dass das Maximum der betrachteten Bewertungsgröße über alle Feldvektorausrichtungen um weniger als 10% größer war als das Maximum aus den Simulationen mit Feldvektorausrichtungen in den drei Hauptachsen. Dieser Unsicherheitsbeitrag ist in das Unsicherheitsbudget der numerischen Berechnungen aufzunehmen.

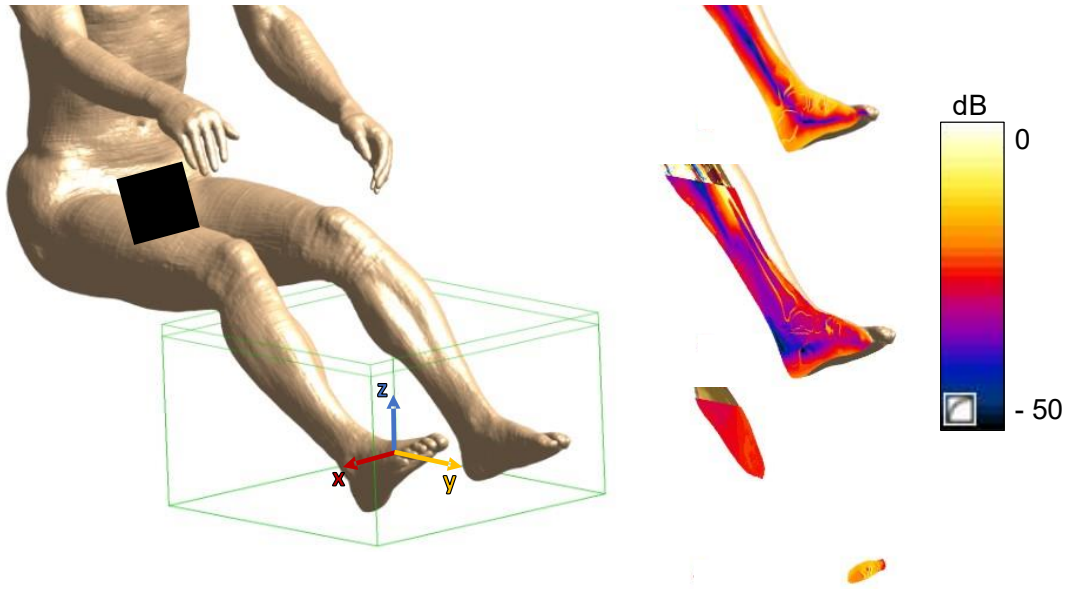


Abbildung 9.294: Position des Körpermodells Duke am Beifahrersitz im Porsche Taycan und resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel bei maximaler Magnetfeldimmission (Bremsen) für unterschiedliche B-Feldrichtungen mit logarithmischer Skalierung (oben: **x** (0 dB = 59 mV/m), Mitte: **y** (0 dB = 38 mV/m), unten: **z** (0 dB = 54 mV/m)). Das Maximum der über 2 x 2 x 2 mm³ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke Ei,avg befindet sich im kortikalen Knochengewebe der linken kleinen Zehe und tritt bei z-gerichtetem Magnetfeld auf.

Tabelle 9.7 fasst die Bewertungsergebnisse im Porsche Taycan zusammen (jeweils Maximum und Minimum aus den drei Simulationen mit unterschiedlicher Feldvektorausrichtung). Trotz der Überschreitung des $ExpInd_{1998}$ bezüglich der magnetischen Flussdichte, blieben die induzierten elektrischen Feldstärken im Körper unterhalb der in ICNIRP 2010 festgelegten Basisgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung.

Tabelle 9.7: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse im Porsche Taycan in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete und über ein Volumen von 2 x 2 x 2 mm³ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$). Der angegebene Wertebereich entspricht jeweils dem Maximum und Minimum aus den drei Simulationen mit unterschiedlicher Feldvektorausrichtung in den drei Hauptachsen.

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP\ 2010,GP}$			
	$E_{i,avg,max}$	$E_{i,avg,p99.99}$	$E_{i,avg,p99.9}$	$E_{i,avg,p99.0}$
Duke	0.038 - 0.045	0.029 - 0.031	0.020 - 0.024	0.008 - 0.016
Ella	0.030 - 0.046	0.024 - 0.032	0.017 - 0.023	0.008 - 0.015

Bei Zugrundelegung der oben angeführten Unsicherheiten bezüglich Variation über Körpermodelle und elektrischer Gewebeparameter (jeweils ± 20 %), der Quellenvalidierung (± 15 %) und der möglichen Unterschätzung des Maximums zufolge der Betrachtung von nur drei Magnetfeldrichtungen (± 10 %), ergibt sich eine Gesamtunsicherheit der Berechnungsergebnisse von ca. ± 33 % (k=1), wenn vereinfachend und konservativ Normalverteilung für alle Unsicherheitsbeiträge angenommen wird.

Da in der betrachteten Situation beim Porsche Taycan (Bremsen) im Bereich des Zentralnervensystems keine relevanten Immissionen auftraten, konnte bei diesem Fahrzeug auf die Berechnung der induzierten Stromdichte verzichtet werden.

9.6.3 Mercedes GLE 350 de PHEV

Die räumiche Feldverteilung am Fahrerplatz im Mercedes GLE 350 de PHEV konnte mit Strompfaden entsprechend der in der Rettungskarte (Abbildung 9.255) ersichtlichen Kabelverläufe hinreichend gut nachgebildet werden (Abweichung zu den Messungen im relevanten Bereich < 20 %).

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der induzierten elektrischen Feldstärke im linken Unterschenkel der betrachteten Körpermodelle.

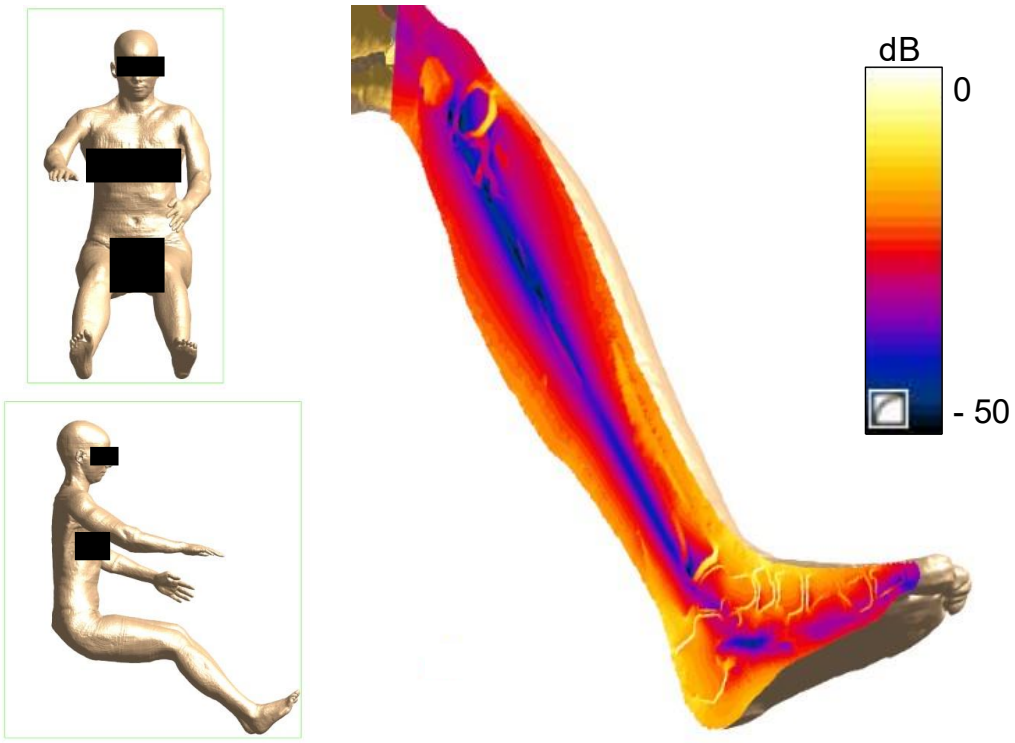


Abbildung 9.295: Position des Körpermodells Ella am Fahrersitz im Mercedes GLE 350 de PHEV und resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel bei maximaler Magnetfeldimmission (Zuschalten des Verbrennungsmotors) mit logarithmischer Skalierung (0 dB = 1.02 V/m). Das Maximum der über 2 x 2 x 2 mm^3 gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg}$ befindet sich im kortikalen Knochengewebe des linken Fersenbeins.

Tabelle 9.8 fasst die Bewertungsergebnisse im Mercedes GLE 350 de PHEV in Form der Expositionsindizes bezüglich des $E_{i,ICNIRP,2010,GP}$ zusammen. Der maximale Expositionsindex betrug 0.42 und trat im linken Fuß auf. Die maximalen Expositionsindizes bezüglich induzierter Stromdichten in Zentralnervensystemgewebe (ICNIRP 1998) betrugen 0.23 bzw. 0.22 beim Körpermodell Duke bzw. Ella.

Trotz der Überschreitung des $ExpInd_{1998}$ und des $ExpInd_{2010}$ bezüglich der magnetischen Flussdichte, blieben die induzierten elektrischen Feldstärken und die induzierten elektrischen Stromdichten daher unterhalb der in ICNIRP 2010 und ICNIRP 1998 festgelegten Basisgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung.

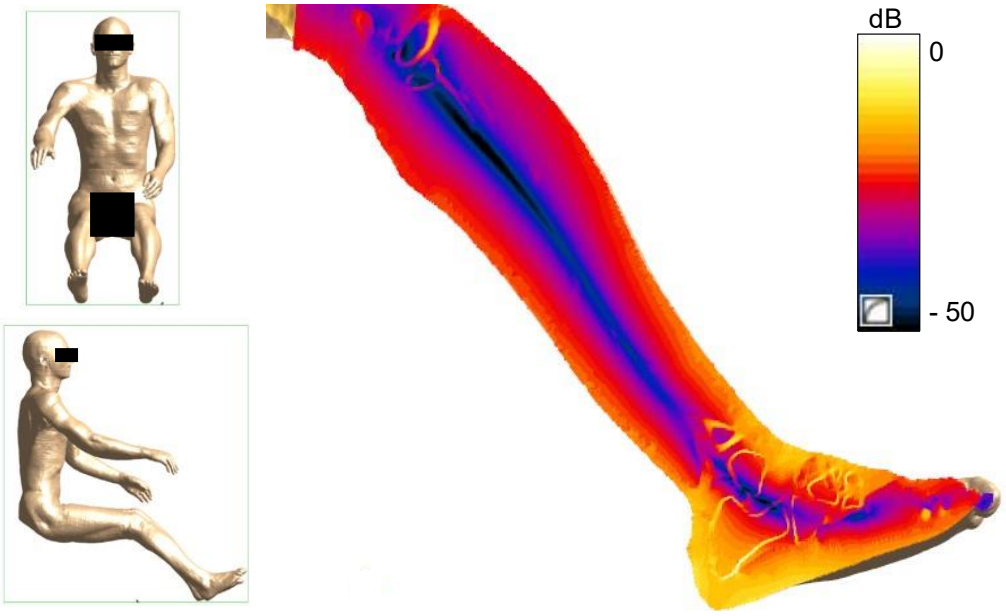


Abbildung 9.296: Position des Körpermodells Duke am Fahrersitz im Mercedes GLE 350 de PHEV und resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel bei maximaler Magnetfeldimmission (Zuschalten des Verbrennungsmotors) mit logarithmischer Skalierung f = 1 kHz (0 dB = 1.39 V/m). Das Maximum der über 2 x 2 x 2 mm³ gemittelten induzierten elektrischen Feldstärke $E_{i,avg}$ befindet sich im kortikalen Gewebe des linken Fersenbeins.

Tabelle 9.8: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse im Mercedes GLE 350 de PHEV in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete über ein Volumen von 2 x 2 x 2 mm³ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$).

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP\ 2010,GP}$			
	$E_{iavg,max}$	$E_{iavg,p99.99}$	$E_{iavg,p99.9}$	$E_{iavg,p99.0}$
Duke	0.416	0.308	0.222	0.150
Ella	0.369	0.276	0.197	0.131

Bei Zugrundelegung der oben angeführten Unsicherheiten bezüglich Variation über Körpermodelle und elektrischer Gewebeparameter (jeweils ± 20 %) sowie der Quellenvalidierung (± 20 %), ergibt sich eine Gesamtunsicherheit der Berechnungsergebnisse von ca. ± 35 % (k=1), wenn vereinfachend und konservativ Normalverteilung für alle Unsicherheitsbeiträge angenommen wird.

9.7 Schlussfolgerungen aus den Messungen und numerischen Berechnungen der Magnetfeldexposition in zweispurigen Fahrzeugen

Die umfangreichen Messungen zeigten zunächst, dass die in unterschiedlichen Fahrzeugen auftretende magnetische Flussdichte, je nach Fahrzeug und Messposition, großen Streubreiten unterworfen ist. Im stationären Fahrbetrieb (Fahren mit konstanter Geschwindigkeit) können die Immissionen lokal im Fuß- und Unterschenkelbereich im zweistelligen Prozentbereich der Referenzwerte basierend auf ICNIRP 1998 für die Allgemeinbevölkerung liegen. Gleiches gilt bei einigen Fahrzeugen auch für den Unterleibs-

und unteren Rückenbereich auf der Rückbank. In Ausnahmefällen (wie beim Mercedes GLE 350 PHEV) sind jedoch offensichtlich auch Magnetfeldimmissionen nahe der vollständigen Ausschöpfung oder knapp oberhalb der ICNIRP 1998 Referenzwerte (für die Allgemeinbevölkerung) möglich. Deutlich höhere Immissionen als beim stationären Fahrbetrieb treten beim Bremsen und Beschleunigen auf, häufig in Form von transienten Magnetfeldverläufen. In diesen Fällen wurden lokale Überschreitungen der ICNIRP 1998 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung in sechs der insgesamt 13 untersuchten Fahrzeuge mit Elektroantrieb beobachtet. Die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 wurden während des Fahrens nur in einem der untersuchten Fahrzeuge während des Beschleunigens überschritten. Die durchgeführten numerischen Berechnungen zeigten jedoch, dass trotz teilweise deutlicher lokaler Überschreitungen (bis zu einem Faktor 12) der ICNIRP 1998 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung im Fuß- und Unterschenkelbereich, die im Körper induzierten elektrischen Feldstärken, auch bei Berücksichtigung der anzunehmenden Unsicherheiten, unterhalb der für periphere Gewebe anwendbaren Basisgrenzwerte gemäß den ICNIRP 2010 Empfehlungen bleiben.

Ergänzend zu den Ergebnissen bezüglich der Exposition während des Fahrens zeigte sich, dass es in den meisten Fahrzeugen (auch beim untersuchten Fahrzeug mit Verbrennungsmotor) beim Einschalten lokal zu deutlichen Überschreitungen der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung kommt. Außerdem wirken auch andere elektrische Verbraucher, die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem elektrischen Antriebssystem stehen, als Ursache für Magnetfeldimmissionen, die teils sogar deutlich höher sind als jene vom elektrischen Antriebssystem stammenden.

10 Magnetfeldmessungen an einspurigen Fahrzeugen

10.1 Messmethoden

Mit Elektro-Zweirädern erfolgten systematische Messungen auf einem Rollenprüfstand und Messungen auf der Teststrecke. Messungen während Fahrten im Realverkehr wurden aus Sicherheitsgründen nicht durchgeführt.

Die Messungen am Rollenprüfstand erfolgten, wie bei den zweispurigen Fahrzeugen, mit dem MF EASY Messsystem (ausgenommen Maximumsuche, siehe Kapitel 7.1.3). Als Rollenprüfstand wurde ein spezieller Prüfstand für Zweiräder (bei Fa. KAMA-Tec GmbH) verwendet, da dieser wesentliche Vorteile gegenüber dem im Zuge der Testmessungen (Kapitel 7.1) in Betracht gezogenen Leistungsprüfstand MAHA LPS 3000 im ADAC Technikzentrum bot.

Für die Messungen auf der Teststrecke wurde ein speziell entwickeltes, fernsteuerbares Messsystem verwendet, bestehend aus zwei kommerziellen Magnetfeld-Messgeräten (Narda ELT 400, jeweils mit 100 cm^2 Aufnehmerquerschnitt) und zwei tragbaren Oszilloskopen (Pico Technology), verbunden mit einem Laptop. Die Echtzeit-Analogausgänge der ELT 400 Geräte wurden mittels der vom Laptop gesteuerten Oszilloskope erfasst und die Zeitbereichsmessdaten am Laptop abgespeichert. Alle verwendeten Messgeräte waren kalibriert und wurden während der Messungen regelmäßigen Plausibilitätsprüfungen unterzogen. Die Steuerung bzw. Triggerung der Messungen erfolgte ferngesteuert vom Messtechniker am Rand der Teststrecke, so dass keine sicherheitsgefährdende Ablenkung der Testfahrerin gegeben war. Die Messaufnehmer wurden während der Messungen mittels Klebebands am Körper der Testfahrerin fixiert. Alle anderen Geräte fanden im von der Testfahrerin getragenen Rucksack Platz (Abbildung 10.2).

In den nachfolgenden Kapiteln 10.1.1 und 10.1.2 ist der Ablauf der Messungen am Rollenprüfstand und am Testgelände zusammengefasst.

10.1.1 Messungen am Rollenprüfstand

1. Vorbereiten und Montage des Fahrzeugs am Motorrad-Rollenprüfstand sowie Einspielung der relevanten Fahrzeugdaten in die Software des Rollenprüfstandes
2. Vormessungen mit Messsonden (Narda ELT 400) nahe den Rollen und Fahrzeugrädern, um ggf. vorhandene Störfelder durch Rollen und Räder zu ermitteln[41]
3. Maximumsuche entlang des Fahrzeugs mittels einer handgeführten isotropen Magnetfeldsonde (ELT 400 mit 100 cm^2 Messaufnehmer, Narda STS)
4. Fixierung des Hartschaum-Dummys inkl. der 10 Messaufnehmer des MF EASY Messsystems (siehe Kapitel 9.1) auf dem Fahrzeug derart, dass ein Messaufnehmer so nahe wie möglich am Ort des gefundenen Immissionsmaximums zu liegen kommt (Abbildung 10.1)
5. Systematische Messungen bei unterschiedlichen Lastmomenten (Steigungen) und Fahrzeugzuständen (Fahrt mit konstanter Geschwindigkeit, Beschleunigung, Bremsen). Der Fahrerplatz wurde immer untersucht, und in Fällen in denen die Maximumsuche ergab, dass am Beifahrerplatz höhere lokale Immissionen auftreten, wurden zusätzlich auch Messungen am Beifahrerplatz durchgeführt.
6. Messungen während eines WMTC (World Motorcycle Test Cycle) am Platz mit den höchsten lokal auftretenden Immissionen.

[41] Die ermittelten Störimmissionen zufolge des Rollenprüfstandes lagen bei weniger als 0.3 %pkte bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998

Die Bedienung des am Prüfstand fixierten Motorades erfolgte während der Messungen mit dem Hartschaum-Dummy durch eine neben dem Motorrad stehenden Person.



Abbildung 10.1: Hartschaum-Dummy am Fahrerplatz mit Messaufnehmern auf einem einspurigen BEV am Motorradprüfstand.

10.1.2 Messungen am Testgelände

1. Vorbereitung des Fahrzeugs und des Messsystems (Sonden, Oszilloskope, Laptops), inklusive Fixierung der Messaufnehmer (Abbildung 10.2 a)
2. Magnetfeldmessungen während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit, während der Beschleunigung und während des Bremsens; da nur zwei Messaufnehmer zur Verfügung standen, wurden die Manöver jeweils mehrmals mit entsprechend geänderten Messaufnehmerpositionen gefahren, um die Messpositionen Fuß, Unterschenkel (jeweils links und rechts) sowie Unterleib am Fahrerplatz zu erfassen (Abbildung 10.2 b, c, d, e). Je nach Fahrzeugtyp und Ergebnissen aus den Messungen am Rollenprüfstand wurden zusätzlich weitere, für den Sozius relevante Messpositionen betrachtet, wie z. B. im Bereich von Unterleib oder Füße (Abbildung 10.2 b, f). Auf Messungen im Brust- und Kopfbereich wurde generell verzichtet, da die Immissionen an diesen Positionen von untergeordneter Bedeutung sind (bekannt aus den Messungen am Rollenprüfstand). Weiters waren auch keine Messungen im Unterschenkelbereich des Beifahrers möglich, da die Messsonden in diesem Bereich nicht sicher fixiert werden konnten.
3. Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz, die nicht unmittelbar vom Antriebssystem verursacht werden (z. B. Ein- und Ausschalten des Fahrzeugs)



Abbildung 10.2: Speziell entwickeltes Messsystem für die Messungen auf dem Testgelände mit zwei Messaufnehmern, montiert an den Füßen der Testfahrerin (a) und weitere Beispiele der Messaufnehmerfixierung während der Testfahrten in den Unterleibsbereichen von Fahrer und Sozius (b), Unterschenkel des Fahrers (c, e), Fußbereich des Fahrers (d) und Fußbereich des Sozius (f).

10.2 Unsicherheitsbetrachtungen

Grundsätzlich gelten, soweit bezüglich der Messmethode übertragbar, die gleichen Überlegungen bezüglich Messunsicherheiten, wie in Kapitel 9.2 beschrieben, wenngleich die Unsicherheitsbeiträge zufolge eingeschränkter Kontrolle über Hintergrundfelder (u_1), Reproduzierbarkeit der Fahrzustände (u_2) und Reifenmagnetisierung (u_3) auf Basis der erhobenen Messdaten etwas geringer als bei den Messungen an den zweispurigen Fahrzeugen einzuschätzen waren.

Der Unsicherheitsbeitrag u_4 entfällt gänzlich, da dieser speziell für Messungen im Realverkehr relevant ist, die mit den einspurigen BEV aus Sicherheitsgründen nicht durchgeführt wurden. Die dominanten Unsicherheitsbeiträge u_5, u_6, u_7 und u_8 (siehe Kapitel 9.2) bleiben jedoch auch bei den Messungen an den einspurigen Fahrzeugen in sehr ähnlichem Ausmaß bestehen, so dass in den Bereichen $B_{PEAK} \geq 15\,\mu T$ und $ExpInd_{1998}$ bzw. $ExpInd_{2010} \geq 0.3$ mit Gesamtunsicherheiten ($k = 1$) von $\pm 35\,\%$ (Fuß- und Unterschenkel-bereich), $\pm 19\,\%$ (Oberschenkel- und Unterleibsbereich) und $\pm 16\,\%$ (Brust- und Kopfbereich) zu rechnen ist. Für geringere B_{PEAK}-Werte und Expositionsindizes sind etwas höhere Unsicherheiten anzunehmen (siehe Kapitel 9.2).

10.3 Untersuchte Fahrzeuge

Tabelle 10.1 gibt einen Überblick über die untersuchten einspurigen BEV. Weitere Details zu den Fahrzeugdaten finden sich in den jeweiligen Unterkapiteln 10.4.1 bis 10.4.4 mit den Messergebnissen.

Tabelle 10.1: Untersuchte einspurige BEV.

#	Modell	Bestand[42] am 1.1.2023	Baujahr	Leistung [kW]	Kategorie
1	Ray 7.7	ca. 15	2022	10,7	Leichtkraftrad
2	Zero SR/S	ca. 60	2021	40	Kraftrad
3	Silence	ca. 800	2020	7	Leichtkraftrad
4	Super Socco CUx	n.b.	2022	3	Kleinkraftrad

10.4 Messergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Magnetfeldmessungen für jedes betrachtete Fahrzeug separat dargestellt. Eine vergleichende Diskussion erfolgt in Kapitel 10.5.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt jeweils anhand der gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte sowie anhand der Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 ($ExpInd_{1998}$) und ICNIRP 2010 ($ExpInd_{2010}$), ermittelt mittels der Methode der gewichteten Spitzenwerte im Zeitbereich (ICNIRP, 2003; Keller, 2017). Mit den beiden letztgenannten Kenngrößen ist eine strahlenschutztechnische Bewertung der Immissionen hinsichtlich der etablierten (akuten) über Änderungen des

[42] Die Bestandszahlen von E-Zweirädern können nicht genau genannt werden. Das KBA veröffentlicht die Zulassungs- und Bestandszahlen nicht auf Modellebene. Der Industrie Verband Motorrad Deutschland e.V. führt eine Statistik über die Neuzulassungen für E-Krafträder und E-Kraftroller auf Modellebene erst seit 2023 und jeweils nur für die Top 7 Modelle. Die angegebenen Bestandszahlen wurden daher aus den vom KBA zur Verfügung stehenden Daten und Abfragen bei Händlern geschätzt.

Zellmembranpotenzials vermittelten Wirkungen möglich. Es wird darauf hingewiesen, dass die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 identisch sind mit den Referenzwerten der Ratsempfehlung 1999/519/EG. D.h. $ExpInd_{1998}$ ist als Synonym für $ExpInd_{1999/519/EG}$ aufzufassen.

Im Hinblick auf hypothetische (wissenschaftlich nicht gesicherte) Wirkungen von Langzeit-Magnetfeldexposition existiert naturgemäß keine etablierte Bewertungsgröße. Dennoch werden für die Messungen während des WMTC auch über Körperdimensionen gemittelte Langzeit-Effektivwerte (Langzeit-RMS-Werte) der Immissionen angeführt. Dazu wurden zunächst aus den n einzelnen, jeweils eine Sekunde langen Zeitsignal-Intervallen in allen zehn Messpositionen die n RMS-Werte der magnetischen Flussdichte $B_{RMS,i}$ ermittelt und anschließend für alle links und rechts angeordneten Messpositionen (Füße, Unterschenkel, Oberschenkel, Brust) jeweils ein (arithmetischer) Mittelwert gebildet, sodass für jedes Zeitintervall i insgesamt sechs B_{RMS}-Werte für Fuß-, Unterschenkel-, Oberschenkel-, Unterleibs-, Brust- und Kopfbereich verbleiben (Links/rechts-Raummittelwerte, Tabelle 9.3). Anschließend wurde für jede der sechs Körperregionen der Langzeit-Effektivwert berechnet und die sechs Langzeit-Effektivwerte schließlich räumlich (arithmetisch) gemittelt (Tabelle 9.3).

10.4.1 Ray 7.7



Abbildung 10.3: Untersuchte Ray 7.7 auf dem Rollenprüfstand.

10.4.1.1 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 10.4 bis Abbildung 10.7 fassen die Ergebnisse für die am Fahrer- und am Soziusplatz während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen, bei jeweils unterschiedlichen Lastmomenten (Steigungen)[43]. Die Ergebnisse der Messungen am Prüfstand sind dabei direkt den entsprechenden am Testgelände (schraffierte Balken) ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt.

[43] Für den Fahrerplatz liegen aufgrund eines Defekts der entsprechenden Sonde keine Messdaten für den linken Oberschenkelbereich vor.

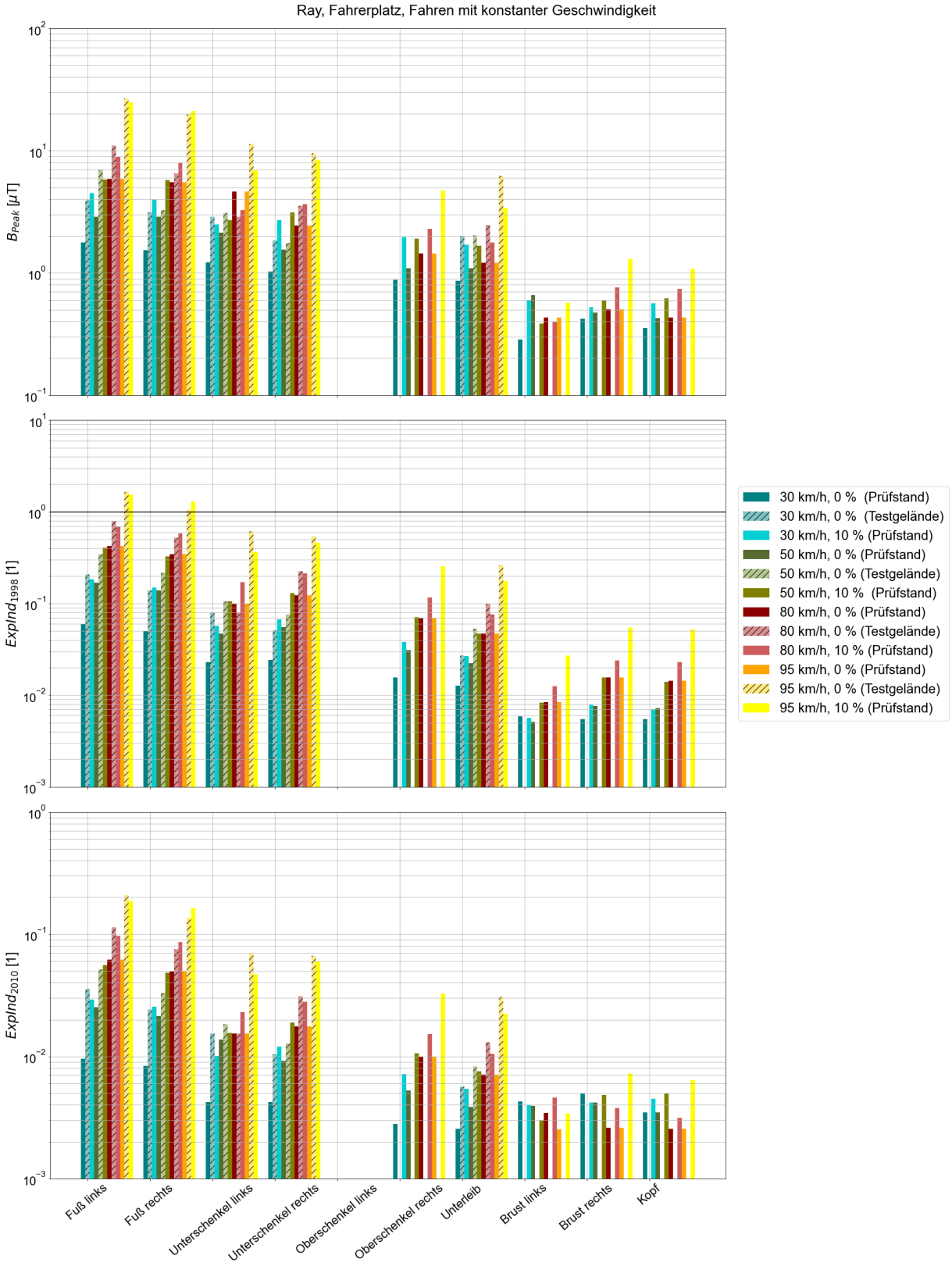


Abbildung 10.4: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

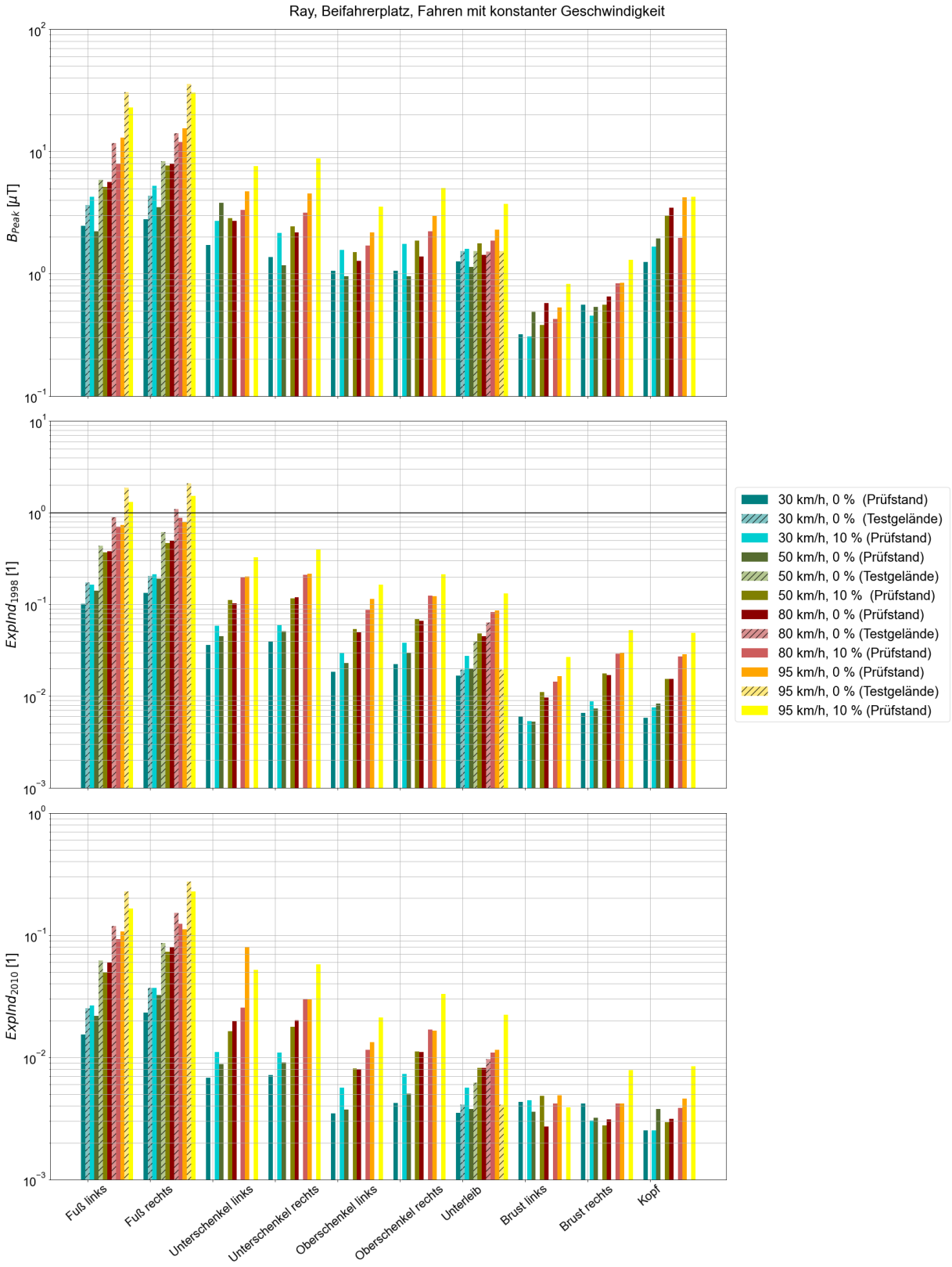


Abbildung 10.5: Magnetfeldimmissionen am Soziusplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Soziusplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

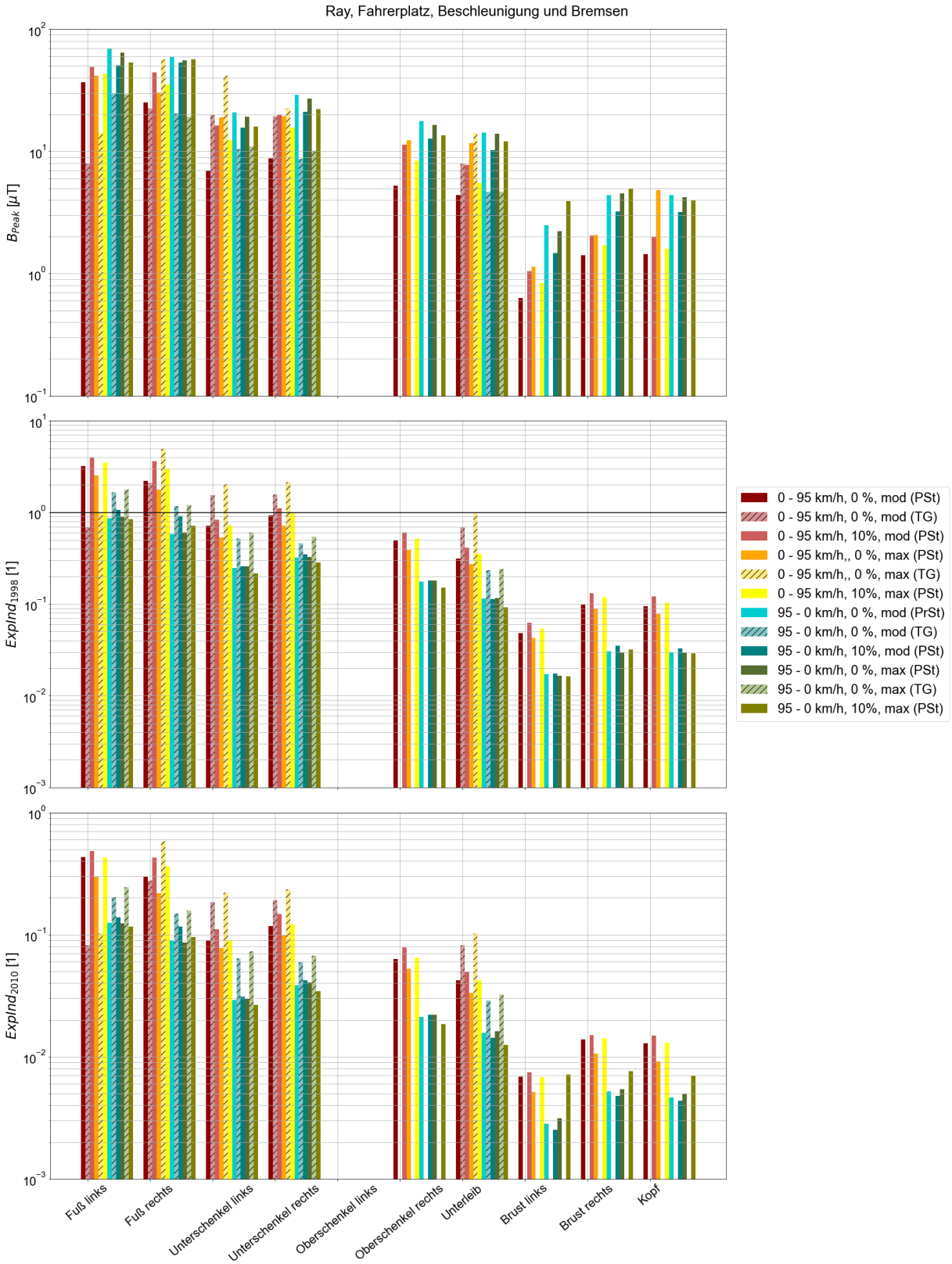


Abbildung 10.6: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-95 km/h) und Bremsen (95-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

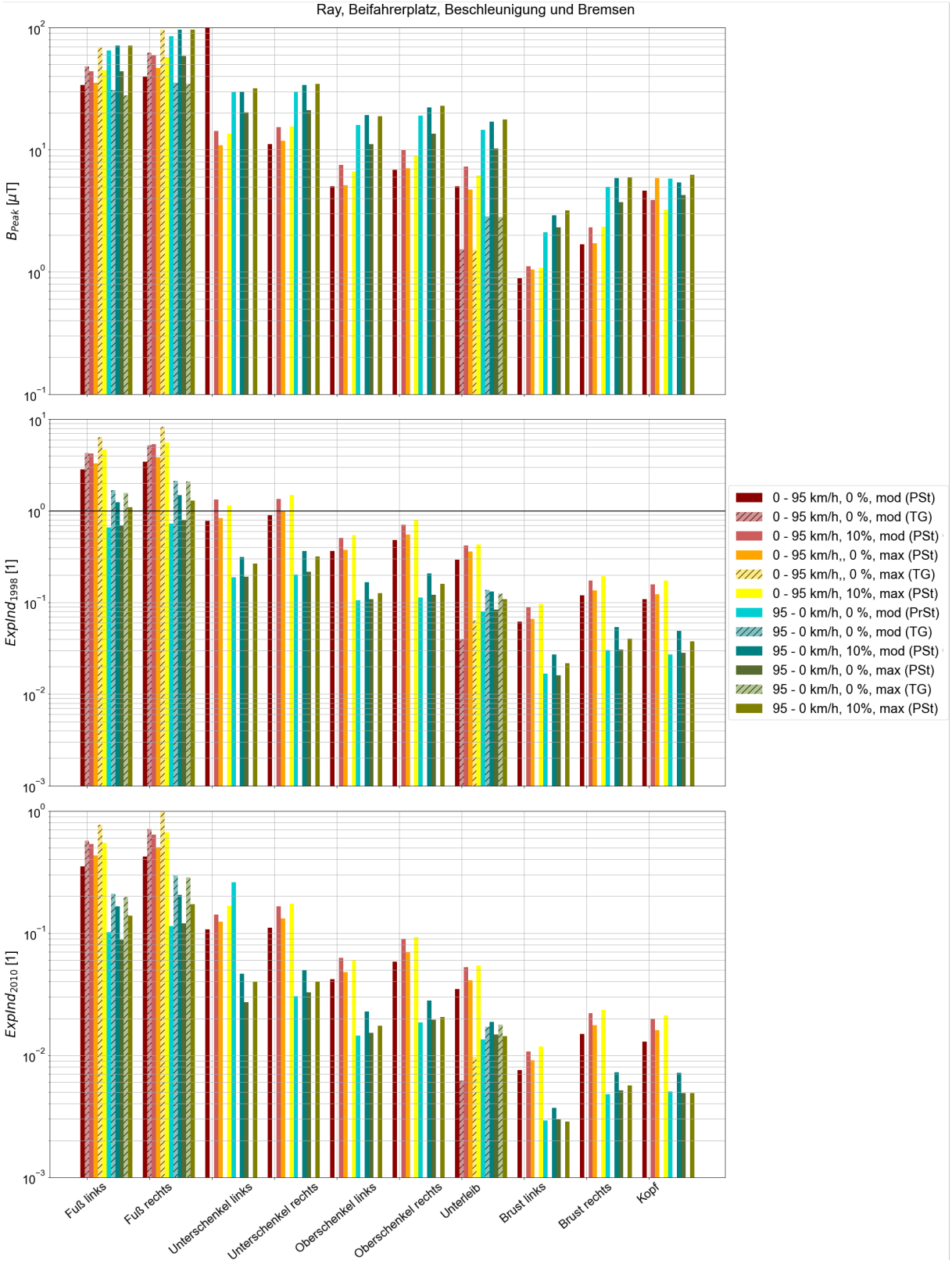


Abbildung 10.7: Magnetfeldimmissionen am Soziusplatz beim Beschleunigen (0-95 km/h) und Bremsen (95-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Soziusplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 10.4 und Abbildung 10.5) zeigten sich die höchsten $ExpInd_{1998}$ in den Fußbereichen von Fahrer und Sozius im Ausmaß von bis zu ca. 2.1 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Die Reifenmagnetisierung hatte daran keinen relevanten Anteil. Von den Unterschenkeln aufwärts blieben die $ExpInd_{1998}$ unterhalb von 0.5.

Deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit traten beim Beschleunigen auf (Abbildung 10.6 und Abbildung 10.7) und erreichten Werte bezogen auf ICNIRP 1998 bis zu ca. 8.2 im Fußbereich des Soziusplatzes. Auch im Bereich des Unterleibs (Fahrersitz) erreichte der $ExpInd_{1998}$ bei starkem Beschleunigen noch Werte von 0.98. Kein Messwert lag über den ICNIRP 2010 Referenzwerten.

Abbildung 10.8 zeigt die im Fußbereich des Soziusplatzes gemessene magnetische Flussdichte, die zum größten $ExpInd_{1998}$ führt, im Zeit- und im Frequenzbereich.

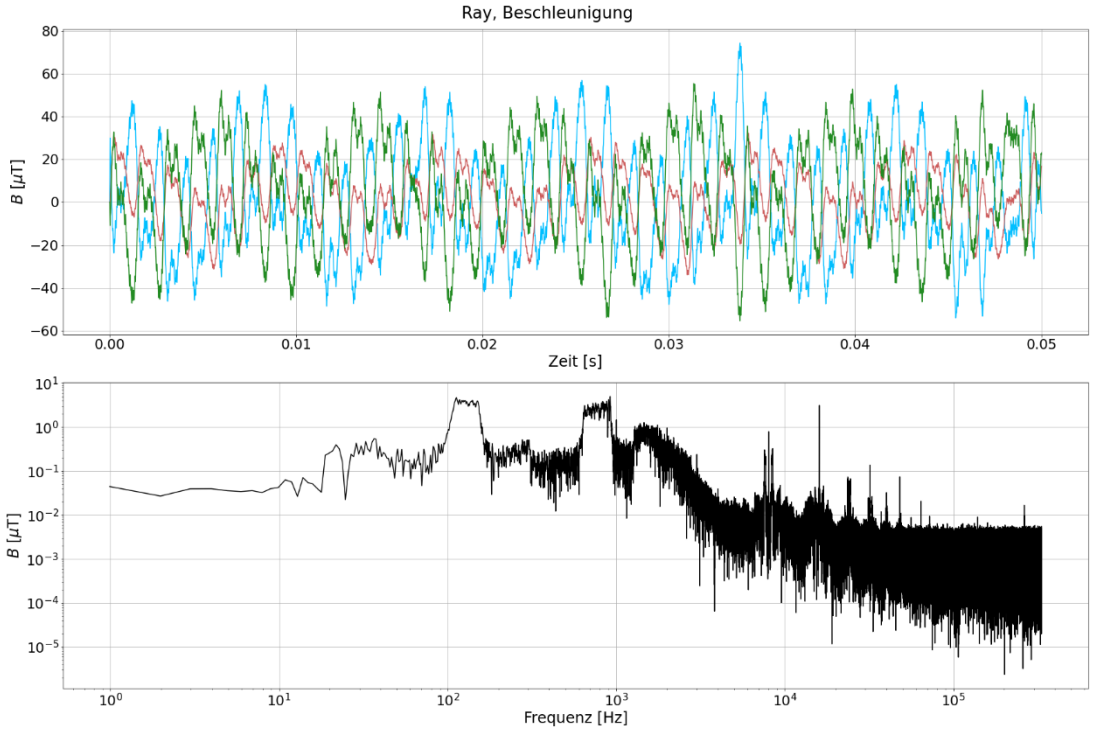


Abbildung 10.8: Zeitverlauf (oben) und Frequenzspektrum (unten) der magnetischen Flussdichte während starker Beschleunigung. Das gezeigte Signal wurde bei einer Fahrt auf dem Testgelände im Bereich des rechten Fußes des Sozius gemessen und ergab mit 8.2 den größten in diesem Projekt an Zweirädern ermittelten $ExpInd_{1998}$.

10.4.1.2 Magnetfeldimmissionen beim WMTC

Abbildung 10.9 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der WMTC-Fahrt am Prüfstand am Fahrerplatz in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer[44].

Abbildung 10.10 zeigt eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

[44] Aufgrund eines Defekts der entsprechenden Sonde liegen keine Messdaten für den linken Oberschenkelbereich vor.

Abbildung 10.11 zeigt schließlich die aus den Messungen während des WMTC resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

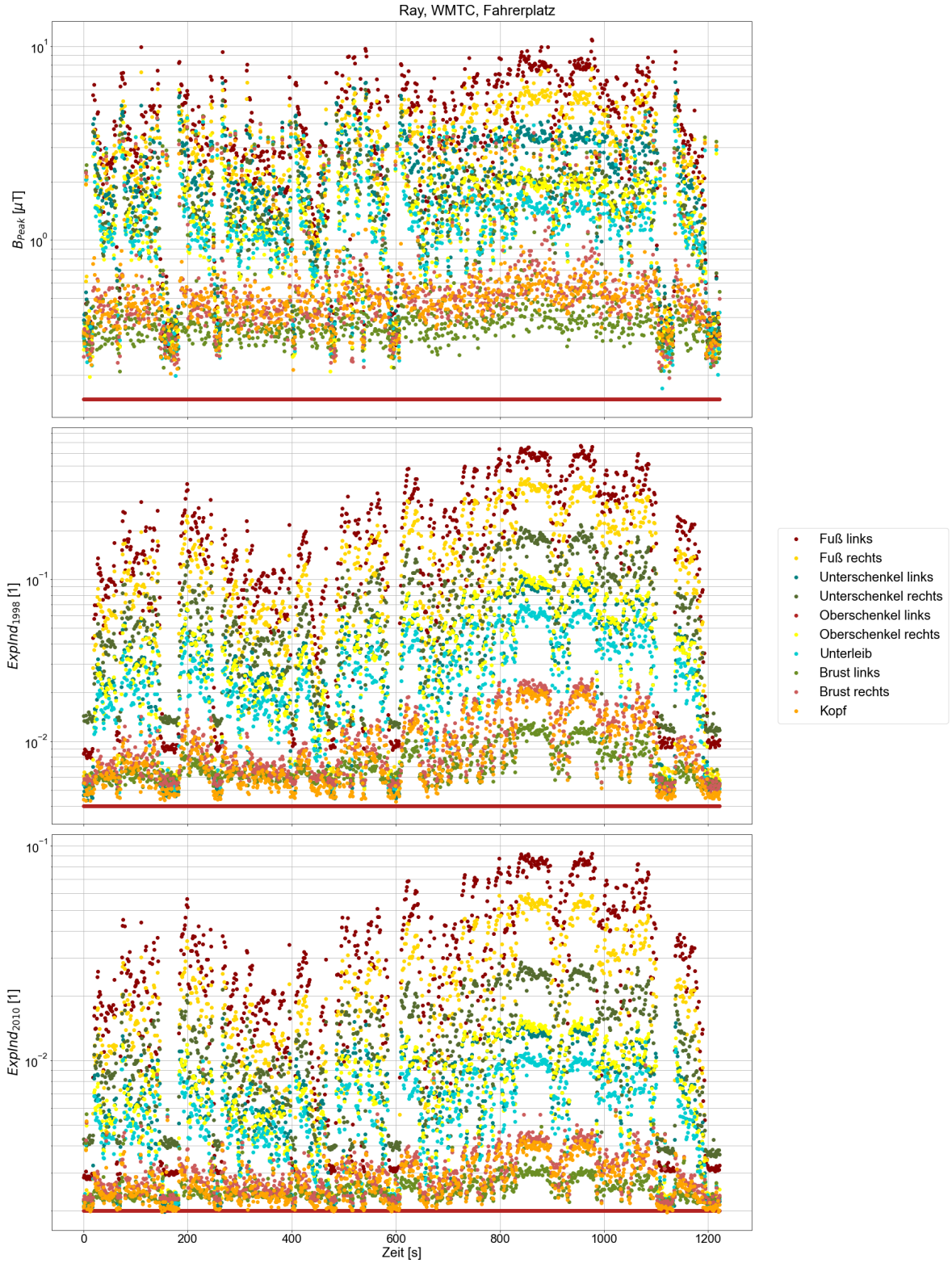


Abbildung 10.9: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz während des WMTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

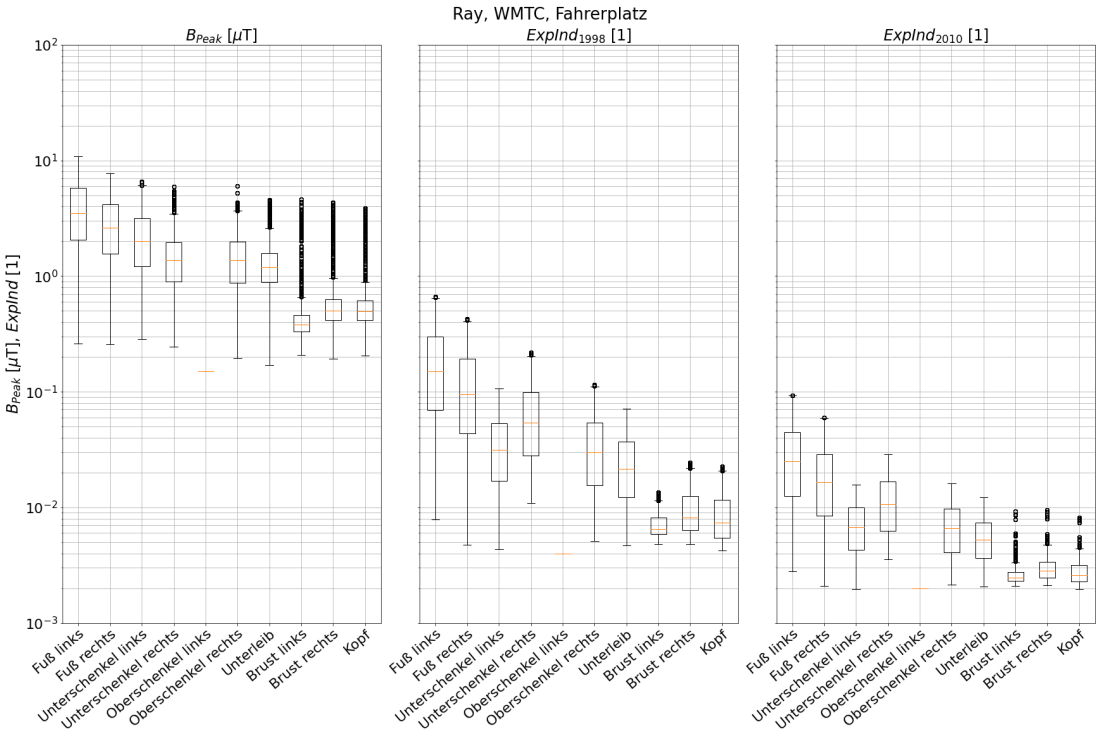


Abbildung 10.10: Statistische Auswertung der WMTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer). Aufgrund eines Defekts des entsprechenden Messkanals liegen keine Messdaten für den linken Oberschenkelbereich vor.

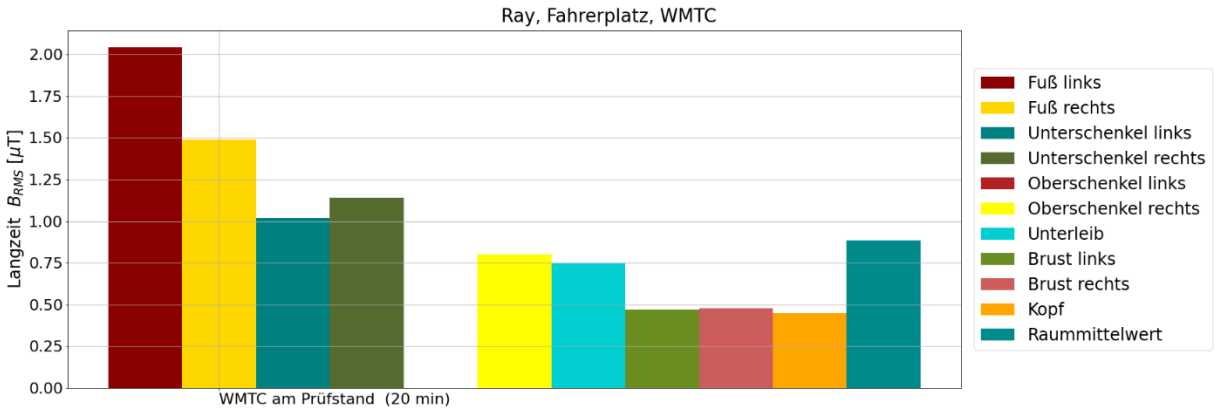


Abbildung 10.11: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WMTC-Fahrt am Prüfstand. Aufgrund eines Defekts des entsprechenden Messkanals liegen keine Messdaten für den linken Oberschenkelbereich vor.

10.4.1.3 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, versursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen für den Fahrerplatz zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 5.6).

Abbildung 10.12 fasst die Ergebnisse am Fahrerplatz der im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

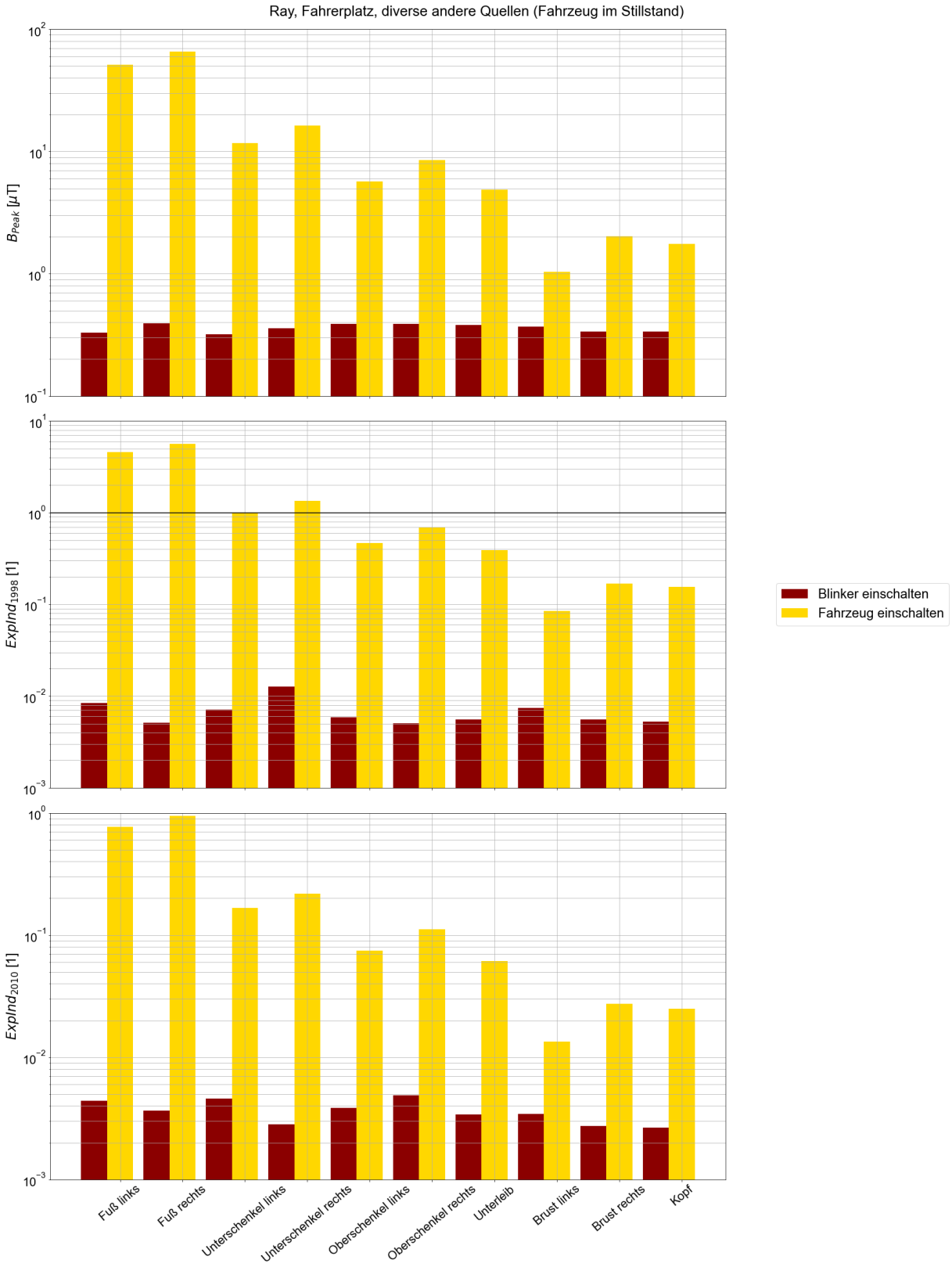


Abbildung 10.12: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser anderer Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

10.4.2 Zero SR



Abbildung 10.13: Untersuchte Zero SR auf dem Rollenprüfstand.

10.4.2.1 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 10.14 und Abbildung 10.15 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen, bei jeweils unterschiedlichen Lastmomenten (Steigungen)[45]. Die Ergebnisse der Messungen am Prüfstand sind dabei direkt den entsprechenden am Testgelände (schraffierte Balken) ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt.

Für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 10.14) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im rechten Fußbereich des Fahrers, im Ausmaß von bis zu ca. 0.54 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Die Reifenmagnetisierung hatte daran keinen relevanten Anteil (< 0.03). Von den Oberschenkeln aufwärts blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit unterhalb von 0.1.

[45] Für den Fahrerplatz liegen aufgrund eines Defekts des entsprechenden Messkanals keine Messdaten für den linken Oberschenkelbereich vor.

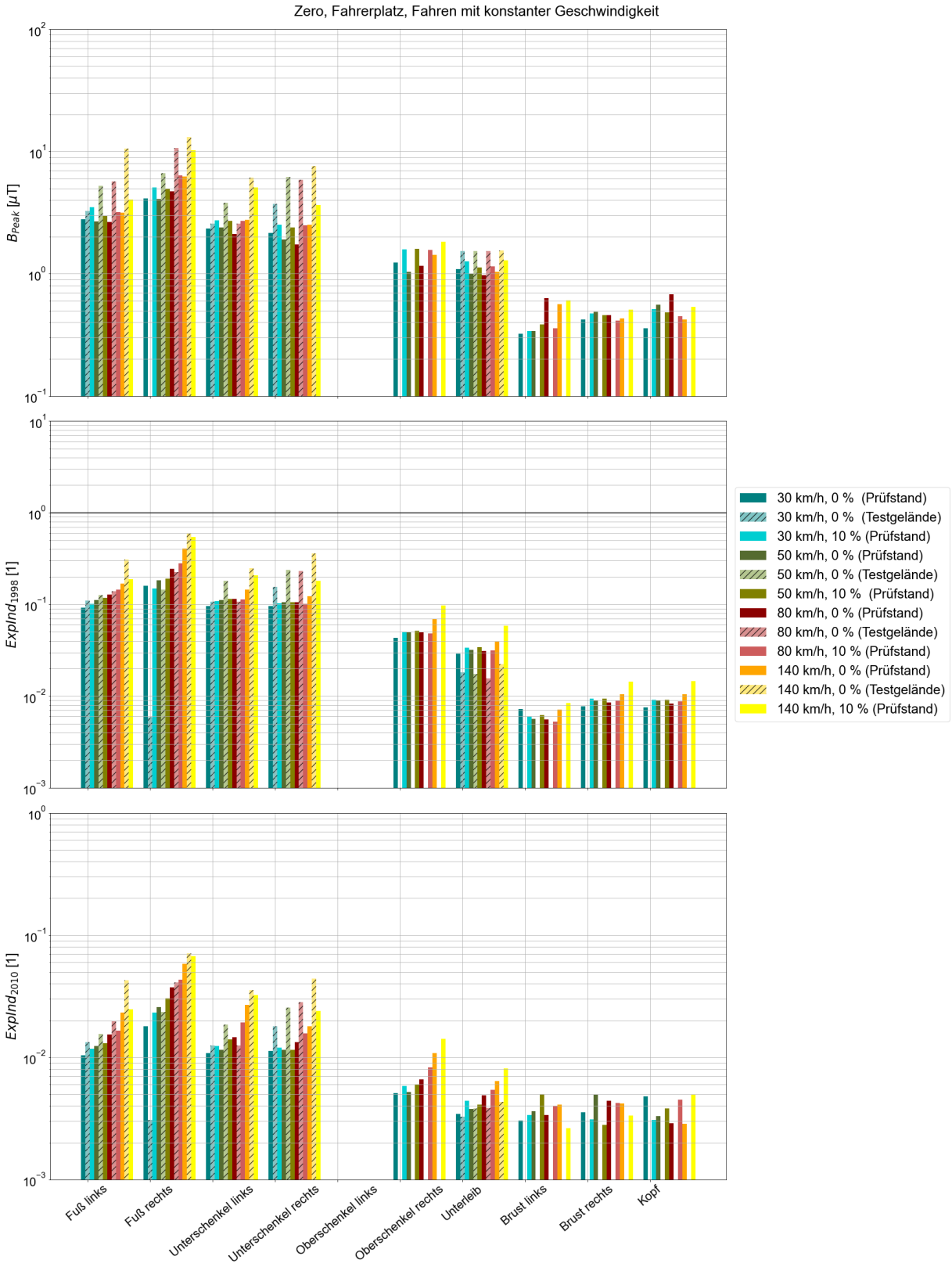


Abbildung 10.14: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

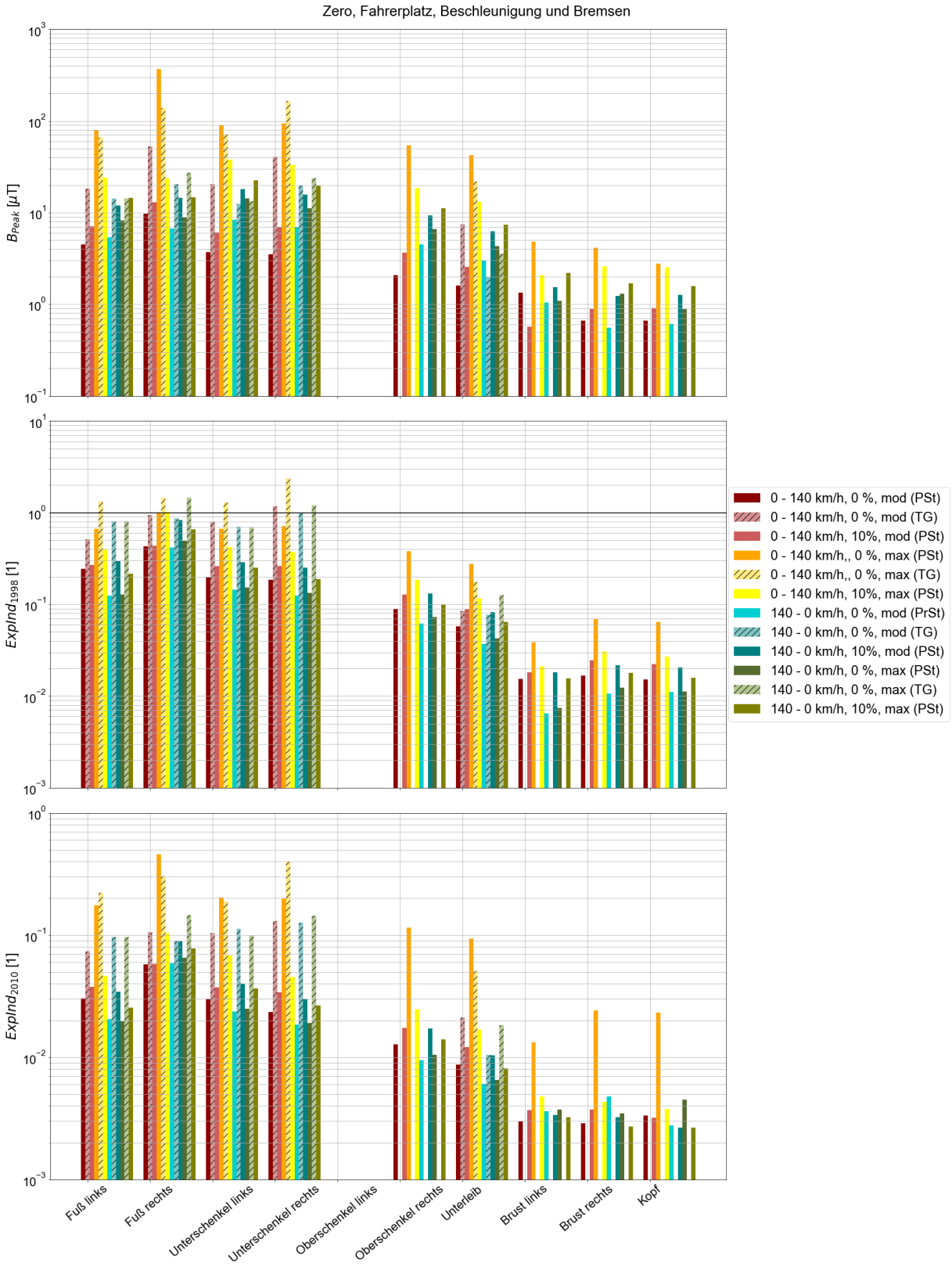


Abbildung 10.15: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-140 km/h) und Bremsen (140-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten BPEAK (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

Deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit traten beim Beschleunigen auf (Abbildung 10.15) und erreichten Werte bis zu ca. 2.4 im Bereich des rechten Unterschenkels des Fahrers (obwohl die Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte im Fußbereich deutlich größer sind). Im Oberschenkel- und Unterleibsbereich erreichten die gemessenen $ExpInd_{1998}$ noch Werte bis zu ca. 0.38, darüber blieben die $ExpInd_{1998}$ unterhalb von 0.1.

Abbildung 10.16 zeigt einen Vergleich der Zeitverläufe der magnetischen Flussdichte im rechten Fuß- und Unterschenkelbereich des Fahrers am Beginn der Beschleunigung. Obwohl die Magnetfeldamplituden im Fußbereich deutlich größer waren, führte der offensichtlich größere Oberwellenanteil im Unterschenkelbereich zu größeren resultierenden $ExpInd_{1998}$.

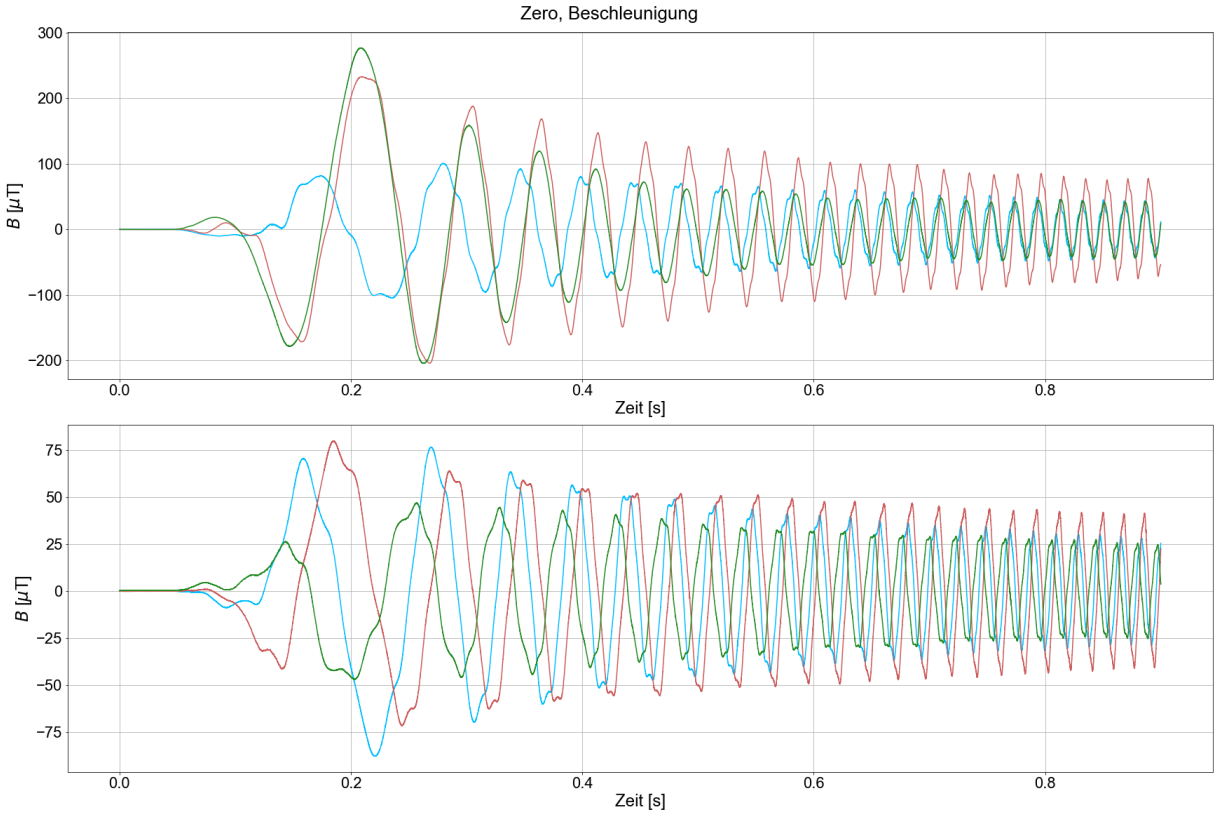


Abbildung 10.16: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte im rechten Fuß- (oben) und Unterschenkelbereich (unten) des Fahrers am Beginn eines starken Beschleunigungsvorganges. Der Oberwellenanteil im Unterschenkelbereich ist deutlich größer als im Fußbereich, was zu größeren Expositionsindizes im Unterschenkelbereich führt (trotz geringerer Amplitude).

10.4.2.2 Magnetfeldimmissionen beim WMTC

Abbildung 10.17 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der WMTC-Fahrt am Prüfstand am Fahrerplatz in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer. Die ca. bei Sekunde 350 sichtbaren geringfügigen Sprünge der Expositionsindizes in den Messkanälen für Brust und Kopf stehen nicht in Zusammenhang mit dem untersuchten Fahrzeug, sondern sind auf ein Verrutschen des Hartschaum-Dummy-Oberkörpers während der Messungen zurückzuführen.

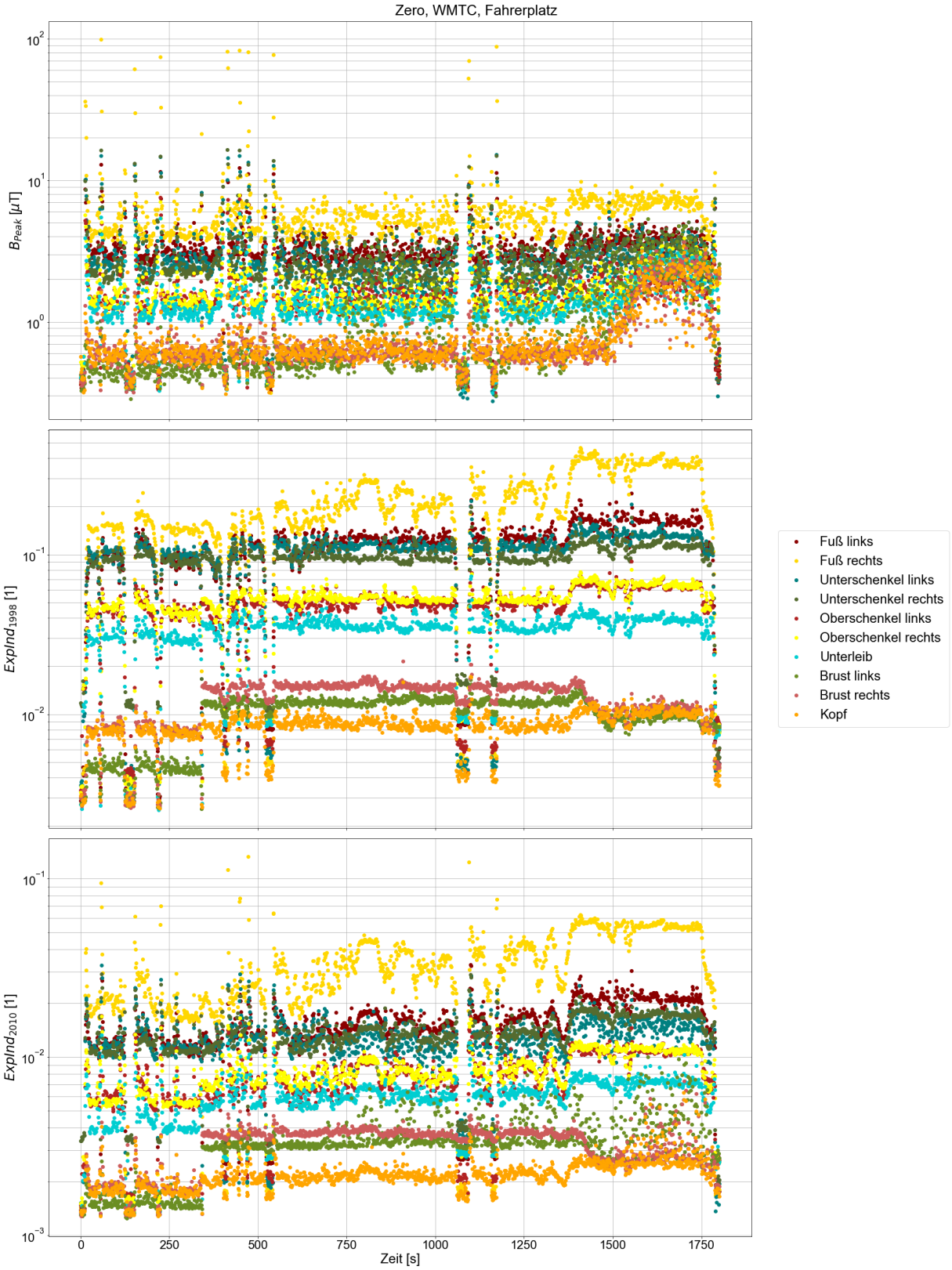


Abbildung 10.17: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz während des WMTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

Abbildung 10.18 zeigt eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 10.19 zeigt schließlich die aus den Messungen während des WMTC resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

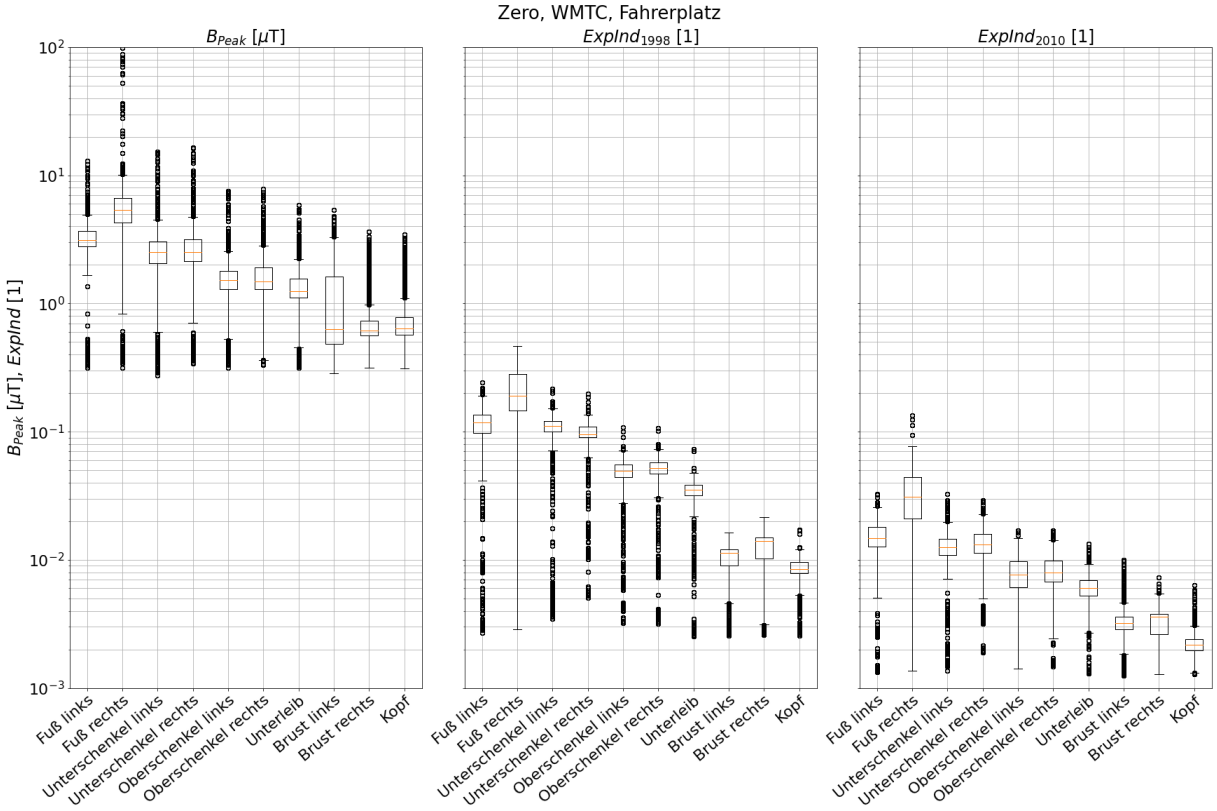


Abbildung 10.18: Statistische Auswertung der WMTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

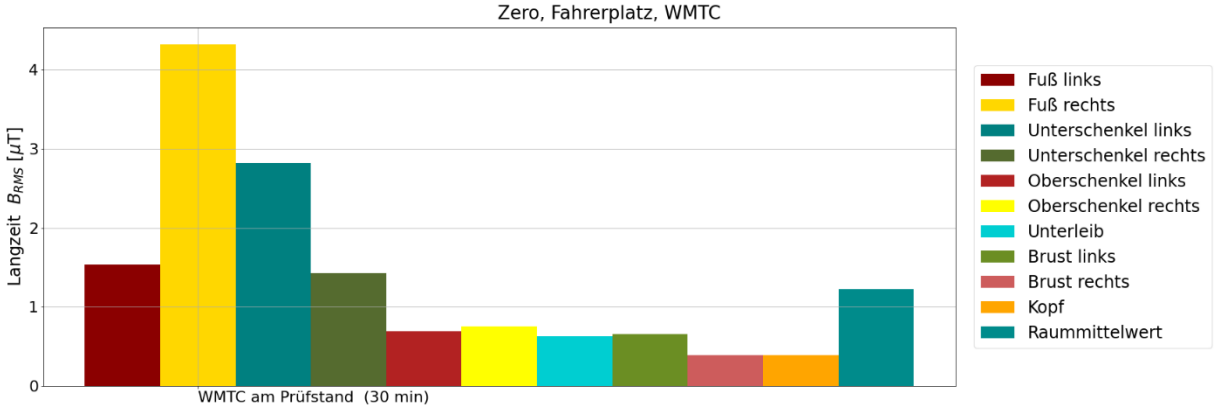


Abbildung 10.19: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WMTC-Fahrt am Prüfstand.

10.4.2.3 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, versursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen für den Fahrerplatz zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs im Unterschenkelbereich auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 0.91).

Abbildung 10.20 fasst die Ergebnisse am Fahrerplatz der im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

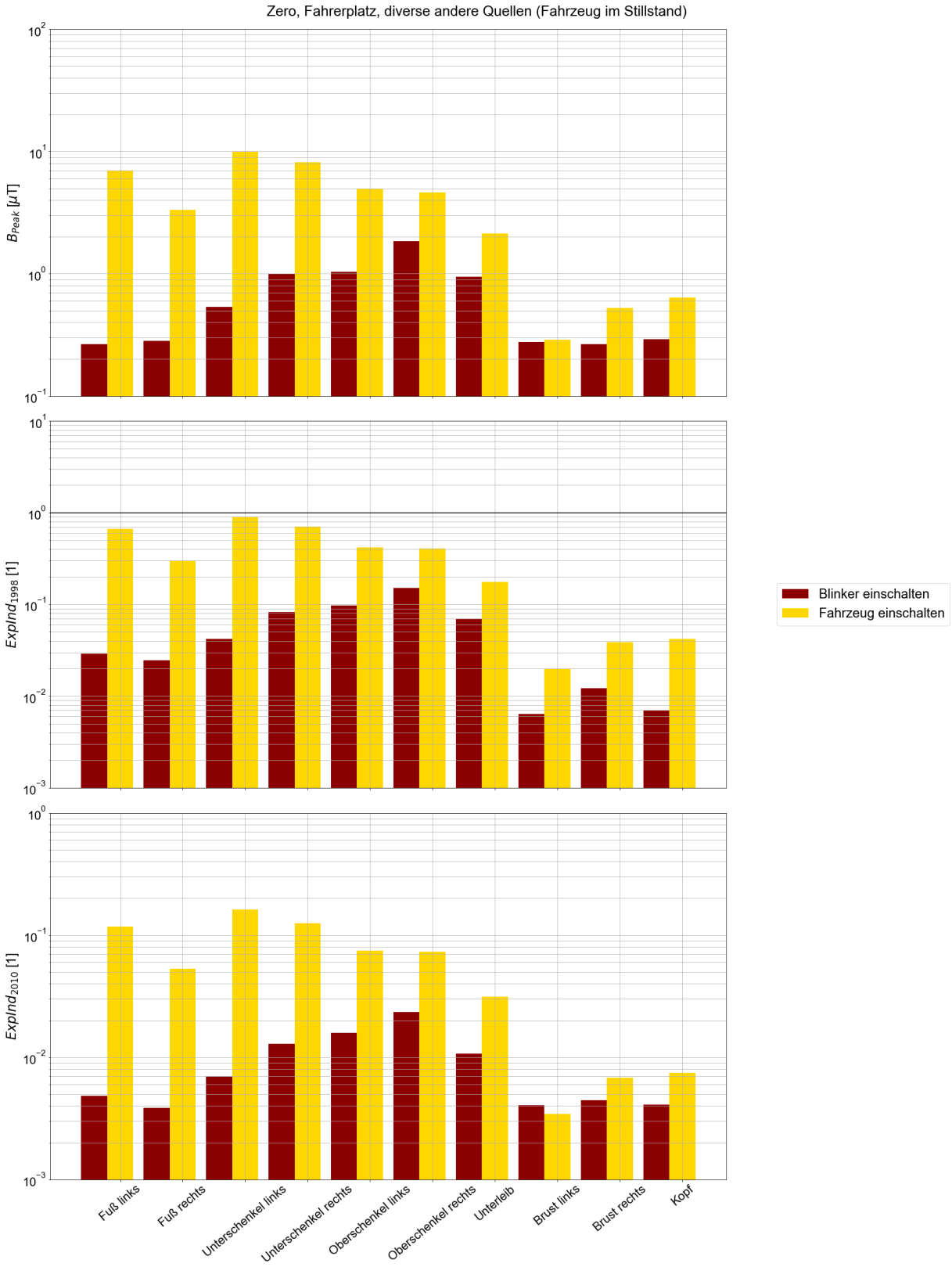


Abbildung 10.20: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

10.4.3 Silence



Abbildung 10.21: Untersuchte Silence auf dem Rollenprüfstand.

10.4.3.1 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 10.22 bis Abbildung 10.25 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz und am Sozius während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen, bei jeweils unterschiedlichen Lastmomenten (Steigungen). Die Ergebnisse der Messungen am Prüfstand sind dabei direkt den entsprechenden am Testgelände (schraffierte Balken) ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt.

Beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 10.22 und Abbildung 10.23) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ im rechten Fußbereich des Sozius im Ausmaß von bis zu ca. 0.54 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Die Reifenmagnetisierung hatte daran keinen relevanten Anteil. Im rechten Fußbereich des Fahrers betrugt der beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit ermittelte $ExpInd_{1998}$ maximal 0.13.

Deutlich größere Expositionsindizes als beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit traten beim Beschleunigen auf (Abbildung 10.24 und Abbildung 10.25) und erreichten Werte bis zu ca. 1.17 im rechten Fußbereich des Sozius (0.43 im rechten Fußbereich des Fahrers).

10.4.3.2 Magnetfeldimmissionen beim WMTC

Abbildung 10.26 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der WMTC-Fahrt am Prüfstand am Fahrerplatz in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

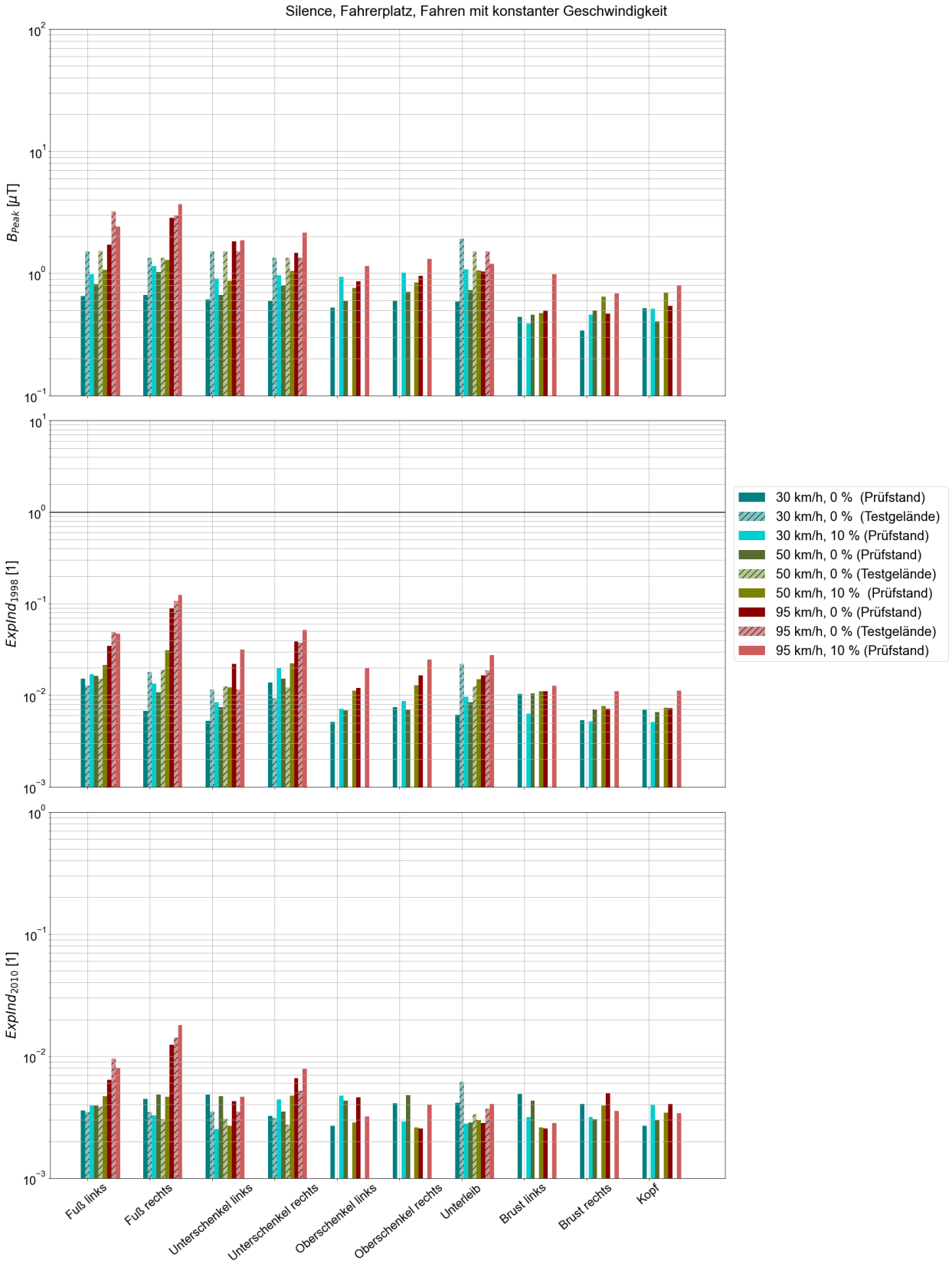


Abbildung 10.22: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

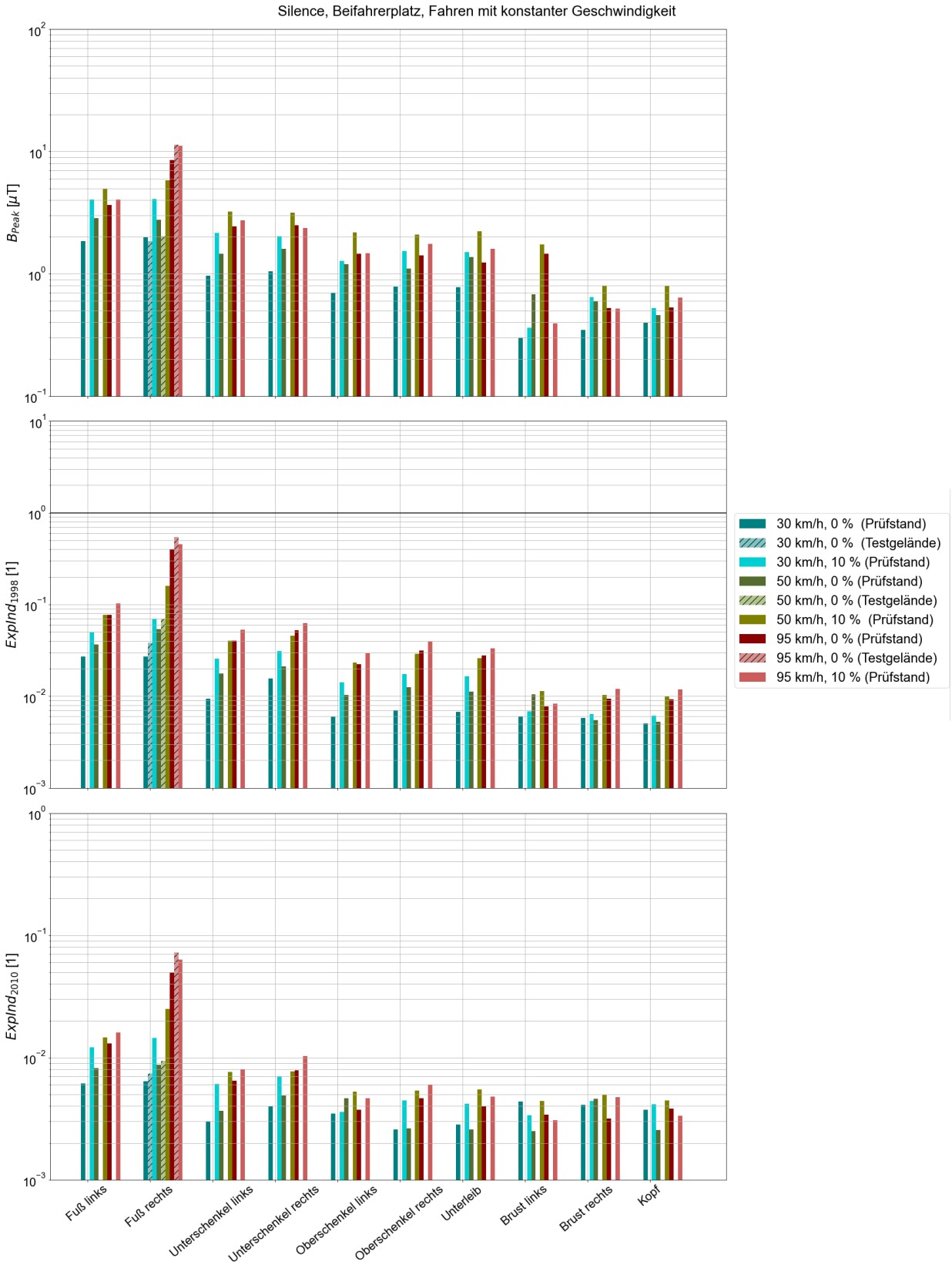


Abbildung 10.23: Magnetfeldimmissionen am Soziusplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurde am Soziusplatz nur die Sondenposition „Fuß rechts“ untersucht.

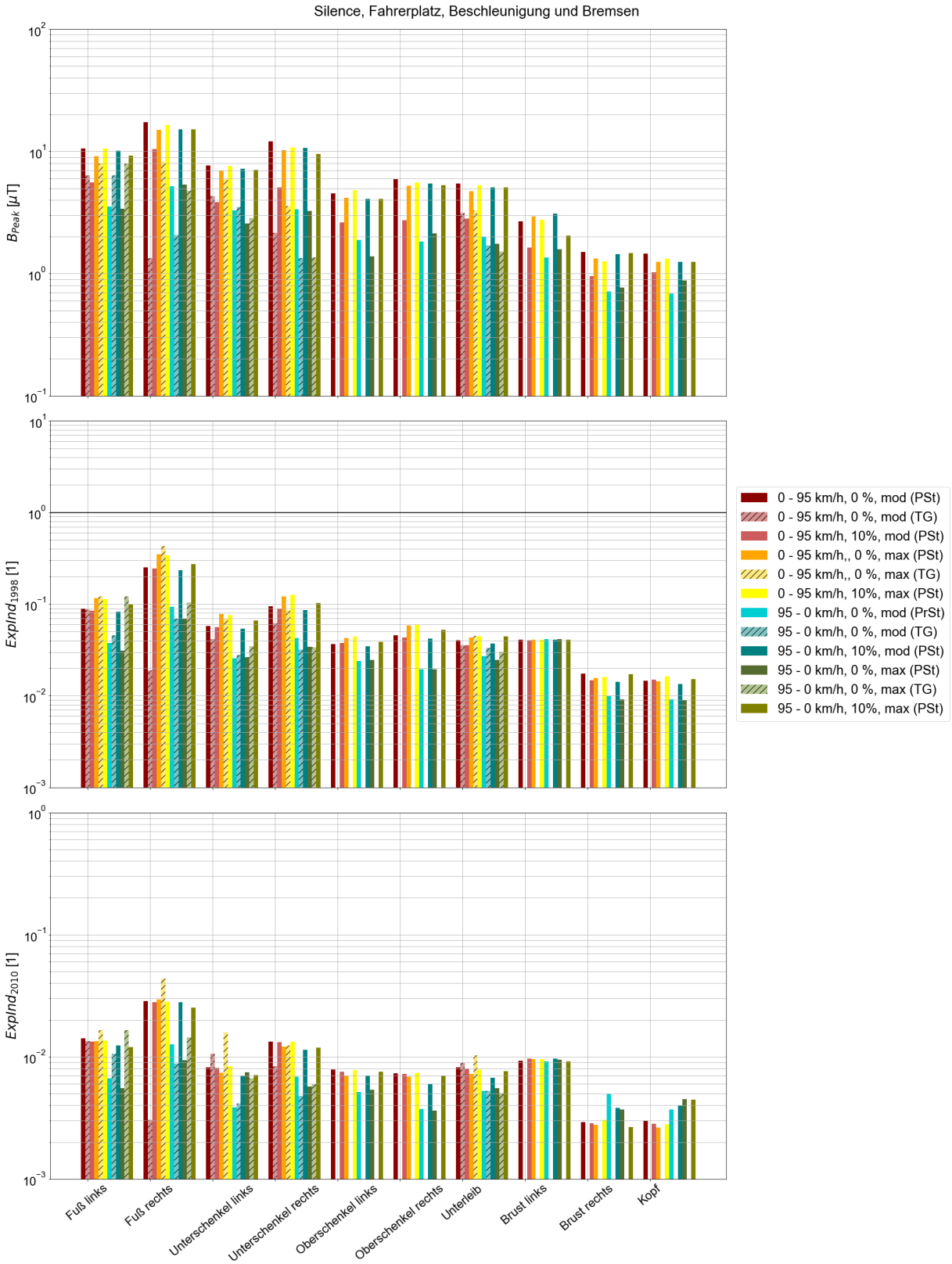


Abbildung 10.24: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-95 km/h) und Bremsen (95-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

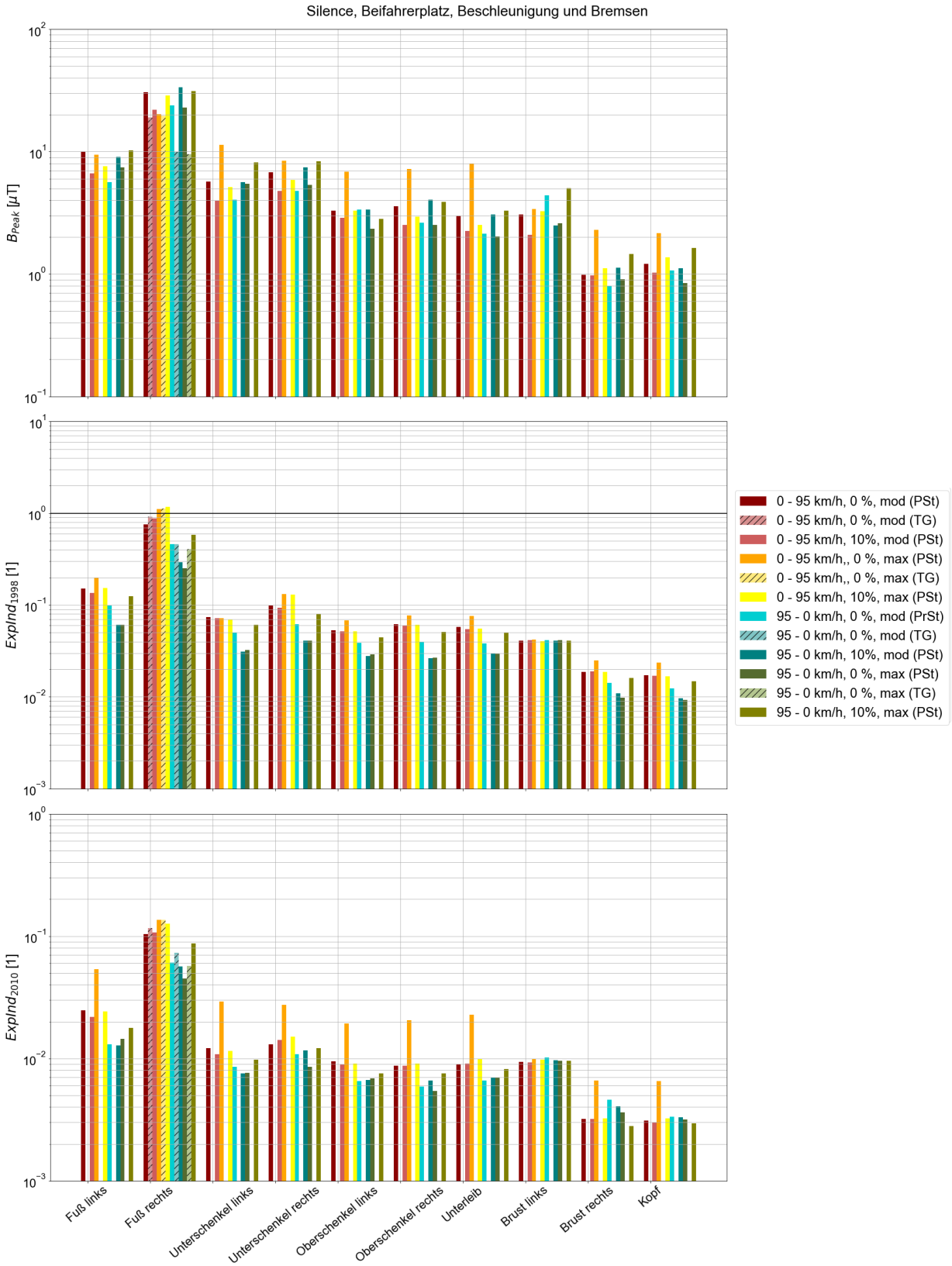


Abbildung 10.25: Magnetfeldimmissionen am Soziusplatz beim Beschleunigen (0-95 km/h) und Bremsen (95-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurde am Soziusplatz nur die Sondenposition „Fuß rechts“ untersucht.



Abbildung 10.26: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz während des WMTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

Abbildung 10.27 zeigt eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

Abbildung 10.28 zeigt schließlich die aus den Messungen während des WMTC (Fahrerplatz) resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

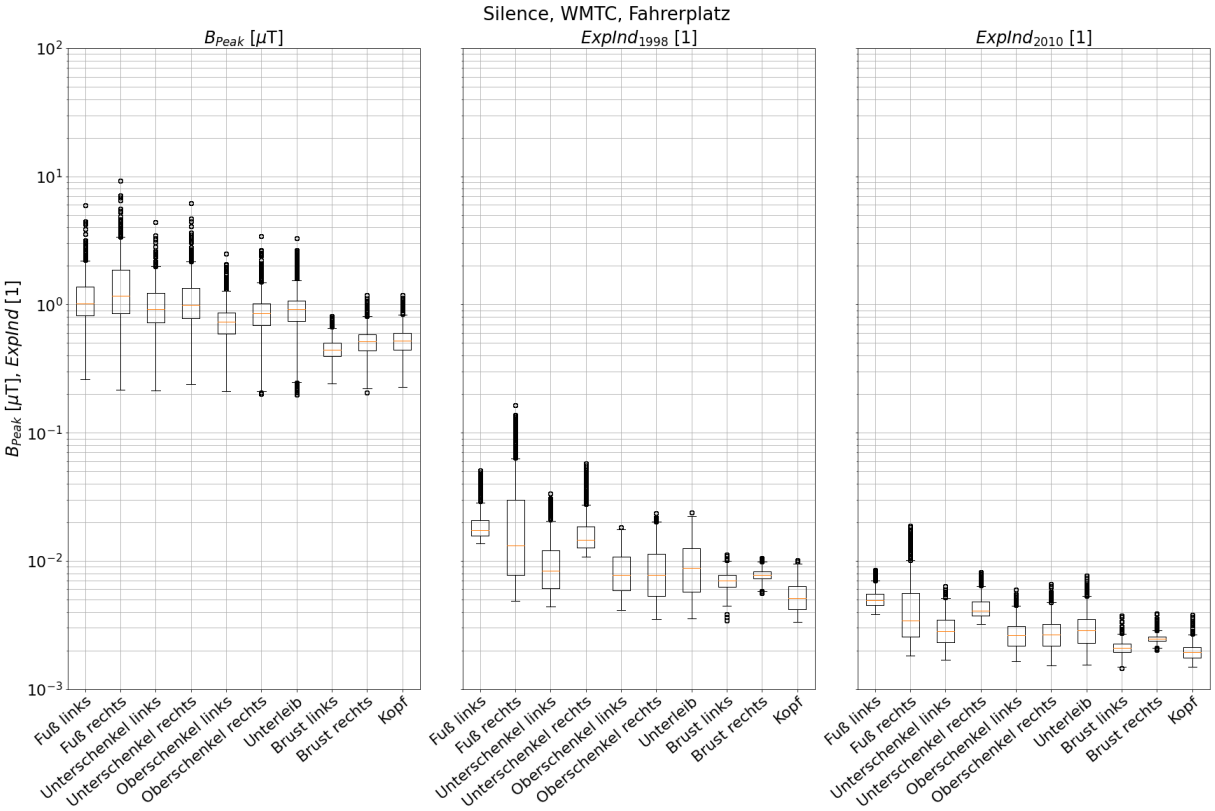


Abbildung 10.27: Statistische Auswertung der WMTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

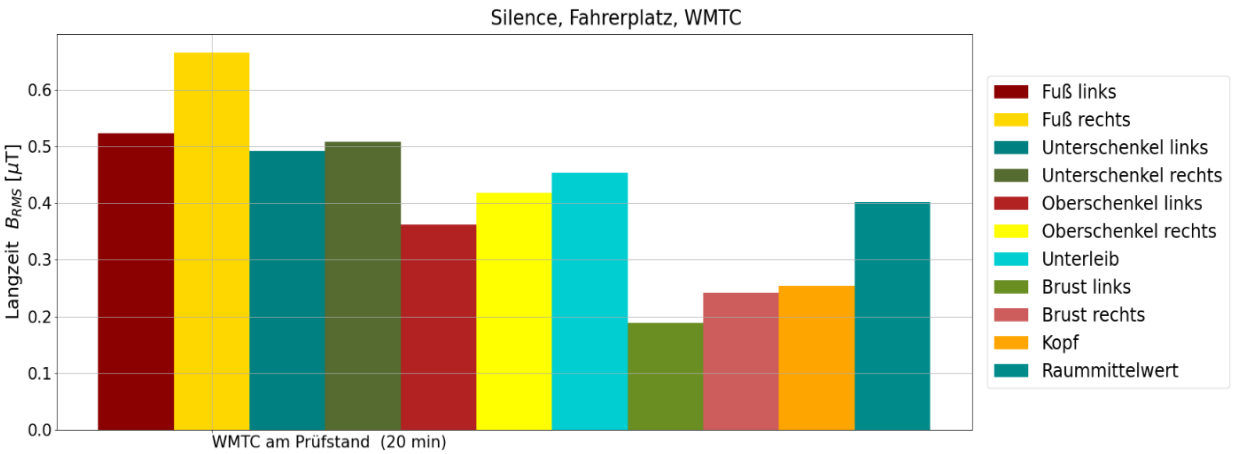


Abbildung 10.28: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WMTC-Fahrt am Prüfstand.

10.4.3.3 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen, versursacht durch andere, nicht mit dem Antriebssystem in Zusammenhang stehende elektrische Fahrzeugkomponenten sind in den folgenden Abbildungen für den Fahrerplatz zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten beim Einschalten des Fahrzeugs im Bereich des rechten Fußes am Fahrerplatz auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 3.9).

Abbildung 10.29 fasst die Ergebnisse am Fahrerplatz der im Stillstand gemessenen Immissionen in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

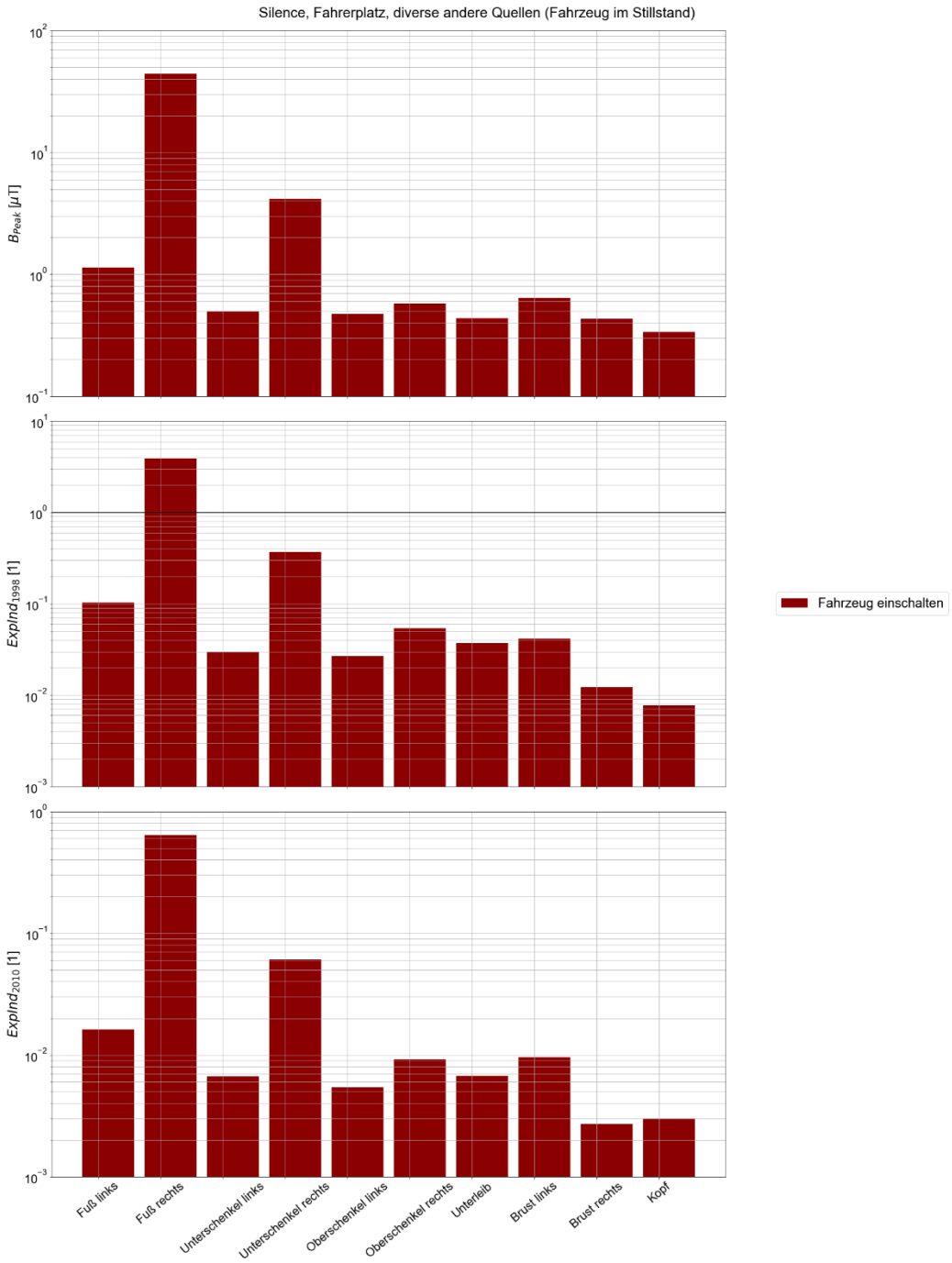


Abbildung 10.29: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz zufolge diverser Magnetfeldquellen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

10.4.4 Super Socco



Abbildung 10.30: Untersuchte Super Socco auf dem Rollenprüfstand.

10.4.4.1 Magnetfeldimmissionen beim Fahren unter definierten Bedingungen

Abbildung 10.31 und Abbildung 10.32 fassen die Ergebnisse für die am Fahrerplatz[46] während des Fahrens unter definierten Bedingungen gemessenen Magnetfeldimmissionen zusammen, jeweils getrennt für das Fahren mit konstanter Geschwindigkeit und für unterschiedlich starkes Beschleunigen bzw. Bremsen, bei jeweils unterschiedlichen Lastmomenten (Steigungen). Die Ergebnisse der Messungen am Prüfstand sind dabei direkt den entsprechenden am Testgelände (schraffierte Balken) ermittelten Messergebnissen gegenübergestellt.

Beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit (Abbildung 10.31) zeigten sich die größten $ExpInd_{1998}$ in den Fußbereichen des Fahrers, im Ausmaß von bis zu ca. 0.39 bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998. Die Reifenmagnetisierung hatte daran keinen relevanten Anteil (< 0.03). Von den Unterschenkeln aufwärts blieben die $ExpInd_{1998}$ beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit unterhalb von 0.1.

Die maximalen, beim Beschleunigen am Fahrerplatz gemessenen Expositionsindizes lagen in der gleichen Größenordnung (0.40) wie beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit.

Im Oberschenkel- und Unterleibsbereich erreichten die gemessenen $ExpInd_{1998}$ noch Werte bis zu ca. 0.04, darüber blieben die $ExpInd_{1998}$ unterhalb von 0.01.

[46] Dieses Fahrzeug hat keinen Sozius.

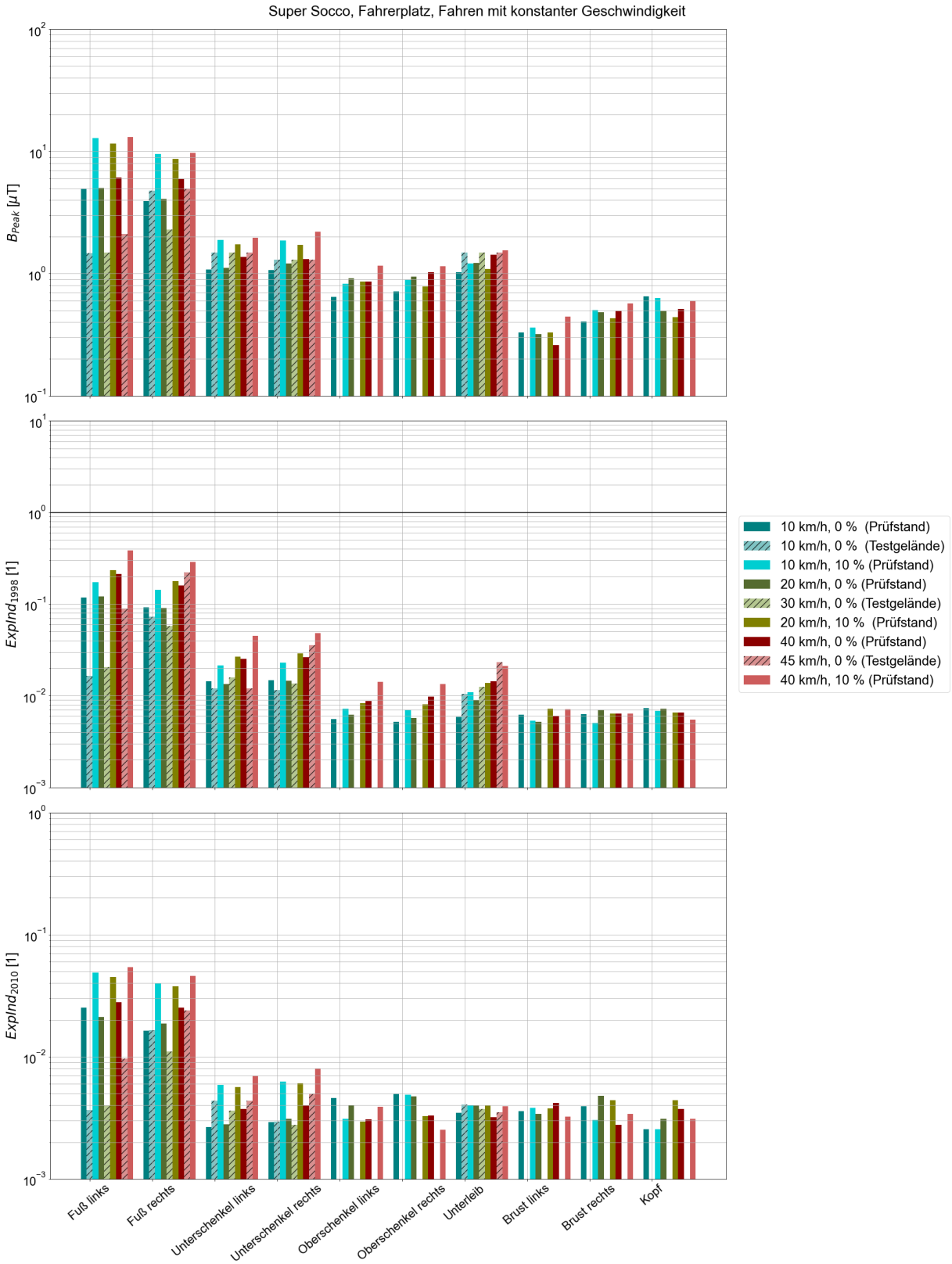


Abbildung 10.31: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Fahren mit konstanter Geschwindigkeit in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

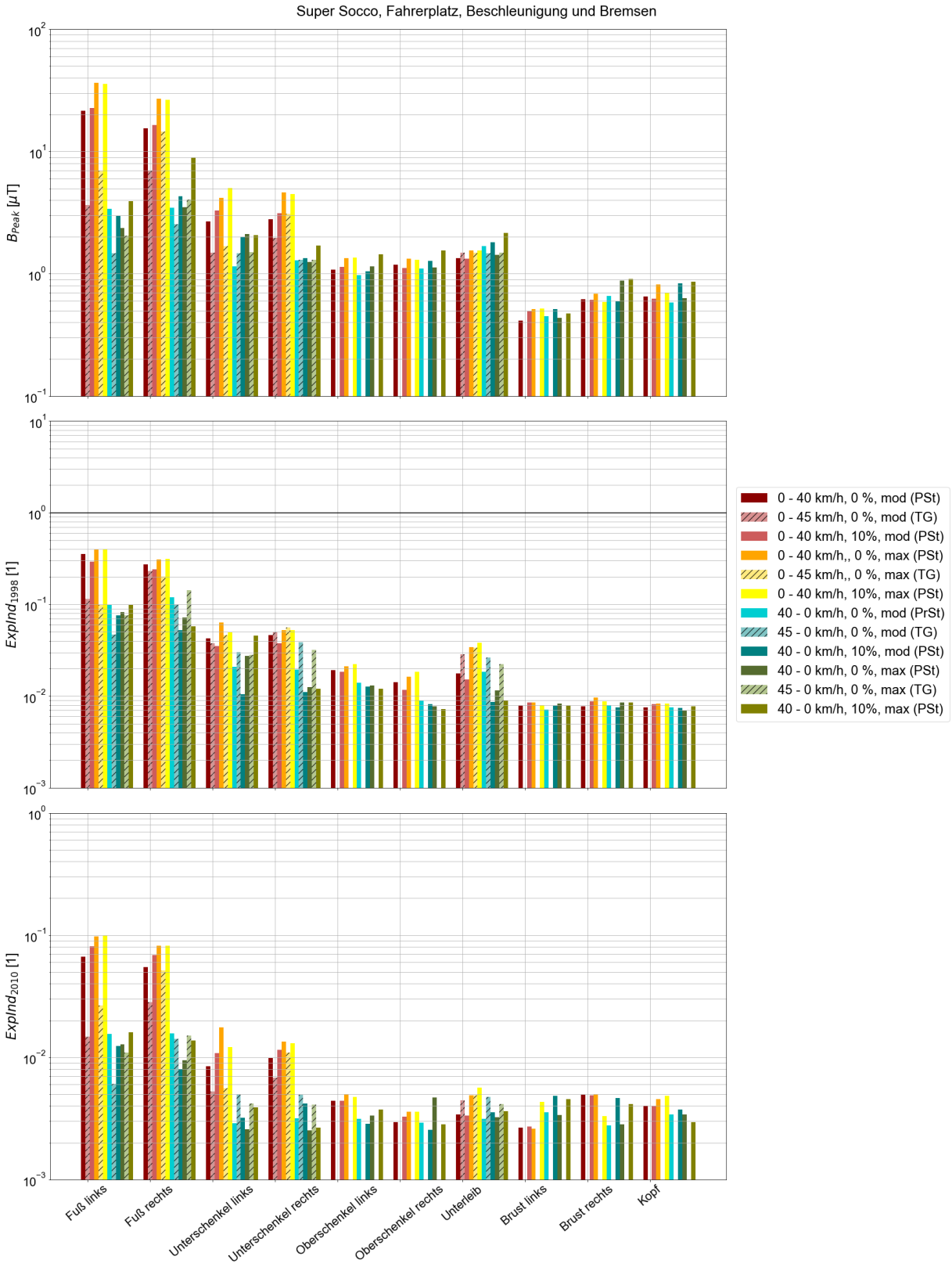


Abbildung 10.32: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz beim Beschleunigen (0-45 km/h) und Bremsen (45-0 km/h) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten); TG Testgelände, PSt Prüfstand; Bei der Fahrt auf dem Testgelände wurden am Fahrerplatz nur die Sondenpositionen „Fuß links“, „Fuß rechts“, „Unterschenkel links“, „Unterschenkel rechts“ und „Unterleib“ untersucht.

10.4.4.2 Magnetfeldimmissionen beim WMTC

Abbildung 10.33 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse der WMTC-Fahrt am Prüfstand am Fahrerplatz in Form des Verlaufs von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ über die Zeit. Jeder Datenpunkt entspricht dem Ergebnis einer Messung von jeweils einer Sekunde Messdauer.

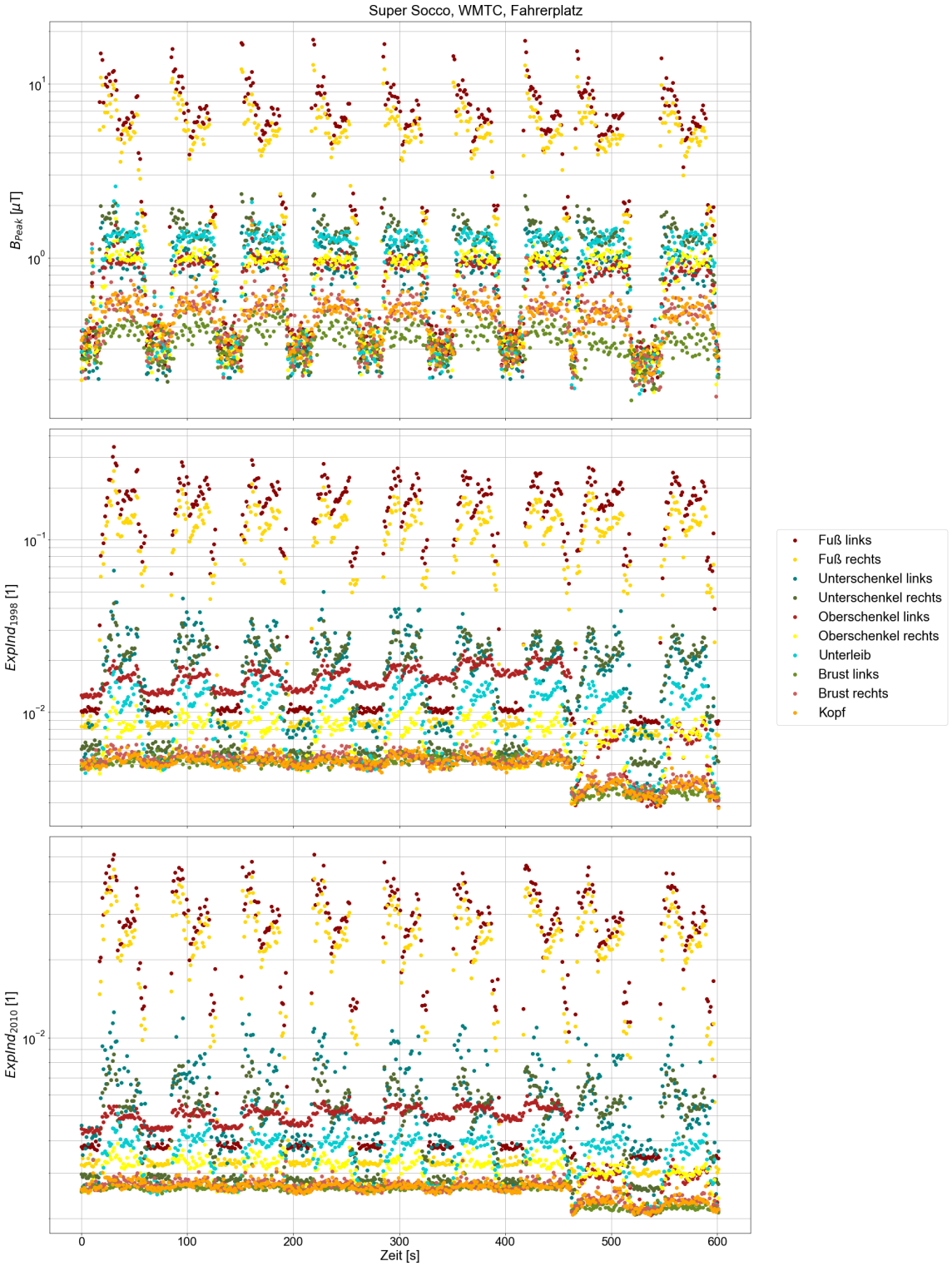


Abbildung 10.33: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz während des WMTC in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

Die ca. bei Sekunde 450 sichtbaren geringfügigen Sprünge der Expositionsindizes in den Messkanälen für Brust und Kopf stehen nicht in Zusammenhang mit dem untersuchten Fahrzeug, sondern sind auf ein Verrutschen des Hartschaum-Dummy-Oberkörpers während der Messungen zurückzuführen.

Abbildung 10.34 zeigt eine statistische Auswertung der Messergebnisse in Form von Boxplots.

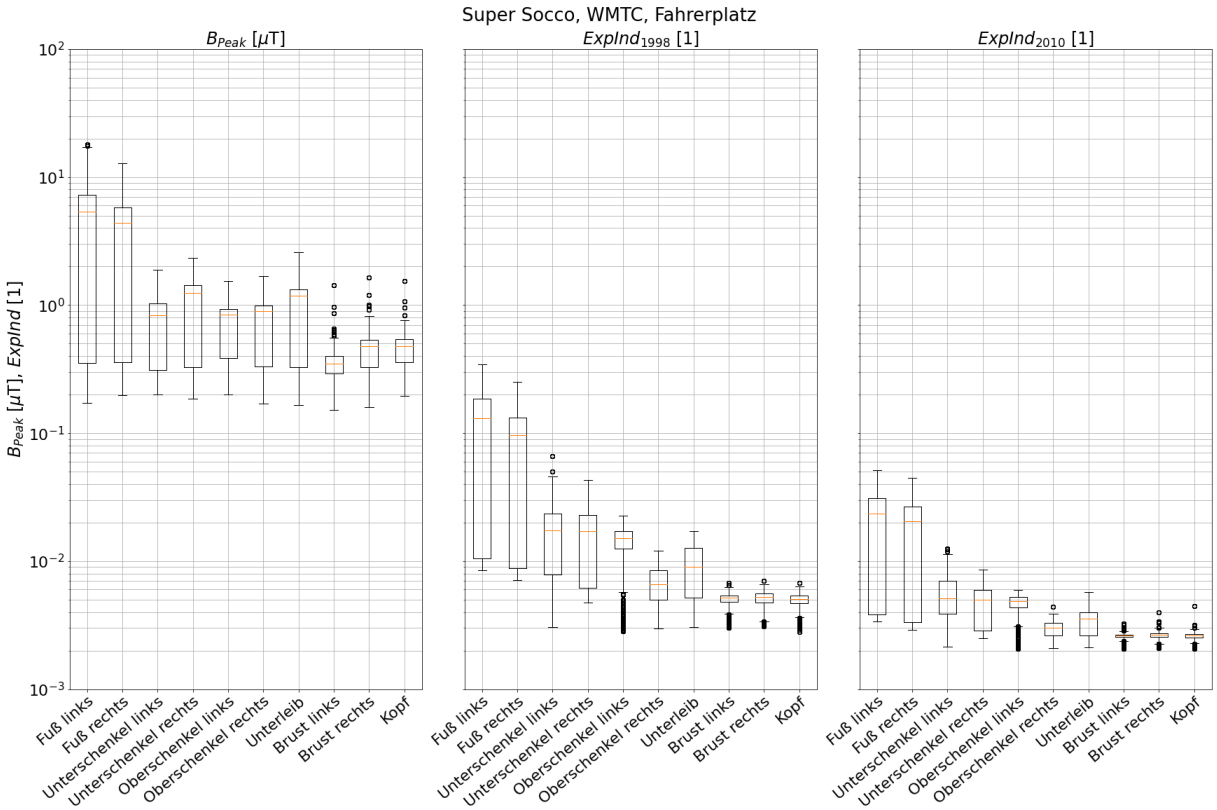


Abbildung 10.34: Statistische Auswertung der WMTC-Fahrt am Prüfstand in einem Boxplot (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

Abbildung 10.35 zeigt schließlich die aus den Messungen während des WMTC resultierenden Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte B_{RMS} in den unterschiedlichen Messpositionen und den Raummittelwert.

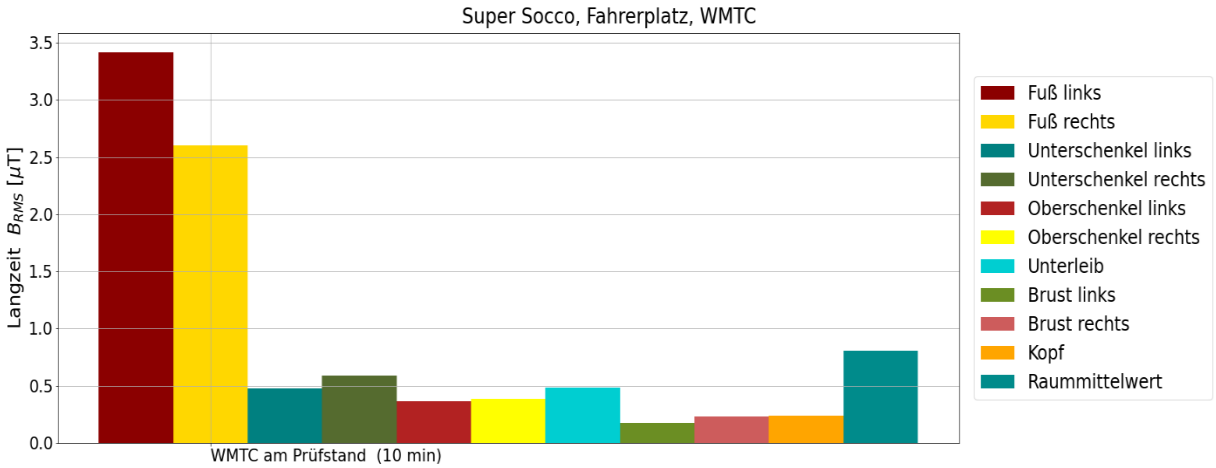


Abbildung 10.35: Langzeit-Effektivwerte der magnetischen Flussdichte während der WMTC-Fahrt am Prüfstand.

10.4.4.3 Magnetfeldimmissionen durch andere Feldquellen

Die Ergebnisse der Messungen im Stillstand zur Erfassung von Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz, versursacht durch das Einschalten sind in den folgenden Abbildungen zusammengefasst. Die größten $ExpInd_{1998}$ traten im Unterschenkelbereich auf ($ExpInd_{1998}$ von bis zu ca. 6.1). Abbildung 10.37 zeigt den Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte im rechten Fußbereich während des Einschaltens.

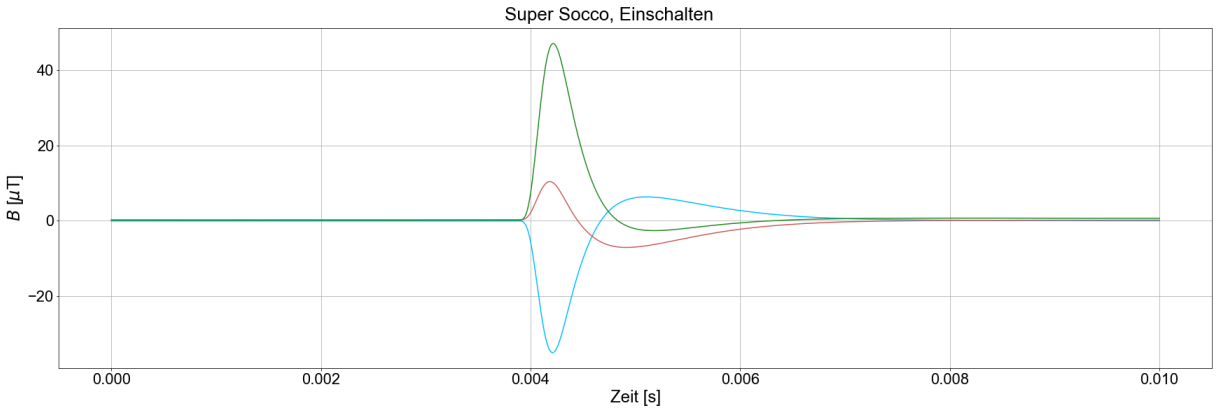


Abbildung 10.36: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte beim Einschalten des Fahrzeugs, gemessen im rechten Fußbereich des Fahrerplatzes.

Abbildung 10.37 fasst die Ergebnisse der Messungen während des Einschaltens in Form von B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ zusammen.

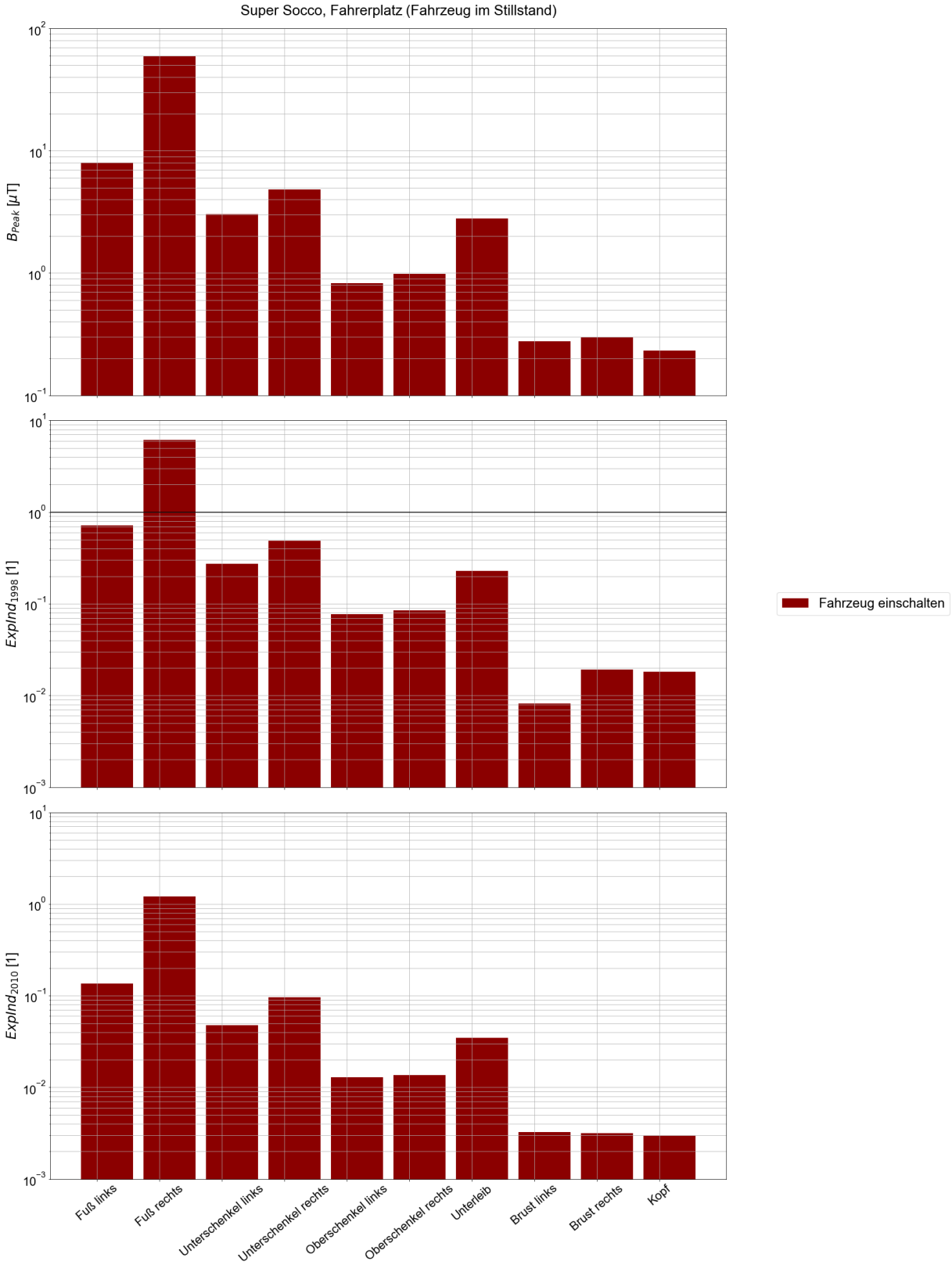


Abbildung 10.37: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz verursacht durch das Einschalten, in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

10.5 Diskussion der Messergebnisse

Tabelle 10.2 fasst die wichtigsten Daten hinsichtlich der maximal gemessenen magnetischen Immissionen an allen untersuchten einspurigen BEV zusammen. Tabelle 10.3 enthält weitere Details hinsichtlich der Immissionen während des Fahrens. Wie auch im Falle der zweispurigen Fahrzeuge traten während des Fahrens die Maximalimmissionen an allen Fahrzeugen während des Beschleunigens oder Bremsens auf (niemals während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit).). Es zeigt sich auch hier der Trend geringfügig höherer Immissionen bei größerer Steigung. An drei der vier untersuchten Fahrzeuge lagen die maximalen, während des Fahrens gemessenen $ExpInd_{1998}$ oberhalb von 1.0. Der größte lokal gemessene $ExpInd_{1998}$ lag bei 8.24 im Bereich der Fußraste des Sozius.

Durch das Einschalten der Fahrzeuge wurden an zwei der untersuchten Fahrzeuge $ExpInd_{1998}$ größer als 1 festgestellt (Maximum bei 6.15).

Tabelle 10.2: Tabellarische Zusammenfassung der Messungen mit einspurigen BEV.

			Ray 7.7	Zero SR	Silence	Super Socco
Fahren	**Max. B_{PEAK}**	max. B_{PEAK} [µT]	111	365	33.7	36.6
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
		Zustand/Ereignis	a_{max}	a_{max}	$-a_{max}$	a_{max}
	Max. $ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	**8.24**	**2.35**	**1.17**	0.40
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Unterschenkel, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
		Zustand/Ereignis	a_{max}	a_{max}	a_{max}	a_{max}
	Max. $ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	**1.05**	0.46	0.14	0.10
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
		Zustand/Ereignis	a_{max}	a_{max}	a_{max}	a_{max}
	Langzeit B_{RMS} Raummittel[1)] WMTC [µT]		0.77	0.99	0.37	0.71
Stillstand – Einschalten, Fahrerplatz	**Max. B_{PEAK}**	max. B_{PEAK} [µT]	65.4	10.0	44.3	59.5
		Position	Fuß, rechts	Unterschenkel, links	Fuß, rechts	Fuß, rechts
	Max. $ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	**5.66**	0.91	**3.89**	**6.15**
		Position	Fuß, rechts	Unterschenkel, links	Fuß, rechts	Fuß, rechts
	Max. $ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.94	0.16	0.64	**1.20**
		Position	Fuß, rechts	Unterschenkel, links	Fuß, rechts	Fuß, rechts

Legende

Zustand/Ereignis/Quelle: v_x…Fahren konst. Geschw. x, $\pm a_{mod}$…moderat Beschleunigen (+) oder Bremsen (-), $\pm a_{max}$ …maximal Beschl. (+) oder Bremsen (-)

Anmerkungen

[1)] arithmetischer Mittelwert aller Langzeit B_{RMS}-Werte über alle betrachteten Messpositionen entlang des Körpers am Fahrerplatz

Tabelle 10.3: Tabellarische Zusammenfassung der Messungen mit einspurigen Fahrzeugen während des Fahrens mit konstanter Geschwindigkeit, während des Bremsens und während des Beschleunigens.

			Ray 7.7	Zero SR	Silence	Super Socco
Fahren mit konstanter Geschwindigkeit	Max. B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	35.6	13.1	11.40	13.14
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
	Max. $ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	**2.08**	0.60	0.54	0.39
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Unterschenkel, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
	Max. $ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.27	0.07	0.07	0.05
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
Beschleunigen	Max. B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	111	365	28.7	36.6
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
	Max. $ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	**8.24**	**2.35**	**1.17**	0.40
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Unterschenkel, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
	Max. $ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	**1.05**	0.46	0.14	0.10
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links
Bremsen	Max. B_{PEAK}	max. B_{PEAK} [µT]	96.7	27.11	33.7	8.85
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts
	Max. $ExInd_{1998}$	max. $ExpInd_{1998}$ [1]	**2.10**	**1.46**	0.58	0.14
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts
	Max. $ExInd_{2010}$	max. $ExpInd_{2010}$ [1]	0.29	0.15	0.09	0.02
		Sitzplatz	Sozius	Fahrerplatz	Sozius	Fahrerplatz
		Position	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, rechts	Fuß, links

Wie auch im Fall der zweispurigen Fahrzeuge zeigen die Daten große Streubreiten über die untersuchten Fahrzeugmodelle und die höchsten Expositionsindizes traten entweder im Fuß- oder Unterschenkelbereich auf, während die Immissionen im Oberschenkel-, Unterleibs-, Brust- und Kopfbereich erwartungsgemäß deutlich geringer waren und in diesen Bereichen an keinem der untersuchten Fahrzeuge Expositionsindizes > 1 festgestellt wurden. Ebenfalls im Einklang mit den Ergebnissen der Untersuchungen mit zweispurigen Fahrzeugen ist die Tatsache, dass die während des WMTC ermittelten Maximalimmissionen deutlich unterhalb der Maximalimmissionen bei Ausschöpfung der Fahrzeugleistung liegt.

10.6 Numerische Berechnungen von Expositionssituationen

Numerische Berechnungen der im Körper induzierten elektrischen Feldstärke erfolgten für die Feldverhältnisse im Fußbereich des Beifahrers der Ray 7.7 bzw. des Fahrers der Zero SR, die zu maximalen $ExpInd_{1998}$ bezüglich der magnetischen Flussdichte führten. Bei der Auswahl der auf Grundlage numerischer Berechnungen zu analysierenden Fahrzeuge bzw. Expositionssituationen wurde das Augenmerk auf Situationen beim Fahren und auf Immissionen, verursacht durch Komponenten des elektrischen Antriebssystems gelegt (siehe auch Kapitel 9.6). Hohe Immissionswerte zufolge des Ein-/Ausschaltens wurden bei der Auswahl niedriger gewichtet.

Auf Grundlage von Detailmessungen der Feldverteilung in diesen Bereichen wurden zunächst numerische Feldquellen des Vektorpotenzials erstellt[47] und die Feldverteilung der magnetischen Flussdichte mit den Messungen verglichen. Die Methode der Berechnungen folgte wieder dem in Kapitel 9.6 beschriebenen Prozedere.

Auf eine streng korrekte Körperhaltung hinsichtlich der Ausrichtung von Oberkörper und Armen entsprechend dem Sitzen auf dem Fahrzeugsattel wurde verzichtet, da dies, aufgrund der stark lokalisierten Exposition im Unterschenkel bzw. Fußbereich keinen Einfluss auf das für die Expositionsbewertung relevante Berechnungsergebnis hat. Das Körpermodell wurde so platziert, dass im relevanten Körperbereich (Fuß- bzw. unterer Unterschenkelbereich) eine Feldverteilung auftritt, die der realen Feldverteilung innerhalb der in den jeweiligen Unterkapiteln angegebenen Unsicherheiten angenähert ist. Die räumliche Auflösung der Rechendomäne im interessierenden Bereich betrug 1 x 1 x 1 mm^3.

Da die Fußhaltung beim Fahren relativ zum Feldgradienten bzw. der Feldvektororientierung variieren kann, wurden die Berechnungen in konservativer Herangehensweise für drei orthogonale Ausrichtungen des Feldvektors (bei Beibehaltung des tatsächlichen Feldgradienten) durchgeführt.

Bezüglich der Unsicherheiten der numerischen Berechnungen und der Interpretation der Ergebnisse als Perzentil-Werte wird auf die Ausführungen in Kapitel 9.6.1 verwiesen.

10.6.1 Ray 7.7

Die Abweichungen zwischen numerischer Ersatzquelle und den Detailmessungen der magnetischen Flussdichte im relevanten Bereich lagen bei < 20 %.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der induzierten elektrischen Feldstärke im rechten Unterschenkel bzw. Fuß der betrachteten Körpermodelle.

Tabelle 10.4 fasst die Bewertungsergebnisse für die Ray 7.7 zusammen (jeweils Maximum und Minimum aus den drei Simulationen mit unterschiedlicher Feldvektorausrichtung). Trotz der Überschreitung des $ExpInd_{1998}$ bezüglich der magnetischen Flussdichte, blieben die induzierten elektrischen Feldstärken im Körper unterhalb der in ICNIRP 2010 festgelegten Basisgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung.
Bei Zugrundelegung der in Kapitel 9.6.1 angeführten Unsicherheiten bezüglich Variation über Körpermodelle und elektrischer Gewebeparameter (jeweils ± 20 %) sowie der Quellenvalidierung (± 20 %), ergibt sich eine Gesamtunsicherheit der Berechnungsergebnisse von ca. ± 35 % (k=1), wenn vereinfachend und konservativ Normalverteilung für alle Unsicherheitsbeiträge angenommen wird.

[47] Aufgrund der Komplexität der Feldverteilung war eine hinreichend genaue Nachbildung der Feldverteilung mit diskreten Strompfaden nicht möglich.

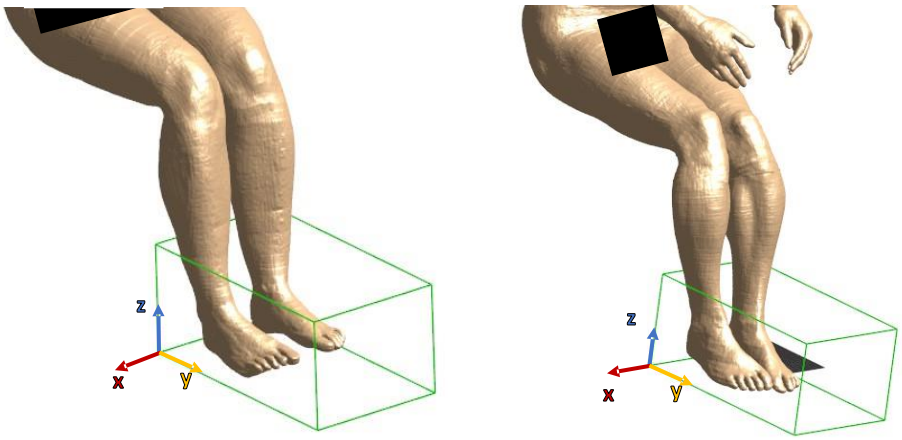


Abbildung 10.38: Position der Körpermodelle Ella (links) bzw. Duke (rechts) auf der Ray 7.7.

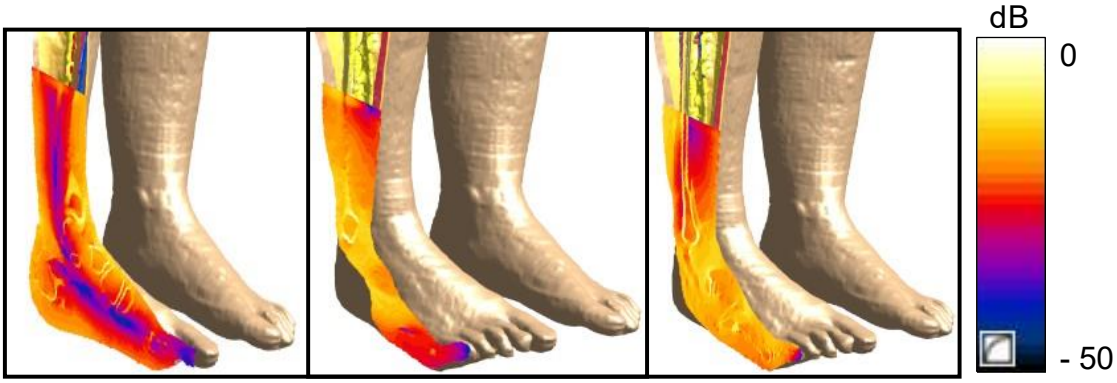


Abbildung 10.39: Resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel von Körpermodell Ella auf der Ray 7.7 bei maximaler Magnetfeldimmission (Beschleunigung) für unterschiedliche Feldrichtungen mit logarithmischer Skalierung (links: **x** (0 dB = 270 mV/m), Mitte: **y** (0 dB = 150 mV/m), rechts: **z** (0 dB = 120 mV/m)). Das Maximum der induzierten elektrischen Feldstärke befindet sich im kortikalen Knochengewebe des rechten Sprunggelenks.

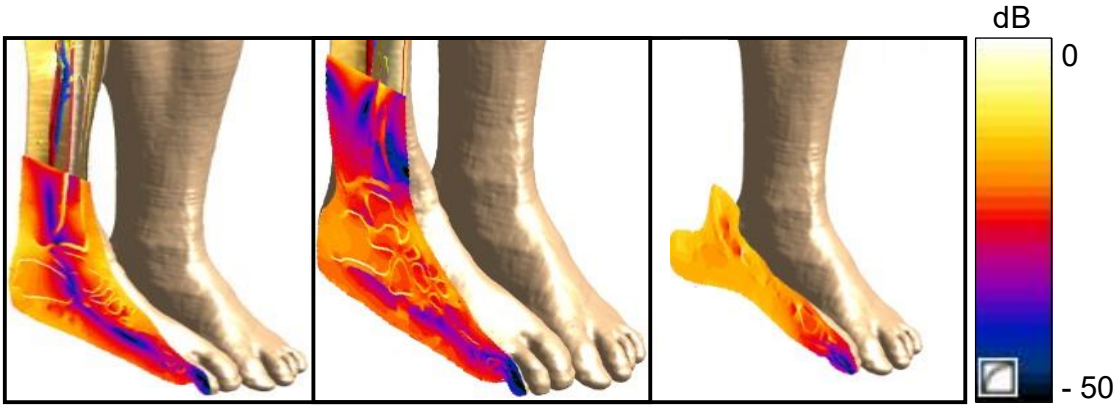


Abbildung 10.40: Resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel von Körpermodell Duke auf der Ray 7.7 bei maximaler Magnetfeldimmission (Beschleunigung) für unterschiedliche Feldrichtungen mit logarithmischer Skalierung (links: **x** (0 dB = 210 mV/m), Mitte: **y** (0 dB = 110 mV/m), rechts: **z** (0 dB = 100 mV/m)). Das Maximum der induzierten elektrischen Feldstärke befindet sich im kortikalen Knochengewebe des rechten Sprunggelenks.

Tabelle 10.4: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse für die Ray 7.7 in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete über ein Volumen von 2 x 2 x 2 mm³ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$).

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP\ 2010,GP}$			
	$E_{iavg,max}$	$E_{iavg,p99.99}$	$E_{iavg,p99.9}$	$E_{iavg,p99.0}$
Duke	0.10 - 0.27	0.09 - 0.21	0.08 - 0.17	0.05 - 0.10
Ella	0.09 - 0.25	0.08 - 0.18	0.07 - 0.14	0.04 - 0.09

10.6.2 Zero SR

Die Abweichungen zwischen numerischer Ersatzquelle und den Detailmessungen der magnetischen Flussdichte im relevanten Bereich lagen bei < 20 %.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Verteilung der induzierten elektrischen Feldstärke im rechten Unterschenkel bzw. Fuß der betrachteten Körpermodelle.

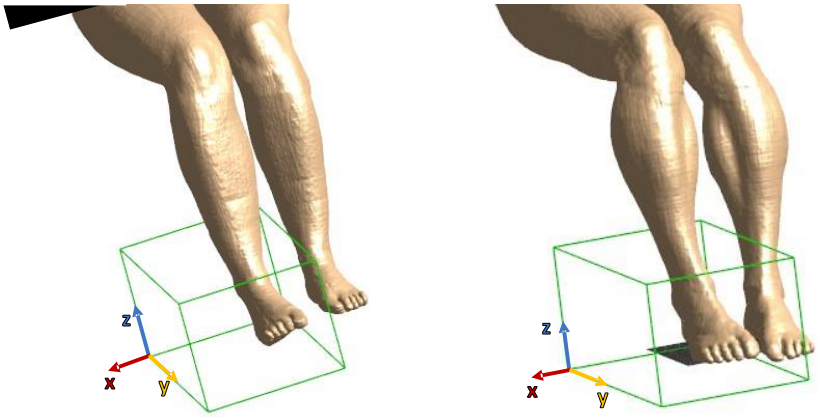


Abbildung 10.41: Position der Körpermodelle Ella (links) bzw. Duke (rechts) auf der Zero SR.

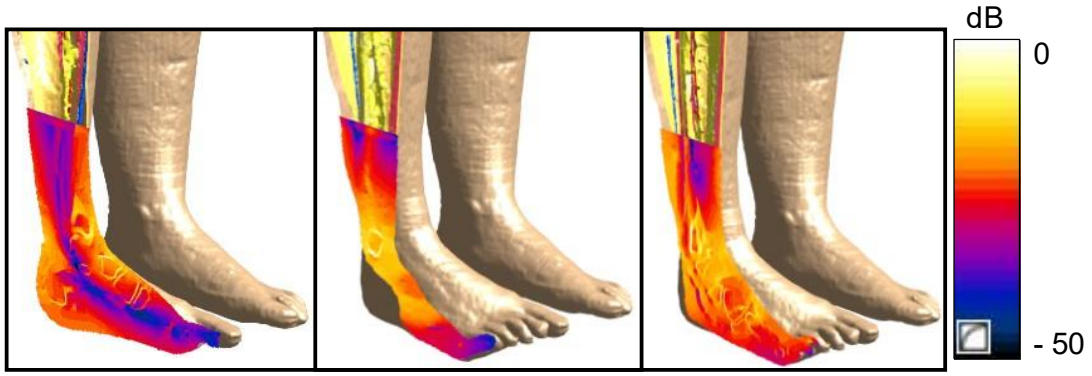


Abbildung 10.42: Resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel von Körpermodell Ella auf der Zero SR bei maximaler Magnetfeldimmission (Beschleunigung) für unterschiedliche Feldrichtungen mit logarithmischer Skalierung (links: **x** (0 dB = 47 mV/m), Mitte: **y** (0 dB = 37 mV/m), rechts: **z** (0 dB = 59 mV/m)). Das Maximum der induzierten elektrischen Feldstärke befindet sich im kortikalen Knochengewebe des rechten Sprunggelenks.

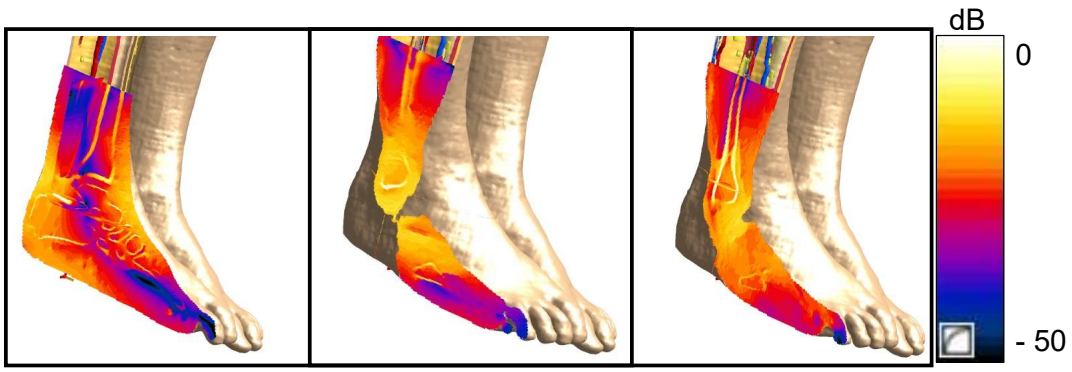


Abbildung 10.43: Resultierende Feldverteilung der ungemittelten induzierten elektrischen Feldstärke E_i im Unterschenkel von Körpermodell Duke auf der Zero SR bei maximaler Magnetfeldimmission (Beschleunigung) für unterschiedliche Feldrichtungen mit logarithmischer Skalierung f = 1 kHz (links: **x** (0 dB = 69 mV/m), Mitte: **y** (0 dB = 41 mV/m), rechts: **z** (0 dB = 33 mV/m)). Das Maximum der induzierten elektrischen Feldstärke befindet sich im kortikalen Knochengewebe des rechten Sprunggelenks.

Tabelle 10.5 fasst die Bewertungsergebnisse für die Zero SR zusammen. Trotz der Überschreitung des $ExpInd_{1998}$ bezüglich der magnetischen Flussdichte, blieben die induzierten elektrischen Feldstärken im Körper unterhalb der in ICNIRP 2010 festgelegten Basisgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung.

Tabelle 10.5: Zusammenfassung der Bewertungsergebnisse für die Zero SR in Form der (einheitslosen) Expositionsindizes bezogen auf die maximale berechnete über ein Volumen von 2 x 2 x 2 mm³ gemittelte induzierte elektrische Feldstärke ($E_{i,avg,max}$) sowie deren 99.99tes, 99.9tes und 99.0tes Perzentil ($E_{i,avg,p99.99}$, $E_{i,avg,p99.9}$, $E_{i,avg,p99.0}$).

	Expositionsindizes für $E_{i,ICNIRP\ 2010,GP}$			
	$E_{iavg,max}$	$E_{iavg,p99.99}$	$E_{iavg,p99.9}$	$E_{iavg,p99.0}$
Duke	0.03 - 0.06	0.03 - 0.05	0.02 - 0.04	0.01 - 0.03
Ella	0.03 - 0.07	0.03 - 0.05	0.02 - 0.04	0.01 - 0.02

Bei Zugrundelegung der in Kapitel 9.6.1 angeführten Unsicherheiten bezüglich Variation über Körpermodelle und elektrischer Gewebeparameter (jeweils ± 20 %) sowie der Quellenvalidierung (± 20 %), ergibt sich eine Gesamtunsicherheit der Berechnungsergebnisse von ca. ± 35 % (k=1), wenn vereinfachend und konservativ Normalverteilung für alle Unsicherheitsbeiträge angenommen wird.

10.7 Schlussfolgerungen aus den Messungen und numerischen Berechnungen der Magnetfeldexposition bei einspurigen BEV

Ähnlich wie bei den zweispurigen Fahrzeugen zeigten die durchgeführten Messungen, dass das Ausmaß der an den unterschiedlichen Fahrzeugen messbaren magnetischen Flussdichte, je nach Fahrzeug und Messposition, großen Streubreiten unterworfen ist. Die Maximalimmissionen traten dabei immer im Fuß- oder Unterschenkelbereich auf. Im Unterschied zu den zweispurigen Fahrzeugen zeigten sich bei den einspurigen Fahrzeugen jedoch auch im stationären Fahrbetrieb (Fahren mit konstanter Geschwindigkeit) bei einem untersuchten Fahrzeug deutliche lokale Überschreitungen der ICNIRP 1998 Referenzwerte für

die Allgemeinbevölkerung[48]. Die maximalen Expositionsindizes traten bei allen untersuchten Fahrzeugen jedoch während des Beschleunigens auf. Die durchgeführten numerischen Berechnungen zeigten, dass trotz teilweise deutlicher lokaler Überschreitungen (bis zu einem Faktor 8.24) der ICNIRP 1998 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung im Fuß- und Unterschenkelbereich, die im Körper induzierten elektrischen Feldstärken, auch bei Berücksichtigung der anzunehmenden Unsicherheiten, unterhalb der für periphere Gewebe anwendbaren Basisgrenzwerte gemäß den ICNIRP 2010 Empfehlungen bleiben.

[48] Bei den Messungen mit zweispurigen Fahrzeugen lag der maximale ExpInd1998 bei einem der untersuchten Fahrzeuge im Grenzbereich von 1.01.

11 Messungen in öffentlichen Verkehrsmitteln mit Elektroantrieb

11.1 Messmethode

Um die in den untersuchten Fahrzeugen für den Individualverkehr gemessenen Magnetfeldimmissionen sinnvoll in den Kontext anderer Magnetfeldimmissionen, verursacht durch öffentliche Verkehrsmittel mit Elektroantrieben, stellen zu können, wurden auch Messungen der magnetischen Flussdichte während Fahrten in Fern-, Regional- und Nahverkehrszügen der Deutschen Bahn sowie in Straßenbahnzügen durchgeführt. Zusätzlich wurden die auftretenden Magnetfelder während des Ein- und Ausfahrens der Verkehrsmittel am jeweiligen Bahnsteig erfasst.

Die Messungen wurden mit einem kommerziellen Magnetfeld-Messgerät (Narda ELT 400) mit einem 100 cm^2 Aufnehmerquerschnitt durchgeführt. Das Zeitbereichssignal wurde über den Analogausgang der Narda ELT 400 in Echtzeit von einem tragbaren Oszilloskop (Pico Technology) mit einer Abtastrate von 2 MS/s ausgelesen und auf den damit verbundenen Laptop gestreamt bzw. im Anschluss gespeichert. Während der Messaufbau (Narda ELT 400 und Oszilloskop) in einem Rucksack untergebracht war, wurde der Messaufnehmer an diversen Positionen im entsprechenden Verkehrsmittel positioniert. Für die Messungen auf den Bahnsteigen befand sich der Messaufnehmer ebenfalls im Rucksack. Alle verwendeten Messgeräte waren kalibriert und wurden während der Messungen regelmäßigen Plausibilitätsprüfungen unterzogen.

Bei den Messungen wurden die von den drei orthogonal angeordneten Spulensensoren des Messgerätes stammenden Zeitsignale der magnetischen Flussdichte sequenziell hintereinander über mehrere Messintervalle (Zeitfenster) von jeweils bis zu 26 Minuten Länge aufgezeichnet, die insgesamt zu einer Langzeitmessung über den ganzen Messtag zusammengefügt werden konnten. Jeder Messtag wurde detailliert dokumentiert, um im Postprozessing die Kategorien „Bremsen“, „Beschleunigen“, „Stillstand“ und „konstante Fahrt“ unterscheiden zu können. Schlussendlich lagen für jede dieser Kategorien mehrere Messergebnisse in Form von Mess-Zeitfenstern vor, die ausgewertet wurden.

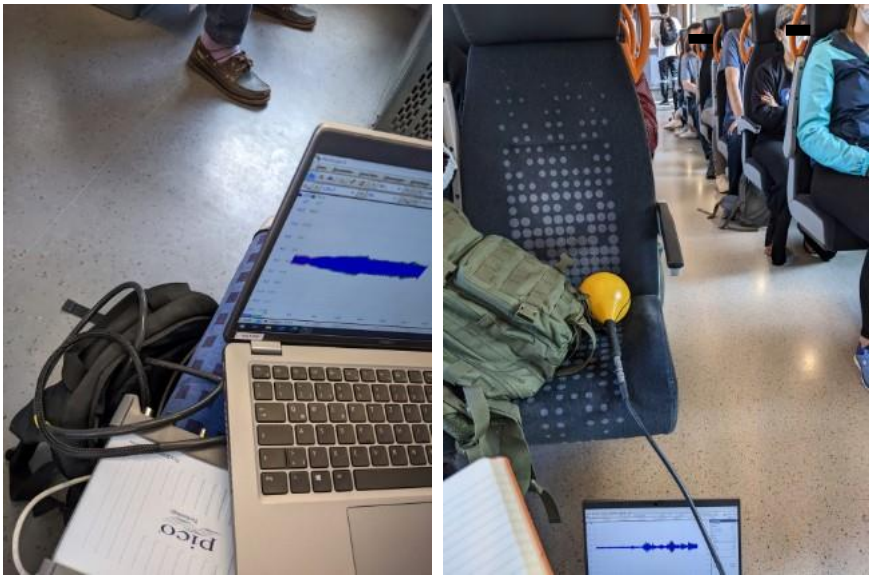


Abbildung 11.1: Der im Rucksack untergebrachte Messaufbau wurde mithilfe eines Laptops gesteuert. Der Messaufnehmer wurde an möglichst vielen verschiedenen zugänglichen Orten im jeweiligen Verkehrsmittel positioniert.

11.2 Messergebnisse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Magnetfeldmessungen für jedes betrachtete öffentliche Verkehrsmittel separat dargestellt.

Die Ergebnisdarstellung erfolgt jeweils anhand der gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte B_{PEAK} sowie anhand der Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 1998 ($ExpInd_{1998}$) und ICNIRP 2010 ($ExpInd_{2010}$), ermittelt mittels der Methode der gewichteten Spitzenwerte im Zeitbereich (ICNIRP, 2003; Keller, 2017). Mit diesen Kenngrößen ist eine strahlenschutztechnische Bewertung der Immissionen hinsichtlich der etablierten (akuten) über Änderungen des Zellmembran-potenzials vermittelten Wirkungen möglich.

In jedem der aufgezeichneten Zeitfenster wurde der maximale B_{PEAK}-Wert und die maximalen Expositionsindizes $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ bestimmt. Dazu ist anzumerken, dass die angegebenen Werte für B_{PEAK}, $ExpInd_{1998}$ und $ExpInd_{2010}$ (vor allem aufgrund der langen Mess-Zeitfenster) nicht zwangsläufig zum gleichen Zeitpunkt auftraten. Dieser Sachverhalt wird in Kapitel 11.2.1 (Abbildung 11.3) anschaulich an einem konkreten Beispiel erläutert.

11.2.1 ICE- und IC-Zug

Die in Abbildung 11.4 und Abbildung 11.7 zusammengefassten Daten wurden in den Zügen ICE 650 (zwischen Hannover Hbf und Köln Hbf, Abbildung 11.2, links) bzw. IC 2441 (zwischen Köln Hbf und Hannover Hbf, Abbildung 11.2, rechts) aufgezeichnet. Dabei wurden Messungen an verschiedenen Positionen in den Zügen (Gangplatz, Fensterplatz, Stehplatz bzw. obere/untere Etage) gezielt während diverser Fahrmanöver (Bremsen, Stillstand am Bahnsteig, Beschleunigung, konstantes Fahren) sowie eine Dauermessung über ca. 15 Minuten auf einem Stehplatz der oberen Etage des IC durchgeführt und statistisch ausgewertet.



Abbildung 11.2: Die untersuchten Fernverkehrszüge ICE 650 (links) und IC 2441 (rechts).

Auf diese Weise wurden Messergebnisse in ICE und IC-Zügen über eine Gesamtmessdauer von ca. 6 Stunden aufgenommen.

Die spektrale Analyse der Daten zeigt über nahezu die gesamte Messdauer die zu erwartende Dominanz von 16.7 Hz auf. Nur selten traten kurzeitig (über einige Perioden) Oberwellen bzw.

transiente Signalanteile auf, die sich in relevantem Ausmaß auf die Expositionsindizes auswirkten (siehe Abbildung 11.3).

Die höchste gemessene magnetische Flussdichte (B_{PEAK}) wurde in der oberen Etage des IC im Bereich des Kopfes eines Stehplatzes mit 65 µT gemessen. Dies entspricht einer Ausschöpfung von ca. 14 % der Referenzwerte (ICNIRP 1998 bzw. ICNIRP 2010). Der höchste $ExpInd_{1998}$ trat jedoch zu einem anderen Zeitpunkt auf (mit ca. 36 % Ausschöpfung der Referenzwerte), siehe Abbildung 11.3.
Gemessene Langzeit-Effektivwerte[49] (Aufzeichnungsdauer jeweils zwischen 50 und 80 Minuten) lagen bei 7.7 µT (IC, Stehplatz oben), 6.6 µT (IC, Sitzplatz unten, am Fenster), 2.3 µT (ICE, 1. Klasse, Sitzplatz Gang, am Boden) und 2.7 µT (ICE, 1. Klasse, Sitzplatz Gang, Kopfhöhe).

Die in Abbildung 11.6 gezeigten Daten wurden auf verschiedenen Bahnsteigen an den Haltestellen Köln Hbf bzw. Köln Messe/Deutz gemessen.

Die Magnetfelder wurden an unterschiedlichen Positionen an Bahnsteigen bei Ein- und Ausfahrt bzw. Aufenthalt eines Zuges aufgezeichnet.

Die maximal auf den Bahnsteigen gemessenen B_{PEAK}-Werte lagen im Bereich von ca. 5-21 µT, entsprechend maximalen Expositionsindizes von ca. 0.04 – 0.36 bzw. 0.02 – 0.06 (ICNIRP 1998 bzw. ICNIRP 2010), wobei die größten B_{PEAK}-Werte und Expositionsindizes während des Bremsens der einfahrenden Züge beobachtet wurden.

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die gemessenen Magnetfeldimmissionen innerhalb eines Zuges nicht zwangsläufig vom Zug selbst bzw. von dem durch ihn verursachten Stromfluss verursacht werden, bzw. bei Messungen auf Bahnsteigen nicht zwangsläufig dem nächstliegenden (einfahrenden, stehenden oder abfahrenden) Zug zugeordnet werden können, da davon auszugehen ist, dass ein erheblicher, möglicherweise sogar dominanter Anteil an der Gesamtimmission von den elektrischen Strömen im gesamten Versorgungsleitungssystem (Oberleitung, Verstärkerleitung, Rückleiter, Schienen) verursacht wird. D. h., dass die am Bahnsteig bzw. in einem Zug (insbesondere in einem stillstehenden Zug) messbaren Immissionen auch von anderen, eventuell vom Messpunkt aus nicht sichtbaren Zügen stammen, die sich im gleichen Leitungsabschnitt befinden.

[49] Berechnet gemäß Formel in Tabelle 9.3, 3. Spalte, aus den RMS-Werten 50 Sekunden langer Einzel-Messintervallen.

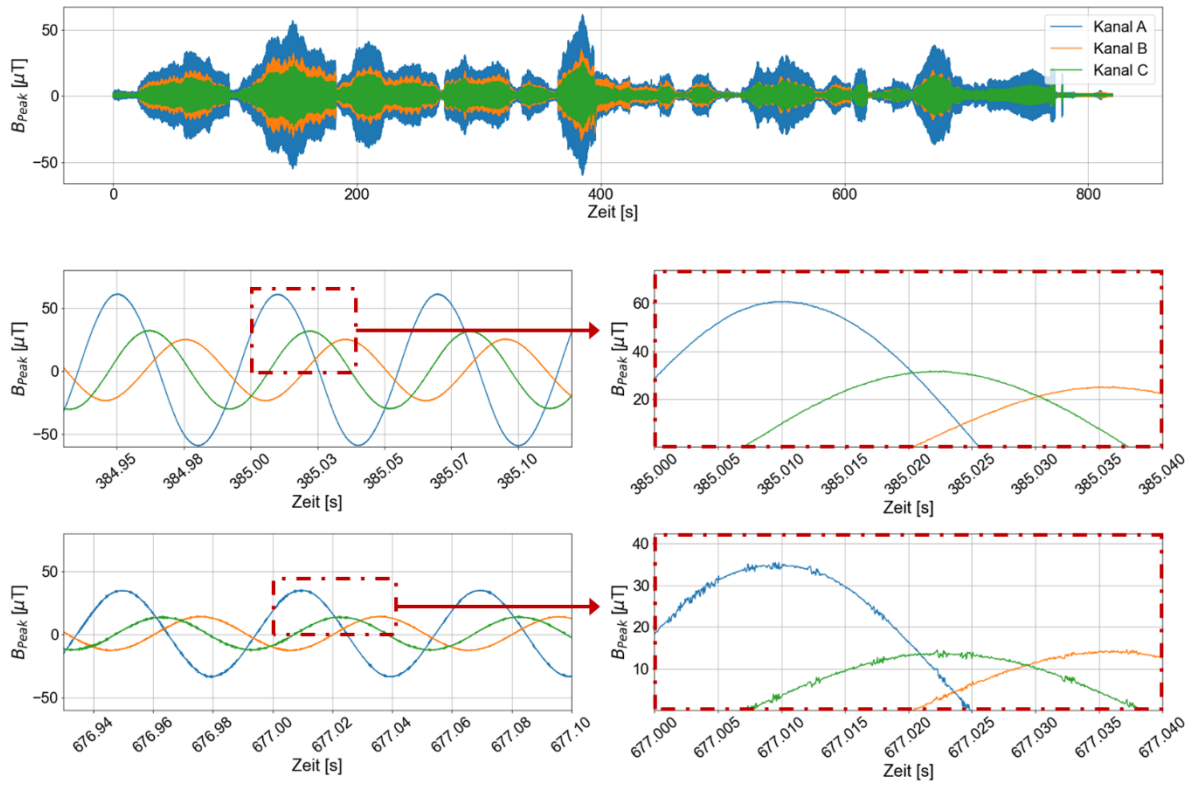


Abbildung 11.3: Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte während einer ca. 13 Minuten langen Messung im IC (Stehplatz, obere Etage) mit Signaldetails in zwei unterschiedlichen Zeitintervallen. Der Maximalwert von B_{PEAK} (65 µT) tritt ca. bei Sekunde 385 während eines Bremsmanövers auf. Dies korreliert zeitlich auch mit dem maximalen $ExpInd_{2010}$ von 0.14. Der maximale $ExpInd_{1998}$ von 0.36 tritt jedoch zu einem anderen Zeitpunkt, bei ca. Sekunde 677 auf, offensichtlich verursacht durch kurzeitig auftretende transiente Signalanteile mit Frequenzen im Bereich mehrere hundert Hz in dem die ICNIRP 1998 Referenzwerte deutlich niedriger sind als die ICNIRP 2010 Referenzwerte.

Abbildung 11.5 zeigt als Beispiel ein typisches Spektrogramm während der Fahrt mit dem IC.

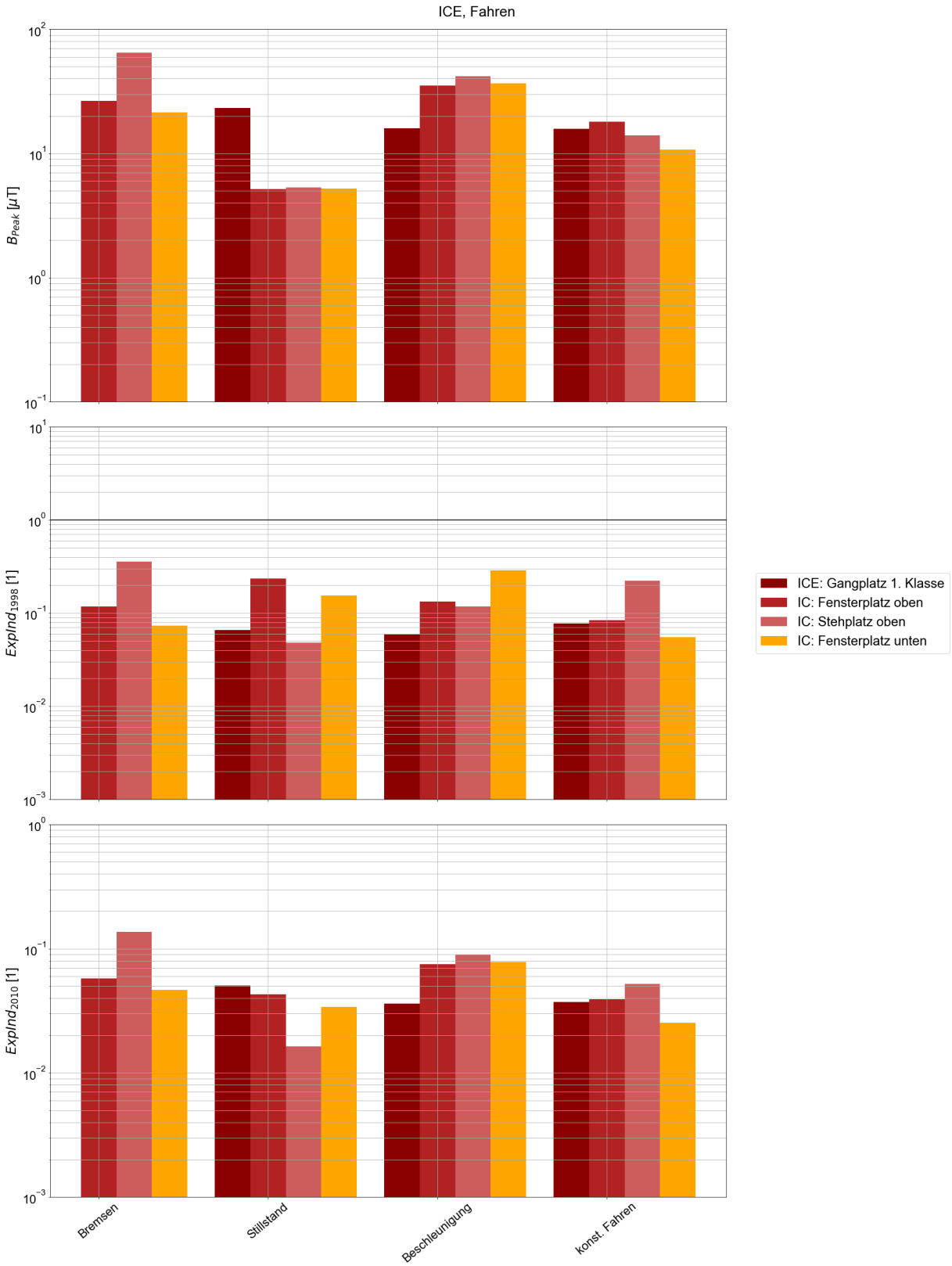


Abbildung 11.4: Maximale Magnetfeldimmissionen an einem Gangplatz der ersten Klasse im ICE bzw. an verschiedenen Positionen in einem IC bei unterschiedlichen Fahrmanövern in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Für „Bremsen“ liegen keine Messdaten aus ICE-Zügen vor.

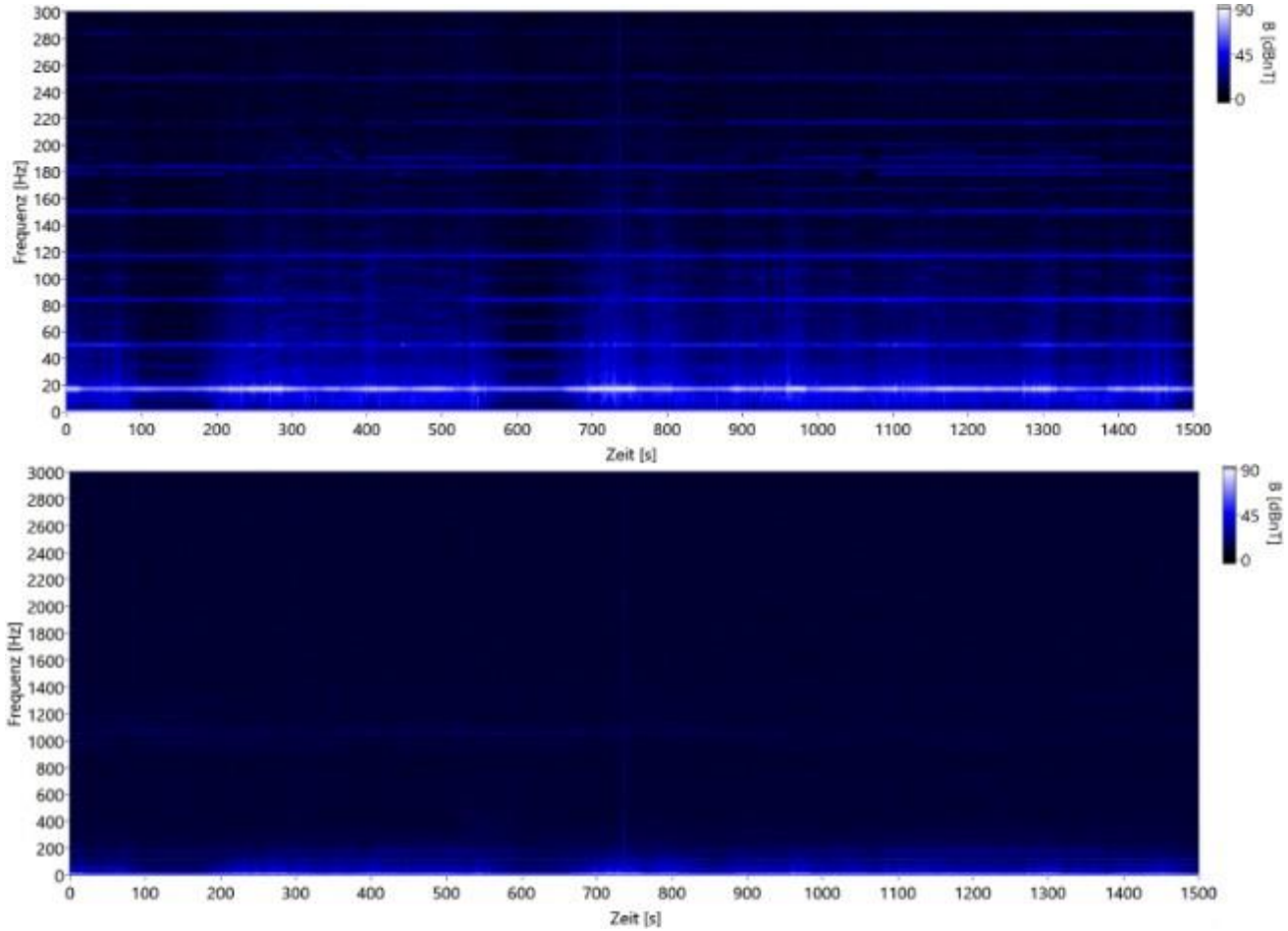


Abbildung 11.5: Spektrogramm der magnetischen Flussdichte (Amplitudenwerte) in einem 25 Minuten langen Zeitintervall, gemessen im IC in zwei unterschiedlichen Auflösungen der Frequenzachse (oben: 0 – 300 Hz, unten: 0 – 3 kHz). Zu erkennen sind die Stillstände des Zuges den Zeitintervallen von ca. Sekunde 90 bis 180 und 580 – 670.

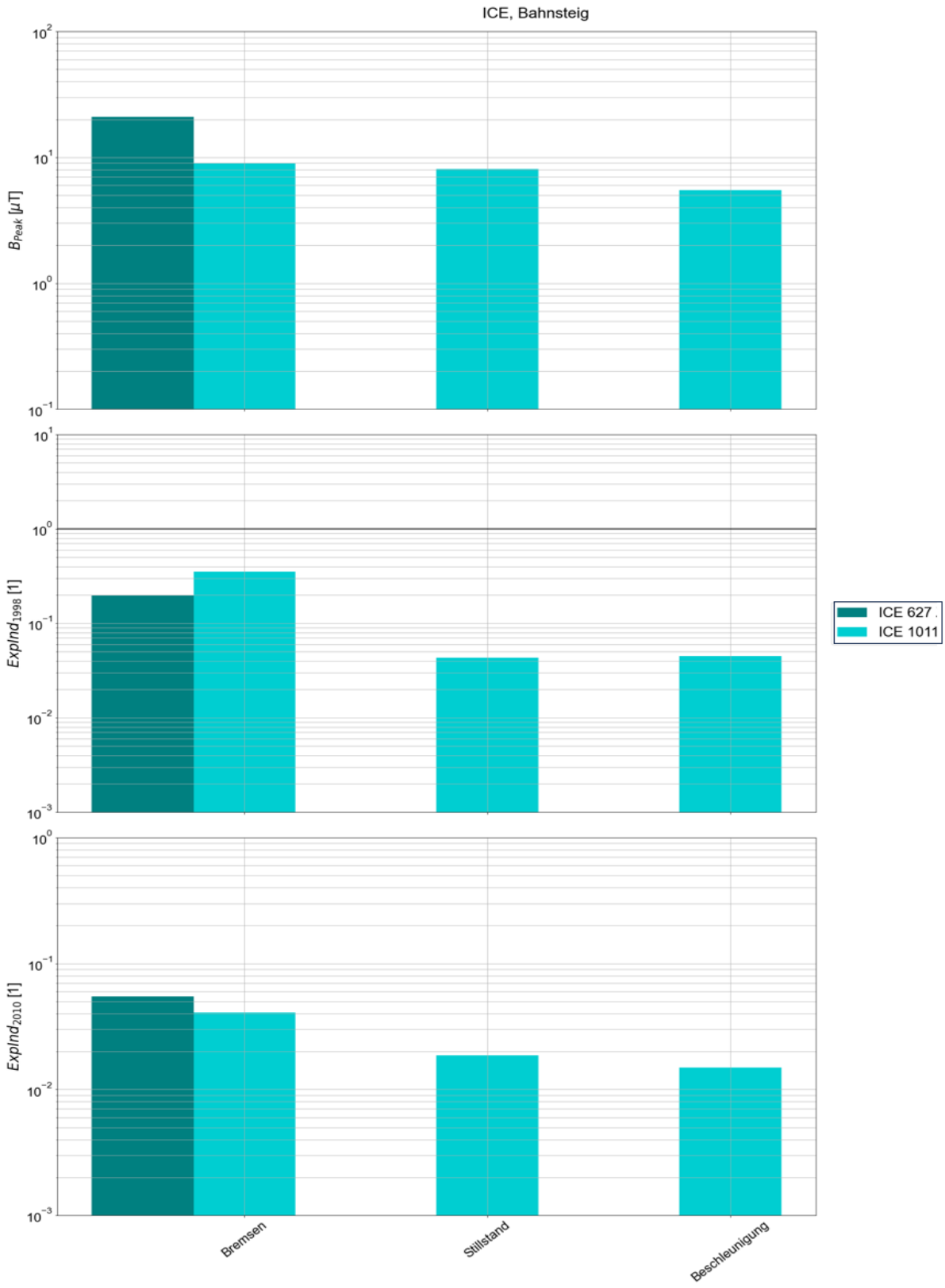


Abbildung 11.6: Maximale Magnetfeldimmissionen auf Bahnsteigen während Einfahrt (Bremsen), Stillstand und Ausfahrt (Beschleunigen) von ICE-Zügen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Für IC-Züge wurden keine Messungen auf Bahnsteigen durchgeführt.

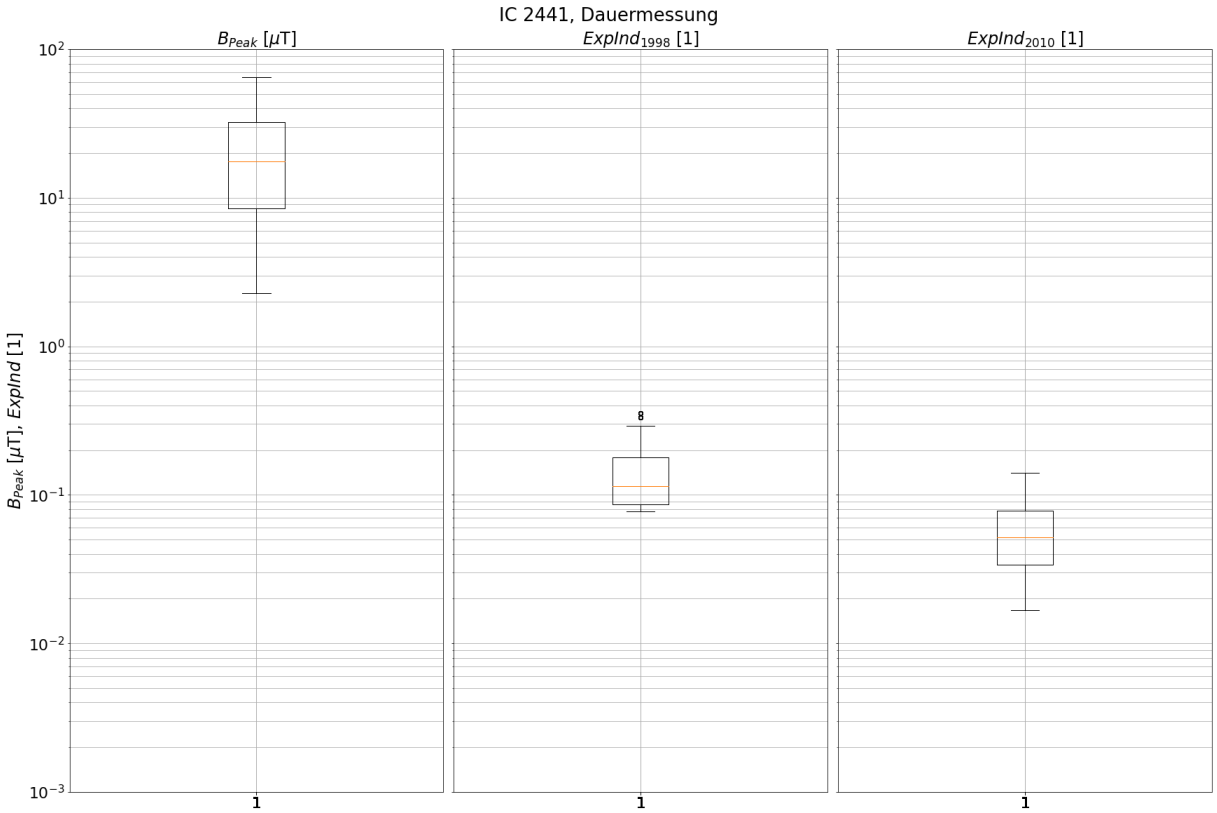


Abbildung 11.7: Statistische Auswertung der Dauermessung über ca. 15 Minuten, analysiert auf Grundlage von aufeinanderfolgenden Zeitintervallen mit Länge = 1 s), an einem Stehplatz der oberen Etage eines IC 2441 in einem Boxplot. (Box: Q1-Q3, Linie: Median, Whisker: von der Box bis zu dem Datenpunkt, der den größten Abstand zur Box hat, der kleiner oder gleich dem 1.5-fachen Interquartilabstand ist; Punkte: Ausreißer).

11.2.2 Regionalzug

Die in Abbildung 11.9 zusammengefassten Daten wurden in den Zügen RE1 (zwischen Aachen Hbf und Dortmund Hbf, Abbildung 11.8, links) bzw. RE9 (zwischen Aachen Hbf und Siegen Hbf, Abbildung 11.8, rechts) aufgenommen.
Dabei wurden Messungen an verschiedenen Positionen in den Zügen (Sitzplatz bzw. Stehplatz; Messgerät auf der Sitzfläche bzw. am Boden (siehe Abbildung 11.1 rechts bzw. links); obere/untere Etage bzw. Mitte zwischen den beiden Geschossen, z. B. im Bereich der Türen, an den jeweiligen Wagonverbindungen sowie Zuganfang und -ende) bei diversen Fahrmanövern (Bremsen, Stillstand am Bahnsteig, Beschleunigung sowie konstantes Fahren) durchgeführt und statistisch ausgewertet.

Die spektrale Analyse der Daten zeigt im Vergleich zu den Messungen im ICE und IC stärkere und auch über längere Zeitintervalle anhaltende Oberwellenanteile.

Auf diese Weise wurden Messergebnisse in ICE und IC-Zügen über eine Gesamtmessdauer von ca. 9.5 Stunden aufgenommen.

Die höchsten Magnetfelder wurden bei Brems- bzw. Beschleunigungsmanövern und – wie auch bei den Messungen im IC-Zug (Kapitel 11.2.1) – auf den oberen Sitz- bzw. Stehplätzen des Doppelstockzugs gemessen (max. 28.6 µT bzw. $ExpInd_{1998}$ 0.35 bzw. $ExpInd_{2010}$ 0.08).

Gemessene Langzeit-Effektivwerte[50] (Aufzeichnungsdauer jeweils zwischen ca. 40 und 50 Minuten) lagen bei 2.2 µT (Zugmitte, Stehplatz unten), 0.32 µT (Zugmitte, Sitzplatz unten), 12.7 µT (Stehplatz oben) und 0.43 µT (Sitzplatz oben).



Abbildung 11.8: Die untersuchten Nahverkehrszüge RE1 (links) und RE9 (rechts).

[50] Berechnet gemäß Formel in Tabelle 9.3, 3. Spalte, aus den RMS-Werten 50 Sekunden langer Einzel-Messintervallen.

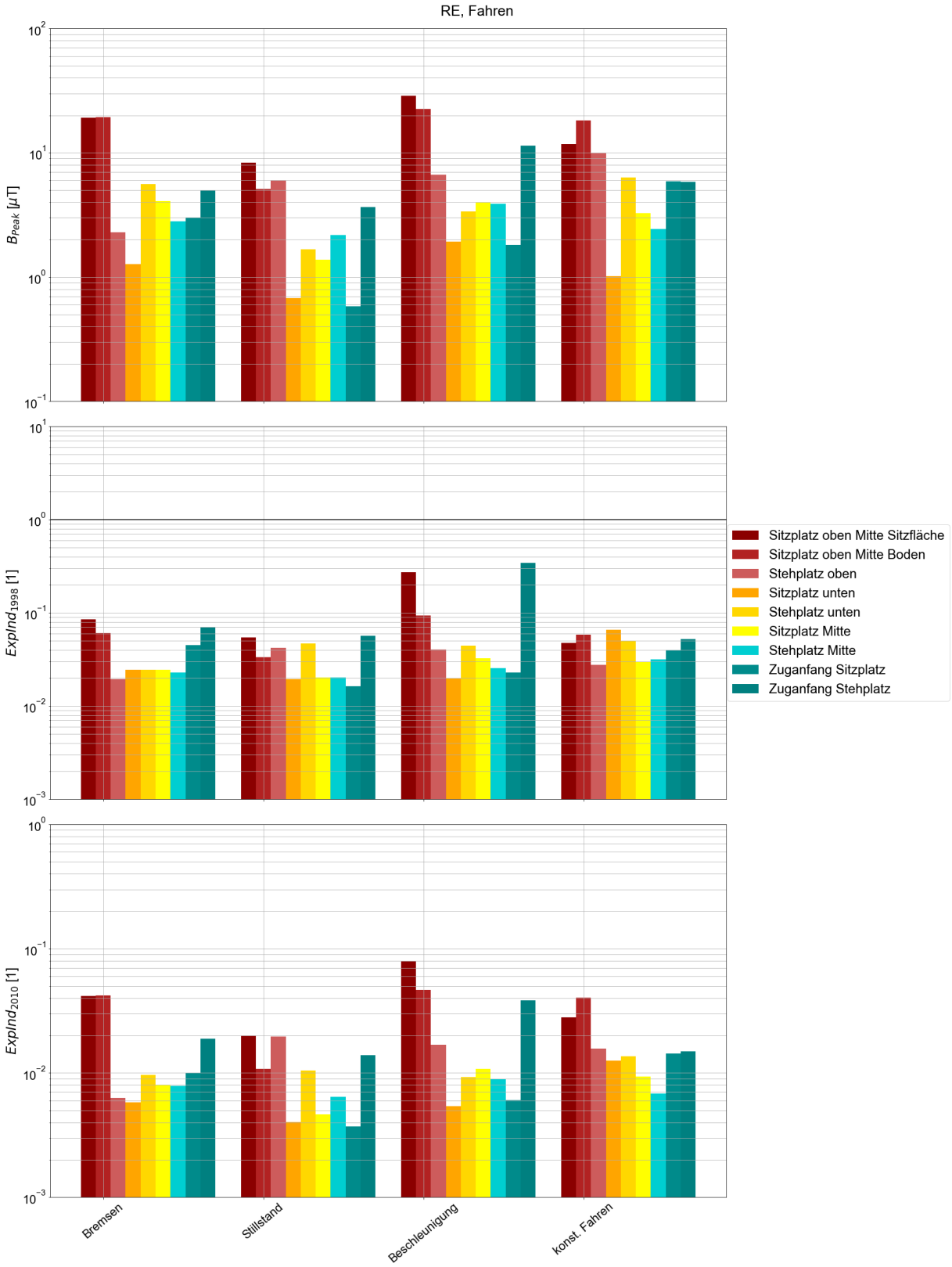


Abbildung 11.9: Maximale Magnetfeldimmissionen an verschiedenen Positionen in den beiden RE bei unterschiedlichen Fahrmanövern (Bremsen, Stillstand, Beschleunigung, konst. Fahren) in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

Die in Abbildung 11.10 gezeigten Daten wurden auf verschiedenen Bahnsteigen an den Haltestellen Köln Hbf bzw. Köln Messe/Deutz gemessen. Dabei wurden die Magnetfelder mit dem tragbaren Messgerät an unterschiedlichen Positionen an den Bahnsteigen bei Ein- und Ausfahrt bzw. Aufenthalt eines beliebigen Zuges aufgezeichnet, die nicht weiter nach Bremsen, Beschleunigen und Stillstand unterschieden wurden.

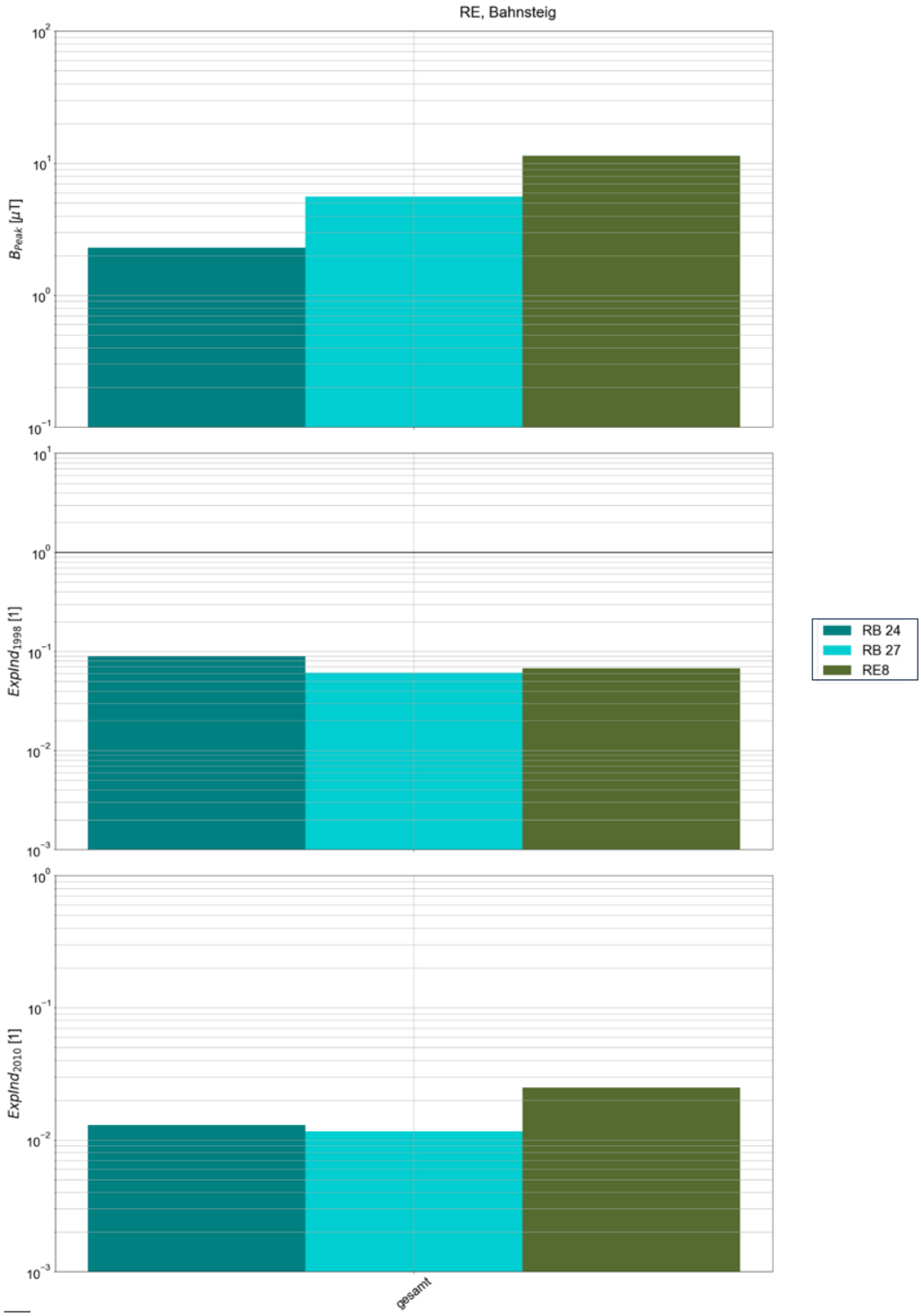


Abbildung 11.10: Maximale Magnetfeldimmissionen auf Bahnsteigen. Gemeinsame Darstellung der Messdaten, erfasst während Einfahrt (Bremsen), Stillstand und Ausfahrt (Beschleunigen) von RE- bzw. RB-Zügen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

11.2.3 S-Bahn

Die in Abbildung 11.12 zusammengefassten Daten wurden in den Zügen S19 (zwischen Köln Hbf und Düren Hbf, Abbildung 11.11, links) bzw. S11 (zwischen Bergisch-Gladbach und Düsseldorf Flughafen, Abbildung 11.11, rechts) aufgenommen.
Dabei wurden Messungen an verschiedenen Positionen in den Zügen (Sitzplatz, Stehplatz bei Gang bzw. Fenster) bei diversen Fahrmanövern (Bremsen, Stillstand am Bahnsteig, Beschleunigung sowie konstantes Fahren) durchgeführt und statistisch ausgewertet.

Auf diese Weise wurden Messergebnisse in ICE und IC-Zügen über eine Gesamtmessdauer von ca. 7 Stunden aufgenommen.

Aufgrund der kurzen Fahrintervalle der S-Bahn ergab sich das Problem, dass sich die gemessenen Immissionen nicht mehr sinnvoll den Fahrmanövern Bremsen, Stillstand und Beschleunigen zuordnen ließen. Grund dafür ist die bereits in Kapitel 11.2.1 beschriebene Tatsache, dass die gemessenen Magnetfeldimmissionen innerhalb eines Zuges nicht zwangsläufig ausschließlich vom Zug selbst bzw. von dem durch ihn verursachten Stromfluss verursacht werden, sondern dass ein erheblicher, möglicherweise sogar dominanter Anteil an der Gesamtimmission von den elektrischen Strömen im gesamten Versorgungsleitungssystem (Oberleitung, Verstärkerleitung, Rückleiter, Schienen) verursacht wird, d. h., dass die in einem Zug (insbesondere in einem stillstehenden Zug) messbaren Immissionen auch von anderen Zügen im gleichen Leitungsabschnitt stammen. Daher wurden die Messdaten nicht getrennt nach Fahrmanövern dargestellt.



Abbildung 11.11: Die untersuchten S-Bahnen S19 (links) und S11 (rechts).

Die in Abbildung 11.13 gezeigten Daten wurden auf verschiedenen Bahnsteigen an der Haltestelle Köln Hbf gemessen. Dabei wurden die Magnetfelder an unterschiedlichen

Positionen an den Bahnsteigen bei Ein- und Ausfahrt bzw. Aufenthalt eines Zuges sowohl direkt am Bahnsteig (Boden) als auch am Rücken aufgezeichnet.

Ähnlich wie oben beschrieben, ist auch bezüglich der Messungen am Bahnsteig anzumerken, dass die gemessenen Magnetfeldimmissionen nicht zwangsläufig ausschließlich dem nächstliegenden (einfahrenden, stehenden oder abfahrenden) Zug zugeordnet werden können, da davon auszugehen ist, dass ein erheblicher, wenn nicht sogar dominanter Anteil an der Gesamtimmission von den elektrischen Strömen im Versorgungsleitungssystem (Oberleitung, Verstärkerleitung, Rückleiter, Schienen) verursacht wird. D. h., dass die am Bahnsteig messbaren Immissionen auch von einem anderen, eventuell vom Messpunkt aus nicht sichtbaren Zügen stammen können, die sich im gleichen Leitungsabschnitt befinden.

Die gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte waren an allen Messpositionen am Bahnsteig (maximaler B_{PEAK}-Wert ca. 29 µT) größer als jene in den S-Bahnen (maximaler B_{PEAK}-Wert ca. 9 µT). Dennoch ergaben sich nach Auswertung mittels der WPM an den unterschiedlichen Messpunkten in den S-Bahnen deutlich höhere maximale Expositionsindizes ($ExpInd_{1998}$ bis zu 0.35, $ExpInd_{2010}$ bis zu 0.07) als auf den Bahnsteigen ($ExpInd_{1998}$ bis zu 0.13, $ExpInd_{2010}$ bis zu 0.06), offensichtlich verursacht durch kurzzeitig auftretende Oberwellenanteile.

Gemessene Langzeit-Effektivwerte[51] in den Zügen (Aufzeichnungsdauer jeweils zwischen ca. 40 und 50 Minuten) lagen bei 0.83 µT (Zugmitte, Stehplatz am Gang, am Boden) und 0.53 µT (Zugende, Sitzplatz am Fenster, Oberkörper).

[51] Berechnet gemäß Formel in Tabelle 9.3, 3. Spalte, aus den RMS-Werten 50 Sekunden langer Einzel-Messintervallen.

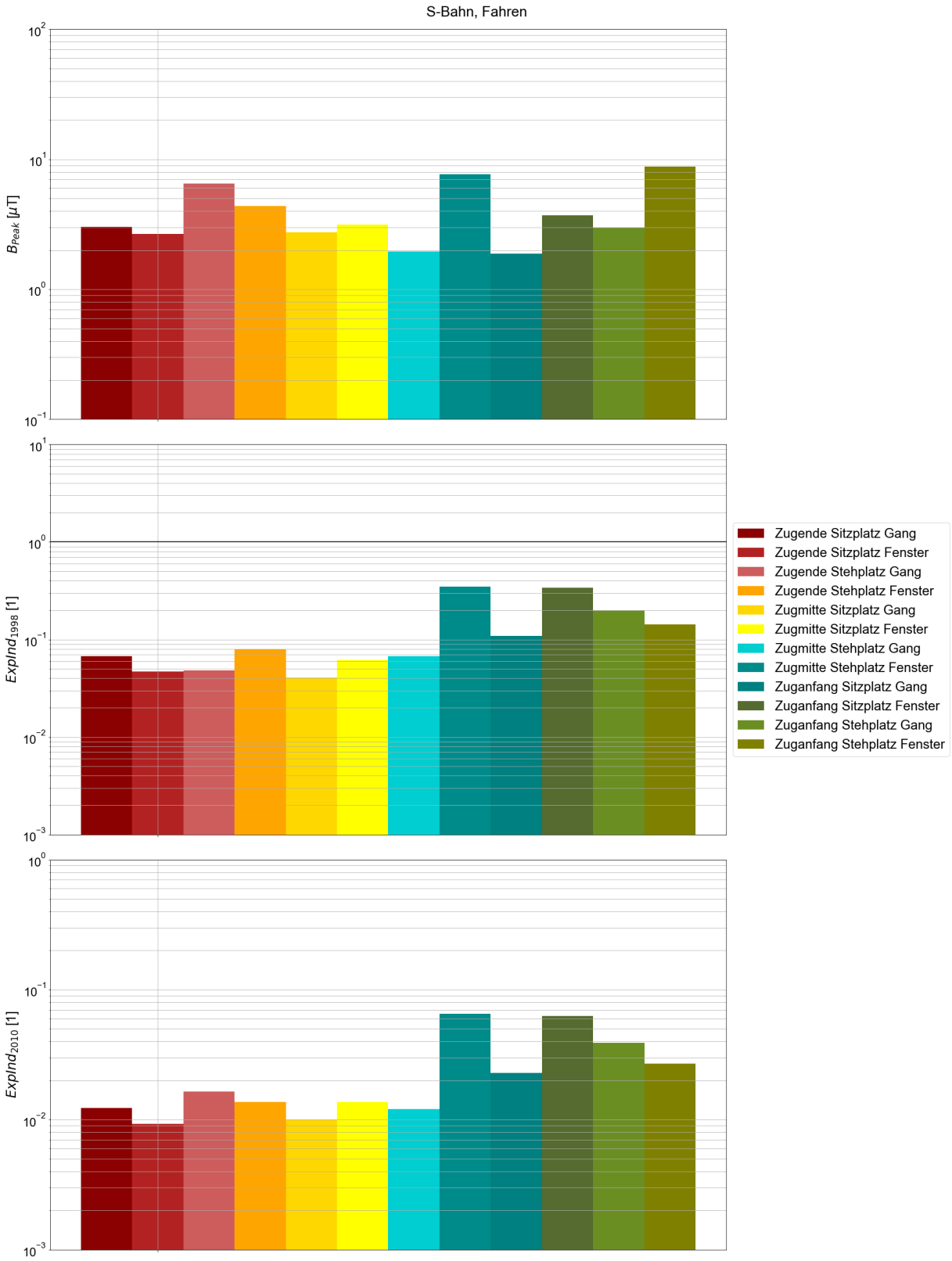


Abbildung 11.12: Maximale Magnetfeldimmissionen an verschiedenen Positionen in zwei verschiedenen S-Bahnen bei unterschiedlichen Fahrmanövern in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

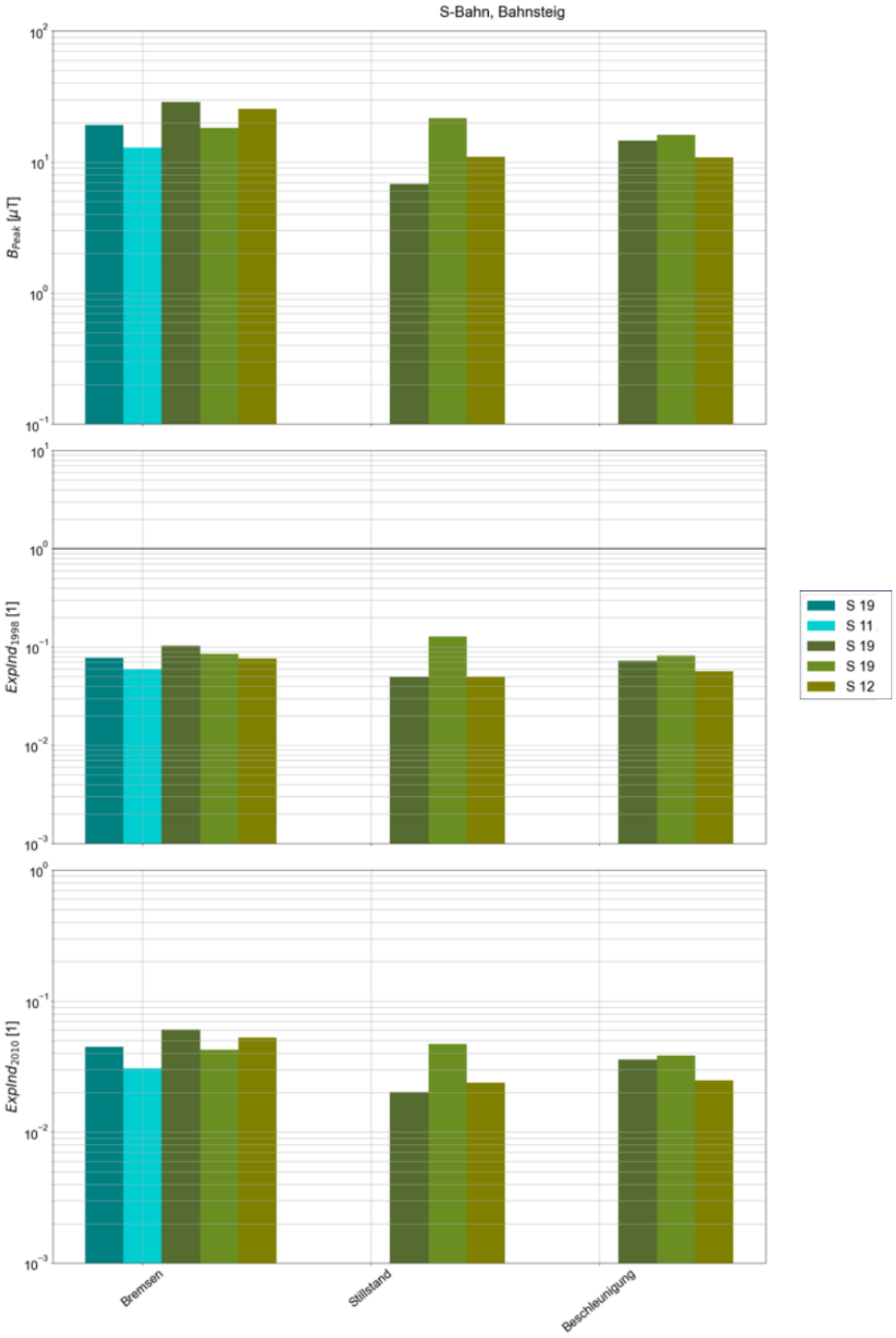


Abbildung 11.13: Maximale Magnetfeldimmissionen auf verschiedenen Bahnsteigen während Einfahrt (Bremsen), Stillstand und Ausfahrt (Beschleunigen) von S-Bahn-Zügen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Für S19 und S11 wurden Stillstand und Beschleunigung nicht erfasst.

11.2.4 Straßenbahn bzw. U-Bahn (unterirdisch fahrende Straßenbahn)

Die in Abbildung 11.15 zusammengefassten Daten wurden in Tram 15 (zwischen Köln Chorweiler und Ubierring) bzw. Tram 18 (zwischen Köln Breslauer Platz/Hbf und Bonn Hbf, Abbildung 11.14) aufgenommen.

Dabei wurden Messungen an verschiedenen Positionen in den Zügen (Wagonverbindung, Sitzplatz, Stehplatz bei Gang bzw. Fenster) während diverser Fahrmanöver (Bremsen, Stillstand am Bahnsteig, Beschleunigung sowie konstantes Fahren) durchgeführt und statistisch ausgewertet.

Auf diese Weise wurden Messergebnisse in den Straßenbahn- bzw. U-Bahn-Zügen über eine Gesamtmessdauer von insgesamt ca. 7 Stunden aufgenommen.

Da die einzelnen Fahrmanöver, aus den weiter oben bereits mehrfach genannten Gründen, entlang der Zeitachse der aufgezeichneten Messsignale in den meisten Fällen nicht eindeutig zuordenbar waren, wurden die Messergebnisse nicht nach Fahrmanövern, sondern nur nach Messpositionen separiert dargestellt.



Abbildung 11.14: Eine der untersuchten U-Bahnen an der Haltestelle Köln Breslauer Platz/Hbf (links) Messungen in der Tram 15 Richtung Bonn Hbf (rechts).

Die maximalen in den Straßenbahnen und U-Bahnen gemessenen B_{PEAK}-Werte lagen (je nach Lage des untersuchten Sitzes, des Wagens, des Fahrmanövers usw.) im Bereich von ca. 0.7 – 28.2 µT, die maximalen Expositionsindizes bei ca. 0.04 – 1.77 bzw. 0.006 – 0.29 (ICNIRP 1998 bzw. ICNIRP 2010).

Der höchste Expositionsindex trat an einem Messpunkt an einem Sitzplatz nahe der Waggonverbindung und konnte eindeutig einem Bremsmanöver zugeordnet werden, bei dem der Referenzwert gemäß ICNIRP 1998 für Allgemeinbevölkerung um einen Faktor 1.77 ausgeschöpft wurde. Der Zeitverlauf und das Frequenzspektrum dieses Signals werden in Abbildung 11.16 gezeigt.

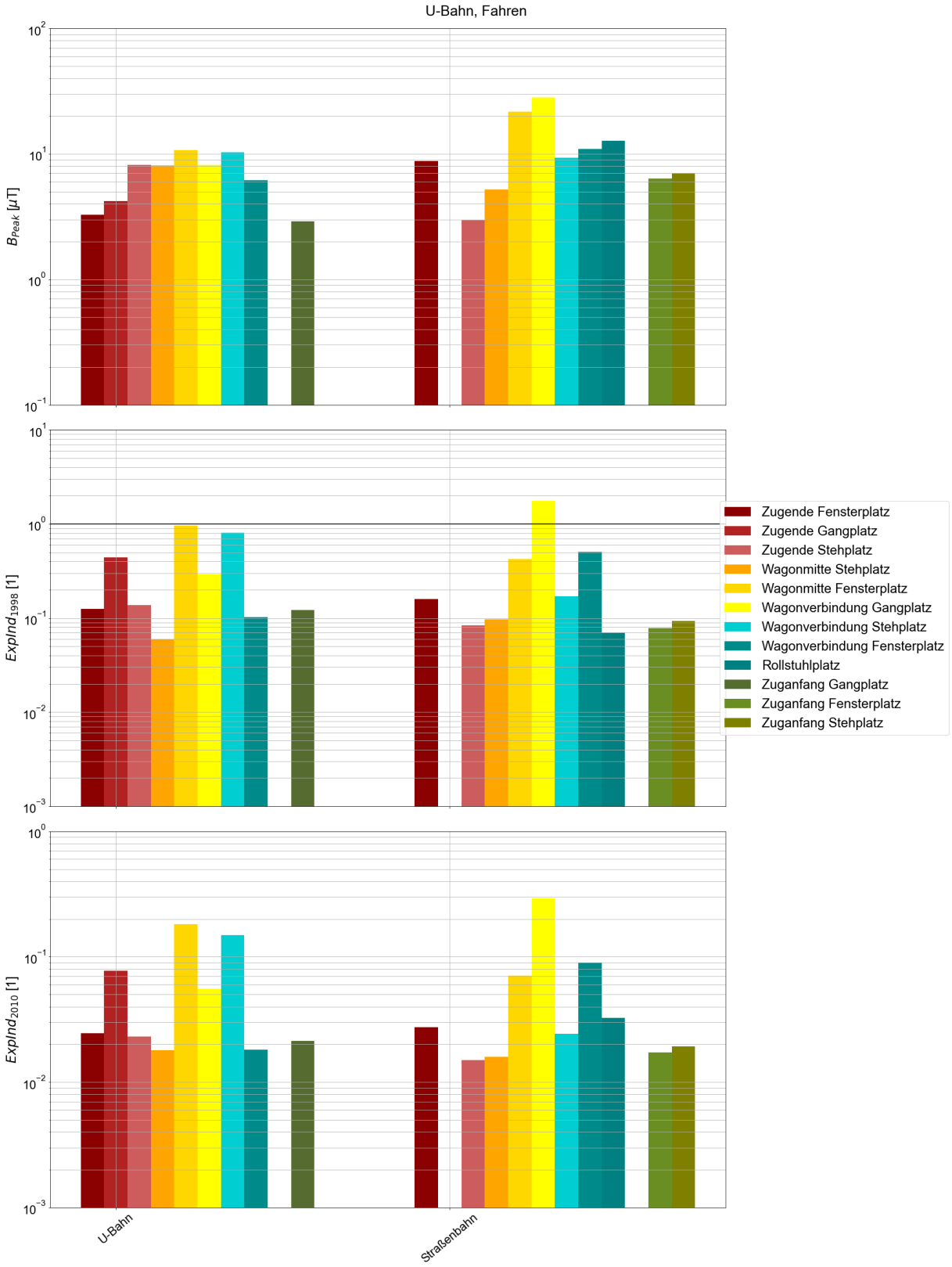


Abbildung 11.15: Maximale Magnetfeldimmissionen an verschiedenen Positionen in einer U-Bahn und einer Straßenbahn in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten). Nicht alle Positionen wurden in den beiden Verkehrsmitteln aufgenommen.

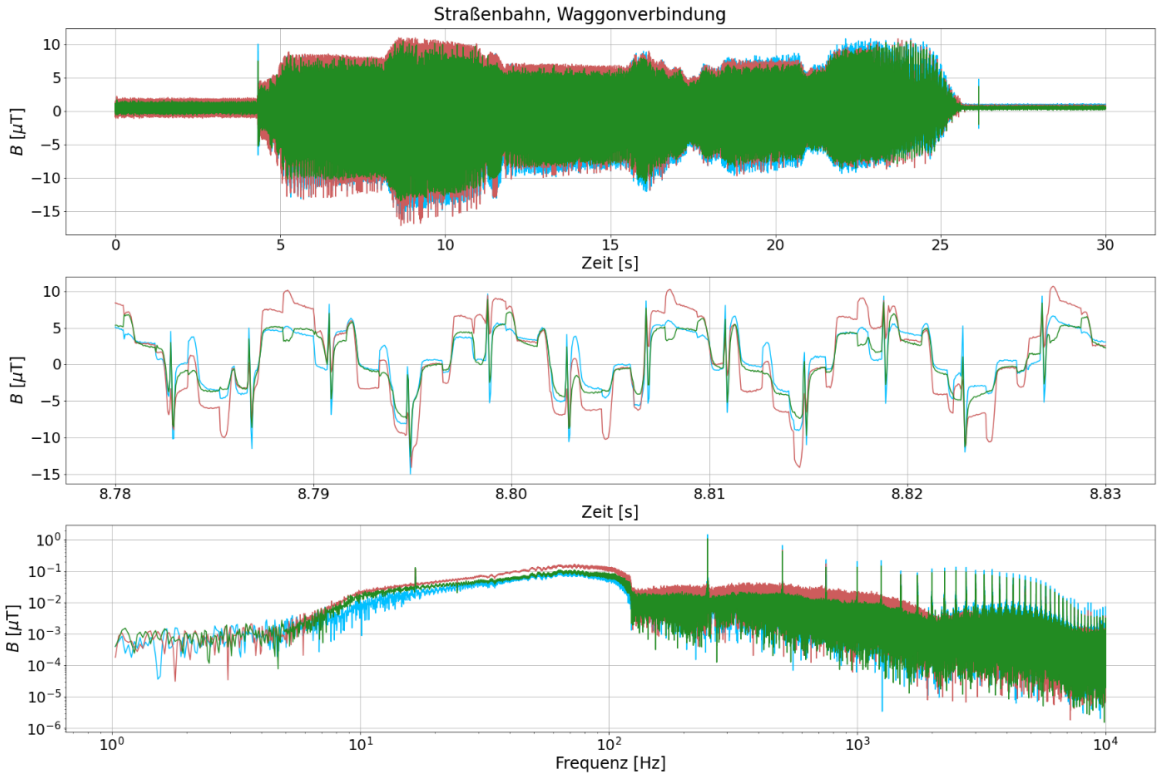


Abbildung 11.16: Zeitverlauf und Frequenzspektrum der magnetischen Flussdichte während eines Bremsvorganges, gemessen in einer Straßenbahn an einem Sitzplatz nahe der Waggonverbindung. Oben: gesamter Bremsvorgang; Mitte Ausschnitt des Zeitsignals in der Phase mit größtem Expositionsindex ($ExpInd_{1998}$ = 1.77); unten: Frequenzspektrum.

Gemessene Langzeit-Effektivwerte (Aufzeichnungsdauer jeweils 25 und 30 Minuten) lagen bei 0.33 µT (neue Fahrzeuggarnitur, Waggonmitte gegenüber Rollstuhlplatz), 2.4 µT (alte Fahrzeuggarnitur, Waggonmitte gegenüber Rollstuhlplatz), und 0.19 µT (alte Fahrzeuggarnitur, Stehplatz neben Tür),

Aufgrund der eingesetzten Messtechnik (Messfrequenzbereich 5 Hz – 400 kHz) wurde ein gegebenenfalls vorhandener DC-Anteil (0 Hz) nicht erfasst. Aufgrund der Gleichstromversorgung der untersuchten Straßen- bzw. U-Bahnen ist aber davon auszugehen, dass ein messbarer DC-Anteil vorhanden war, dieser jedoch auf die Expositionsindizes (Ausschöpfung der Referenzwerte) nur sehr geringe Auswirkung hatte. Geht man von einer Antriebsleistung von ca. 500 kW und einer Fahrdrahtspannung von 750 V aus, ist anzunehmen, dass die maximale Stromstärke im Bereich zwischen 600 und 700 A liegt. Nimmt man in (sehr) konservativer Weise einen Einzelleiter als dominante Quelle an, ergäbe sich der in Abbildung 11.17 dargestellte Verlauf der magnetischen Flussdichte in Abhängigkeit von der Distanz zum Einzelleiter. Für die Situation im Fahrzeug erscheint die Annahme eines Mindestabstandes von 20 cm zu Komponenten mit derartig hohem Strombelag vernünftig, was zu magnetischen Flussdichten von nicht mehr als ca. 700 µT führt. Bei Zugrundelegung des Basisgrenz- bzw. Referenzwertes von 40 mT gemäß 1999/519/EG ergäbe sich ein Expositionsindex von weniger als 0.02, was im Vergleich zu den $ExpInd_{1998}$-Werten zufolge des zeitlich veränderlichen Magnetfeldes (Abbildung 11.15) als vernachlässigbar erscheint.

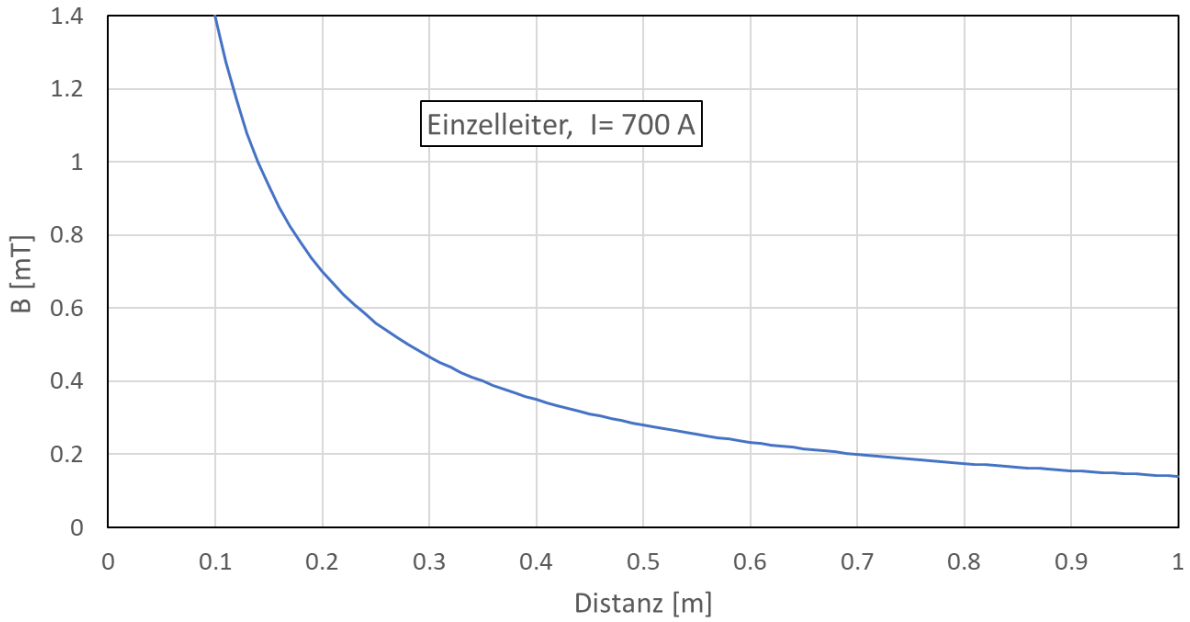


Abbildung 11.17: Berechnete Abnahme der magnetischen Flussdichte (0 Hz) mit fortschreitender Distanz zu einem geraden Einzelleiter bei einer Stromstärke von 700 A.

Die in Abbildung 11.18 gezeigten Daten wurden auf verschiedenen Bahnsteigen an den Haltestellen Köln Breslauer Platz/Hbf (Abbildung 11.14, links) bzw. Köln Barbarossaplatz gemessen.

Dabei wurden die Magnetfelder an unterschiedlichen Positionen an Bahnsteigen bei Ein- und Ausfahrt bzw. Aufenthalt eines Zuges sowohl in Höhe des Unterschenkels (Rucksack mit Messgerät am Boden stehend) als auch in Oberkörperhöhe (Rucksack mit Messgerät am Rücken getragen) aufgezeichnet. Unterirdisch fahrende Trams („U-Bahn“) wurden an der Haltestelle Köln Breslauer Platz/Hbf gemessen, während oberirdische Trams („Straßenbahnen“) bei der Haltestelle Köln Barbarossaplatz gemessen wurden. Da nach den ersten Messungen bereits Unterschiede zwischen den einzelnen Trams der unterschiedlichen Generationen bemerkt wurden, wurden die in die jeweilige Station einfahrenden Straßenbahnen ebenfalls in „alt“ bzw. „neu“ unterschieden.

Für die Situation des Aufenthalts am Bahnsteig bzw. im Bereich der Gleise könnte der DC-Anteil, je nach Distanz zum Gleis, einen relevanten Beitrag zum lokal auftretenden Expositionsindex leisten. Der diesbezüglich ungünstigste Fall wäre vermutlich das Betreten einer (als Rückleiter wirkenden) Schiene während eines Brems- oder Beschleunigungsmanövers eines Zuges im betrachteten Leitungsabschnitt. Dieser Fall wurde im Rahmen der Messungen jedoch nicht untersucht.

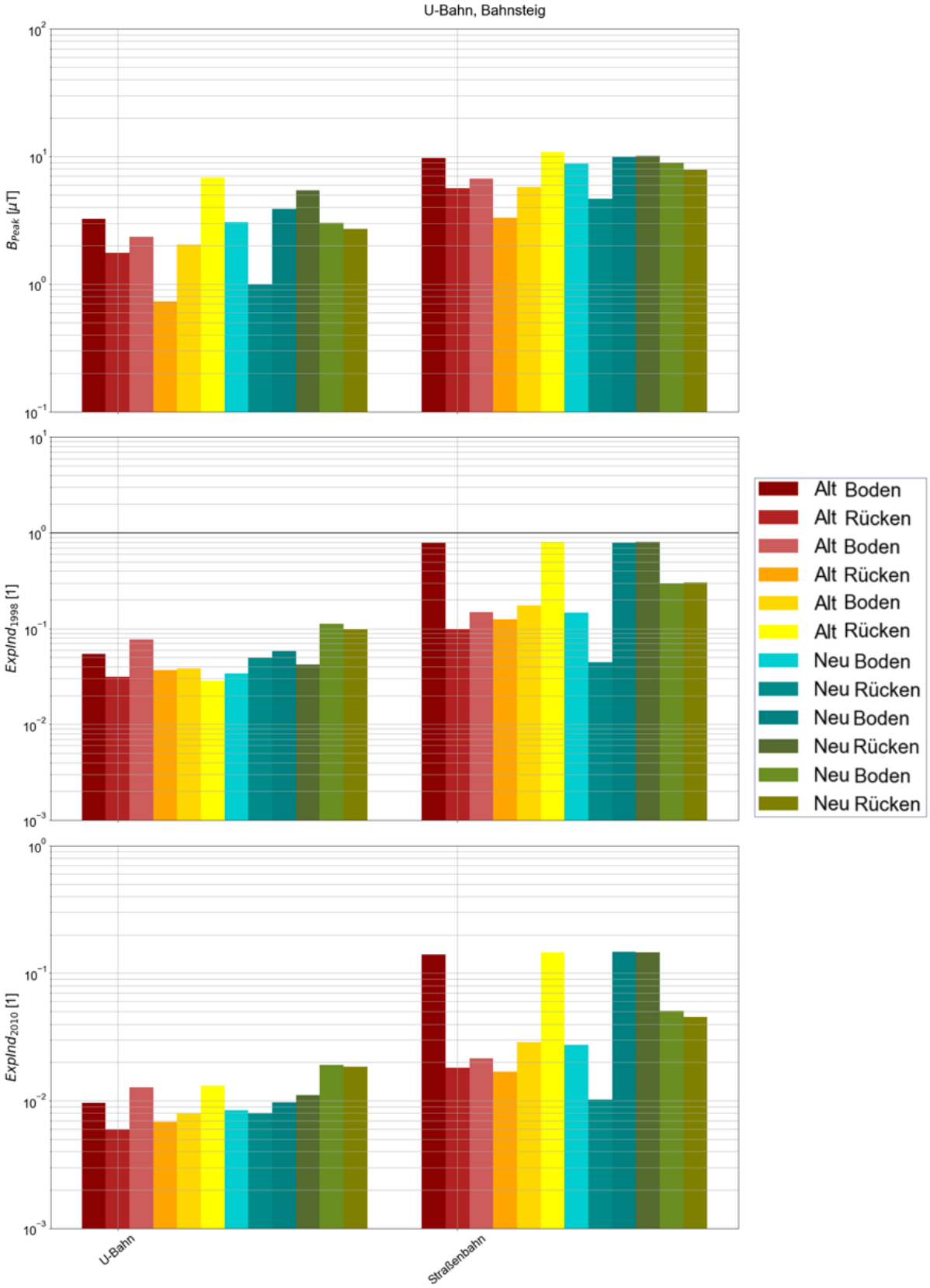


Abbildung 11.18: Maximale Magnetfeldimmissionen an verschiedenen Positionen auf verschiedenen U-Bahnsteigen in Form von Magnetfeldspitzenwerten B_{PEAK} (oben), Expositionsindizes bezüglich der Referenzwerte gemäß ICNIRP 1998 (Mitte) und gemäß ICNIRP 2010 (unten).

11.3 Diskussion der Messergebnisse

In allen untersuchten öffentlichen Verkehrsmitteln traten die maximalen Immissionen während des Bremsens oder Beschleunigens auf. In den Fern-, Regional-, und S-Bahn-Zügen (versorgt über 15 kV / 16.7 Hz Oberleitungen) lagen die maximal gemessenen B_{PEAK}-Werte und Expositionsindizes bei einigen 10 µT (max. 65 µT) bzw. bei 0.36 ($ExpInd_{1998}$) bzw. 0.14 ($ExpInd_{2010}$). Ähnlich hohe B_{PEAK}-Werte (max. ca. 28 µT), jedoch deutlich größere Expositionsindizes zeigten die Messungen in der Kölner Stadtbahn (U-Bahn bzw. Straßenbahn, Versorgung mit 800 V Gleichstrom-Oberleitungen). Grund dafür sind offensichtlich die Schaltfrequenzen der Stromrichter, die zu stark oberwellenbehafteten Immissionen führen (vgl. Abbildung 11.16). In einer Straßenbahn wurden während eines Bremsmanövers auf einem Sitzplatz im Bereich der Waggonverbindung kurzzeitig sogar Überschreitungen der ICNIRP 1998 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung festgestellt ($ExpInd_{1998}$ = 1.77). Die Beantwortung der Frage, ob es an dieser Position auch zu Überschreitungen der von ICNIRP empfohlenen Basisgrenzwerte kommen kann, hängt in großem Maße von der räumlichen Feldverteilung in dem für Personen zugänglichen Raumbereich ab, war jedoch nicht Gegenstand des Projekts. Sofern die Möglichkeit besteht der Quelle dieser Immissionen deutlich näher zu kommen als dies bei den Messungen der Fall war, würde eine nähere Analyse auf Basis numerischer Berechnungen jedenfalls sinnvoll erscheinen.

Die Langzeit RMS-Werte lagen in allen untersuchten Verkehrsmitteln auf der unteren (ggf. einzigen) Fahrgastebene in der gleichen Größenordnung im Bereich von 2 – 3 µT. In ggf. vorhandenen oberen Fahrgastebenen (in doppelstöckigen IC- und Regionalzügen) traten deutlich größere Langzeit RMS-Werte auf (bis ca. 13 µT).

11.3.1 Anmerkung hinsichtlich Gefährdung von Personen mit aktiven Implantaten

Eine vereinfachte Bewertung der Messergebnisse bezüglich einer möglichen Gefährdung von Personen mit aktiven medizinischen Implantaten kann auf den in Kapitel 9.5.4 beschriebenen Überlegungen erfolgen. Demzufolge sind vor allem die über längere Zeiträume (> 1 Sekunde) andauernden Immissionswerte relevant und weniger kurzzeitig und vereinzelt auftretende transiente Feldstärken. Aus den Messdaten lassen sich maximale, über längere Zeiträume anhaltende magnetische Flussdichten mit Spitzenwerten im Bereich unter 70 µT ableiten, mit dominanten Frequenzanteilen deutlich unter 100 Hz. Höherfrequente und über längere Zeit andauernde Immissionen (z. B. Abbildung 11.16) traten nur mit deutlich geringeren Spitzenwerten der magnetischen Flussdichte auf, so dass sich auf Grundlage des Bewertungsparadigmas gemäß Forschungsbericht FB 451 (BMAS, 2015) in den untersuchten Messpositionen kein Hinweis auf eine Gefährdung von Personen mit aktiven medizinischen Implantaten durch zeitlich veränderliche Magnetfelder ergab. Ebenso erscheint eine Gefährdung durch magnetische Gleichfelder (DC) in den untersuchten mit Gleichspannung versorgten Straßenbahn- bzw. U-Bahn-Fahrzeugen als sehr unwahrscheinlich. Der dafür anwendbare Gefährdungs-Schwellenwert (Ansprechen des Reed-Schalters) von 500 µT erscheint, auf Basis der in Kapitel 11.2.4 angestellten theoretischen Überlegungen, in unmittelbarer (< 30 cm) Nähe von Komponenten möglich, der Aufenthalt einer Person mit dem Implantat in genau diesen Bereichen erscheint aus praktischer Sicht aber unwahrscheinlich.

12 Zusammenfassung und Gesamtdiskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der durchgeführten Messungen in den zweispurigen Fahrzeugen stellen eine solide Datenbasis der innerhalb der untersuchten Fahrzeuge auftretenden Magnetfeldimmissionen dar. Ein Vergleich mit Daten aus der Literatur ist schon allein aufgrund der methodischen Heterogenität schwierig (siehe Kapitel 4). Die aus der Gesamtschau der Literatur ableitbare weitgefasste Aussage, dass in EV und PHEV Spitzenwerte der magnetischen Feldstärke bis knapp über 100 µT auftreten können und Ausschöpfungen der ICNIRP 1998-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung bis in den zweistelligen Prozentbereich auftreten können, werden durch die in diesem Bericht präsentierten Ergebnisse in den meisten Fahrzeugen für „sanfte“ Fahrweise bestätigt. Jedoch konnte darüber hinaus gezeigt werden, dass in vielen Fahrzeugen bei „sportlicher“ Fahrweise die Magnetfeldimmissionen deutlich größer und dass die Referenzwerte in einigen Fahrzeugen lokal auch deutlich überschritten werden können. Grund dafür sind zumeist transiente Vorgänge in Zusammenhang mit Brems- und/oder Beschleunigungsmanövern. Der Grund, warum sich dies in der bisherigen Literatur nicht findet, liegt wahrscheinlich daran, dass die in diesem Forschungsvorhaben angewendete rigorose Messmethodik bisher als beispiellos angesehen werden muss. Insgesamt wurden für die vierzehn untersuchten zweispurigen Fahrzeuge systematisch mehr als 975.000 Einzelmessungen durchgeführt und ausgewertet, was die Wahrscheinlichkeit des „Übersehens“ transienter Vorgänge minimiert. Durchgeführte numerische Berechnungen der von diesen lokalen Magnetfeldexpositionen verursachten induzierten elektrischen Feldstärken in den Füßen bzw. im Unterschenkel von Fahrer und Beifahrer zeigen bei den untersuchten Fahrzeugen jedoch keine Konflikte mit den Basisgrenzwerten für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010. Ebenso ergeben die Messergebnisse keine Hinweise auf Konflikte mit Basisgrenzwerten für am Beifahrerplatz oder auf der Rückbank sitzende Kinder.

Eine auf Basis der untersuchten Fahrzeugstichprobe durchgeführte Analyse im Hinblick auf die Frage, ob sich ein Trend zu größerer Magnetfeldexposition bei größerer maximaler elektrischer Antriebsleistung aus den Messdaten ableiten lässt, zeigte, dass im Hinblick auf eine Expositionsbewertung auf Grundlage der ICNIRP-Empfehlungen die maximale Antriebsleistung der Fahrzeuge kein sinnvoller Prädiktor für die Exposition ist. Jedoch zeigt sich ein mittlerer bis starker Zusammenhang zwischen maximaler Antriebsleistung und der maximal gemessenen Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte. Diese Aussagen sind jedoch aufgrund der kleinen Fahrzeugstichprobe mit Vorsicht zu interpretieren.

Bezüglich des Frequenzspektrums der gemessenen und vom Antriebssystem stammenden Immissionen zeigte sich, dass die im Hinblick auf die Exposition relevanten Spektralanteile in allen Fahrzeugen unterhalb von 20 kHz lagen.

Als ebenfalls interessanter Befund ist die Tatsache zu bezeichnen, dass es in den meisten Fahrzeugen (auch beim untersuchten Fahrzeug mit Verbrennungsmotor) beim Einschalten lokal zu deutlichen Überschreitungen der ICNIRP 1998 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung kommt, und dass auch andere elektrische Verbraucher, die nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem elektrischen Antriebssystem stehen, Ursache für Magnetfeldimmissionen sein können, die deutlich höher sein können als jene vom elektrischen Antriebssystem stammenden. Dies eröffnet die berechtigte Frage, ob durch Überlagerung der Immissionsbeiträge unterschiedlicher Quellen (z. B. von Antriebssystem, Sitzheizung, Lüfter, Blinker oder Fensterheber) die resultierende Exposition in relevantem Ausmaß steigen kann. Da diese Frage grundsätzlich nicht verneint werden kann, ist für eine umfassende und

konservative Bewertung der Gesamtexposition im Inneren von Fahrzeugen zu empfehlen, relevante Immissionsbeiträge unterschiedlicher Verursacher die gleichzeitig auftreten können, unter Berücksichtigung ihrer räumlichen Verteilung zu addieren.

Die Tatsache, dass die größten Expositionsindizes durch transiente Vorgänge verursacht wurden, lässt die derzeit für Immissionsmessungen in Fahrzeugen verwendete Norm EN IEC 62764-1 in besonders kritischem Licht erscheinen, da in dieser Norm die Erfassung von transienten Vorgängen, die kürzer als 200 ms sind, nicht vorgesehen ist. Insofern kann diese Norm nicht als ausreichend für eine umfassende strahlenschutztechnische Bewertung der in Fahrzeugen auftretenden magnetischen Felder basierend auf dem Bewertungsparadigma von ICNIRP 1998 und ICNIRP 2010 angesehen werden, demzufolge, im Hinblick auf durch Beeinflussung des Zellenmembranpotenzials vermittelte Effekte, auch kurzzeitig auftretende Spitzenwerte der Magnetfeldimmissionen für die Bewertung heranzuziehen sind.

Weiters lassen die in begrenztem Umfang durchgeführten Analysen bezüglich der Ursache für die teilweise überraschend hohen lokalen Immissionen die Vermutung zu, dass eine Minimierung der Magnetfeldimmissionen im Innenraum der Fahrzeuge seitens mancher Fahrzeughersteller im Zuge des Entwicklungsprozesses noch wenig berücksichtigt wird. Beispielsweise erscheinen die aus Fahrzeug-Rettungskarten ablesbaren Verlegearten von relevanten stromführenden Kabeln teilweise nicht optimal für eine Minimierung der Magnetfeldimmissionen.

Die durchgeführten Messungen an den einspurigen Fahrzeugen stellen derzeit die einzigen verfügbaren systematisch erhobenen Messdaten dar und zeigen ebenfalls die Möglichkeit von lokal eingegrenzten (im Fuß- bzw. Unterschenkelbereich) Referenzwertüberschreitungen bei „sportlicher“ Fahrweise. Hier zeigt sich jedoch konsistent, dass die Ursache nicht in transienten Vorgängen liegt, sondern an den erwartbaren, bei zunehmender Last deutlich oberwellenbehafteten Magnetfeldern der Motorströme beim Beschleunigen und den im Vergleich zu den zweispurigen Fahrzeugen geringeren Abständen der Körperteile zu den Quellen. Wie auch im Fall der zweispurigen Fahrzeuge zeigten die numerischen Berechnungen, dass die von den lokalen Magnetfeldexpositionen verursachten, induzierten elektrischen Feldstärken in den Füßen bzw. im Unterschenkel bei den einspurigen Fahrzeugen ebenfalls nicht zu Konflikten mit den Basisgrenzwerten für die Allgemeinbevölkerung gemäß ICNIRP 2010 führten.

Die zu Vergleichszwecken durchgeführten Messungen in elektrisch betriebenen öffentlichen Verkehrsmitteln mit 15 kV / 16.7 Hz Oberleitungsversorgung zeigten, dass auch dort Ausschöpfungen des ICNIRP 1998 Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung im zweistelligen Prozentbereich möglich bzw. an einigen Passagierplätzen sogar üblich sind. In den untersuchten Straßenbahnen bzw. U-Bahnen (versorgt über 800 V Gleichstrom-oberleitungen) traten an einzelnen Passagierplätzen Überschreitungen der ICNIRP 1998 Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung auf. Über Körperdimensionen gemittelte Langzeit RMS-Werte müssen, basierend auf den vorliegenden Messdaten, in den hier betrachteten elektrisch betriebenen Verkehrsmitteln höher als in den untersuchten EV und PHEV erwartet werden.

13 Literatur

ADAC, 2021. ADAC-Autodatenbank [WWW Document]. ADAC Autokatalog: Aktuelle News und Autodatenbank. URL https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/

BMAS, 2015. Elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz: Sicherheit von Beschäftigten mit aktiven und passiven Körperhilfsmitteln bei Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern. Forschungsbericht 451.

BMU, 2013. 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit).

Bornkessel, C., Schubert, M., Wuschek, M., Brüggemeyer, H., Weiskopf, D., 2011. Systematische Erfassung aller Quellen nichtionisierender Strahlung, die einen relevanten Beitrag zur Exposition der Bevölkerung liefern können.

Brecher, Disk, Fugate, Jacobs, Joshi, Kupferman, Mauri, Valihura, U.S Department of Transportation- FRA, 2002. Electromagnetic Field Characteristics of the Transrapid TR08 Maglev System. U.S. Department of Transportation-FRA 1–224.

Chen, J., Ruddle, A.R., Xian Teo, Y., 2018. Simplification Strategies for SimulatiNg Low Frequency Magnetic Fields Around Battery Modules Formed from Cylindrical 18650 Cells, in: 2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE). pp. 860–865. https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2018.8485002

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

Contessa, G.M., Falsaperla, R., Brugaletta, V., Rossi, P., 2010. Exposure to magnetic fields of railway engine drivers: a case study in Italy. Radiation Protection Dosimetry 142, 160–167. https://doi.org/10.1093/rpd/ncq270

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

Dietrich, F.M., Jacobs, W.L., 1999. Survey and assessment of electric and magnetic field (EMF) public exposure in the transportation environment (No. PB-99-130908/XAB). Electric Research and Management, Inc., State College, PA (United States); John A. Volpe National Transportation Systems Center, Cambridge, MA (United States).

Eberhard, J., Fröhlich, J., Zahner, M., 2023. Elektromagnetische Felder (EMF) in Elektrofahrzeugen (Schlussbericht vom 31.03.2023). Forschungsstiftung Strom und Mobilkommunikation (FSM), Bern.

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.

Garvanova, M., Garvanov, I., Ivanov, V., Borissova, D., 2022. Measurement and Estimation of the Magnetic Fields in Electric Vehicles. 2022 22nd International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies (SIELA) 1–4. https://doi.org/10.1109/SIELA54794.2022.9845773

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

Hakuta, Y., Watanabe, T., Takenaka, T., Ito, T., Hirata, A., 2021. Safety Standard Compliance of Human Exposure From Vehicle Cables Using Coupling Factors in the

Frequency Range of 0.3–400 kHz. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 63, 313–318. https://doi.org/10.1109/TEMC.2020.2983952
Halgamuge, M.N., Abeyrathne, C.D., Mendis, P., 2010. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars. Radiat Prot Dosimetry 141, 255–268. https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168
Hareuveny, Sudan, Halgamuge, Yaffe, Tzabari, Namir, Kheifets, 2015. Characterization of Extremely Low Frequency Magnetic Fields from Diesel, Gasoline and Hybrid Cars under Controlled Conditions. Int J Environ Res Public Health 12, 1651–1666. https://doi.org/10.3390/ijerph120201651
Hasgall, P., Di Gennaro, F., Baumgartner, C., Neufeld, E., Lloyd, B., Gosselin, M.-C., Payne, D., Klingenböck, 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., 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.
Hoffmann M, Mehnert C, Kurz T, de Ridder M, Gerke M, Vogel E, 2020. Elektromagnetische Felder im Alltag. Aktuelle Informationen über Quellen, Einsatz und Wirkungen 1–140.
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, 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 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 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
Ionescu, V.-M., Săpunaru, A.-A., Popescu, M.O., Popescu, C.L., 2019. Magnetic Field Constraints in the Passenger Compartment of Electric Vehicles, in: 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe). pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2019.8905554
Karabetsos, E., Kalampaliki, E., Koutounidis, D., 2014. Testing Hybrid Technology Cars: Static and Extremely Low-Frequency Magnetic Field Measurements. IEEE Vehicular Technology Magazine 9, 34–39. https://doi.org/10.1109/MVT.2014.2360651
Karabetsos, E., Kalampaliki, E., Tsanidis, G., Koutounidis, D., Skamnakis, N., Kyritsi, T., Yalofas, A., 2010. EMF measurements in hybrid technology cars, in: Proceedings of 6th International Workshop on Biological Effects of Electromagnetic Fields, Istambul. pp. 10–14.
Karabetsos, E., Koutounidis, D., Kalampaliki, E., 2013. Static and Extremely Low Frequency Magnetic Fields Measurements in Various Types and Models of Hybrid Technology Cars. Joint Meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association (BioEM2013) 1–78.

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
Kircher, R., Palka, R., Fritz, E., Eiler, K., Witt, M., Blow, L., Klühspies, J., 2018. Electromagnetic fields of high-speed transportation systems. Maglev Technologies in Comparison with Steel.
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
Li, C., Lin, J., Lei, J., Wu, T., Qi, D., Chen, R., 2018. Dosimetry Assessment for Human Exposure to Extremely Low Frequency Magnetic Fields in the Electric Vehicles, in: 2018 12th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE). pp. 1–4. https://doi.org/10.1109/ISAPE.2018.8634413
Lin, J., Lu, M., Wu, Tong, Yang, L., Wu, Tongning, 2018. EVALUATING EXTREMELY LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELDS IN THE REAR SEATS OF THE ELECTRIC VEHICLES. Radiation Protection Dosimetry 182, 190–199. https://doi.org/10.1093/rpd/ncy048
Low, L., Ruddle, A.R., 2013. Investigation of human exposure due to unintended electromagnetic emissions in electric vehicles, in: 2013 7th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). pp. 1285–1289.
Moreno-Torres, P.C., Lourd, J., Lafoz, M., Arribas, J.R., 2013. Evaluation of the Magnetic Field Generated by the Inverter of an Electric Vehicle. IEEE Transactions on Magnetics 49, 837–844. https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2214787
Moreno-Torres, P.C., Velez, P., Lafoz, M., R. Arribas, J., 2016. Passenger Exposure to Magnetic Fields due to the Batteries of an Electric Vehicle. IEEE Transactions on Vehicular Technology 65, 4564–4571. https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2490105
Pääkkönen, R., Korpinen, L., 2019. LOW FREQUENCY MAGNETIC FIELDS INSIDE CARS. Radiation Protection Dosimetry 187, 268–271. https://doi.org/10.1093/rpd/ncz248
Pinaud, O., Chadebec, O., Rouve, L.L., Guichon, J.M., Vassilev, A., 2014. Forward Model Computation of Magnetostatic Fields Inside Electric Vehicles. IEEE Transactions on Magnetics 50, 985–988. https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2283913
Ptitsyna, N., Kopytenko, Y., Ponzetto, A., Villoresi, G., 2012. Analysis of magnetic fields onboard electric transport systems in regard to human exposure, in: International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396902
Ptitsyna, N., Ponzetto, A., 2012. Magnetic fields encountered in electric transport: Rail systems, trolleybus and cars, in: International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. pp. 1–5. https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396901
Ptitsyna, N.G., Ponzetto, A., Kopytenko, Y.A., Ismagilov, V.S., Korobeinikov, A.G., 2014. Electric Vehicle Magnetic Fields and Their Biological Relevance. Journal of Scientific Research and Reports 1753–1770. https://doi.org/10.9734/JSRR/2014/9736
Ruddle, A.R., Armstrong, R., Dawson, L., Rowell, A., 2014a. Investigation of human exposure to magnetic fields from electrical powertrains: measured exposure levels and simulated impact on human body 7.2-7.2. https://doi.org/10.1049/cp.2014.0956

Ruddle, A.R., Low, L., 2014a. Exposures representative of traction current magnetic fields in hybrid and electric vehicles - I: Simulation of basic restrictions in a seated human, in: 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. pp. 348–353. https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2014.6930930
Ruddle, A.R., Low, L., 2014b. Exposures representative of traction current magnetic fields in hybrid and electric vehicles - II: Safety factors provided by field reference levels, in: 2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. pp. 354–359. https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2014.6930931
Ruddle, A.R., Low, L., 2013a. Analysis of twisted cable options for reducing low frequency magnetic fields due to traction currents in vehicles with electric powertrains, in: 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. pp. 449–454.
Ruddle, A.R., Low, L., 2013b. Design and integration measures to minimize low frequency magnetic field exposure for the occupants of vehicles with electrical powertrains, in: IET Hybrid and Electric Vehicles Conference 2013 (HEVC 2013). pp. 1–6. https://doi.org/10.1049/cp.2013.1909
Ruddle, A.R., Low, L., 2012. Impact of bodyshell on low frequency magnetic fields due to electric vehicle power cables, in: International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE. pp. 1–6. https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396781
Ruddle, A.R., Low, L., Armstrong, R., Dawson, L., Rowell, A., 2014b. Recommendations for mitigating low frequency magnetic field exposure in hybrid/electric vehicles, in: 2014 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE). pp. 86–91. https://doi.org/10.1109/ICCVE.2014.7297674
Ruddle, A.R., Low, L., Vassilev, A., 2013. Evaluating low frequency magnetic field exposure from traction current transients in electric vehicles, in: 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility. pp. 78–83.
Sadamitsu, S., Leung, S.W., Lo, W.K., Sun, W.N., 2018. Practical considerations of human exposure in railway systems, in: 2018 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and 2018 IEEE Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC/APEMC). pp. 28–31. https://doi.org/10.1109/ISEMC.2018.8393732
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. Journal of Radiological Protection 39, 794–808. https://doi.org/10.1088/1361-6498/ab25be
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.
Schmid, Überbacher, Cecil, Petric, Göth, BfS, 2009. Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz ; 21/09 Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte : Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben ; Vorhaben 3608S04574 ; SL-LE-0004/09. BfS 1–158.
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.
Tan, L., Li, G., Xie, Q., Xiang, Y., Luo, B., 2023. Study on the safety assessment and protection design of human exposure to low-frequency magnetic fields in electric vehicles. Radiat Prot Dosimetry 200, 60–74. https://doi.org/10.1093/rpd/ncad269
Tell, R. a., Sias, G., Smith, J., Sahl, J., Kavet, R., 2013. ELF magnetic fields in electric and gasoline-powered vehicles. Bioelectromagnetics 34, 156–161. https://doi.org/10.1002/bem.21730
Tell, R.A., Kavet, R., 2016. Electric and magnetic fields <100 kHz in electric and gasoline-powered vehicles. Radiat Prot Dosimetry 172, 541–546. https://doi.org/10.1093/rpd/ncv533
Tian, R., Lu, M., 2020. Safety Assessment of Electromagnetic Exposure in High-Speed Train Carriage with Full Passengers. Annals of Work Exposures and Health 64, 838–851. https://doi.org/10.1093/annweh/wxaa048
Tondato, F., Bazzell, J., Schwartz, L., Mc Donald, B.W., Fisher, R., Anderson, S.S., Galindo, A., Dueck, A.C., Scott, L.R., 2017. Safety and interaction of patients with implantable cardiac defibrillators driving a hybrid vehicle. International Journal of Cardiology 227, 318–324. https://doi.org/10.1016/j.ijcard.2016.11.090
Trentadue, G., Zanni, M., Martini, G., 2020. Assessment of low frequency magnetic fields in electrified vehicles. 1–47. https://doi.org/10.2760/056116
Vassilev, A., Ferber, A., Wehrmann, C., Pinaud, O., Schilling, M., Ruddle, A.R., 2015. Magnetic Field Exposure Assessment in Electric Vehicles. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 57, 35–43. https://doi.org/10.1109/TEMC.2014.2359687
VDA, V. der A. e.V., 2021. VDA 460-100 - Bewertungsempfehlung für den Personenschutz gegenüber niederfrequenten Magnetfeldern im Kraftfahrzeug.
Wang, Y., Wen, Y., 2019. Electromagnetic Emission of Maglev Vehicle by Linear Synchronous Motor, in: 2019 IEEE 3rd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). pp. 1507–1512. https://doi.org/10.1109/CIEEC47146.2019.CIEEC-2019544
Yang, L., Lu, M., Lin, J., Li, C., Zhang, C., Lai, Z., Wu, T., 2019. Long-Term Monitoring of Extremely Low Frequency Magnetic Fields in Electric Vehicles. International Journal of Environmental Research and Public Health 16, 3765. https://doi.org/10.3390/ijerph16193765
ZMT Zurich MedTech AG, 2024. Sim4Life [WWW Document]. URL https://zmt.swiss/sim4life/

14 Anhang – Zulassungszahlen BEV und PHEV

Tabelle 14.1: Fahrzeugzulassungen BEV 2016 bis April 2021.

#	Modell	Zulassungszahlen						
		Gesamt	2021	2020	2019	2018	2017	2016
1	Renault ZOE	63935	10642	30376	9431	6360	4322	2804
2	Tesla Model 3	38421	14208	15202	9011			
3	Volkswagen e-Golf	35509	1544	17438	6898	5743	3026	860
4	smart fortwo electric drive	33710	9609	11544	5287	4204	2987	79
5	BMW i3 BEV	32262	6412	8629	9117	3792	2791	1521
6	Volkswagen e-up!	32020	18027	10839	465	1019	1078	592
7	Volkswagen ID.3	29588	15095	14493				
8	Hyundai Kona Elektro	29123	11226	14008	3521	368		
9	Audi e-tron quattro	16388	4675	8135	3578			
10	smart forfour electric drive	14068	3905	4491	2362	2552	758	
11	Kia Soul EV	12852	1288	2364	1591	3292	2933	1384
12	Nissan Leaf	12695	2125	3607	2620	2381	841	1121
13	Opel Corsa-e	11468	6245	5223				
14	Mini Cooper SE Elektro	10120	5431	4365	324			
15	Volkswagen ID.4	9242	6914	2328				
16	Hyundai IONIQ Elektro	7527	1429	1915	1527	1695	881	80
17	Kia Niro EV	7333	3310	3543	450	30		
18	Peugeot e-208	7151	4520	2631				
19	Skoda Citigo e	6863	2117	4746				
20	Tesla Model S	6735	14	777	981	1248	2241	1474
21	Fiat 500	5866	5866					
22	Mercedes EQC	5569	2414	3155				
23	Porsche Taycan	5547	2344	3203				
24	Skoda ENYAQ	5312	5312					
25	Seat Mii electric	5207	3058	2149				
26	Mazda MX-30	5186	1465	3721				
27	Renault Twingo Electric	4419	3318	1101				
28	Tesla Model X	3637	35	714	716	652	1090	430
29	Peugeot e-2008	3414	2217	1197				
30	Opel Mokka-e	2953	2935	18				
31	Jaguar I-Pace	2839	353	1341	954	191		
32	Mercedes EQA	2191	2191					
33	Polestar 2	2120	1110	1010				
34	Nissan e-NV200	1715	121	453	617	150	202	172
35	Hyundai IONIQ 5	1690	1520	170				
36	Mercedes EQV	1562	667	895				
37	Honda E	1443	409	1034				
38	Opel Ampera-e	1432	14	680	120	385	233	
39	BMW iX3	1335	1264	71				
40	Mercedes B-Klasse Electric Drive	1059				80	542	437
41	Ford Mustang Mach-E	1054	873	181				
42	Audi Q4 e-tron	1045	1045					
43	Peugeot iON	737			174	140	269	154
44	Volvo XC40 Recharge Elektro	699	590	109				
45	Audi e-tron GT	650	650					
46	Citroën C-Zero	639		116	142	98	170	113
47	Citroën ë-C4	562	562					
48	Dacia Spring	548	548					
49	Volkswagen e-Crafter	356	15	138	203			
50	DS Automobiles DS3 CB E-Tense	339	121	218				
51	Mercedes eVito	269		269				

#	Modell	Zulassungszahlen						
		Gesamt	2021	2020	2019	2018	2017	2016
52	Opel Zafira-e	242		242				
53	BMW iX	239	239					
54	Citroën ë-Jumpy	234	234					
55	Opel Zafira-e	174	174					
56	Mercedes eVito	157	157					
57	Peugeot e-Expert	86	86					
58	Ford Focus Electric	75				34	34	7
59	Mitsubishi Electric Vehicle IMIEV	48					35	13
60	Volkswagen e-Caddy	40	10	30				
61	Lexus UX 300e	24	24					
62	Mercedes EQS	23	23					
63	Opel Combo-e	21	21					
64	Citroën Berlingo	16				1	15	
65	Toyota Proace Electric	13	13					

Tabelle 14.2: Fahrzeugzulassungen PHEV seit 2016.

#	Modell	Zulassungszahlen						
		Gesamt	2021	2020	2019	2018	2017	2016
1	Volkswagen Passat Plug-in Hybrid	31268	9549	14920	1181	2137	2234	1247
2	Mercedes E-Klasse Plug-in Hybrid	26501	5451	11307	6231	1636	1579	297
3	Volkswagen Golf Plug-in Hybrid	25526	12224	7859	215	1978	1935	1315
4	Audi A3 Plug-in Hybrid	25413	7781	8365	1516	1682	4454	1615
5	Mitsubishi Outlander Plug-In Hyb.	24833	3116	8255	7593	2198	2234	1437
6	Mercedes GLE Plug-in Hybrid	23959	8197	12102	2180	1480		
7	Mercedes A-Klasse Plug-in Hybrid	18129	6344	11680	105			
8	BMW 2er Plug-in Hybrid	17953	563	2648	4981	4878	3680	1203
9	BMW 3er Plug-in Hybrid	15565	6803	6216	1636	336	574	
10	Ford Kuga Plug-in Hybrid	14292	10252	4040				
11	Audi A6 Plug-in Hybrid	13719	5215	8504				
12	Mercedes C-Klasse Plug-in Hybrid	13569	3257	8328	1984			
13	Seat Leon Plug-in Hybrid	12643	9425	3218				
14	Audi Q5 Plug-in Hybrid	12300	2293	9695	312			
15	BMW 5er Plug-in Hybrid	12210	3513	2784	4025	1888		
16	Mercedes GLE Plug-in Hybrid	9878	4167	3775	1753	183		
17	BMW X1 Plug-in Hybrid	9758	5462	4296				
18	Skoda Superb Plug-in Hybrid	9589	2964	6625				
19	Mini Cooper Plug-in Hybrid	9399	2074	3386	2447	1492		
20	BMW X5 Plug-in Hybrid	9030	3646	4216	335	177	296	360
21	Kia Ceed Plug-in Hybrid	8460	4122	4338				
22	Volvo XC40 Plug-in Hybrid	8009	3671	4338				
23	Volvo S60/V60 Plug-in Hybrid	7979	2170	4307	405	176	639	282
24	Mercedes CLA Plug-in Hybrid	7869	4017	3852				
25	Volvo XC90 Plug-in Hybrid	7840	2013	2979	1048	531	580	689
26	BMW X3 Plug-in Hybrid	7839	3994	3845				
27	Opel Grandland X Plug-in Hybrid	7712	3917	3795				
28	Skoda Octavia Plug-in Hybrid	7181	5575	1606				
29	Volvo XC60 Plug-in Hybrid	6632	2172	2581	1130	749		
30	Porsche Cayenne S Plug-in Hybrid	6395	1578	2074	1353	718	309	363
31	Kia Niro Plug-in Hybrid	5815	980	2386	1009	1440		
32	Porsche Panamera 4 Plug-in Hyb.	5790	763	1088	1471	1322	955	191
33	Renault Capture Plug-in Hybrid	4980	3096	1884				
34	Hyundai IONIQ Plug-in Hybrid	4644	1023	1673	903	1045		
35	Cupra Formentor Plug-in Hybrid	4380	4380					
36	DS Automobiles DS7 CB Plug-in H.	4268	414	573		966	1528	787
37	Volkswagen Tiguan Plug-in Hybrid	4146	2781	23				1342
38	Audi Q7 Plug-in Hybrid	4060	1914	1775	34	337		
39	Mercedes GLA Plug-in Hybrid	4020	1919	2101				
40	Mercedes B-Klasse Plug-in Hybrid	4003	2142	1861				
41	Audi Q3 Plug-in Hybrid	3126	3126					
42	Land Rover Range Rover Plug-in	3077	1233	1395	449			
43	Peugeot 3008 Plug-in Hybrid	2658	1516	1142				
44	BMW 7er Plug-in Hybrid	2591	218	683	766	410	321	193
45	Mitsubishi Eclipse Plug-In Hybrid	2268	2268					
46	Volvo S90/V90 Plug-in Hybrid	2148	514	769	598	267		
47	Hyundai Tucson	1940	1940					
48	Renault Mégane Plug-in Hybrid	1842	1126	716				
49	Jeep Compass Plug-in Hybrid	1735	1205	530				
50	Ford Explorer Plug-in Hybrid	1690	1014	676				
51	Citroën C5 Aircross Plug-in Hybrid	1676	889	787				
52	Kia Optima Plug-in Hybrid	1661	63	258	1145	195		
53	Peugeot 508 Plug-in Hybrid	1643	746	897				
54	BMW i8	1637	30	276	350	465	273	243
55	Toyota Prius Plug-in Hybrid	1594	131	387	404	672		

#	Modell	Zulassungszahlen						
		Gesamt	2021	2020	2019	2018	2017	2016
56	BMW i3 Range Extender	1568			265	1303		
57	Volkswagen Touareg Plug-in Hyb.	1543	801	742				
58	Audi A7 Plug-in Hybrid	1430	470	960				
59	Jeep Wrangler Plug-in Hybrid	1377	311				680	386
60	Kia Sorento Plug-in Hybrid	1339	1339					
61	Seat Tarraco Plug-in Hybrid	1305	1305					
62	BMW X2 Plug-in Hybrid	1298	868	430				
63	Jeep Renegade Plug-in Hybrid	1275	773	502				
64	Toyota RAV4 Plug-in Hybrid	1165	1032	133				
65	Volkswagen Arteon Plug-in Hybrid	1134	1108	26				
66	Audi Q8 Plug-in Hybrid	1101	978	123				
67	Audi A8 Plug-in Hybrid	1019	456	563				
68	Hyundai Santa Fe	786	786					
69	Land Rover Discovery Plug-in Hyb.	679	397	282				
70	Mercedes S-Klasse Plug-in Hybrid	364	112	161	91			
71	Suzuki Across Plug-in Hybrid	257	33	224				
72	Ford Tourneo/Transit Plug-in Hyb.	253	44	209				
73	Jaguar F-Pace Plug-in Hybrid	237	237					
74	Jaguar E-Pace Plug-in Hybrid	97	97					
75	Land Rover Defender Plug-in Hyb.	88	88					
76	Ferrari SF90 Stradale	86	86					