

Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen Sicherheit und zum Strahlenschutz

Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte - Vorhaben 3608S04574

Auftragnehmer:
Seibersdorf Labor GmbH, Austria

G. Schmid

R. Überbacher

S. Cecil

B. Petric

P. Göth

Das Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Auftrag des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS) durchgeführt.

Dieser Band enthält einen Ergebnisbericht eines vom Bundesamt für Strahlenschutz im Rahmen der Ressortforschung des BMU (UFOPLAN) 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.

BfS-RESFOR-21/09

Bitte beziehen Sie sich beim Zitieren dieses Dokumentes immer auf folgende URN:
urn:nbn:de:0221-2009082182

Salzgitter, Oktober 2009

Bestimmung der Exposition durch Magnetfelder alternativer Antriebskonzepte

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

im Auftrag des

**Bundesamtes für Strahlenschutz
38201 Salzgitter, Deutschland**

Gernot Schmid, Richard Überbacher, Stefan Cecil, Benjamin Petric, Peter Göth

Seibersdorf Labor GmbH
Geschäftsfeld EMC & Optics
Fachbereich Elektromagnetische Verträglichkeit

Verfasser:

Dipl. Ing. Gernot Schmid
Fachbereich EMV, Geschäftsfeld EMC & Optics
Seibersdorf Labor GmbH
A-2444 Seibersdorf

Dipl. Ing. Richard Überbacher
Fachbereich EMV, Geschäftsfeld EMC & Optics
Seibersdorf Labor GmbH
A-2444 Seibersdorf

Dipl. Ing. Stefan Cecil
Fachbereich EMV, Geschäftsfeld EMC & Optics
Seibersdorf Labor GmbH
A-2444 Seibersdorf

Ing. Benjamin Petric
Fachbereich EMV, Geschäftsfeld EMC & Optics
Seibersdorf Labor GmbH
A-2444 Seibersdorf

Dipl. Päd. Peter Göth
Technologisches Gewerbemuseum, Kfz-Werkstätte
Wexstraße 10-23
A-1200 Wien

DANKSAGUNG

Die Durchführung der Immissionsmessungen in den Fahrzeugen war nur aufgrund der freundlichen Unterstützung der unten in alphabetischer Reihenfolge aufgelisteten Fahrzeughersteller, Fahrzeughändler und Betreiber der Fahrzeuge möglich:

- Bochum-Gelsenkirchner Straßenbahnen AG, Bochum, Deutschland
- Daimler AG, Stuttgart, Deutschland
- Honda Austria GmbH, Wien, Österreich
- LuPower Energie-Projekt GmbH & Co KG, St. Andrä / Lungau, Österreich
- PEFRA AG, Eiching / Weixerau, Deutschland
- Solaris Bus & Coach S.A, Owińska, Polen
- Toyota Frey Austria GmbH, Wien, Österreich

Die Autoren bedanken sich auf diesem Weg bei den jeweils verantwortlichen Personen der genannten Firmen für deren Bereitschaft zur Teilnahme an dem Forschungsvorhaben, für die zur Verfügungstellung der Fahrzeuge und der zugehörigen Fahrzeugdaten, sowie für deren tatkräftige Unterstützung während der Messungen.

ZUSAMMENFASSUNG

Alternative Antriebskonzepte sind in den vergangenen Jahren zunehmend in den Forschungsfokus der Automobilindustrie gerückt. Zu den derzeit prominentesten Konzepten zählen zweifellos Elektro-Hybridantriebe und reine Elektroantriebe, die gegenwärtig von einigen wenigen Herstellern bereits in Form von (einigen wenigen) Serienfahrzeugtypen realisiert wurden. Mit solchen Fahrzeug- bzw. Antriebskonzepten verknüpft ist naturgemäß der Umstand, dass leistungsstarke elektrische bzw. elektronische Komponenten (Elektromotoren, Leistungselektronik, Batterien) im Auto verbaut werden müssen und sich damit in unmittelbarer Nähe zu den Fahrzeuginsassen befinden. Aus strahlenschutztechnischer Sicht drängt sich daher die Frage nach der von diesen Komponenten bzw. von der Verkabelung zwischen diesen Komponenten verursachten Magnetfeldimmissionen im Inneren der Fahrzeuge und der damit verbundenen Exposition der Fahrzeugpassagiere auf.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden die Magnetfeldimmissionen in ausgewählten Vertretern der gegenwärtig bereits verfügbaren Fahrzeuge mit Hybrid- oder Elektroantrieb messtechnisch erhoben und entsprechend den ICNIRP Richtlinien aus dem Jahr 1998 strahlenschutztechnisch beurteilt. Zusätzlich erfolgte eine Beurteilung der erhobenen Immissionsdaten hinsichtlich einer möglichen Gefährdung von Herzschrittmacherpatienten auf Basis von DIN VDE 0840-3-1. Als zu untersuchende Fahrzeugkategorien wurden Hybrid PKWs (Honda Civic IMA, Toyota Prius, Lexus GS 450h), PKWs mit reinem Elektroantrieb (Panda Electric, Doblo Electric), Nutzfahrzeuge (Daimler Atego BlueTec Hybrid LKW und PEFRA Schlepper 780), sowie ein Nahverkehrsbus (Urbino18 Hybrid) festgelegt. Nachdem in allen untersuchten Fahrzeugen festgestellt wurde, dass sich die relevanten Spektralanteile auf den Frequenzbereich unterhalb von ca. 80 kHz beschränkten, erfolgten alle Immissionsmessungen im Frequenzbereich von 0 Hz – 100 kHz. Als Messgröße wurde jeweils der Zeitverlauf der magnetischen Flussdichte aufgezeichnet und einer frequenzselektiven Bewertung gemäß den ICNIRP Richtlinien unterzogen, wobei zur Vermeidung systematischer Überbewertungen der Immissionen ein Verfahren mit phasenrichtiger Summierung der Einzelspektralkomponenten verwendet wurde.

In den untersuchten Hybrid-PKWs lagen die lokal auftretenden Maximalimmissionen im Honda Civic IMA bei ca. 35%, im Toyota Prius bei ca. 29% und im Lexus GS 450h bei ca. 34% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung. In den untersuchten Fahrzeugen mit reinem Elektroantrieb lag diese Bewertungsgröße bei ca. 3% im Panda Electric und bei ca. 25% im Doblo Electric. Diese Maximalwerte treten in den meisten Fällen lokal stark begrenzt, am Fahrer- und Beifahrerplatz typischerweise im Fuß- und Unterschenkelbereich auf. In manchen Fällen, bei ungünstiger Lage der Batterie bzw. der Verkabelung unmittelbar unter oder hinter der Rückbank, wurden (je nach Fahrzeug stark unterschiedlich) auch im Unterleibsbereich auf der Rückbank Immissionswerte bis zu maximal 34% des Referenzwertes gemessen. Alle genannten Maximalwerte traten während des Bremsens oder Beschleunigens auf. Während annähernd stationärer Fahrverhältnisse liegen die Immissionswerte, abhängig von der betrachteten Messposition, teilweise deutlich unterhalb der genannten Maximalwerte.

Die während des normalen Fahrbetriebs in den untersuchten Nutzfahrzeugen maximal messbaren Immissionen lagen im Daimler Atego BlueTech Hybrid LKW (im Fußbereich des Fahrers) und im PEFRA Elektroschlepper 780 (im Unterleibsbereich des Fahrers) durchwegs unterhalb von 1% des ICNIRP-Referenzwertes für berufliche Exposition.

Im Nahverkehrsbus Urbino18 Hybrid (Solaris Bus & Coach) wurden am exponiertesten Fahrgastplatz, der sich direkt unterhalb der Leistungselektronik (Inverter) und direkt vor dem Kabelschacht für die Verkabelung zwischen Motor und Inverter befindet, im Bereich des Kopfes Immissionsspitzenwerte bis zu ca. 19% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung festgestellt. An Plätzen in unmittelbarer Nähe des Motorgehäuses lagen die maximal festgestellten Immissionswerte bei ca. 6%. Am Fahrerplatz des Busses ergaben die Messungen maximale Immissionen (im Kopfbereich) von ca. 2,6% des ICNIRP-Referenzwertes für berufliche Exposition.

Ein Vergleich der aus der Literatur näherungsweise ableitbaren Spitzenimmissionswerte im Fahrgastbereich von Eisenbahnzügen zeigt, dass diese etwa in der gleichen Größenordnung liegen, wie die Spitzenimmissionswerte in den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs, wobei angemerkt werden muss, dass die Spitzenimmissionswerte in den Hybrid- und Elektrofahrzeugen zumeist lokal stark begrenzt und durch die unmittelbare Nähe zu den Feldquellen erwartungsgemäß mit größeren Gradienten auftreten als in den Eisenbahnzügen. Im Bereich des Kopfes und des Rumpfes sind die Spitzenimmissionswerte in den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs, zumindest auf den Sitzplätzen der vorderen Reihe, deutlich geringer zu erwarten als die aus der Literatur ableitbaren Spitzenimmissionswerte im Fahrgastbereich von Eisenbahnzügen. Ein Vergleich der Immissionen im untersuchten Hybrid-Nahverkehrsbus mit jenen in vergleichbaren Schienenfahrzeugbasierten Verkehrsmitteln (S-Bahn, Straßenbahn, U-Bahn) zeigt ähnliche Spitzenimmissionswerte, wobei davon auszugehen ist, dass die Magnetfeldimmissionen im Hybridbus räumlich wesentlich inhomogener auftreten, als in den Schienenfahrzeugen. D.h., nahe an den Komponenten des Antriebssystems (z.B. unter dem Inverter) zeigten sich im Hybridbus größere, fernab der elektrischen Komponenten jedoch geringere Immissionswerte, als die aus der Literatur ableitbaren Werte in den Schienenfahrzeugen.

Die Bewertung der in den Hybrid- und Elektrofahrzeugen gemessenen Magnetfelder im Hinblick auf mögliche elektromagnetische Störbeeinflussungen von implantierten Herzschrittmachern nach dem Normentwurf DIN VDE 0848 Teil 3-1 ergab keinerlei Hinweise auf mögliche Gefährdungen.

Im Hinblick auf eine strahlenschutztechnische Gesamtbeurteilung der betrachteten alternativen Antriebssysteme ist jedenfalls festzuhalten, dass, durch die in der Literatur dokumentierten Messergebnisse und auch durch stichprobenartige Messungen im Rahmen dieses Vorhabens bestätigt, auch in konventionellen Kraftfahrzeugen teilweise relativ hohe, stark vom konkreten Fahrzeug abhängige Magnetfeldimmissionen auftreten können. Für eine generelle Aussage, ob alternative (elektrische) Antriebssysteme in Zukunft zu einer höheren Magnetfeldexposition der Bevölkerung führen werden, als es derzeit durch die konventionellen Fahrzeuge der Fall ist, ist einerseits die gegenwärtig vorhandene Anzahl von Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen noch zu gering und es fehlen andererseits derzeit systematisch erhobene und repräsentative Messdaten aus konventionellen Fahrzeugen.

SUMMARY

In recent years alternative drive systems have become key technologies in the research fields of automotive industries. Currently electro-hybrid systems and purely electric drive systems belong to the most promising technologies, which have already been deployed in (a few) presently available series vehicles by very few manufacturers. Consequently, these systems are bringing high power electric and electronic components (electric motors, inverters, batteries) in the immediate surrounding of the car's driver and passengers. Therefore, from the view of radiation protection, the question about the personal magnetic field exposure inside the vehicles, caused by these components and the cabling between them arises.

In the frame of this project the magnetic induction was measured inside a sample of vehicles, selected from the currently available market, and was assessed according to the ICNIRP guidelines published in 1998. Additionally, the measured field values were evaluated with respect to possible electromagnetic interference with cardiac pacemakers according to the draft standard DIN VDE 0840-3-1. Categories of vehicles which were considered in this study included motorcars with hybrid drive systems (Honda Civic IMA, Toyota Prius, Lexus GS 450h), motorcars with purely electric drive systems (Panda Electric, Doblo Electric), utility vehicles (the lorry Daimler Atego BlueTec Hybrid and the PEFRA tractor model 780), as well as the bus Urbino 18 Hybrid. Following the observation that in all considered vehicles all relevant spectral components were restricted to the frequency range below approximately 80 kHz, it was decided to limit the measured frequency range to 0 Hz – 100 kHz. As the measurement quantity the magnetic induction was recorded in time domain and the recordings were assessed in a frequency selective manner. In order to avoid systematic overestimation of exposure, the assessment followed an approach which correctly considers the phase relation between the single spectral components during the summation process required to get the resulting exposure in relation to the ICNIRP-reference levels.

Inside the investigated hybrid motorcars the local maximum magnetic field exposure in relation to the ICNIRP reference levels for general public exposure was obtained to be approx. 35% for the Honda Civic IMA, approx. 29% for the Toyota Prius, and approx. 34% for the Lexus GS 450h. Inside the purely electrically driven motorcars the corresponding values were found to be approx. 3% for the Panda Electric and approx. 25% for the Doblo Electric. These given maximum exposure values in most cases appeared locally restricted at the driver's and co-driver's feet and lower leg area, respectively. In a few cases, where the battery and its cabling was adversely located directly behind the backrest of the rear seat, exposures up to approx. 34% (strongly dependent on the vehicle type) of the ICNIRP general public reference levels were also found at the rear seats in the lower belly area. All mentioned exposure values correspond to phases of acceleration and braking. Under stationary driving conditions the resulting exposure values were observed to be significantly less than the maximum values stated above.

Maximum exposures at the driver's seat during usual operation of the investigated utility vehicles were found to be clearly less than 1% of the ICNIRP reference level for occupational exposure. In case of the Daimler lorry Atego BlueTech Hybrid the maximum was found in the feet area, in case of the PEFRA tractor model 780 the location of maximum exposure was in the lower belly area.

Inside the considered Urbino18 Hybrid bus (Solaris Bus & Coach) the highest level of exposure was found to be approx. 19% of the ICNIRP general public reference levels in the head area of the passenger seat located directly below the inverter electronics and immediately in front of the cabling between the inverter and the motors. At other passengers' places in the immediate surrounding of the motor housing the maximum exposure corresponded to approx. 6% of the mentioned ICNIRP reference levels. At the driver's seat a maximum exposure corresponding to approx. 2.6% of the ICNIRP reference level for occupational exposure was measured in the head region.

A comparison of the magnetic field exposure measured inside the hybrid and electric motorcars with data from literature concerning exposure of the passengers in electric trains showed that the resulting maximum exposure values are approximately in the same order of magnitude. However, it must be noted that the maximum exposure values inside the hybrid and electric cars are highly localized and that the magnetic field shows high gradients around the maximum. On the contrary, in the passengers' area inside electric trains the field gradients can usually be expected significantly less due to the larger distances to the field sources. Consequently, this means that the exposure of the passengers' head and trunk inside the hybrid and electric motorcars can be expected lower than in trains. This statement is valid at least for the front seat row of the motorcars. Comparing the obtained exposure values inside the investigated hybrid bus with other corresponding (conventional) urban means of public transportation (city train, tramway, underground), the local maximum exposure values are again in similar order of magnitudes. However, also in this case higher field gradients inside the hybrid bus can be expected, while a more homogeneous field distribution must be assumed inside the city train, tramway and subway. In other words, close to the electric components inside the hybrid bus peak exposure can be somewhat higher than usual peak exposure inside the conventional urban electric transportation means, but at larger distances to the components personal exposure inside the hybrid bus is likely to be significantly less than the exposure in the conventional electric urban transportation means.

The assessment of all the measurement data obtained inside the investigated hybrid and electric vehicles with respect to a possible electromagnetic interference with cardiac pacemakers according to the standard DIN VDE 0848-3-1 did not show any indications of a possible risk.

With respect of an overall evaluation of alternative drive systems from the perspective of radiation protection, it must be noted that not only the electric components of hybrid and electric drive systems but also the electric components of conventional vehicles can cause significant local magnetic field exposure, as demonstrated by literature data as well as by spot checks in the frame of this project. The extent of these exposures seems to be highly dependent on the specific vehicle type and the arrangement of the components and the cabling between them. Consequently, due to the lack of systematically assessed exposure data from conventional cars and the still small number of alternative systems presently available, at present it is not possible to make a final judgment if future alternative hybrid and electric drive systems will lead to significant changes of the passengers' magnetic field exposure compared to nowadays car technology.

INHALT

1 EINLEITUNG	7
2 TECHNIK ALTERNATIVER ANTRIEBSKONZEPTE.....	8
2.1 Elektro-Hybridantriebe	8
2.1.1 Prinzip von Elektro-Hybridantriebskonzepten	8
2.1.2 PKWs mit Hybridantrieb.....	10
2.1.3 Busse mit Hybridantrieb.....	13
2.1.4 Nutzfahrzeuge mit Hybridantrieb	13
2.2 Reine Elektroantriebe	14
2.2.1 PKWs mit reinem Elektroantrieb	14
2.2.2 Nutzfahrzeuge mit reinem Elektroantrieb.....	16
2.3 Auswahl der für Messungen in Betracht gezogenen Fahrzeuge	18
3 VORLIEGENDE ARBEITEN BEZÜGLICH MAGNETFELDEXPOSITION IN AUTOMOBILEN	20
3.1 Magnetfeldexposition zufolge Reifenmagnetisierung	20
3.2 Magnetfeldexposition in Hybridfahrzeugen	20
4 VERFÜGBARE MESSVERFAHREN FÜR DIE EXPOSITIONSERFASSUNG.....	22
4.1 Frequenzselektive Messmethoden im NF-Bereich.....	22
4.1.1 Mess-System ARC-NIFSPEC (Austrian Research Centers)	22
4.1.2 Mess-System EFA 300 & EFA-TS (Narda Safety and Test Solutions).....	25
4.1.3 Benchmark-Vergleich der beiden Systeme.....	26
5 VERFÜGBARE METHODEN ZUR NUMERISCHEN BERECHNUNG INDUZIERTER KÖRPERSTROMDICHTEN	32
5.1 Einsetzbare numerische Methoden.....	32
5.1.1 Impedanzmethode	32
5.1.2 Low Frequency Solver	33
5.1.3 FDTD- bzw. FIT mit Frequenzskalierung	33
6 VERWENDETE MESS- UND BEWERTUNGSMETHODEN	34
6.1 Betrachtete Messpositionen	34
6.2 Konkret eingesetzte Messtechnik	35
6.3 Untersuchungsmethoden	37
6.3.1 Immissionsmessungen am Leistungsprüfstand	37
6.3.2 Messfahrten mit Hybrid- und Elektro-PKWs	40
6.3.3 Messfahrten mit Hybridbus- und Nutzfahrzeugen.....	42
6.4 Messdatenauswertung	43
6.4.1 Strahlenschutztechnische Bewertung der Messergebnisse	43
6.4.2 Berücksichtigung bzw. Eliminierung von Hintergrundimmissionen.....	44
6.4.3 Problematik der Reifenmagnetisierung.....	45
6.4.4 Hintergrundfelder des Leistungsprüfstandes	48
6.4.5 Behandlung und Beurteilung transienter Vorgänge	50
6.5 Messempfindlichkeit und Unsicherheit der Messergebnisse	54
6.5.1 Unsicherheit der Messergebnisse.....	54
6.5.2 Unsicherheiten bei der Beurteilung transienter Vorgänge	57

6.6	Numerische Immissions-Prognosemodelle für die PKWs	58
6.6.1	Strecken- und Fahrzeugdaten	59
6.6.2	Immissionsdatensätze	60
6.6.3	Berechnung der effektiven mechanischen Last.....	64
6.6.4	Ermittlung der Momentan-Fahrzeugbetriebszustände und dazugehöriger Immissionsdatensätze	65
6.6.5	Interpolation der Immissionsdatensätze	66
6.6.6	Evaluierung und Unsicherheiten der Berechnungsmodelle	66
7	MESSERGEBNISSE	70
7.1	PKWs mit Elektro-Hybridantrieb.....	71
7.1.1	Honda Civic IMA 2006	71
7.1.2	Toyota Prius.....	79
7.1.3	Lexus GS450h	88
7.2	PKWs mit reinem Elektroantrieb	96
7.2.1	Panda Electric (Fa. NEWTEON).....	97
7.2.2	Doblo Electric (Fa. NEWTEON).....	103
7.3	Immissionsvergleich anhand des NEDC-Fahrzyklus.....	110
7.4	Nahverkehrsbus mit Elektro-Hybridantrieb	110
7.4.1	Messungen im Urbino 18 Hybrid (Solaris Bus & Coach)	110
7.5	Nutzfahrzeug mit Elektro-Hybridantrieb	121
7.5.1	Messungen im Atego Blue TEC Hybrid LKW (Daimler AG).....	121
7.6	Nutzfahrzeug mit reinem Elektroantrieb	128
7.6.1	Messungen im PEFRA-Elektroschlepper <i>Modell 780</i>	129
8	VERGLEICH DER MAGNETFELDIMMISSIONEN IN NEUEN HYBRID- UND ELEKTROFAHRZEUGEN MIT JENEN IN ETABLIERTEN FAHRZEUGTECHNOLOGIEN	134
8.1	Vergleich mit Magnetfeldimmissionen in elektrischen Schienenfahrzeugen	134
8.1.1	Vorliegende Daten aus der Literatur	134
8.1.2	Zusätzliche eigene Messungen im Rahmen des Projekts	135
8.1.3	Vergleich der Immissionsdaten.....	137
8.2	Vergleich der Magnetfeldimmissionen in den untersuchten Hybrid-PKWs mit verfügbarer Literatur.....	140
8.3	Vergleich mit konventionellen PKWs.....	141
8.3.1	Vorliegende Daten aus der Literatur	141
8.3.2	Zusätzliche eigene Messungen im Rahmen des Projekts	141
8.3.3	Vergleich der Immissionsdaten.....	145
8.4	Vergleich mit 50 Hz- Magnetfeldimmissionen durch das Energieversorgungsnetz.....	145
9	BEURTEILUNG DER IMMISSIONSDATEN BEZÜGLICH DES SCHUTZES VON PERSONEN MIT HERZSCHRITTMACHERN	146
9.1	Schutz- und Bewertungskonzept von DIN VDE 0848 Teil 3-1	146
9.1.1	Bewertungsmethode	147
9.1.2	Bewertungsunsicherheit zufolge der Sonden-Integrationsfläche	148
9.2	Bewertung der Immissionen in den Fahrzeugen	148
10	LITERATUR.....	150

1 EINLEITUNG

Durch die gegenwärtig im Blickfeld stehenden Probleme der Klimaerwärmung und der hohen Öl- bzw. Treibstoffpreise sind alternative Antriebskonzepte für Personenfahrzeuge zu einem aktuellen Thema geworden. Während sich Brennstoffzellen-Antriebe derzeit noch im Versuchstadium bei den Fahrzeugherstellern befinden, sind Fahrzeuge mit reinem Elektroantrieb und Fahrzeuge mit Elektro-Hybridantrieb, wenn auch nur in vergleichsweise sehr beschränktem Ausmaß, bereits kommerziell verfügbar. Der Ersatz des Verbrennungsmotors durch einen Elektromotor bzw. die Ergänzung des Verbrennungsmotors mit einem oder mehreren Elektromotor(en) führt bei üblichen Batterie- bzw. Motornennspannungen bei entsprechender Belastung zu relativ hohen elektrischen Stromstärken in den einzelnen elektrischen Komponenten (Batterien, Leitungen, Stromrichter und Motor). Diese Tatsache führt zwangsläufig zur Frage nach der Exposition von Fahrzeuginsassen durch die von den elektrischen Komponenten verursachten Magnetfelder.

Ziel dieses Projektes war es, bereits zum gegenwärtigen Zeitpunkt eine belastbare Datengrundlage über diese Magnetfeldexpositionen zu schaffen. Ausgehend von einer Bestandsaufnahme hinsichtlich der gegenwärtigen Hybrid- und Elektroantriebstechnik und bereits verfügbarer Fahrzeuge, wurden konkrete Fahrzeuge unterschiedlicher Kategorien ausgewählt, in denen die Magnetfeldexpositionen messtechnisch erfasst wurden. Als Fahrzeugkategorien wurden dabei Personenkraftwagen (PKW) mit Elektro-Hybrid- und reinem Elektroantrieb, Nutzfahrzeuge mit Elektro-Hybrid- und reinem Elektroantrieb, sowie Nahverkehrsbusse mit Elektro-Hybridantrieb betrachtet. Um die Magnetfeldexposition und deren räumliche Verteilung in den Fahrzeugen unter realistischen Bedingungen charakterisieren zu können, wurden ausführliche messtechnische Untersuchungen auf Basis frequenzselektiver Messverfahren in fünf gegenwärtig bereits am Markt verfügbaren Hybrid- und Elektro-PKW, einem Hybrid-LKW, einem Elektroschlepper, sowie in einem Hybrid-Nahverkehrsbus durchgeführt.

Die im Zuge der Messkampagnen erhobenen Messdaten wurden schließlich hinsichtlich der von ICNIRP 1998 [1] empfohlenen Richtlinien zur Beschränkung der Exposition gegenüber zeitlich veränderlichen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern strahlenschutztechnisch beurteilt und mit entsprechenden Expositionswerten, wie sie in herkömmlichen Transportmitteln auftreten, verglichen. Zusätzlich zur allgemeinen strahlenschutztechnischen Beurteilung der erhobenen Immissionsdaten erfolgte auch eine Bewertung bezüglich der Möglichkeit des Auftretens von Störbeeinflussungen implantierbarer Herzschrittmacher.

2 TECHNIK ALTERNATIVER ANTRIEBSKONZEPTE

In einer allgemeinen Sichtweise ist der Begriff der „alternativen Antriebskonzepte“ für Fahrzeuge ein sehr breit gefasster, er wird im Hinblick auf die Zielsetzung des gegenständlichen Projekts hier allerdings auf Antriebskonzepte mit Beteiligung eines Elektromotors zum Zweck des Fahrzeugantriebs eingeschränkt. Dies bedeutet im Wesentlichen eine Einschränkung auf Fahrzeuge mit Elektro-Hybridantrieben oder reinen Elektroantrieben. Konzepte, bei denen die aus Brennstoffzellen gewonnene Energie zum elektrischen Antrieb von Fahrzeugen genutzt wird und damit auch als Hybridantriebe bezeichnet werden können, sind gegenwärtig ebenfalls bereits absehbar, jedoch noch nicht als Serienfahrzeuge am Markt verfügbar. Fahrzeuge mit reinen Brennstoffzellen-, Gas- oder sonstigen Antrieben sind nicht Gegenstand des Vorhabens. Unter dem allgemeinen Begriff *Hybridantrieb* wird daher im Folgenden stets die Kombination eines konventionellen Verbrennungsmotors mit einem oder mehreren Elektromotoren bzw. Elektrogeneratoren verstanden. Andere denkbare und teilweise zumindest in Forschungsprojekten realisierte Formen von Hybridantrieben (mechanisch, pneumatisch, elektrochemisch, usw.) werden nicht behandelt.

2.1 Elektro-Hybridantriebe

Die Idee des Elektro-Hybridantriebes ist grundsätzlich keine neue. Soweit geschichtlich nachvollziehbar, wurde das erste Automobil mit Elektro-Hybridantrieb bereits vor mehr als 100 Jahren unter der Federführung von Ferdinand Porsche konstruiert und vorgestellt (*Lohner Hybrid*). Ab der zweiten Hälfte, spätestens aber gegen Ende des zwanzigsten Jahrhunderts, begannen praktisch alle namhaften Automobilhersteller mit der Entwicklung von Elektro-Hybridfahrzeugen, die zumindest in Form von Design- bzw. Konzeptstudien vorgestellt wurden. Zur Serienreife im Sinne der kommerziellen Verfügbarkeit von Fahrzeugen am freien Markt haben es allerdings bisher nur relativ wenige Fahrzeuge geschafft. In [2] findet man eine übersichtliche Zusammenfassung der bisher weltweit vorgestellten Hybridfahrzeuge.

Im folgenden Abschnitt sollen zunächst die wichtigsten Konzepte der Elektro-Hybridfahrzeugtechnik beschrieben werden, wobei eine Einschränkung auf jene Konzepte erfolgt, die gegenwärtig in Form von kommerziell erhältlichen Straßenfahrzeugen realisiert sind.

2.1.1 Prinzip von Elektro-Hybridantriebskonzepten

Das wesentliche Merkmal von Elektro-Hybridantriebskonzepten ist der (die) zusätzlich zum Verbrennungsmotor eingebaute(n) Elektromotor(e), wobei das Zusammenspiel zwischen Verbrennungs- und Elektromotor(en) automatisch optimiert geregelt wird. Die gegenwärtig für bereits kommerziell erhältliche Fahrzeuge relevante Elektro-Hybridtechnik unterscheidet **serielle**, **parallele** und **powersplit**-Hybride. Bezüglich weiterer bzw. neuerer Hybridkonzepte bietet [2] eine gute und leicht verständliche Einführung.

Beim **seriellen Elektro-Hybridantrieb** arbeitet der Verbrennungsmotor niemals direkt als Fahrzeugantrieb, sondern treibt eine als Generator arbeitende elektrische Maschine an, die wiederum die elektrische Leistung zur Speicherung in der Batterie oder zur Anspeisung einer zweiten, als Fahrzeug-Antriebsmotor (Elektromotor)

arbeitenden elektrischen Maschine bereitstellt. Die Aktivitäten der drei Leistungskomponenten in den unterschiedlichen Fahrmodi können für den seriellen Hybridantrieb wie in Tabelle 2.1 dargestellt zusammengefasst werden. Der wesentliche Nachteil des seriellen Konzepts ist die mehrmalige Wandlung der Leistung und der damit verbundene Wirkungsgradverlust.

Fahrmodus	Verbrennungsmotor	Generator	Elektromotor
Konventionell	treibt Generator an	speist Elektromotor	treibt Fahrzeug an (gespeist vom Generator)
Elektrisch fahren	ausgeschaltet	ausgeschaltet	treibt Fahrzeug an (gespeist von der Batterie)
Boost	treibt Generator an	speist Elektromotor	treibt Fahrzeug an (gespeist von Batt. und Generator)
Rekuperation	ausgeschaltet	ausgeschaltet	bremst Fahrzeug und speist die Batterie (arbeitet als Generator)
Lastpunktanhebung	treibt (in günstigem Arbeitspunkt) Generator an	speist Elektromotor und Batterie	treibt Fahrzeug an (gespeist vom Generator)

Tabelle 2.1: Fahrmodi und Aktivität der Leistungskomponenten beim seriellen Elektro-Hybridantrieb.

Der **parallele Elektro-Hybridantrieb** findet das Auslangen mit einem Verbrennungsmotor und einem Elektromotor, wobei das in Tabelle 2.2 zusammengefasste Zusammenspiel der Leistungskomponenten gilt.

Fahrmodus	Verbrennungsmotor	Elektromotor
Konventionell	treibt Fahrzeug an	inaktiv
Elektrisch fahren	ausgeschaltet	treibt Fahrzeug an (gespeist von der Batterie)
Boost	treibt Fahrzeug an	treibt Fahrzeug an (gespeist von Batterie)
Rekuperation	ausgeschaltet	bremst Fahrzeug und speist die Batterie (arbeitet als Generator)
Lastpunktanhebung	treibt (in günstigem Arbeitspunkt) Fahrzeug und Elektromotor (Generator) an	speist die Batterie (angetrieben vom Verbrennungsmotor)

Tabelle 2.2: Fahrmodi und Aktivität der Leistungskomponenten beim parallelen Elektro-Hybridantrieb.

Das **powersplit-Elektro-Hybridkonzept** arbeitet mit einem Verbrennungsmotor und zwei Elektromotoren, entsprechend der Zusammenstellung in Tabelle 2.3.

Fahrmodus	Verbrennungsmotor	Elektromotor 1	Elektromotor 2
Elektrisch fahren	ausgeschaltet	treibt Fahrzeug an (gespeist von der Batterie)	inaktiv
Boost	treibt Fahrzeug und Elektromotor 2 (Generator) an	treibt Fahrzeug an (gespeist von Elektromotor 2 und der Batterie)	speist Elektromotor 1
Rekuperation	ausgeschaltet	bremst Fahrzeug und speist die Batterie (arbeitet als Generator)	inaktiv
Lastpunktanhebung	treibt (in günstigem Arbeitspunkt) Fahrzeug und Elektromotor 2 an	inaktiv	speist Batterie

Tabelle 2.3: Fahrmodi und Aktivität der Leistungskomponenten beim powersplit- Elektro-Hybridantrieb.

Neben den oben kurz zusammengefassten grundlegenden Hybridkonzepten werden konkrete gegenwärtige Realisierungen durch die Begriffe **Mikro-Hybrid**, **Mild-Hybrid**, **Voll-Hybrid** und **Power-Hybrid** unterschieden.

Beim **Mikro-Hybrid** handelt es sich üblicherweise um eine Minimalvariante eines parallelen Hybrids, die nur mit relativ geringfügigen Modifikationen an Fahrzeugmodellen bzw. der Fahrzeugelektronik erreichbar ist. Sie wird daher oftmals von Fahrzeugherstellern eingesetzt um zumindest einige Fahrzeugmodelle in Zusammenhang mit dem Schlagwort „Hybrid“ anführen zu können. Tatsächlich wird dabei zumeist nur der herkömmliche Anlasser durch einen stärkeren Elektromotor ersetzt und entsprechend in die Fahrzeugelektronik eingebunden um Start/Stop Funktionalitäten und optimierten Generatorbetrieb (zur Batterieaufladung) zu realisieren, d.h., der Verbrennungsmotor wird abgeschaltet, wenn er nicht benötigt wird (z.B. bei Stillstand im Stau oder an einer Ampel) und wieder automatisch gestartet, sobald der Fahrer wieder anfahren möchte (z.B. Betätigen des Gaspedals bzw. Loslassen des Bremspedals). Mikro-Hybridantriebe sind demnach streng genommen keine **Hybridantriebe**, da sie das Fahrzeug nicht elektrisch antreiben, sondern nur (in gewissen Grenzen) zu einer Energieersparnis aufgrund der Start/Stop Funktionalität führen. Die Nennleistungen der eingesetzten Elektromotore liegen hier im Bereich von ca. 2-3 kW bei üblicher Bordspannung von 12 V.

Der **Mild-Hybrid** kann hingegen bereits als „echter“ Hybridantrieb bezeichnet werden, der Parallel-Hybrid Funktionalitäten wie Start/Stop, optimierter Generatorbetrieb, Boost und Rekuperation realisiert. Die Elektromotorleistung liegt üblicher Weise im Bereich 10-15 kW, bei eigenem Versorgungsspannungsniveau im Bereich von typisch 42-150 V.

Voll-Hybrid Fahrzeuge bieten schließlich die gesamte Palette der Hybrid-Funktionalitäten und bringen damit die größte Kraftstoffersparnis in der Praxis. Sie können als serielle, parallele und powersplit-Hybrid ausgeführt sein und implementieren üblicherweise Elektromotorleistungen > 15 kW bei Nennspannungen > 100 V. Je nach Anzahl der vorhandenen elektrischen Maschinen sind dabei durchaus auch unterschiedliche Spannungsniveaus möglich.

Um in Zukunft mit der Elektro-Hybridtechnik nicht nur den energiebewussten, sondern auch den sportlichen Fahrer bedienen zu können, sind inzwischen auch so genannte **Power-Hybride** verfügbar. Es handelt sich dabei um sehr leistungsstarke Ausführungen von Parallel- oder Powersplit-Hybridkonzepten mit elektrischen Motorleistungen > 50 kW (Nennspannung >100V).

2.1.2 PKWs mit Hybridantrieb

Eine ausführliche Recherche hinsichtlich PKWs mit Elektro-Hybridantrieb zeigt zunächst, dass die gesamte Automobilbranche sich offensichtlich mit diesem Thema auseinandersetzt und in den vergangenen Jahren eine beachtliche Anzahl von Design- und Konzeptstudien bis hin zu Prototypen im Bereich der Elektro-Hybridantriebe durchgeführt wurden. Bei näherer Betrachtung wird allerdings schnell klar, dass die Anzahl der gegenwärtig in Europa tatsächlich verfügbaren Modelle stark eingeschränkt ist. Einige der derzeit prinzipiell serienreifen Modelle sind entweder auf den japanischen oder US-amerikanischen Markt beschränkt oder deren Einführung in Europa ist für den Zeitraum 2009-2012 angekündigt. Von manchen, im Zuge der durchgeführten Recherchen kontaktierten großen europäischen Herstellern

wurde konkret auch klargelegt, dass sie derzeit keinen Entwicklungsschwerpunkt in der Elektro-Hybridtechnik sehen, sondern andere Konzepte, wie z.B. Brennstoffzellenantriebe bevorzugen.

Tabelle 2.4 fasst die bei Internetrecherchen und über Kontakte zu Herstellern erfassten Hybridfahrzeuge mit deren relevanten elektrischen Kenndaten (sofern diese erhoben werden konnten), sowie Anmerkungen hinsichtlich deren Verfügbarkeit in Europa zusammen. Zusätzlich zu den wenigen bereits kommerziell erhältlichen Modellen sind dabei auch viele Fahrzeuge angeführt, die bisher nur als Prototypen bzw. Konzept- und Designstudien vorliegen und bei denen eine konkrete Markteinführung derzeit nicht abgesehen werden kann. Die Auflistung auch dieser Fahrzeuge soll dem Leser einen Gesamteindruck über die Aktivitäten der Hersteller vermitteln. Die Recherche hinsichtlich detaillierter elektrischer Kenndaten wurde allerdings nur für realistischer Weise im Projektzeitraum bzw. in naher Zukunft konkret am Markt erwartete Modelle intensiviert.

Hersteller	Modell	Elektr. Nennleistung der Elektromotor(en) / Spannungsniveaus Batterie-Motor	Ort des Elektromotors	Ort der Batt.	Hybridvariante	Anmerkung zur Verfügbarkeit	Motorart
Audi	Sportback Concept	20 kW	Front	Heck	Voll	Prototyp 2008	SM
Audi	Duo Hybrid	21 kW	Front	Heck	Voll	nicht mehr verfügbar	SM
Audi	Metroproject Quattro	30 kW	Hinterachse	Heck	Voll	Prototyp 2007	SM
Audi	Q7 Hybrid	32 kW	Front	Heck	Voll	Prototyp 2005	SM
BMW	X3 Efficient Dynamics	30 kW	Front	Seite (li + re)	Voll	Konzept 2005	SM
BMW	Concept 7	15 kW	Front	Heck	Mild	Prototyp 2008	SM
BMW	Concept X6	-	Front	Heck	Voll	Prototyp 2007	SM
BMW	X5 Efficient Dynamics	70 kW	Front	Heck	Voll	Studie 2004	ASM
BMW	X5 Vision Efficient Dynamics	15 kW / 120 V	Front	Heck	Mild	Studie 2008	SM
Cadillac	Escalade 2Mode	2 x 60 kW / 300V	Front	unter Rücksitz	Voll	Prototyp 2007	SM
Chevrolet	Tahoe 2Mode	-	-	-	Voll	USA	-
Chevrolet	Volt Concept	45 kW / 320-380 V 53 kW / 320-380 V	Front Front	Heck	Voll	Konzept 2007	SM
Chevrolet	Silverado 2Mode	2 x 60 kW / 300V	Front	unter Rücksitz	Voll	USA	SM
Chevrolet	Silverado Hybrid	15 kW / 42 V	Front	unter Rücksitz	Mild	USA	ASM
Citroen	C4 HDi Hybrid	16 kW / 210-380 V	Front	Heck	Mild	Prototyp 2006	SM
Citroen	C Metisse	2 x 15 kW Radnabenmot.	Räder	Mitte	Mild	Konzept 2006	-
Citroen	C-Catus	22 kW	-	-	Mild	Konzept 2007	-
Citroen	Airscape	-	-	-	Mild	Konzept 2007	-
Daihatsu	HVS	36 kW 36 kW 20 kW	Front Front Front	-	Voll	Konzept 2005	SM
Daihatsu	UFE III	-	-	-	Voll	Studie 2006	ASM
Fisker	Karma	-	-	-	-	Prototyp 2008	-
Fisker	Karma Sunset	-	-	-	-	Prototyp 2009	-
Ford	Escape Hybrid	65 kW / 330 V 28 kW / 330 V	Front Front	Heck	Voll	USA	SM
GMC	Yukon Hybrid	- kW / 300 V	Front	unter Rücksitz	Voll	USA	SM
GMC	Sierra Hybrid	14 kW / 42 V	Front	unter Rücksitz	Mild	USA	ASM
Guigaro	Namir	Gesamtleistung (inkl. Verbrennungsmotor) 240 kW	Vo.- u. Hi.-achse	Heck	Voll	Konzept 2009	-
Honda	Civic IMA 2006	15 kW / 158 V	Front	Rückenlehne	Mild	verfügbar	SM
Honda	Insight IMA 2009	10 kW / 100 V	Front	Heck	Mild	verfügbar	SM
Honda	Sports Concept 2005	-	-	-	Mild	Konzept 2005	SM
Honda	CR-Z 2008	-	-	-	-	Konzept 2008	-
Infinity	Essence 2009	120 kW	Front	Heck	Voll	Prototyp 2009	SM
Kia	Rio Hybrid	12 kW	Front	-	Mild	Prototyp 2007	SM

Tabelle 2.4 a: Zusammenstellung von recherchierten Elektro-Hybridfahrzeugen am PKW Sektor (Fortsetzung nächste Seite)
SM ... Synchronmaschine, ASM ... Asynchronmaschine

Hersteller	Modell	Elektr. Nennleistung der Elektromotor(en) / Spannungsniveaus Batterie-Motor	Ort des Elektr-Motors	Ort der Batt.	Hybridvariante	Anmerkung zur Verfügbarkeit	Motorart
Land Rover	Diesel ERAD 2008	25 kW / 288-300 V	Heck	Heck	Voll	Prototyp 2008	SM
Land Rover	Land e_2007	-	Heck	Heck	Voll	Konzept 2007	SM
Land Rover	LRX Concept 2008	-	-	-	-	Konzept 2008	-
Lexus	GS 450h	147 kW / 288-650 V 134 kW / 288-650 V	Front Front	Heck	Voll	verfügbar	SM
Lexus	RX 400h	123 kW / 288-650 V 109 kW / 288-650 V 50 kW / 288-650 V	Front Front Heck	Heck	Voll	verfügbar	SM
Lexus	LS 600h	165 kW / 288-650 V	Front	Heck	Voll	verfügbar	SM
Lexus	HS 250h	Gesamtleistung (inkl. Verbrennungsmotor) 137 kW	Front	Heck	Voll	Prototyp 2009	SM
Lexus	RX 450h	123 kW / 288-650 V 50 kW / 288-650 V	Front Heck	Heck	Voll	verfügbar	SM
Lexus	LF-Xh	-	-	-	Voll	Konzept 2007	-
Mazda	Tribute HEV	70 kW / 330 V	Front	Heck	Voll	USA	SM
Mercury	Mariner Hybrid	65 kW / 330 V 28 kW / 330 V	Front Front	Heck	Voll	USA	SM
Mercedes	F500 Mind 2003	50 kW	Front	Heck	Voll	Konzept 2003	-
Mercedes	ML 450 Hybrid	62 kW / 288V 60 kW / 288V	Front	Heck	Voll	USA	SM
Mercedes	S350 Direct Hybrid	6 kW / 42 V	Front	-	Mild	Prototyp 2005	SM
Mercedes	S400 Blue Hybrid	15 kW / 120 V	Front	Front	Mild	angekündigt für 2009	SM
Mercedes	GLK Bluetec Hybrid	-	Front	-	Mild	Prototyp 2008	SM
Mindset	Hybrid 2008	-	-	-	-	Konzept 2008	-
Nissan	Altima Hybrid	Gesamtleistung (inkl. Verbrennungsmotor) 137 kW / 245 V	Front	Heck	Voll	USA	SM
Nissan	HEV 2008	-	-	-	Voll	Prototyp 2008	-
Opel	Astra GTC Hybrid	30 kW 40 kW	Front Front	Heck	Voll	Konzept 2005	-
Opel	Flextrene 2007	-	-	-	-	Konzept 2007	-
Peugeot	RC HYmotion 4	70 kW	-	-	Voll	Konzept 2008	-
Peugeot	Prologue HYmotion 4	20 kW / 200-270 V	Heck	Heck	Voll	Konzept 2008	SM
Peugeot	308 Hybrid HDi	16 kW / 200 V	Front	Heck	Mild	Prototyp 2007	SM
Peugeot	307 HDi Hybrid	16 kW / 210-380 V	Front	Heck	Mild	Prototyp 2006	SM
Porsche	Cayenne Hybrid	40 kW / 288 V	Front	Heck	Voll	Prototyp 2007	SM
Porsche	Panamera Hybrid	-	Front	Heck	Voll	Prototyp 2008	SM
Saab	Bio Power Concept	15 kW / 42 V 38 kW / 300 V	Front Heck	Heck	Voll	Konzept 2006	-
Saturn	Vue 2 Mode 2009	2 x 55 kW / 300 V	Front	Heck	Voll	USA	SM
Seat	Leon TwinDrive	35 kW	Front	Heck	Voll	Prototyp 2009	SM
Subaru	B5-TPH	10 kW / 173 V	Front	Heck	Voll	Konzept 2005	SM
Toyota	Camry Hybrid	105 V / 245-650 V	Front	Heck	Voll	USA	SM
Toyota	Crown Hybrid	-	-	-	Voll	Japan	SM
Toyota	Estima Hybrid	105 kW / 245-650 V 50 kW / 245-650 V	Front Heck	Heck	Voll	Japan	SM
Toyota	Hybrid X	-	-	-	Voll	Konzept 2007	-
Toyota	1/X	-	-	-	Voll	Konzept 2008	-
Toyota	A-Bat	-	-	-	Voll	Konzept 2008	-
Toyota	Prius 2009	50 kW / 200-500 V 33 kW / 200-500 V	Front Front	Heck	Voll	verfügbar	SM
Toyota	FT-HS Concept	-	-	-	Voll	Konzept 2007	SM
Volvo	ReCharge	4 Radnabenmotore	-	Heck	Voll	Konzept 2007	-
VW	Golf Diesel Hybrid	-	-	-	Mild	Prototyp 2008	-
VW	Tuareg Hybrid	38 kW /	Front	Heck	Voll	Prototyp 2009	SM
VW	Touran Eco Power II	20 kW / 187 V	Front	Heck	Voll	Konzept 2007	SM
VW	TwinDrive	Gesamtleistung (inkl. Verbrennungsmotor) 130 kW	Front	Heck	Voll	Prototyp 2008	-

Tabelle 2.4 b (Fortsetzung): Zusammenstellung von recherchierten Elektro-Hybridfahrzeugen am PKW Sektor. Bezüglich des Einbauortes der Batterie bedeutet „Heck“ in den meisten Fällen den Einbau in den Kofferraumboden
SM ... Synchronmaschine, ASM ... Asynchronmaschine

Mikro-Hybrid Varianten, deren Funktionalität sich auf Start/Stop Automatik beschränkt wurden in Tabelle 2.4 bewusst weggelassen, da inzwischen fast alle Hersteller Fahrzeugmodelle mit dieser Funktionalität auf dem Markt haben. Leere Tabellenfelder bedeuten, dass die betreffenden Kenndaten nicht eruiert werden konnten. Diese Situation (nur rudimentär verfügbarer Kenndaten) ist vor allem bei Konzeptfahrzeugen, die bisher, bzw. niemals Seriennähe erreicht haben, anzutreffen.

Alle gegenwärtig (Stand Juni 2009) am europäischen Markt frei käuflich erwerbbar Hybridfahrzeuge sind in Tabelle 2.4 fett gedruckt.

2.1.3 Busse mit Hybridantrieb

Bei Nahverkehrs-Omnibussen mit Hybridantrieb handelt es sich üblicherweise um serielle, teilweise auch um gemischte seriell/parallele Hybridkonzepte. Tabelle 2.5 fasst die im Zuge von Recherchen erhobenen Modelle mit deren relevanten elektrischen Kenndaten (sofern diese erhoben werden konnten) und Anmerkungen hinsichtlich deren Verfügbarkeit in Europa innerhalb der Projektlaufzeit zusammen.

Hersteller	Modell	Elektrische Daten	Hybridkonzept	dzt. in Europa verfügbar
Solaris	Urbino 18 Hybrid	2 x 75 kW E-Motoren Spannungsniveau 430-900 V	seriell/parallel	JA
Mercedes Benz	Citaro Hybrid	4 x 80 kW Radnabenmotore (ASM) (SM) Generator 170 kW Spannungsniveau 650 V	seriell	NEIN angekündigt für 2009
MAN	Lion's City	2 x 75 kW E-Motoren (ASM) (SM) Generator 150 kW Spannungsniveau 400-630 V	seriell	JA
Mitsubishi	Fuso	2 x 79 kW E-Motoren (ASM) (SM) Generator 40 kW	seriell	NEIN serienmäßig in Japan
Orion	VII HybriDrive	Fahrmotor: 184-235 kW (ASM) (SM) Generator: 170 kW Spannungsniveau 550-600 V	seriell	NEIN serienmäßig in USA
Hess-Vossloh	lighTram	2 x 160 kW E-Motoren (ASM) (SM) Generator 190 kW Spannungsniveau 400-630 V	seriell	nur eingeschränkt

Tabelle 2.5: Zusammenstellung von recherchierten Elektro-Hybridfahrzeugen am Omni-Bus Sektor.

In Tabelle 2.5 bedeutet ein „JA“ in der Spalte „Verfügbarkeit“, dass sich die betreffenden Bus-Modelle derzeit bereits zumindest in geringer Stückzahl in mehreren Nahverkehrsunternehmen im Testbetrieb befinden.

2.1.4 Nutzfahrzeuge mit Hybridantrieb

Am Nutzfahrzeugsektor haben ernsthafte Anstrengungen der Hersteller in Richtung Hybridantriebe erst wesentlich später begonnen als am PKW und Omnibus-Sektor. Der erste Hersteller der moderne Hybridtechnik serienmäßig in einem Kleinbus realisierte war Toyota mit dem Modell *Coaster Hybrid*, einem seriellen Mild-Hybrid Antrieb, mit 70 kW Fahrleistung. Im Jahr 2003 folgten das Modell *Dyna Hybrid* bzw. *Dutro Hybrid* (baugleiches Modell der Toyota-Konzerntochter Hino), ein Klein-LKW

mit 110 kW Dieselmotor und 23 kW Elektromotor als Parallel-Mild-Hybrid. All diese Modelle kamen nie auf den europäischen Markt.

Daimler-Benz testet derzeit im Rahmen von Feldversuchen das mit 44 kW Elektromotor (Batteriespannung ca. 400 V) und 160 kW Dieselmotor ausgestattete LKW-Modell *Atego BlueTec Hybrid* (Mercedes-Benz) in der Flotte der *Deutsche Post DHL*, sowie das Modell *Fuso Canter Eco Hybrid* (*Mitsubishi*) bei unterschiedlichen Kunden in London.

Neben den genannten, bereits konkret verfügbaren Fahrzeugen existieren von einigen anderen Herstellern bereits Hybridkonzepte am Nutzfahrzeugsektor (z.B. Renault Hybris) bzw. Ankündigungen der Serienreife. Beispielsweise hat Volvo für 2009 die Serienproduktion eines Hybrid LKW mit 120 kW Elektromotor/generator angekündigt.

2.2 Reine Elektroantriebe

2.2.1 PKWs mit reinem Elektroantrieb

Im Gegensatz zu den Elektro-Hybridantrieben, wo zumindest einige der großen Markenhersteller selbst die Entwicklung vorantreiben, herrscht bei rein elektrisch angetriebenen Fahrzeugen derzeit eher die Situation vor, dass konventionelle Marken-Serienfahrzeuge von (teilweise sehr kleinen) Spezialfirmen auf reinen Elektroantrieb umgerüstet werden. Erst in den vergangenen beiden Jahren sind auf den großen internationalen Automobilmessen auch von den großen Herstellern vermehrt Konzepte bzw. Prototypen von Elektrofahrzeugen vorgestellt worden.

Gegenwärtig in Mitteleuropa tatsächlich als (Klein-)Serienfahrzeuge mit Elektroantrieb bereits verfügbar sind jedoch, wie oben erwähnt, bisher nur Fahrzeuge einiger weniger Spezialfirmen aus dem Sektor der elektrischen Antriebs- und/oder Batterietechnik. Zumeist basieren diese Fahrzeuge auf Fahrgestellen bekannter Autotypen (der Kleinwagen- bzw. Kleintransporterklasse), die von diesen Firmen mit dem elektrischen Antriebssystem ausgerüstet werden. Viele dieser Fahrzeuge befinden sich derzeit in Flottenversuchen bei Behörden, Kommunalservice-Betrieben, aber auch bei privaten Firmen, einerseits zur Erprobung der Technologie und andererseits, um für die Technologie in der Öffentlichkeit zu werben. Ein Beispiel eines solchen öffentlich geförderten Projekts ist [3]. Neben diesen Fahrzeugen aus der Klasse der Kleinwagen (bzw. Kleintransporter), die für das Segment des energie- und umweltbewussten Autofahrers gedacht sind, stehen auch bereits Hersteller von rein elektrisch betriebenen sportlichen Fahrzeugen mit Antriebsleistungen im Bereich größer als 150 kW am Beginn der Kleinserienproduktion (z.B. Ruf, Tesla).

Das erste in Großserie produzierte Elektroauto eines großen Herstellers wird vermutlich der Mitsubishi i-MiEV sein, dessen Markteinführung in Europa kürzlich für 2010 angekündigt wurde.

Tabelle 2.6 fasst einige der wichtigsten derzeit angekündigten bzw. angebotenen PKWs mit reinem Elektroantrieb zusammen. Leere Tabellenfelder bedeuten, dass die betreffenden Kenndaten nicht eruiert werden konnten. Diese Situation (nur rudimentär verfügbarer Kenndaten) ist vor allem bei Konzeptfahrzeugen bzw. Prototypen anzutreffen die bisher keine Seriennähe erreicht haben.

Hersteller	Modell	Elektr. Nennleistung der Elektromotor(en) / Spannungsniveaus Batterie-Motor	Motorart	Ort des Elektr-Motors	Ort der Batt.	Anmerkung zur Verfügbarkeit
Cadillac	Cinverj Concept	120 kW	-	-	-	Konzept 2009
Dodge	CEO Concept	200 kW	-	-	-	Konzept 2008
Ford	Edge HySeries	65 kW 65 kW	SM	Front Heck	-	Prototyp 2007
Ford	E-Ka	65 kW	SM	Front	Front & Heck	Prototyp 2000
Loremo	EV	-	-	-	-	Konzept 2008
Mercedes	Concept BlueZERO	70 kW	-	Front	Mitte	Konzept 2009
Mini	E	150 kW / 380 V	ASM	Front	Heck	Kleinserie 2008
Mitsubishi	Lancer MIEV	4 x 50 kW Radnabenmotoren / 356 V	SM	Räder	Heck	Prototyp 2005
Mitsubishi	i-MiEV	47 kW / 330 V	SM	Heck	Mitte	ab 2010
Nissan	Mixim	-	-	-	-	Konzept 2007
Nissan	EV	80 kW	-	-	-	Prototyp 2008
Nissan	Pivo II	-	-	-	-	Konzept 2008
Opel	Ampera	110 kW	-	-	-	Konzept 2009
Protoscar	Lampo	2 x 100 kW	-	Fr + He	-	Konzept 2009
Rinspeed	iChange	150 kW	-	-	-	Konzept 2009
Ruf	eRuf	150 kW	SM	Heck	Front	ab 2009
Tesla	Roadster	185 kW / 400 V	SM	Heck	Heck	ab 2009
THINK	City	30 kW	ASM			Norwegen, ab 2009 auch andere europäische Länder
Smart	Elektro	30 kW	SM	Heck	Mitte	angekündigt ab 2010
Toyota	FT-EV	-	-	-	-	Konzept 2009
VW	SpaceUp Blue	45 kW	-	-	-	Konzept 2007
MES-DEA	Twingo Ellettrica	16-39 kW / 325 V	ASM	Front	Heck	Schweiz und Italien
MES-DEA	Panda Ellettrica	16-36 kW / 253 V	ASM	Front	Heck	Schweiz und Italien
Newteon	Panda Electric	30 kW / 216 V	ASM	Front	Heck	verfügbar
Newteon	Doblo Electric	30-60 kW / 216 V	ASM	Front	Heck	verfügbar
Newteon	Piaggio-Porter	10 - 20 kW / 84-96 V	DC	Heck	Mitte	verfügbar
Newteon	Florino Electric	30 kW / 216 V	ASM	-	Heck	verfügbar
Treffpunkt Zukunft GmbH	Hotzenblitz	12 kW / 168 V	ASM	-	-	verfügbar

Tabelle 2.6: Zusammenstellung von recherchierten PKWs mit reinen Elektroantrieben.

Zusätzlich zu professionellen Herstellern bzw. Händlern existieren einige Interessensverbände von Privatpersonen, die entweder im Eigenbau konventionelle Fahrzeuge auf ein Elektrofahrzeug umgerüstet haben oder längst nicht mehr erzeugte Marken-Elektrofahrzeuge besitzen. Tabelle 2.7 fasst die elektrischen Kenndaten einiger solcher Elektro-PKWs zusammen.

Hersteller	Modell	Elektr. Nennleistung der Elektromotor(en) / Spannungsniveaus Batterie-Motor	Motorart
Volkswagen	Golf Citystromer	20 kW / 96 V	ASM
Citroen	Saxo	11-20 kW / 120 V	DC
Citroen	Berlingo	16-28 kW / 162 V	DC
AutoSol / EVT	Cinquecento Sol	12-21 kW / 168 V	ASM
Peugeot	106 Electric	11-20 kW / 120 V	DC

Tabelle 2.7: Zusammenstellung von PKWs mit reinen Elektroantrieben, die aus Klein- oder Testserien stammen und praktisch nur mehr im Privatbesitz verfügbar sind

2.2.2 Nutzfahrzeuge mit reinem Elektroantrieb

Nutzfahrzeuge mit Straßenzulassung

Tabelle 2.8 gibt einen Überblick über derzeit grundsätzlich verfügbare straßentaugliche Nutzfahrzeuge mit reinem Elektroantrieb.

Hersteller	Modell	Elektr. Nennleistung der Elektromotor(en) / Spannungsniveaus Batterie-Motor	Motorart
Newteon	Iveco Daily Hybrid ¹	16 kW / 84 V	-
Newteon	Electric Iveco Daily	30-60 kW / 160 V	ASM
Newteon	Piaggio Porter Kastenwagen	11 kW / 84-96 V	DC
EcoCraft	EcoCarrier	18 kW / 80 V	ASM
Aixam	Mega	4 kW / 48 V	-

Tabelle 2.8: Zusammenstellung von Straßenverkehrs-tauglichen Nutzfahrzeugen mit reinem Elektroantrieb

Nutzfahrzeuge ohne Straßenzulassung (Transportgeräte, Gabelstapler)

Gegenüber der, wohl aufgrund der relativ geringen Reichweite nur sehr eingeschränkten Auswahl an straßentauglichen Elektro-Nutzfahrzeugen, existiert eine vielfältige Palette an professionellen Elektro-Nutzfahrzeugen für Lastentransporte mit beschränktem Aktionsradius (z.B. innerhalb von Produktionsstätten und Firmengeländen). Tabelle 2.9 fasst die elektrischen Kenndaten von diversen Elektro-Transportgeräten und Elektro-Gabelstaplern zusammen.

Sonstige Nutzfahrzeuge ohne Straßenzulassung

Schließlich existieren noch eine Reihe von Elektromobilen, die zur Personenbeförderung in weitläufigen Arealen und Betriebsgeländen außerhalb des Straßenverkehrs eingesetzt werden (z.B. auf Flughäfen und Golfplätzen). Tabelle 2.10 gibt eine Übersicht der elektrischen Kenndaten solcher Fahrzeuge

¹ Das auf dem *Iveco Daily* Transporter basierende Fahrzeug wird unter dem Namen *Iveco Daily Hybrid* geführt. Es handelt sich dabei allerdings nicht um ein automatisches Hybridfahrzeug in oben genanntem Sinn, sondern um die Erweiterung des Basisfahrzeugs um einen zweiten, völlig parallel laufenden elektrischen Antrieb (z.B. für städtischen Stopp and Go Verkehr), der alternativ zum konventionellen Antrieb aktiviert werden kann. Die Umschaltung zwischen konventionellem und elektrischem Antrieb erfolgt durch Knopfdruck durch den Fahrer. Die Aufladung der Batterien erfolgt, wie bei allen rein elektrisch betriebenen Fahrzeugen ausschließlich durch externe Stromquellen (Steckdose). Aus diesem Grund wird dieses Fahrzeug hier als reines Elektrofahrzeug und nicht als Hybridfahrzeug gewertet.

Hersteller	Modell	Elektr. Nennleistung der Elektromotor(en) / Batteriespannung	Motorart
Pefra	Plattformwagen 509	1 kW / 24 V	3~
Pefra	Schlepper 510	1 kW / 24 V	DC
Pefra	Plattformwagen 610	3 kW / 24 V	DC
Pefra	Schlepper 712	2,5 kW / 24 V & 6 kW / 48 V	DC & 3~
Pefra	Plattformwagen 611	3 kW / 24 V	DC
Pefra	Plattformwagen 612	6 kW / 48 V	3~
Pefra	Plattformwagen 614	2,5 kW / 24 V	DC
Pefra	Plattformwagen 620	7,5 kW / 80 V	3~
Pefra	Schlepper 780	28 kW / 80 V	3~
Pefra	Schlepper 740	14,5 kW / 80 V	3~
Still	Gabelstapler RX 50 Tragkraft 1-1.6t	Fahrmotor 4,5 kW / 24 V Hubmotor 7,8 kW / 24 V	3~
Still	Gabelstapler RX 20 Tragkraft 1.5-2t	Fahrmotore 2 x 4,5 kW / 48 V Hubmotor 9 kW / 48 V	3~
Still	Gabelstapler RX 60 Tragkraft 1.6-2t	Fahrmotore 2 x 5,5 kW / 80 V Hubmotor 11 kW / 80 V	3~
Still	Gabelstapler RX 60 Tragkraft 2.5-3.5t	Fahrmotor 15 kW / 80 V Hubmotor 16,3 kW / 80 V	3~
Still	Gabelstapler RX 60 Tragkraft 4-5t	Fahrmotor 15 kW / 80 V Hubmotor 25 kW / 80 V	3~
Mitsubishi	Gabelstapler FB10-15KRT Tragkraft 1-1,5t	Fahrmotor 5 kW / 24 V Hubmotor 6,5 kW / 24 V	3~
Mitsubishi	Gabelstapler FBNT Tragkraft 1,6-2t	Fahrmotore 2 x 5 kW / 48 V Hubmotor 14 kW / 48 V	3~
Mitsubishi	Gabelstapler FBN Tragkraft 1,6-2t	Fahrmotore 2 x 5 kW / 48 V Hubmotor 14 kW / 48 V	3~
Mitsubishi	Gabelstapler FBK PAC Tragkraft 2-3,5t	Fahrmotor 14,5 kW / 80 V Hubmotor 20 kW / 80 V	3~
Mitsubishi	Gabelstapler FBK Tragkraft 4-5t	Fahrmotor 18 kW / 80 V Hubmotor 23,5 kW / 80 V	3~
Mitsubishi	Gabelstapler FBC15-30N Tragkraft 1,5-3t	Fahrmotor 14 kW / 48 V Hubmotor 11,7-15,1 kW / 48 V	3~
Linde	Gabelstapler E10 Tragkraft 1t	Fahrmotor 2,2 kW / 24 V Hubmotor 3 kW / 24 V	3~
Linde	Gabelstapler E12 Tragkraft 1,2t	Fahrmotore 2 x 3,5 kW / 24 V Hubmotor 5 kW / 24 V	3~
Linde	Gabelstapler E20 Tragkraft 2t	Fahrmotore 2 x 5 kW / 48 V Hubmotor 11 kW / 48 V	3~
Linde	Gabelstapler E35 Tragkraft 3,5t	Fahrmotor 12,5 kW / 80 V Hubmotor 14 kW / 80 V	3~
Linde	Gabelstapler E40-E48 Tragkraft 4-4,8t	Fahrmotor 12,5 kW / 80 V Hubmotor 15 kW / 80 V	3~
Linde	Schubstapler R14-R20 Tragkraft 1,4-2t	Fahrmotor 6 kW / 48 V Hubmotor 12 kW / 46 V	3~
Linde	Schubstapler R25F Tragkraft 2,5t	Fahrmotor 7,5 kW / 48 V Hubmotor 12 kW / 46 V	3~
König	KE3-Serie Tragkraft 1,5-2t	Fahrmotore 2 x 4,6 kW / 48 V Hubmotor 8,6 kW / 48 V	3~
König	KE4-Serie Tragkraft 1,5-3t	Fahrmotor 8-10,6 kW / 48 V Hubmotor 7,8-12,8 kW / 48 V	3~

Tabelle 2.9: Zusammenstellung von Elektro-Transportern und Gabelstaplern

Hersteller	Modell	Elektr. Nennleistung der Elektromotor(en) / Spannungsniveaus Batterie-Motor	Motorart
Club Car	diverse Modelle	2,3-7,4 kW / 48 V	-
Melex	diverse Modelle	2,1 -2,8 kW / 24-48 V	-
Hummer	Golf Cart	2,8-4 kW / 48 V	-

Tabelle 2.10: Zusammenstellung von Elektromobilen zur Personenbeförderung

2.3 Auswahl der für Messungen in Betracht gezogenen Fahrzeuge

Gemäß der Projektdefinition sollten messtechnische Untersuchungen an exemplarisch ausgewählten Modellen der Kategorien

- Hybrid-PKW (3 Modelle)
- Elektro-PKW (2 Modelle)
- Hybrid-Nahverkehrsbus (1 Modell)
- Elektro- bzw. Hybrid-Nutzfahrzeuge (2 Modelle)

erfolgen.

Im Bereich der **Hybrid-PKWs** waren im für die Messungen verfügbaren Zeitraum (August 2008 bis März 2009) am europäischen Markt die Modelle Toyota Prius, Lexus RX400h, Lexus GS450h und Lexus LX600h, sowie der Honda Civic IMA kommerziell verfügbar. Um unterschiedliche Hersteller in die messtechnischen Untersuchungen einzuschließen, wurden die Modelle **Toyota Prius**, **Lexus GS 450h** und der **Honda Civic IMA** in die Liste der zu untersuchenden Fahrzeuge aufgenommen. Damit waren sowohl Voll-Hybrid als auch Mild-Hybrid in den Untersuchungen vertreten. Vertreter der Mikro-Hybridtechnik wurden bei den messtechnischen Untersuchungen nicht berücksichtigt, da einerseits sowohl die elektrischen Motorleistungen und Ströme vergleichsweise gering sind, diese Ströme nicht am Fahrgastraum entlang geführt werden müssen (Batterie im Motorraum) und die Expositionsdauer (Zeitintervalle mit hohen Stromstärken) als gering einzustufen ist (nur Start/Stopp Funktionalität).

Im Bereich der PKWs mit **reinem Elektroantrieb** war die Auswahl von Modellen für aussagekräftige Messungen schwierig. Einerseits ist gegenwärtig die Verfügbarkeit von mit moderner Technik ausgestatteten Fahrzeugen, die auch für mittelfristig zukünftige Szenarien noch als repräsentativ eingestuft werden können (Tabelle 2.6), noch relativ gering, und die wenigen verfügbaren Modelle dieser Fahrzeugkategorie sind teilweise nur relativ schwer für messtechnische Untersuchungen zugänglich. Dies betrifft insbesondere das Vorhaben, die Messungen während des Betriebs der Fahrzeuge auf einem Leistungsprüfstand durchzuführen. Demgegenüber standen teilweise individuell (und teilweise mit relativ alter Technologie) konstruierte Elektrofahrzeuge aus Privatbesitz, die wesentlich besser in Europa gestreut sind.

Im Hinblick auf das Projektziel einer möglichst repräsentativen, auch mittelfristig noch aktuellen Immissionsdatenbasis, waren Untersuchungen mit modernen Fahrzeugkonzepten zu favorisieren und konnten schließlich auch in Form von

Messungen an einem **Panda Electric** und einem **Doblo Electric** (beide Autos von Fa. Newteon) realisiert werden.

Das aus der Sicht der maximal zu erwartenden Betriebsströme am interessantesten anmutende und im Projektzeitraum zumindest im Testbetrieb befindliche Fahrzeug, der Tesla Roadster, konnte leider nicht für Messungen verfügbar gemacht werden.

Die Messungen in **Hybrid-Nahverkehrs-Omnibussen** konnten in Zusammenarbeit mit der Bochum Gelsenkirchner Straßenbahn AG (BOGESTRA) und dem Hersteller (Fa. Solaris Bus & Coach) im Modell **Urbino 18 Hybrid** durchgeführt werden.

In der Kategorie der **Elektro- bzw. Hybrid-Nutzfahrzeuge** erschien auf Basis der elektrischen Kenndaten vor allem der EcoCarrier (Fa. EcoCraft) interessant, der allerdings aufgrund fehlender Kooperationsbereitschaft des Herstellers für die Messungen nicht verfügbar war. Als Alternative wurde daher der Hybrid-LKW **Atego Blue Tec Hybrid** (Fa. Daimler) für die messtechnischen Untersuchungen in Betracht gezogen und konnte aufgrund der Unterstützung des Herstellers in die Untersuchungen inkludiert werden. Als Vertreter der Elektro-Nutzfahrzeuge ohne Straßenzulassung wurde schließlich der **Elektroschlepper 780** (Fa. Pefra) messtechnisch untersucht.

Messungen an Elektromobilen der Kategorie der nicht-straßentauglichen Personenbeförderungsfahrzeuge, wie sie in Tabelle 2.10 zusammengefasst sind, wurden als wenig interessant für die messtechnischen Untersuchungen eingestuft und daher nicht weiter betrachtet.

3 VORLIEGENDE ARBEITEN BEZÜGLICH MAGNETFELDEXPOSITION IN AUTOMOBILEN

3.1 Magnetfeldexposition zufolge Reifenmagnetisierung

Zur generellen Frage der Magnetfeldexposition der Insassen von Kraftfahrzeugen existieren bereits einige wissenschaftliche Untersuchungen. Eine der ersten Arbeiten stammt aus 1997 [4]. In dieser Arbeit wurde die magnetische Flussdichte (Frequenzbereich 5 Hz – 2000 Hz) in 7 unterschiedlichen PKWs, an jeweils 4 unterschiedlichen Sitzplätzen gemessen. Die Messungen erfolgten dabei im Stillstand der Fahrzeuge, bei laufendem Motor und eingeschalteter Klimaanlage. Die jeweils über den Körper gemittelten Werte lagen, stark abhängig vom Fahrzeugtyp und der untersuchten Sitzposition, zwischen 0,03 μT und 4,0 μT .

Interessante Erkenntnisse brachten die Publikationen [5] und [6], die von magnetischen Flussdichten im Bereich bis zu ca. 10 μT im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer bzw. auf der Rückbank zufolge eines Magnetmoments des Stahlgürtels der Reifen berichteten. Ursache dafür ist eine eventuell vorhandene Vormagnetisierung des Stahlgürtels im Reifen, die zufällig oder z.B. noch während des Produktionsprozesses der Reifen entstanden sein kann. Während der Fahrt stellt der Reifen daher aus physikalischer Sicht einen rotierenden Permanentmagneten dar, der magnetische Wechselfelder mit einer Frequenz entsprechend der Reifendrehzahl erzeugt. Das Spektrum dieser Immissionen ist naturgemäß direkt abhängig von der momentanen Fahrgeschwindigkeit und dem Reifendurchmesser. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 80 km/h und einem für PKWs üblichen Reifendurchmesser von ca. 62 cm liegt die Grundwelle der Immissionen bei ca. 11 Hz. Zu beachten ist jedoch, dass, je nach Art der Reifenmagnetisierung, der Oberwellengehalt relevant sein kann, insbesondere deshalb, da in diesem Frequenzbereich die Referenzwerte umgekehrt proportional mit der Frequenz abnehmen. Aus den in [4] und [5] dokumentierten Flussdichtewerten (bis zu 10 μT im Fußbereich bzw. auf der Rückbank) und den zu erwarteten Spektren können die auf eine Reifenmagnetisierung zurückführbaren Immissionen durchaus im einstelligen Prozentbereich in Bezug auf die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung liegen.

Weiters wurden in einer Zeitschrift im Jahr 2002 [7] Magnetfeldwerte im Inneren von diversen PKWs berichtet. Ohne nähere technische Details bezüglich des Messverfahrens anzugeben, wurde stark abhängig vom Fahrzeugtyp, von Maximalwerten zwischen 0,5 μT und 18 μT berichtet. Die in einigen Fahrzeugen aufgetretenen hohen Messwerte wurden, physikalisch plausibel, auf fehlende Rückleiter bei der Stromversorgung einiger elektrischer Komponenten zurückgeführt (d.h., Karosserie wird als Rückleiter verwendet).

3.2 Magnetfeldexposition in Hybridfahrzeugen

Wenngleich derzeit noch keine wissenschaftlichen Publikationen (im Sinn von Artikeln in wissenschaftlichen Journalen) zum Thema der Magnetfeldimmissionen in Hybridfahrzeugen vorliegen, so sind in jüngster Vergangenheit in Zeitschriften und im Internet vereinzelt Berichte über Magnetfeldmessungen im auf dem US amerikanischen Markt seit längerem verfügbaren Honda Insight Hybrid [8], im Toyota Prius [9] und in nicht näher spezifizierten Hybrid-PKWs [10] erschienen. Eine ganze

Reihe damit zusammenhängender bzw. davon ausgelöster Diskussionen und Messungen von Laien, von denen im Internet in diversen Diskussions-Foren zu lesen ist, wird hier nicht weiter behandelt.

In der New York Times [8] wurden Messdaten aus dem Honda Insight Hybrid (Modell 2001, in Europa nicht auf dem Markt) veröffentlicht, wonach die magnetische Flussdichte im Hüftbereich bis zu $13,5 \mu\text{T}$ und im Brustbereich bis zu $10 \mu\text{T}$ betrug. Es werden jedoch keine näheren Angaben zum Messfrequenzbereich und den Messbedingungen gemacht.

Ein etwas detaillierterer Messbericht ist für den Toyota Prius, ebenfalls aus einem in den USA vermarkteten Modell auf [9] abrufbar. Im Frequenzbereich $5 \text{ Hz} - 2 \text{ kHz}$ wird auf der Rückbank beim Beschleunigen (Boost) von $0,6-0,8 \mu\text{T}$ berichtet. Bei rein elektrischem Fahren lagen die Messwerte auf der Rücksitzfläche bei ca. $0,3 \mu\text{T}$ und im Kopfbereich bei ca. $0,04 \mu\text{T}$. Im Frequenzbereich von $2 - 300 \text{ kHz}$ wird auf der Rückbank von $0,75 \text{ nT}$ bis 15 nT im Boost-Betrieb und von $5 \text{ nT} - 7,5 \text{ nT}$ beim rein elektrischen Fahren berichtet. Zusätzlich werden für den Rücksitz im Boost-Betrieb die Immissionen bei 60 Hz mit $0,1 \mu\text{T}$ angegeben.

Schließlich wurden kürzlich die Ergebnisse von Immissionsmessungen in zwei (nicht näher offen gelegten) Hybrid-PKWs auf der Homepage des Schweizer Bundesamtes für Gesundheit veröffentlicht [10]. Gemessen wurde dabei sowohl während Realfahrten in der Stadt, als auch unter definierten Bedingungen im Labor. Als Messpositionen wurden der Fußbereich des Fahrerplatzes, die Sitzfläche des Beifahrerplatzes, sowie ein auf der Rückbank montierter Kindersitz gemessen. Bezüglich des Spektrums der Immissionen wird in [10] davon ausgegangen, dass alle relevanten Frequenzanteile zwischen 5 Hz und 500 Hz liegen. Als Messwerte der magnetischen Flussdichte während der Messfahrt im Stadtgebiet können aus den graphisch dargestellten Ergebnissen in [10] für den Fußbereich des Fahrers ca. $0,05 \mu\text{T} - 7,6 \mu\text{T}$, den Beifahrersitz ca. $0,40 \mu\text{T} - 3,2 \mu\text{T}$ und den Kindersitz auf der Rückbank ca. $0,1 \mu\text{T} - 3,0 \mu\text{T}$ abgelesen werden.

Grundsätzlich ist zu den oben angeführten Messdaten aus der Literatur anzumerken, dass Angaben von Breitbandmesswerten ohne detaillierte Information über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen im hier interessierenden Frequenzbereich (z.B. $5 \text{ Hz} - 2000 \text{ Hz}$) leider nur sehr eingeschränkt für eine strahlenschutztechnisch sinnvolle Bewertung der Exposition brauchbar sind, da die Referenzwerte im angegebenen Frequenzbereich einen Wertebereich von mehr als zwei Zehnerpotenzen überstreichen.

4 VERFÜGBARE MESSVERFAHREN FÜR DIE EXPOSITIONSERFASSUNG

Aufgrund der Tatsache, dass die von den elektrischen Fahrzeugkomponenten verursachten elektrischen Felder in der Fahrgastzelle aufgrund der abschirmenden Wirkung der metallischen Karosserie vernachlässigbar sein werden, bleiben die hier angestellten Betrachtungen auf die Erfassung der magnetischen Felder beschränkt. Weiters werden nur frequenzselektive Messmethoden näher betrachtet, da grundsätzlich von nicht-harmonischen Strömen bzw. Magnetfeldern auszugehen ist und die Referenz- und Basisgrenzwerte [1] im interessierenden Spektralbereich bis zumindest einige Kilohertz stark frequenzabhängig sind. Eine detaillierte Beurteilung der Magnetfeldimmissionen auf Basis von Breitbandmessungen wäre demnach nicht sinnvoll möglich.

4.1 Frequenzselektive Messmethoden im NF-Bereich

Im Prinzip sind zwei grundsätzlich unterschiedliche frequenzselektive Messverfahren denkbar. Einerseits können, wie auch im HF-Bereich üblich, Messantennen (Spulenantennen bei Magnetfeldmessungen) in Kombination mit einem nach dem Heterodyn-Prinzip arbeitenden Spektrumanalysator verwendet werden. Der wesentliche Vorteil dieses Verfahrens liegt in der großen erreichbaren Messdynamik. Demgegenüber steht allerdings ein erheblicher Nachteil im Hinblick auf die praktische Durchführung von Messungen, nämlich dass Spektrumanalysatoren in der Regel nur mit einem Messeingang ausgestattet sind und somit für eine isotrope Messung in jedem Messpunkt zeitlich hintereinander drei Einzelmessungen durchzuführen sind.

Das für Messungen im NF-Bereich wesentlich effizientere Prinzip basiert auf der unmittelbaren Digital-Analog-(D/A-)Umsetzung des von der Messantenne kommenden (vorverstärkten) Signals und der anschließenden Fast-Fourier-Transformation (FFT) zur Ermittlung der spektralen Zusammensetzung. Mit den heute üblichen Geschwindigkeiten von D/A-Wandlern ist es dabei problemlos möglich, mehrere Kanäle, bei Abtastraten im Megahertz-Bereich pro Kanal, parallel zu verarbeiten. D.h., bei Verwendung isotroper Messantennen (für Magnetfeldmessungen drei orthogonal zueinander angeordnete Spulen) sind Messungen sehr zeiteffizient durchführbar. Die im Vergleich zum oben erwähnten Verfahren mit Spektrumanalysator schlechtere Messdynamik (geringere Messempfindlichkeit) spielt im NF-Bereich in der Praxis üblicher Weise nur eine untergeordnete Rolle. Für die im Zuge dieses Projekts durchzuführenden Messungen ist daher die Methode mit direkter D/A-Wandlung und nachfolgender FFT wesentlich besser geeignet. Im Folgenden werden unterschiedliche Systemkonzepte dieser Methode anhand von konkreten Produkten beschrieben und verglichen.

4.1.1 Mess-System ARC-NIFSPEC (Austrian Research Centers)

Bei diesem Mess-System handelt es sich um ein Multikanal-Signalverarbeitungssystem für beliebige analoge Messsignale. Die an den Signaleingängen anliegenden Messsignale werden mittels kommerziell erhältlicher professioneller Datenerfassungsmodule (PXI-Produktfamilie, National Instruments Corporation) digitalisiert und mittels einer entsprechenden Messsoftware, entwickelt unter LabView (National Instruments Corporation), weiterverarbeitet (Abbildung 4.1).

Die Datenerfassungsmodule sind hinsichtlich verschiedenster Parameter (Eingangsbereich, Abtastrate, Länge der einzulesenden Messsignalintervalle) über die inhouse entwickelte Messsoftware flexibel in weiten Grenzen konfigurierbar. In der gegenwärtigen Ausführung ist das System optimiert für frequenzselektive Magnetfeldmessungen im Frequenzbereich 0 Hz – 400 kHz. Validiert und erfolgreich eingesetzt wurde dieses System in vorangegangenen Projekten zum Thema der Exposition von Elektroschweißern [11]. Dabei wurden als Messsignale die Analogausgänge kommerziell erhältlicher Magnetfeldsondensysteme verwendet, wie z.B. ELT 400 (Narda Safety and Test Solutions) und Lakeshore 460 (Lakeshore Cryotronics), wobei aufgrund der ausreichend vorhandenen parallel verarbeitbaren Eingangskanäle die Messung magnetischer Wechselfelder und Gleichfelder mit zwei entsprechend geeigneten Sensoren parallel und damit gleichzeitig erfolgen kann. Dies erlaubt z.B. bei Verwendung der Analogausgänge der Sondensysteme ELT-400 (5 Hz-400 kHz) und Lakeshore 460 (0 Hz - 400 Hz) sehr zeiteffiziente und isotrope Magnetfeldmessungen über einen lückenlos abgedeckten Frequenzbereich von 0 Hz bis 400 kHz.

Die Messsoftware zur Datenerfassung (über eine schnelle digitale Schnittstelle mit dem Datenerfassungsmodul verbunden) und Datenauswertung des ARC-NIFSPEC läuft vollständig auf einem leistungsfähigen Computer mit entsprechend großen Speicherressourcen und entsprechender Geschwindigkeit, sodass die Aufzeichnung und Speicherung einer Messsequenz über den Frequenzbereich von 0 Hz- 400 kHz innerhalb von ca. 2-3 Sekunden erfolgen kann. Frequenzabhängige Kalibrierfaktoren werden bei der Messung automatisch berücksichtigt. Zusätzlich können externe Triggerquellen und Anti-Aliasing Filter definiert und bei der Messung verwendet werden.

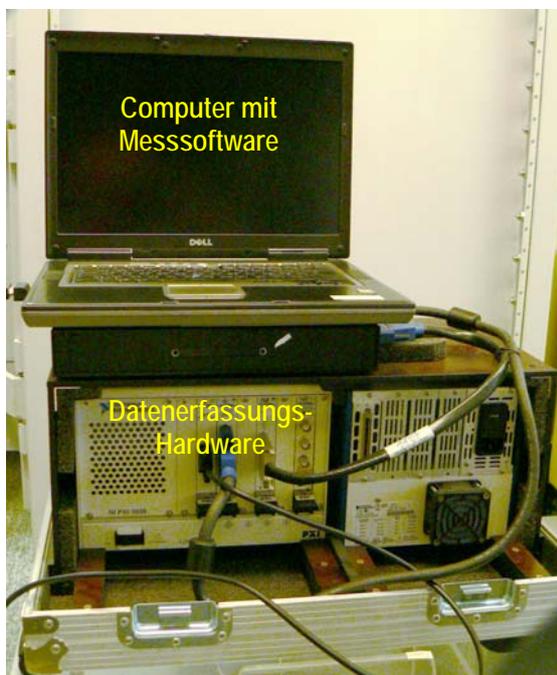


Abbildung 4.1: Vorder- und Rückansicht des Inhouse entwickelten Mess-Systems ARC-NIFSPEC (Austrian Research Centers)

Die Datenauswertung und Analyse kann in einem von der Datenaufzeichnung separierten Programmmodul nach unterschiedlichen, flexibel wählbaren Gesichtspunkten erfolgen. Abbildung 4.2 und Abbildung 4.3 zeigen die

Programmfenster für die Datenaufzeichnung und die Datenauswertung (Frequenzanalyse) des ARC-NIFSPEC Systems. Das Programmmodul zur Datenauswertung erlaubt zusätzlich eine automatische Bewertung der Messergebnisse nach unterschiedlichen Normen bzw. Referenzwerten.

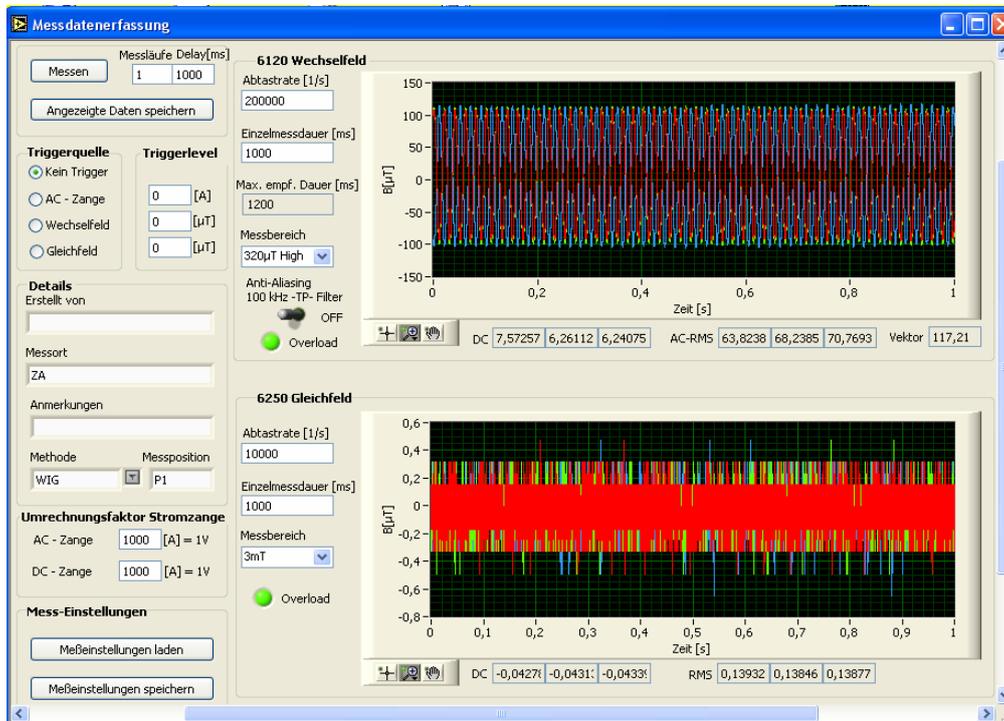


Abbildung 4.2: Programmfenster für die Messsignalaufzeichnung des ARC-NIFSPEC Systems

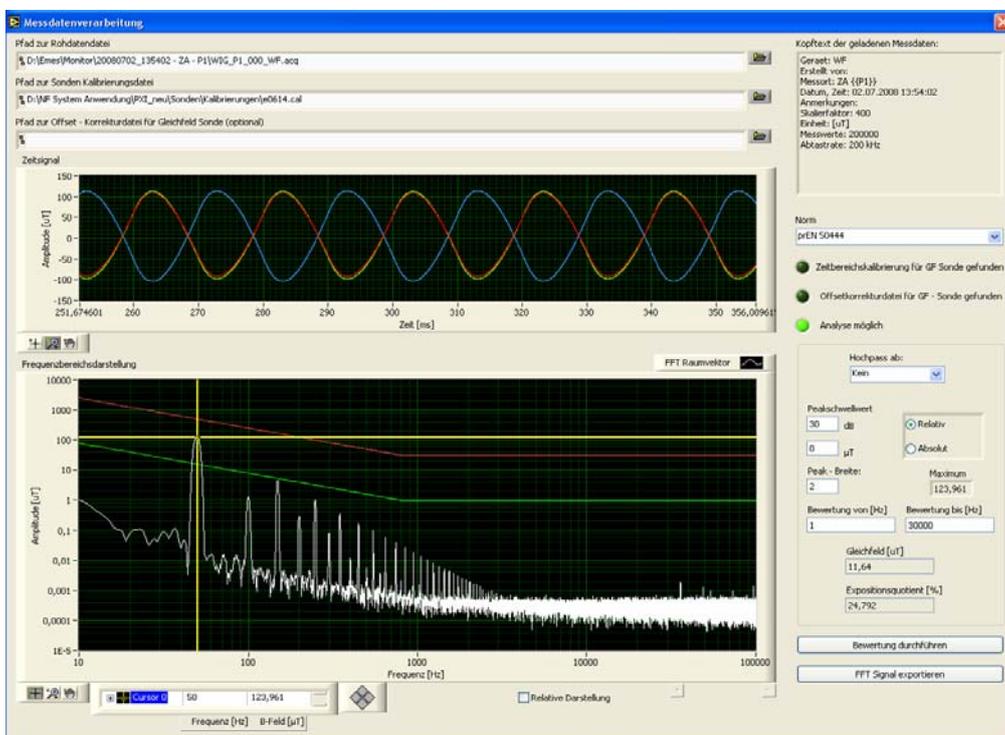


Abbildung 4.3: Programmfenster für die Messsignalauswertung (Frequenzanalyse) des ARC-NIFSPEC Systems

4.1.2 Mess-System EFA 300 & EFA-TS (Narda Safety and Test Solutions)

Das kommerziell erhältliche Mess-System EFA 300 bietet die Möglichkeit frequenzselektive Magnetfeldmessungen im Frequenzbereich 5 Hz bis 32 kHz mittels eines kompakten Handgerätes durchzuführen (Abbildung 4.4).



Abbildung 4.4: Das Mess-System EFA 300 (Narda Safety and Test Solutions)

Aufgrund der Tatsache, dass sowohl Messwertaufzeichnung, als auch Messwertanalyse (FFT) vollständig im kompakten Handgerät durchgeführt werden, bleiben die Möglichkeiten des Systems hinsichtlich flexibler Parametrisierung der Messungen/Auswertungen, hinsichtlich verfügbarer Speichertiefe pro Messung und hinsichtlich der Speicherung mehrerer Messungen stark eingeschränkt. Beispielsweise sind nur 2 fix definierte Messsignalintervalle verfügbar (1 s im Frequenzbereich bis 2 kHz und 0.1 s im Frequenzbereich bis 32 kHz). Dies könnte bei langsam-transienten Vorgängen zu nicht näher bzw. nur schwer definierbaren Unsicherheiten durch „spectral leakage“² bei der FFT führen. Weiters sind nicht mehr als 22 frequenzselektive Messungen am Handgerät speicherbar, was ebenfalls bei bestimmten Messaufgaben eine relevante Einschränkung darstellt. Das Problem der beschränkten Anzahl speicherbarer FFT-Ergebnisse lässt sich umgehen, wenn man das EFA 300 System in Kombination mit der vom Hersteller ebenfalls angebotenen Software EFA-TS auf einem über Lichtwellenleiter angeschlossenen Remote-

² „Spectral Leakage“ ist eine Folge der Anwendung der FFT auf zeitlich beschränkte Signalintervalle, wie in der Praxis natürlich immer gegeben. Wie durch den Namen „spectral leakage“ bereits suggeriert, führt dies dazu, dass nach Anwendung der FFT die spektrale Energieverteilung etwas „verschmiert“ erscheint. Z.B. zeigt das durch FFT eines beschränkten Zeitintervalls eines harmonischen Signals gewonnene Spektrum aufgrund des „spectral leakage“ nicht die theoretisch bei einem harmonischem Signal zu erwartende „Nadel“ bei der Grundfrequenz, sondern ein etwas verbreitetes Spektrum, bei gleichzeitig etwas geringerer Amplitude im Vergleich zur theoretischen „Nadel“. Je kürzer das FFT-analytierte Zeitintervall ist, desto breiter wird der Spektralanteil abgebildet und desto geringer wird seine Amplitude.

Computer (z.B. Laptop) verwendet. Bei der Software EFA-TS handelt es sich allerdings praktisch nur um die Realisierung eines Remote-Terminals für das EFA 300 Mess-System. D.h., es steht zwar die Harddisk des Remote-Computers für die Speicherung von wesentlich mehr als 22 frequenzselektiven Messergebnissen und eine im Vergleich zum LCD Display des Handgerätes wesentlich übersichtlichere Darstellungsmöglichkeit der Ergebnisse zur Verfügung, die wesentlich durch die Integration aller Funktionalitäten ins Handgerät bedingten, oben genannten Systembeschränkungen bleiben allerdings bestehen. Zusätzlich führt ein offensichtlich relativ langsames Übertragungsprotokoll zwischen Handgerät und Remote-Computer zu Messzeiten von ca. 20 Sekunden pro Messpunkt (vom Start der Messung bis zur Abspeicherung des Ergebnisses). Die Speicherung des Zeitsignals im bzw. der Export des Zeitsignals aus dem Handgerät ist nicht möglich.

4.1.3 Benchmark-Vergleich der beiden Systeme

Um die Tauglichkeit der beiden oben genannten Mess-Systeme für die in diesem Projekt durchzuführenden Messungen zu evaluieren, wurden Vergleichsmessungen in einem definierten Feldpunkt nahe einer Magnetfeldquelle durchgeführt. Als Magnetfeldquelle diente eine Spule, die mit 50 Hz-Signalen unterschiedlichen Oberwellengehalts gespeist wurde (Abbildung 4.5).

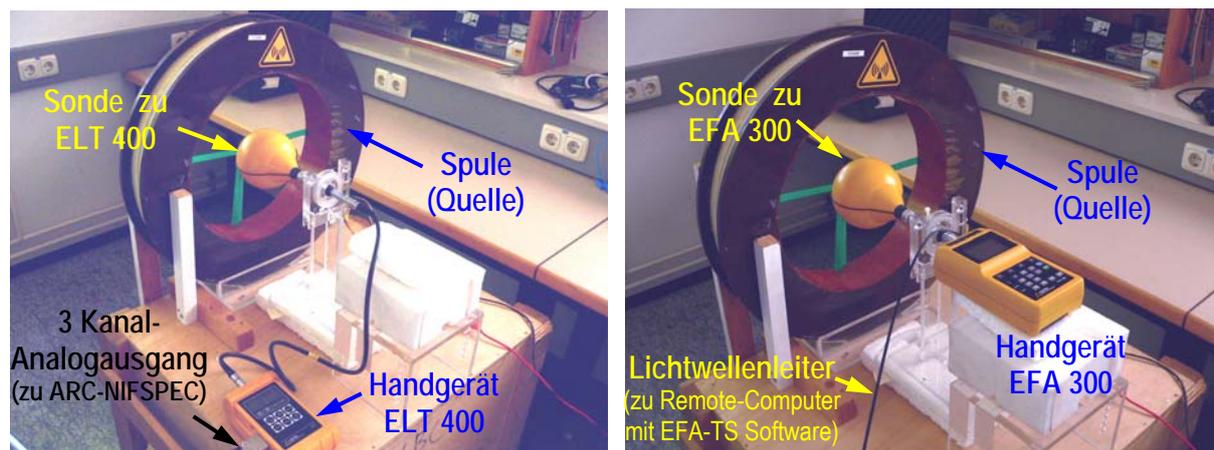


Abbildung 4.5: Vergleich der Mess-Systeme ARC-NIFSPEC in Kombination mit dem SONDENSYSTEM ELT 400 (links) und EFA 300 in Kombination mit EFA-TS (rechts) anhand von frequenzselektiven Messungen unter Laborbedingungen

Abbildung 4.6 zeigt zunächst die Messergebnisse im 50 Hz-Magnetfeld mit geringem Oberwellengehalt. Das ARC-NIFSPEC System erlaubt flexibel die Wahl einer passenden Messintervalllänge und eines darzustellenden Frequenzbereichs. Konkret wurde hier eine Messintervalllänge von 1 s und ein Frequenzbereich bis 100 kHz, bei einer Abtastrate von 200 kHz gewählt. Das frequenzselektive Messergebnis zeigt deutlich Oberwellen bis zu etwa 1 kHz. Der Effektivwert der einzelnen Spektralanteile (peaks) kann einfach mit dem Maus-gesteuerten Cursor (gelbes Fadenkreuz in Abbildung 4.6, oben) ausgelesen oder automatisch ermittelt und exportiert werden. Zusätzlich zeigt das ARC-NIFSPEC den Zeitverlauf des gemessenen Signals oberhalb der Frequenzbereichsdarstellung an und erlaubt ein flexibles Maus-gesteuertes Ein- und Auszoomen (sowohl in die Zeitbereichs- als auch die Frequenzbereichsdiagramme), um Signaldetails näher analysieren zu können.

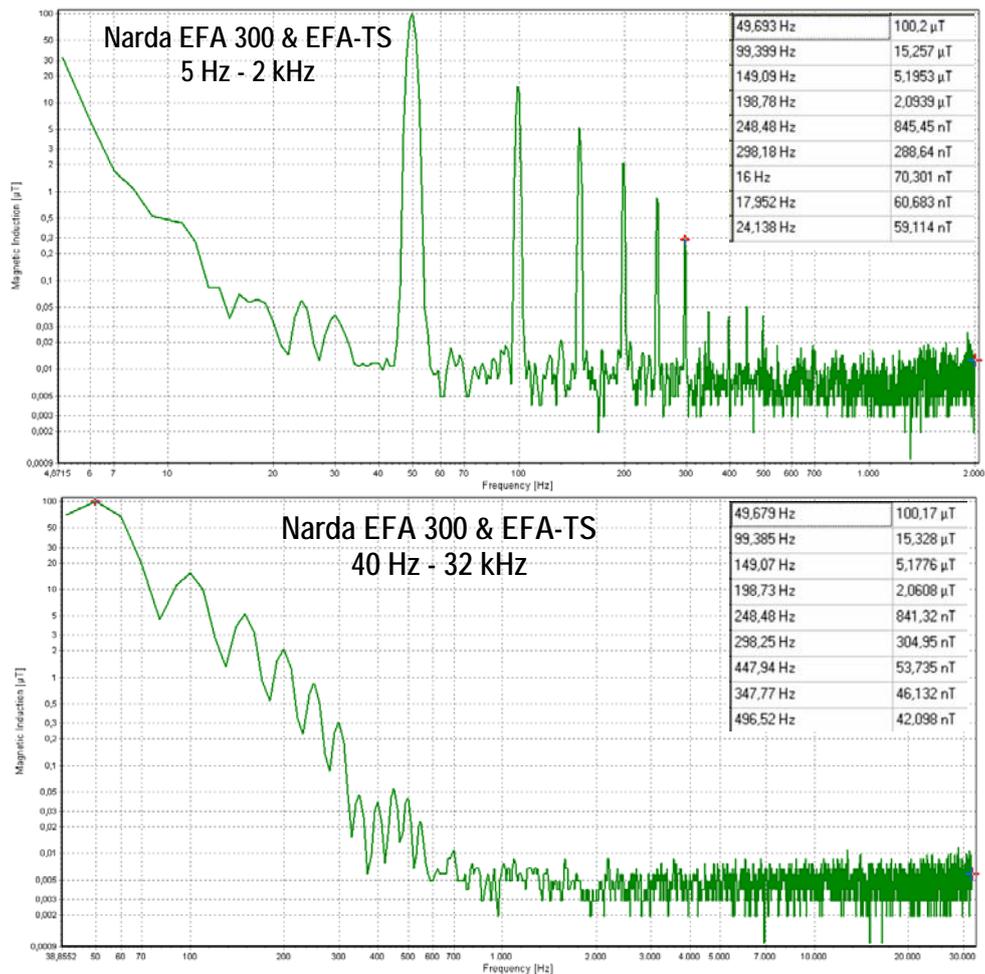
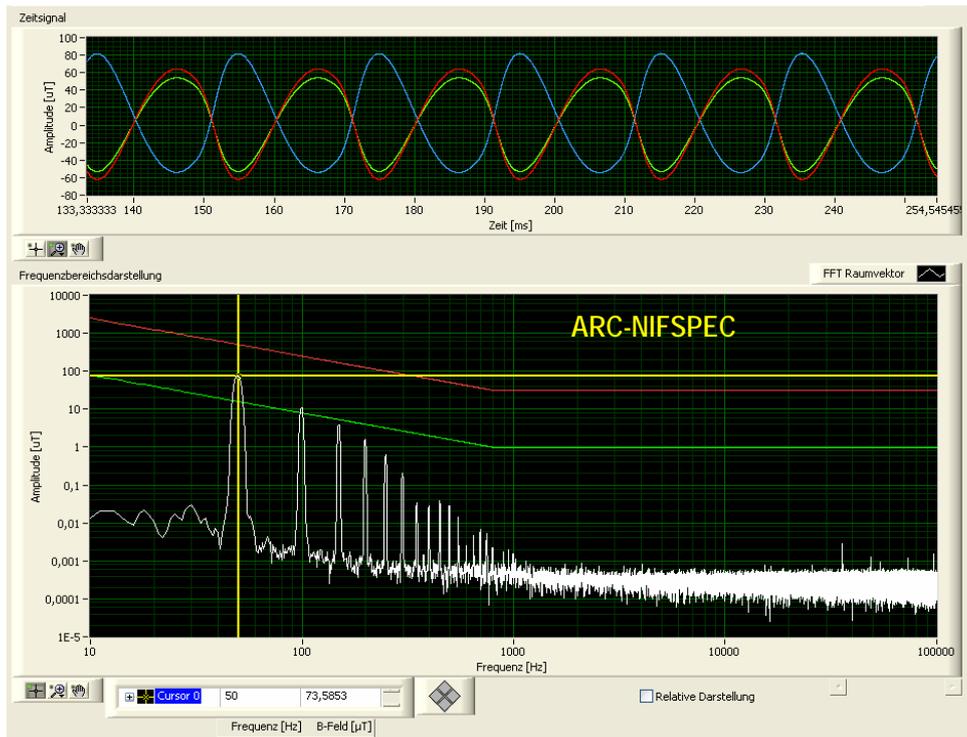


Abbildung 4.6: Vergleich von Messergebnissen des Mess-Systems ARC-NIFSPEC in Kombination mit dem Sondensystem ELT 400 (oben) und des Systems EFA 300 in Kombination mit EFA-TS (in den beiden möglichen Frequenzbereichen 5 Hz – 2 kHz (Mitte) und 40 Hz-32 kHz (unten) in einem 50 Hz-Magnetfeld mit geringem Oberwellengehalt.

Mit dem EFA 300 & EFA-TS System wurden Messungen in beiden zur Verfügung stehenden Modi, von 5 Hz – 2 kHz (Abbildung 4.6, Mitte) und von 40 Hz – 32 kHz (Abbildung 4.6, unten) durchgeführt. Ein Vergleich der ARC-NIFSPEC Messergebnisse und der EFA 300 & EFA-TS Messergebnisse bis 2 kHz zeigt im Rahmen der Messgenauigkeit ausreichend gute Übereinstimmung ($\pm 6\%$) der Messwerte der einzelnen Spektralkomponenten bis zur 9. Oberwelle (500 Hz)³. Vergleicht man das mittlere und untere Teilbild von Abbildung 4.6, so wird der Effekt des „spektral leakage“ deutlich (siehe Fußnote 2). Bei einer Frequenzbereichsdarstellung bis zur Maximalfrequenz des EFA 300 & EFA-TS von 32 kHz steht nur ein Messintervall von 0.1 s zur Verfügung, was zur Verbreiterung der Spektrallinien und zur Erhöhung der Messunsicherheit, vor allem von höheren Harmonischen mit kleinerer Amplitude führen kann (vgl. Peak-Tabellen der mittleren und unteren Abbildung).

In Abbildung 4.7 ist in gleicher Weise der Vergleich der Messergebnisse im 50 Hz-Magnetfeld mit hohem Oberwellengehalt dargestellt. Das ARC-NIFSPEC System wurde wieder auf eine Messintervalllänge von 1 s und einen Frequenzbereich bis 100 kHz, bei einer Abtastrate von 200 kHz konfiguriert. Mit dem EFA 300 & EFA-TS System erfolgten die Messungen wieder mit beiden möglichen Modi, von 5 Hz – 2 kHz und von 40 Hz – 32 kHz. Das ARC-NIFSPEC Messergebnis zeigt erkennbare Oberwellen bis über 20 kHz hinaus. Im Modus 5 Hz – 2 kHz des EFA 300 & EFA-TS Systems (mittleres Teilbild von Abbildung 4.7) können diese naturgemäß nicht alle erfasst werden. Im Modus 40 Hz – 32 kHz ist mit dem EFA 300 & EFA-TS System eine Beurteilung der Oberwellen bis etwa 6 kHz möglich, darüber hinaus stößt das EFA 300 & EFA-TS System offensichtlich an seine Grenzen hinsichtlich der Messdynamik. Zusätzlich ist naturgemäß auch wieder der Effekt des „spektral leakage“ im Modus 40 Hz – 32 kHz, aufgrund der kurzen Messintervalllänge von nur 0,1 s, deutlich sichtbar. Die mit den beiden Systemen ermittelten Messwerte zeigen allerdings im Rahmen der Messunsicherheit wieder ausreichend gute Übereinstimmung ($\pm 7\%$).

Für die Auswahl des für dieses Projekt bestgeeigneten Messverfahrens können folgende Kriterien, gereiht nach Prioritäten, definiert werden:

- Messgenauigkeit und Messdynamik
- Abgedeckter Frequenzbereich
- Flexibilität des Messsystems hinsichtlich Parametrisierbarkeit der Messungen und der Immissionsbeurteilung
- Zeitaufwand pro Messung und Messposition
- Handlichkeit (Kompaktheit des Systems)

Im Folgenden werden die Messsysteme ARC-NIFSPEC & ELT 400 und EFA 300 & EFA-TS anhand der oben genannten Kriterien vergleichend diskutiert.

³ Beim Vergleich der Bilder bzw. der Messwerte ist zu beachten, dass das ARC-NIFSPEC-System in der Frequenzbereichsdarstellung die Effektivwerte darstellt und das EFA 300 & EFA-TS System die Spitzenwerte.

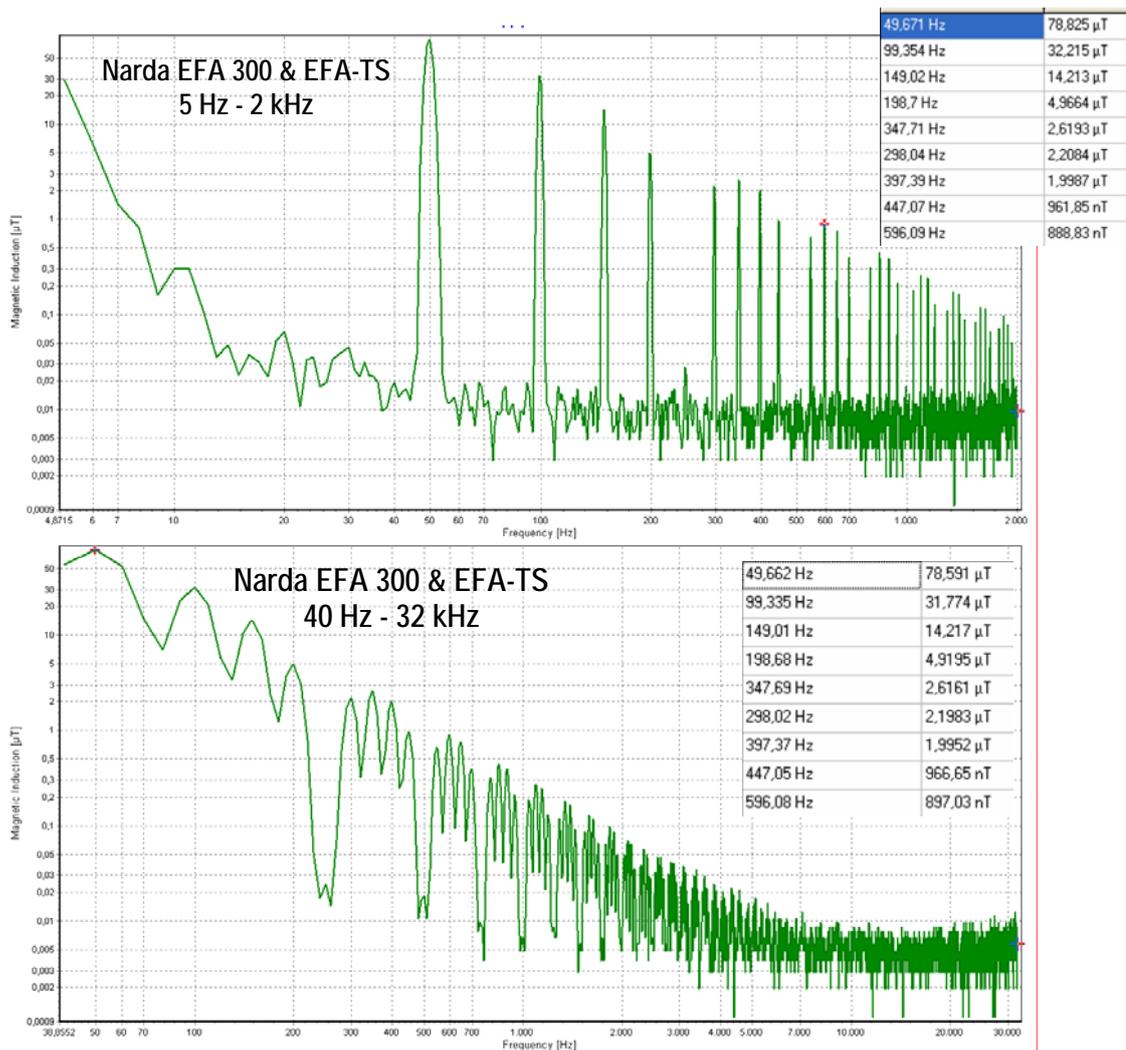
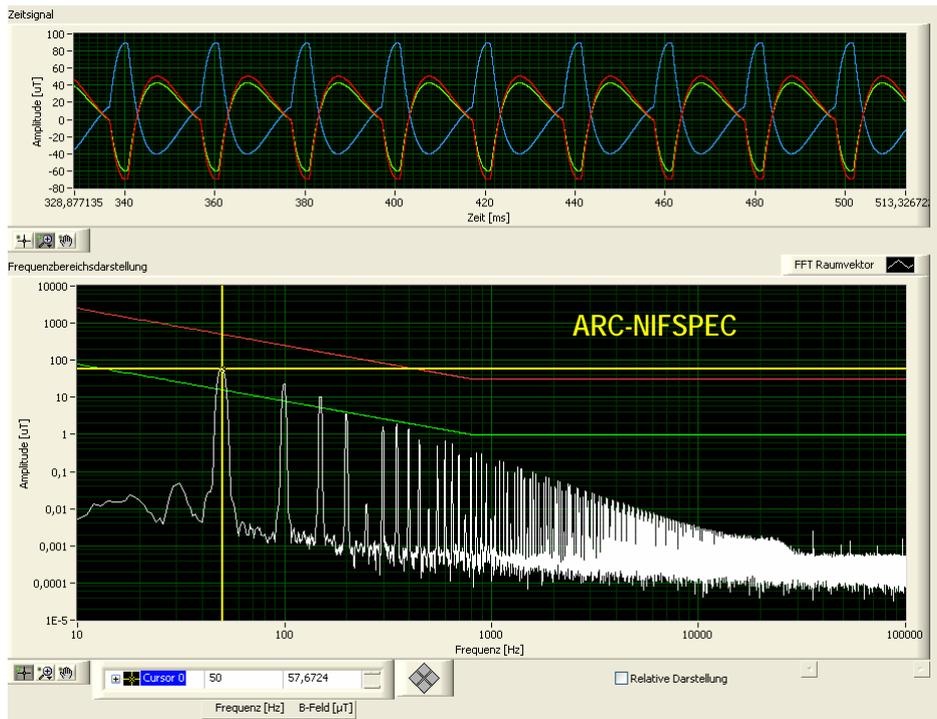


Abbildung 4.7: Vergleich von Messergebnissen des Mess-Systems ARC-NIFSPEC in Kombination mit dem Sondensystem ELT 400 (oben) und des Systems EFA 300 in Kombination mit EFA-TS (in den beiden möglichen Frequenzbereichen 5 Hz – 2 kHz (Mitte) und 40 Hz-32 kHz (unten) in einem 50 Hz-Magnetfeld mit hohem Oberwellengehalt.

Messgenauigkeit und Messdynamik

Hinsichtlich der Messgenauigkeit zeigten die durchgeführten Vergleichsmessungen, dass die beiden Messsysteme für die im Rahmen dieses Projektes durchzuführenden Arbeiten gleichwertig sind. Die bei frequenzselektiven Messungen erreichbare Messdynamik ist mit dem ARC-NIFSPEC & ELT 400 System wesentlich größer. Einerseits ist aufgrund der ELT 400-Spezifikationen die obere Messbereichsgrenze höher (80 mT im Vergleich zu 32 mT bei EFA 300) und andererseits liegt der Rauschboden im frequenzselektiven Messergebnis mit ARC-NIFSPEC & ELT 400 wesentlich tiefer als beim EFA 300 & EFA-TS System (vgl. obere und mittlere bzw. untere Teilbilder in Abbildung 4.6 und Abbildung 4.7).

Frequenzbereich

Hier ist das ARC-NIFSPEC & ELT 400 System dem EFA 300 & EFA-TS deutlich überlegen. Einerseits ist der spezifizierte Frequenzbereich des ELT 400 Gerätes (1 Hz – 400 kHz) bereits wesentlich breiter als jener des EFA 300 Gerätes (5 Hz – 32 kHz), zum anderen sind bei EFA 300 & EFA-TS, wie bereits weiter oben erwähnt, nur zwei fix vorgegebene Frequenzbereiche (5 Hz – 2 kHz und 40 Hz – 32 kHz) mit jeweils fixer Messintervalllänge (1 s und 0.1 s) für die frequenzselektive Messung verfügbar. Mit dem ARC-NIFSPEC & ELT 400 System kann hingegen der gesamte Frequenzbereich von 1 Hz bis 400 kHz bei maximal flexibler Handhabung der Abtast- und Messintervallparameter abgedeckt werden. Durch zusätzlichen, parallelen Anschluss einer isotropen Hallsonde (z.B. Chauvin Arnoux MF05 & C.A42) an das ARC-NIFSPEC, ist ohne zusätzlich Zeitaufwand sogar der Frequenzbereich von 0 Hz bis 400 kHz lückenlos abdeckbar.

Flexibilität

Da es sich bei EFA 300 & EFA-TS um ein kommerziell erhältliches (Fremd-) System handelt, ist man als Benutzer an die durch die Gerätespezifikationen vorgegebenen, und wie weiter oben bereits erwähnt, relativ eingeschränkten Möglichkeiten gebunden. Im Gegensatz dazu bietet das ARC-NIFSPEC System wesentlich mehr Flexibilität hinsichtlich der verfügbaren Messparameter, was speziell im Hinblick auf die Untersuchung transienter Vorgänge vorteilhaft ist.

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des ARC-NIFSPEC Systems ist die Tatsache, dass das Original-Immissionssignal im Zeitbereich gespeichert wird, was alle Möglichkeiten einer detaillierten Analyse im Zuge der Immissionsbewertung offen lässt. Dies ist für eine realistische Beurteilung der Immissionen unter Berücksichtigung der Phasenbeziehungen der einzelnen Spektralkomponenten [12] unerlässlich. Hingegen ist mit dem EFA 300 & EFA-TS nur die Aufnahme des Amplitudenspektrums möglich, was zwangsläufig, je nach Phasenbeziehungen der Einzelspektralkomponenten, zu unter Umständen sehr großen Überbewertungen der resultierenden Immissionen führen kann.

Zusätzlich bietet die Tatsache, dass es sich bei ARC-NIFSPEC um ein Inhouse entwickeltes System handelt, die Möglichkeit kurzfristig notwendiger Erweiterungen bzw. Adaptierungen.

Zeitaufwand pro Messung und Messposition

In diesem Projekt sind frequenzselektive Messungen der Magnetfeldimmissionen an mehreren Messpositionen in definierten räumlichen Messrastern innerhalb von Fahrzeugen in unterschiedlichen Betriebszuständen der Fahrzeuge geplant. Aufgrund der Vielzahl sich daraus ergebender Einzelmesspunkte kommt einer effizienten Durchführung der Messungen wesentliche Bedeutung zu. Dies

insbesondere deshalb, weil die zu untersuchenden Fahrzeuge angemietet werden müssen und teilweise auf einem (ebenfalls anzumietenden) Leistungsprüfstand untersucht werden. Aufgrund des Systemkonzeptes des ARC-NIFSPEC, bei dem die Analogausgänge von Messsonden bzw. Messgeräten mit schneller Datenerfassungshardware digitalisiert und auf einem leistungsfähigen Computer weiterverarbeitet werden, liegt der pro frequenzselektiver Einzelmessung anzusetzende Zeitaufwand (vom Starten der Messung bis zum Ende des Abspeicherns des Messergebnisses) bei weniger als 3 Sekunden. Im Gegensatz dazu erfolgt die gesamte Signalanalyse und Auswertung beim EFA 300 & EFA-TS System innerhalb des kompakten EFA 300-Handgerätes und die Software EFA-TS stellt im Wesentlichen nur ein Remote-Terminal dar. D.h., nach dem Start jeder Messung müssen zuerst die eingestellten Messparameter zum EFA 300-Handgerät übertragen, dann die Messung und FFT-Berechnung im EFA 300-Handgerät durchgeführt und anschließend das Messergebnis zum Remote-Computer übertragen werden. Der dafür benötigte Zeitaufwand liegt pro frequenzselektiver Einzelmessung (vom Starten der Messung bis zum Ende des Abspeicherns des Messergebnisses auf dem Remote-Computer) bei ca. 20 s. D.h., ARC-NIFSPEC & ELT 400 ist bezüglich der Zeiteffizienz dem EFA 300 & EFA-TS System um ca. einen Faktor 7 überlegen. Eine Abspeicherung der Messdaten direkt auf dem Handgerät würde die Zeiteffizienz der Messungen mit dem EFA 300 zwar erhöhen, ist aber nur in sehr begrenztem Ausmaß möglich (maximal 22 frequenzselektive Einzelmessungen). Weiters würde in diesem Fall nur das kleine Monochrom-Display des Handgerätes für eine laufende Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse zur Verfügung stehen, was im Vergleich zur Vollbild-Ansicht auf einem Computer bzw. Notebook-Bildschirm ebenfalls nachteilig erscheint.

Handlichkeit (Kompaktheit)

Von den oben genannten Vergleichskriterien ist dies der einzige Punkt, bei dem das EFA 300 & EFA-TS Systems dem ARC-NIFSPEC & ELT 400 System klar überlegen ist. Mit einem Gesamtgewicht von nur ca. 1 kg, Abmessungen des Handgerätes von ca. 11 cm x 20 cm x 60 cm und Batterie als einzig benötigte Stromversorgung ist das EFA 300 Gerät mobil und flexibel ohne wesentliche Einschränkungen überall für frequenzselektive Magnetfeldmessungen verwendbar. Das ARC-NIFSPEC & ELT 400 besteht dagegen aus dem ELT 400 Gerät (hinsichtlich Gewicht und Abmessungen vergleichbar mit dem EFA 300 Gerät) und zusätzlich aus der Datenerfassungshardware (ca. 20 kg, Abmessungen ca. 35 cm x 50 cm x 25 cm, kompakt in einem fahrbaren Messgerätekofter untergebracht), die über Netzkabel gespeist werden muss. Ohne Wechsel des Aufstellungsortes der Datenerfassungshardware ist das ARC-NIFSPEC & ELT 400 daher nur in einem räumlich eingeschränkten Bereich einsetzbar (ca. 5-6 m, je nach Länge des Kabels zur Analogsignalübertragung). Im Vergleich zum als „mobil“ zu bezeichnenden EFA 300 ist das ARC-NIFSPEC daher wohl eher nur als „portabel“ zu bezeichnen.

Da das ARC-NIFSPEC System in Kombination mit entsprechenden Messwertaufnehmern (z.B. ELT 400 Gerät) dem EFA 300 – EFA-TS System nur hinsichtlich der Handlichkeit (Kompaktheit) bzw. Mobilität unterlegen ist, diese aber für die gegenständliche Aufgabenstellung (Messungen in Fahrzeugen) nur von untergeordneter Bedeutung ist, wird für die durchzuführenden frequenzselektiven Magnetfeldmessungen im Rahmen dieses Projektes das ARC-NIFSPEC System verwendet.

5 VERFÜGBARE METHODEN ZUR NUMERISCHEN BERECHNUNG INDUZIERTER KÖRPERSTROMDICHTEN

Für den Fall, dass die Immissionsmessungen der magnetischen Flussdichte eine (lokale) Überschreitung der Referenzwerte zeigen, bzw. diesen sehr nahe kommen, ist eine Bewertung der Exposition auf Grundlage der Basisgrößen (Stromdichte im Zentralnervensystemgewebe) notwendig bzw. von Interesse. Dies kann auf Basis von Computersimulationen unter Verwendung detaillierter anatomischer Körpermodelle erfolgen, wobei für derartige Berechnungen in der Literatur unterschiedliche numerische Methoden beschrieben sind, die in unterschiedlichen kommerziellen Softwarepaketen zum Einsatz kommen.

5.1 Einsetzbare numerische Methoden

Für die konkret hier vorliegende Situation niederfrequenter Felder, in der die magnetischen Feldwirkungen als dominant einzustufen sind und der Notwendigkeit der Berücksichtigung detaillierter anatomischer Gewebestrukturen, sind die folgenden Berechnungsmethoden als grundsätzlich tauglich⁴ einzustufen:

- Impedanzmethode
- Methode der Finiten Integrale (FIT)
- FDTD basierter Low Frequency Solver
- FDTD mit Frequenzskalierung

5.1.1 Impedanzmethode

Die Impedanzmethode geht von quasi-statischen, dominant magnetischen Feldverhältnissen aus, d.h., es werden keine Verschiebungsströme berücksichtigt, das Induktionsgesetz kommt aber in vollem Umfang zur Geltung. Das exponierte Körpermodell wird als dreidimensionales Impedanznetzwerk repräsentiert, bestehend aus diskreten Impedanzen entlang der Kanten von (zumeist kubischen bzw. quaderförmigen) Elementarzellen. An den Ecken der Elementarzellen sind die jeweils sechs einlaufenden Impedanzen elektrisch kontaktiert. Der Wert der diskreten Impedanzen entlang der Gitterkanten wird aus den dielektrischen Eigenschaften (Leitfähigkeit σ und Permittivität ϵ) der angrenzenden Elementarzelle berechnet. Die eigentliche Feldberechnung besteht in der Lösung des linearen Gleichungssystems, das aus allen Kirchhoff'schen Maschengleichungen im Körpermodell gebildet wird, wobei als Quellenspannungsterm jeweils die in der jeweiligen Masche induzierte Spannung dient. Das Berechnungsergebnis sind die entlang der Elementarzellenkanten auftretenden Ströme bzw. Spannungsabfälle aus denen, unter Verwendung geeigneter Mittelungsalgorithmen, die Körperstromdichten berechnet werden können. Eine detaillierte Beschreibung der Impedanzmethode findet man in [13]. Einer der größten Vorteile dieser Methode besteht darin, dass, bei Kenntnis der räumlichen Verteilung des anregenden Magnetfeldes, nicht der gesamte Feldraum diskretisiert werden muss, sondern nur das Körpermodell. Der

⁴ Unter „grundsätzlich tauglich“ wird in diesem Zusammenhang verstanden, dass die genannten Berechnungsmethoden in der wissenschaftlichen Literatur für die Berechnung von Körperstromdichten bei niederfrequenter Magnetfeldexposition bereits etabliert sind.

Nachteil des Verfahrens liegt in der rasch ansteigenden Größe des zu lösenden linearen Gleichungssystems bei feiner Auflösung des Körpermodells.

5.1.2 Low Frequency Solver

Da die allgemeine numerische Lösung der Maxwellgleichungen im Zeitbereich, sei es nun basierend auf der FDTD- oder der FIT-Methode, für niederfrequente Felder bei gleichzeitig räumlich hoch aufgelösten Modellen, aufgrund des Courant-Friedrich-Levi-Stabilitätskriteriums, zu extrem langen Rechenzeiten führt, beinhalten gute Simulationsplattformen bereits spezielle Low Frequency Solver die, je nach vorliegenden Feldverhältnissen, von entsprechend vereinfachten Formulierungen der Maxwellgleichungen ausgehen. Für die hier vorliegenden Verhältnisse dominant magnetischer Felder bieten sich Solver für stationäre Stromverteilungen an, die in kommerziellen FDTD-basierten (z.B. [14]) bzw. FIT-basierten (z.B. [15]) Simulationsplattformen implementiert sind.

5.1.3 FDTD- bzw. FIT mit Frequenzskalierung

Das bereits im vorigen Abschnitt angesprochene Problem extrem langer Rechenzeiten bei der allgemeinen Berechnung niederfrequenter Feldprobleme im Zeitbereich mittels FDTD- bzw. FIT-Methode (siehe [16] bzw. [17]) kann, für den Fall, dass Verschiebungsströme keine relevante Rolle spielen, mit der in [18] beschriebenen Methode der Frequenzskalierung deutlich verkleinert werden. Alle Vorteile der genannten Methoden (z.B. Verfügbarkeit detailgetreuer anatomischer Körpermodelle) bleiben dabei aufrecht. Die Methode der Frequenzskalierung besteht darin, dass die eigentliche FDTD- oder FIT- Berechnung bei einer deutlich höheren Anregungsfrequenz f_B durchgeführt wird, als die tatsächlich zu untersuchende Frequenz f_0 , und dass die bei Frequenz f_B erhaltenen Ergebnisse (z.B. in Form der elektrischen Feldstärke im Gewebe E) auf die interessierende Frequenz f_0 „rückskaliert“ werden können,

$$E(f) = \frac{\omega(\sigma_B + j\omega\varepsilon_B)}{\omega_B(\sigma + j\omega\varepsilon)} E(f_B) \cong \frac{f\sigma_B}{f_B\sigma} E(f_B)$$

wobei vorausgesetzt wird, dass Verschiebungsströme gegenüber ohmschen Strömen vernachlässigt werden können, d.h., dass gilt $\sigma + j\omega\varepsilon \cong \sigma$ und $\sigma_B + j\omega_B\varepsilon_B \cong \sigma_B$. Die letztgenannte Bedingung ist für Körpergewebe bis in den Frequenzbereich um etwa 1 MHz in guter Näherung gültig. D.h., für Berechnungen im Frequenzbereich bei etwa 100 Hz kann mit dieser Methode eine Rechenzeiterparnis von etwa vier Zehnerpotenzen erreicht werden, was die FDTD- bzw. FIT-Methode auch für derartige niederfrequente Simulationen praktikabel werden lässt, wenngleich die Rechenzeiten bei üblichen Modellgrößen im Bereich von etwa 100 Millionen Zellen trotzdem noch im Bereich von mehreren Tagen liegt. Zusätzlich zu den bereits genannten Bedingungen muss bei Verwendung der Frequenzskalierungsmethode natürlich auch darauf geachtet werden, dass die Modellabmessungen wesentlich kleiner als die Wellenlänge der Berechnungsfrequenz f_B sind, so dass noch von homogenen Stromverteilungen entlang von Leitern ausgegangen werden kann.

Für die in diesem Vorhaben bearbeitete Fragestellung ist die Methode der Frequenzskalierung, angewendet auf FDTD-Berechnungen mit detaillierten anatomischen Körpermodellen, am vorteilhaftesten.

6 VERWENDETE MESS- UND BEWERTUNGSMETHODEN

In den folgenden Abschnitten werden die konkret in diesem Projekt eingesetzten Mess- und Bewertungsmethoden, einschließlich zugehöriger Unsicherheitsanalysen, detailliert beschrieben.

6.1 Betrachtete Messpositionen

Gemäß der Projektzielsetzung wurden die messtechnischen Untersuchungen auf den Innenraum der Fahrzeuge und auf realistische Aufenthaltsorte von Personen beschränkt. In den zu untersuchenden PKWs und Nutzfahrzeugen sind dies die Sitzpositionen der Fahrzeuginsassen, im Hybrid-Bus werden sowohl Sitzplätze als auch Stehplätze betrachtet. Da aus Aufwandsgründen nicht alle Sitz- bzw. Stehplätze in den Fahrzeugen im Detail untersucht werden konnten, erfolgte für jedes untersuchte Fahrzeug individuell eine Auswahl von Positionen auf Basis von Übersichtsmessungen in einem typischen Betriebszustand (z.B. mittleres Drehmoment bei ca. 80 km/h), wobei bei Fahrzeugen mit vollautomatischem Elektro-Hybridantrieb das Aktivsein des Elektromotors sicherzustellen war. Die Übersichtsmessungen wurden im gesamten Fahrgastraum mittels Breitbandfeldsonden und, falls erforderlich, auch mit frequenzselektiven Messgeräten durchgeführt. Insbesondere wurden Bereiche nahe der Batterien und Versorgungskabel und nahe dem Elektromotor betrachtet. Als Auswahlkriterium wird eine möglichst hohe Magnetfeldexposition angesehen. An jenen Sitzpositionen (bzw. auch Stehplätzen im Omnibus), die sich im Bereich der höchsten, im Rahmen der Übersichtsmessungen festgestellten Immissionswerte befanden, wurden schließlich die detaillierten frequenzselektiven Messungen in einem räumlichen Messraster durchgeführt. In den PKWs wurden insgesamt jeweils drei Sitzplätze (inklusive Fahrerplatz), im Nahverkehrsbus vier Sitz- (inklusive Fahrerplatz) und ein Stehplatz und in den Nutzfahrzeugen jeweils der Fahrerplatz untersucht. Der auf jedem für die Detailmessungen ausgewählten Sitz- bzw. Stehplätze definierte Messpunktraster besteht aus insgesamt 12 Messpunkten, die den folgenden Körperbereichen eines typischen Erwachsenen zugeordnet werden können:

- Fuß, links
- Fuß, rechts
- Unterschenkel, links
- Unterschenkel, rechts
- Oberschenkel, links
- Oberschenkel, rechts
- Unterleib
- Bauch, links
- Bauch, rechts
- Oberkörper, links
- Oberkörper, rechts
- Kopf

Um eine reproduzierbare Festlegung dieser Messpunkte während der Messungen zu garantieren, wurde ein eigens angefertigtes einfaches Körpermodell (Abbildung 6.1) verwendet, in das entsprechende Vorrichtungen zur definierten Positionierung der Messsonden eingearbeitet sind (Abbildung 6.2).

Um die einzelnen definierten Messpunkte nicht nur Körperregionen eines Erwachsenen zuordnen zu können, sondern auch Kindern, wurden auf dem Körpermodell auch die Umriss eines 2-jährigen und 7-jährigen Kindes abgebildet.



Abbildung 6.1: Aus Hartschaumstoff gefertigtes Körpermodell zur Festlegung der Messpunkte (links: stehend, Mitte und rechts: am Beifahrersitz eines PKWs)

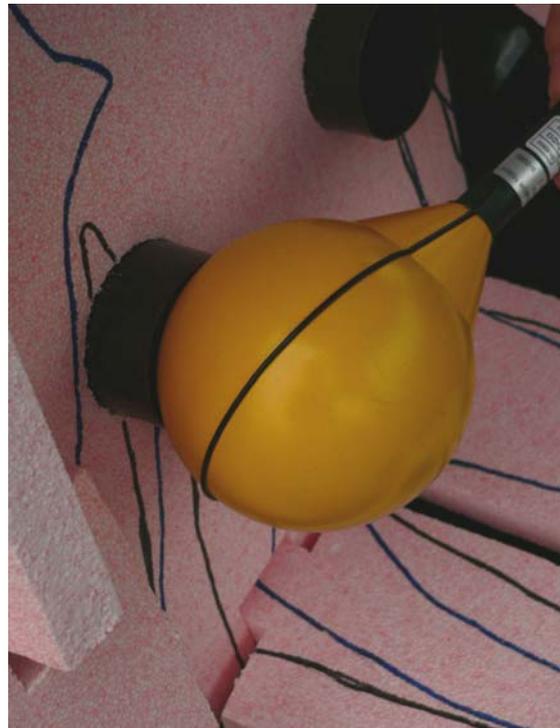


Abbildung 6.2: Eindeutige Definition der Messpositionen durch die in das Körpermodell eingearbeiteten Vorrichtungen zur genauen Platzierung der Messsonden

6.2 Konkret eingesetzte Messtechnik

Wie in Kapitel 4.1 bereits vorgestellt, wurde für alle messtechnischen Untersuchungen das inhouse entwickelte frequenzselektive Messsystem NIFSPEC verwendet. Dieses System besteht aus einem schnellen Analog-Digital-Converter Frontend aus der PXI-Produktfamilie (National Instruments Corporation), das die parallele A/D-Wandlung von insgesamt acht Signaleingängen erlaubt, wobei Abtastraten bis zu 800 kHz möglich sind. Mittels der zugehörigen, ebenfalls inhouse unter LabView (National Instruments Corporation) entwickelten Steuer- und

Aufzeichnungssoftware, können damit die Echtzeit-Analogausgänge von kommerziell erhältlichen Feldsonden flexibel aufgezeichnet und analysiert werden.

Für alle Messungen wurden als Messsignale die Analogausgänge der folgenden isotropen Magnetfeldsonden verwendet:

Frequenzbereich	10 Hz – 400 kHz	DC-500 Hz
Feldmeter	Narda ELT400 BN 2304/01 (S/N B-0068)	Chauvin Arnoux C.A42 (S/N 100365AEK)
Feldsonde	Narda B-Field Sensor 100 cm ² BN2300.90.10 (S/N: B-0080)	Chauvin Arnoux MF05 (S/N 100352AEK)

Tabelle 6.1: Für die Messungen in Kombination mit den NIFSPEC Messsystem verwendete Feldmeter und Feldsonden

Zusätzlich zu den Magnetfeldsonden wurden teilweise (wo grundsätzlich zugänglich und für sinnvoll erachtet) auch Motorströme bzw. Batterieströme mittels einer Stromzange (Modell PR2000, LEM HEME Ltd.) aufgezeichnet, um z.B. die Zeitpunkte des Umschaltens vom Fahr- zum Rekuperationsbetrieb auch ohne Energieflussstatusanzeige zeitlich dokumentieren zu können (Vorzeichenumkehr des Batteriestromes).

Das verwendete Messsystem lässt sich daher schematisch wie in Abbildung 6.3 dargestellt beschreiben.

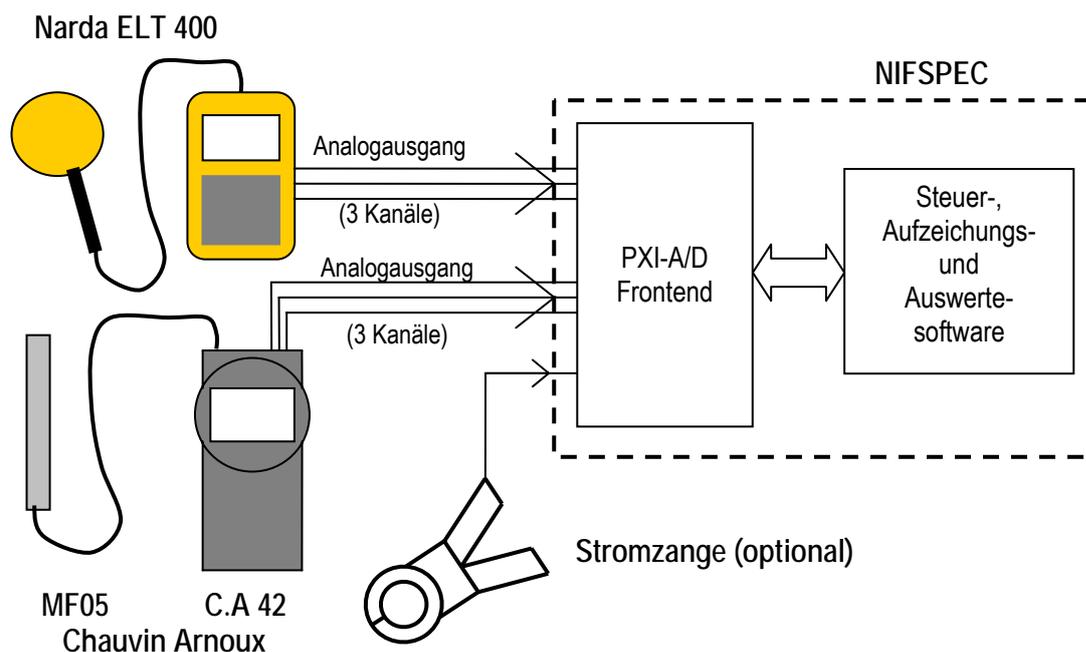


Abbildung 6.3: Schema des verwendeten Messsystems

Grundsätzlich erlaubt das NIFSPEC Messsystem Abtastraten bis zu 800 kHz. Da sich bei allen untersuchten Fahrzeugen im Rahmen von Voruntersuchungen zeigte, dass keine relevanten Magnetfeldimmissionen oberhalb von 100 kHz zu erwarten waren, wurde die Abtastrate für die Signaleingänge auf 200 kHz (Narda ELT 400 und Stromzange) bzw. 10 kHz (Chauvin Arnoux) begrenzt und entsprechende Anti-Aliasing Filter (100 kHz bzw. 5 kHz) wurden vorgeschaltet. Bei jeder Einzelmessung wurde ein Signalausschnitt von einer Sekunde Länge aufgezeichnet. Im Fall von Serienmessungen bzw. Dauermessungen (z.B. im Rahmen von Messfahrten) konnte

mit diesen Einstellungen automatisch ca. alle 2,5 s eine (1 Sekunden lange) Einzelaufzeichnung gestartet und abgespeichert werden.

6.3 Untersuchungsmethoden

Das Hauptziel des gegenständlichen Projektes war die Erhebung von repräsentativen Magnetfeldimmissionen in den Fahrzeugen, die es erlauben, auf typische Expositionsverläufe für die Fahrzeuginsassen in der Praxis zurück zu schließen. Ganz allgemein wird die Höhe der Momentanimmissionen stark von den auftretenden elektrischen Strömen und damit vom gerade vorherrschenden Betriebszustand des Fahrzeuges und Belastungszustand des Elektromotors (Drehzahl und Drehmoment) abhängen. Insbesondere bei modernen Hybridfahrzeugen, bei denen in der Praxis eine vollautomatische Regelung des Zusammenspiels von konventionellem und elektrischem Antriebssystem erfolgt, ist davon auszugehen, dass es zu komplexen zeitlichen Immissionsmustern kommt (vgl. unterschiedliche Fahrmodi bzw. Betriebszustände von Hybridfahrzeugen in Tabelle 2.1 bis Tabelle 2.3). Um möglichst allgemeine Aussagen über die Exposition in unterschiedlichen Fahrzeug-Nutzungsszenarien (z.B. Fahrt im städtischen Verkehr, Autobahnfahrt, Überlandfahrt, Bergfahrt, etc.) machen zu können, wurden in den untersuchten PKWs zunächst Immissionsmessungen auf einem Leistungsprüfstand unter definierten und stationären Fahrzeug-Lastzuständen (Geschwindigkeits/Lastmoment⁵-Paare) durchgeführt. Diese Messungen wurden zunächst durch Immissionsmessungen während definierter Brems- und Beschleunigungsmanöver auf der Straße (außerhalb des öffentlichen Straßenverkehrs) ergänzt, da die Immissionen während Rekuperation (Energierückgewinnung beim Bremsen) auf dem Leistungsprüfstand nicht untersucht werden können. Grund dafür ist, dass der Leistungsprüfstand nur Lastmomente, aber keine Antriebsmomente auf die Achse aufprägen kann. Die Verwendung von Standard-Bremsprüfständen war ebenfalls nicht sinnvoll, da diese üblicherweise maximale Anfangsgeschwindigkeiten von nicht mehr als 50 km/h erlauben und darüber hinaus die während einer realen Nutzbremmung durch die Fahrzeugmasse auftretende Dynamik nicht nachbilden können. Schließlich erfolgten Immissionsmessungen während Messfahrten im Realverkehr. Im Rahmen der Untersuchungen im Hybrid-Nahverkehrsbus und den Nutzfahrzeugen waren keine entsprechenden Leistungsprüfstände verfügbar, so dass in diesen Fällen die Immissionserfassung ausschließlich während repräsentativer und ausführlicher Messfahrten unter realistischen Betriebsbedingungen erfolgte.

6.3.1 Immissionsmessungen am Leistungsprüfstand

Messungen am Leistungsprüfstand unter definierten, stationären Lastbedingungen konnten sowohl für die untersuchten Hybrid-PKWs (Toyota Prius, Honda Civic IMA, Lexus GS450h) als auch für die untersuchten PKWs mit reinem Elektroantrieb (Panda Electric und Doblo Electric) durchgeführt werden.

Für diese Messungen wurde zunächst der in Abbildung 6.4 gezeigte allgemeine Ablauf definiert und konnte mit einer geringfügigen Modifikation auch so realisiert werden. Diese Modifikation wurde durch die autonome und von außen nicht beeinflussbare Regelung der Hybridsysteme notwendig. Da die prinzipiell möglichen unterschiedlichen Betriebszustände der Hybridsysteme nicht beliebig „manuell einschaltbar“ sind, sondern von den aufgeprägten Lastbedingungen und von internen

⁵ Unter Lastmoment wird in diesem Bericht immer das an der Antriebsachse wirkende Lastmoment verstanden

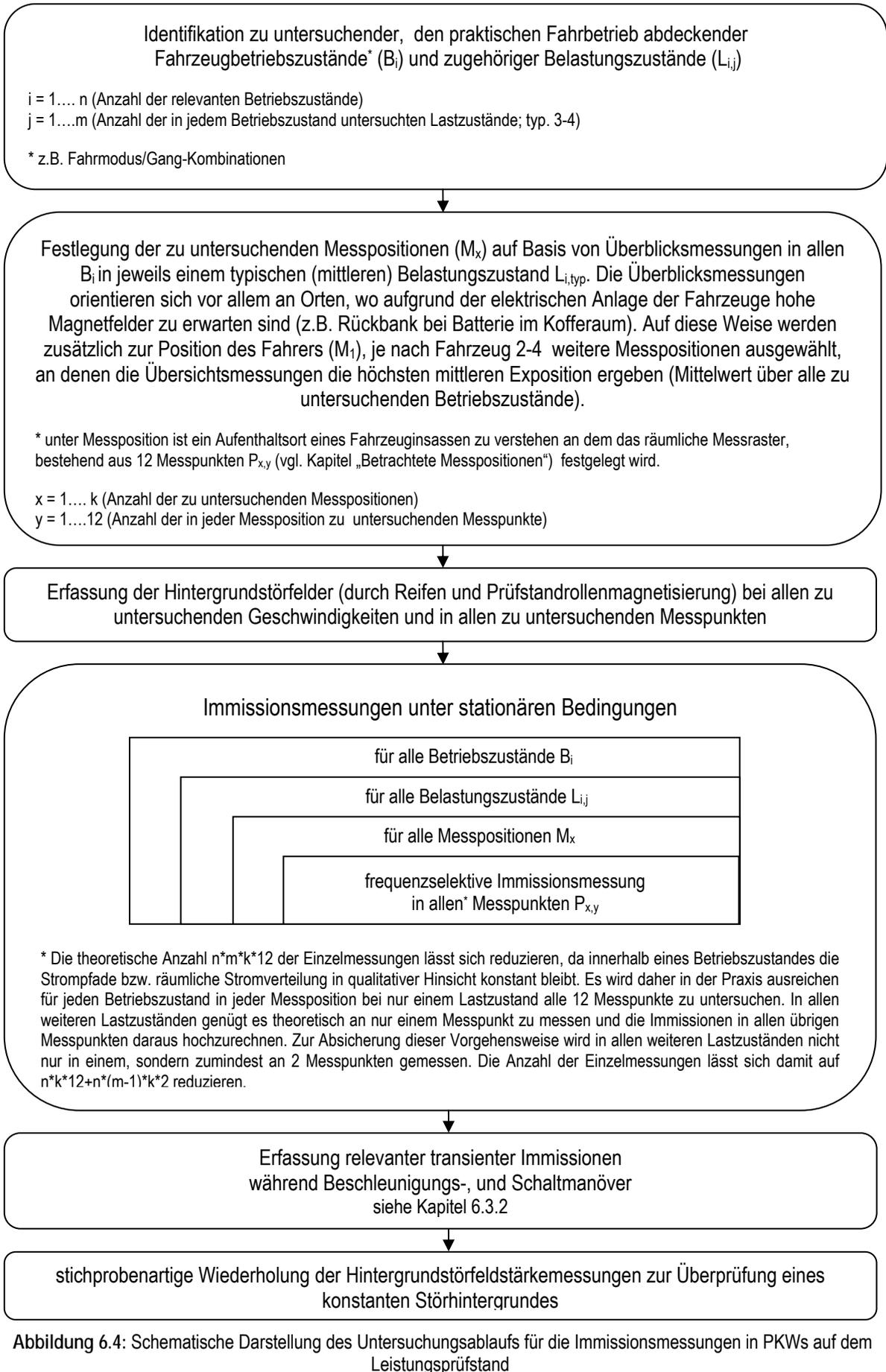


Abbildung 6.4: Schematische Darstellung des Untersuchungsablaufs für die Immissionsmessungen in PKWs auf dem Leistungsprüfstand

Parametern, wie z.B. dem momentanen Ladezustand der Batterie abhängen, musste die ursprünglich angestrebte Vorgangsweise (starres Schema unterschiedlicher Betriebszustände) etwas modifiziert werden. Es wurden dazu, wie geplant, Lastmoment und Geschwindigkeitspaare vorgegeben und jeweils während annähernd stationären Verhältnissen die räumliche Verteilung der Magnetfeldimmissionen an den betrachteten Sitzplätzen gemessen. Durch die Vorgabe von Lastmoment und Geschwindigkeit stellte sich (automatisch durch die Hybridregelung) zwar in den meisten Fällen, jedoch nicht zwangsläufig, ein für das jeweilige Lastmoment/Geschwindigkeitspaar „typischer“ Betriebsmodus ein. „Nicht zwangsläufig“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass beispielsweise eine bereits relativ stark entladene Batterie dazu führt, dass kein „Boost“ Modus mehr zur Verfügung steht, der sich unter normalen Verhältnissen (ausreichender Batterieladezustand) einstellen würde⁶. Die sich während den einzelnen Messungen jeweils einstellenden Betriebsmodi wurden mittels Kameras (Abfilmen des Energiefluss-Statusdisplays der Fahrzeuge) lückenlos dokumentiert, so dass schließlich vereinzelt „fehlende“ Konstellationen gezielt nachgeholt werden konnten. Zeigten sich beispielsweise trotz konstantem Geschwindigkeits/Lastmoment-Paar variierende Betriebsmodi (z.B. weil gegen Ende der Messzyklus die Batterie bereits zu stark entladen war), so wurden die Messungen unterbrochen, um gezielt die Batterie wieder in einen ausreichenden Ladezustand zu versetzen (durch Fahren ohne bzw. bei geringer Last mit entsprechend hoher Geschwindigkeit stellt sich automatisch ein Betriebsmodus ein, bei dem die Batterie geladen wird). Sobald wieder ein ausreichender Batterieladezustand gegeben war, wurden die Messungen entsprechend fortgesetzt. Messungen der Feldverteilung während dieser Batterieladephasen wurden ebenfalls durchgeführt. Abbildung 6.5 und Abbildung 6.6 zeigen Bilder von den Messungen am Toyota Prius am Leistungsprüfstand.



Abbildung 6.5: Toyota Prius auf dem Leistungsprüfstand

⁶ Diese Situation ist in der Praxis, unter üblichen Fahrbedingungen, sehr unwahrscheinlich. Sie war vielmehr eine Folge des verwendeten Prüfablaufs am Leistungsprüfstand, bei dem das elektrische Antriebssystem extrem stark gefordert wurde, ohne dass zwischen den einzelnen Lastzuständen längere Regenerationsphasen für die Batterie zur Verfügung standen, die im praktischen Fahrbetrieb immer vorhanden sind.



Abbildung 6.6: Toyota Prius auf dem Leistungsprüfstand

6.3.2 Messfahrten mit Hybrid- und Elektro-PKWs

Mit den Messungen auf dem Leistungsprüfstand konnten bei den Hybrid- und Elektro-PKWs die Magnetfeldimmissionen während gut definierter Geschwindigkeits/Lastverhältnisse untersucht werden. Jedoch ist dabei beispielsweise eine realistische Erfassung der Immissionsverhältnisse während Brems- und Beschleunigungsvorgängen, aufgrund der fehlenden Fahrzeugdynamik, nicht möglich (Fahrzeugmasse bewegt sich am Prüfstand nicht). Aus diesem Grund wurden mit allen untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs zusätzlich zu den Messungen am Leistungsprüfstand, Messfahrten im Straßenverkehr⁷ durchgeführt. Während dieser Messfahrten wurde das gesamte NIFSPEC-Messsystem gemeinsam mit einer dafür ausgelegten autarken Stromversorgung, bestehend aus einem 12 V Bleiakкумуляtor und einem Wechselrichter, im Kofferraum des untersuchten Fahrzeugs untergebracht (Abbildung 6.7). Die über Koaxialkabel mit dem NIFSPEC-System verbundenen Magnetfeldsonden wurden an den jeweils untersuchten Messpositionen platziert und es wurden während der gesamten Messfahrt vollautomatisch (ca. alle 2,5 s) alle relevanten Messsignale (Samplelänge 1 s) aufgezeichnet.

Diese Messfahrten dienen einerseits dazu, die Messdaten vom Leistungsprüfstand hinsichtlich realistischer Verhältnisse während Brems- und Beschleunigungsmanöver zu vervollständigen und andererseits dazu, die aus den Messungen unter definierten Bedingungen abgeleiteten Immissions-Berechnungsmodelle (siehe Kapitel 6.6) zu verifizieren.

Der durch die Stromversorgung für das Messsystem (vor allem durch den Wechselrichter) zwangsläufig entstehende magnetische Störhintergrund wurde jeweils durch Messungen bei ausgeschaltetem Fahrzeug in allen während den Messfahrten untersuchten Messpositionen erfasst und bei der Ergebnisauswertung entsprechend berücksichtigt (siehe Kapitel 6.4.2)

⁷ Extreme Brems- und Beschleunigungsmanöver wurden aus Sicherheitsgründen teilweise außerhalb des öffentlichen Straßenverkehrs durchgeführt

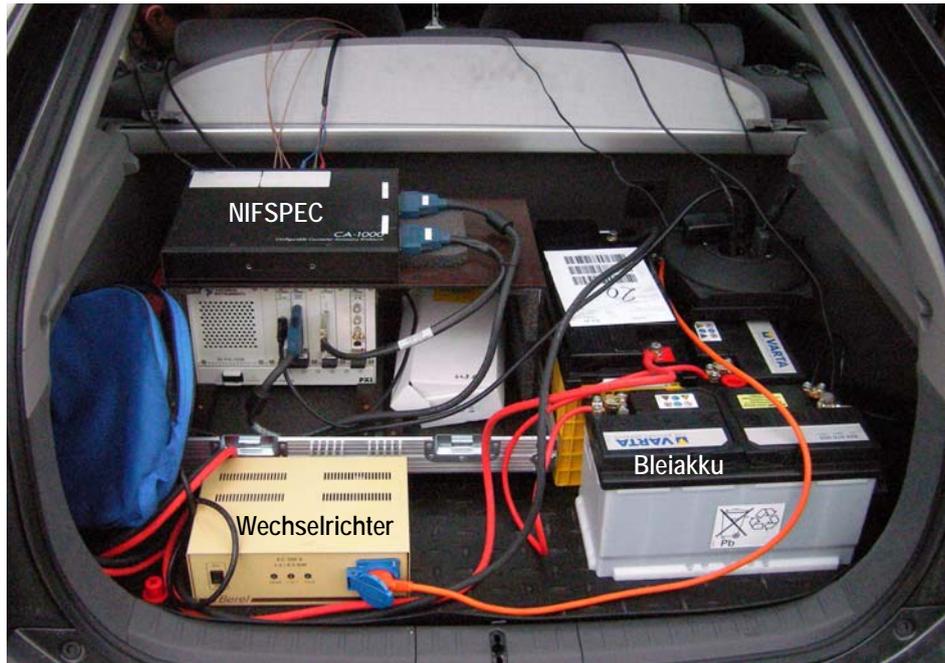


Abbildung 6.7: Für die Messfahrten im Kofferraum untergebrachtes NIFSPEC-System inkl. Stromversorgung

Um so weit wie möglich die veränderlichen Umgebungsbedingungen und Fahrzeugparameter während der Messfahrten zu dokumentieren, wurde jeweils mit mehreren Kameras das Sichtfeld des Fahrers und relevante Anzeigen des Armaturenbretts (z.B. Energiemodusanzeige bei Hybridfahrzeugen) abgefilmt. Die Momentangeschwindigkeiten während der Messfahrten konnten mit Hilfe eines GPS-Datenloggers (Samplingrate 1 s) bzw. durch das Abfilmen des Tachometers dokumentiert werden. Die filmische Dokumentation des Fahrer-Sichtfeldes war insofern notwendig, als damit die Umgebungsbedingungen hinsichtlich potenzieller Hintergrundimmissionen (z.B. Durchfahrt unter Hochspannungsleitungen) dokumentiert und bei der Datenauswertung berücksichtigt werden konnten.

Abgesehen von den separat durchgeführten Messungen während Brems- und Beschleunigungsmanövern wurde zwecks Vergleichbarkeit der maximalen Magnetfeldimmissionen mit allen untersuchten PKWs die gleiche, ca. 60 km lange Teststrecke im Großraum Wien gefahren und während dieser Fahrt die Magnetfeldimmissionen kontinuierlich in jener Messposition erfasst, die sich auf Basis der Untersuchungen am Leistungsprüfstand als die mit den (relativ zum Referenzwert) größten Immissionen herausstellte. Die genannte Teststrecke (Abbildung 6.8) enthält sowohl Stadt-, Autobahn- und Überlandstraßenverhältnisse, sowie Bergauf und Bergabstrecken (bis zu ca. 10% Anstieg bzw. Gefälle).

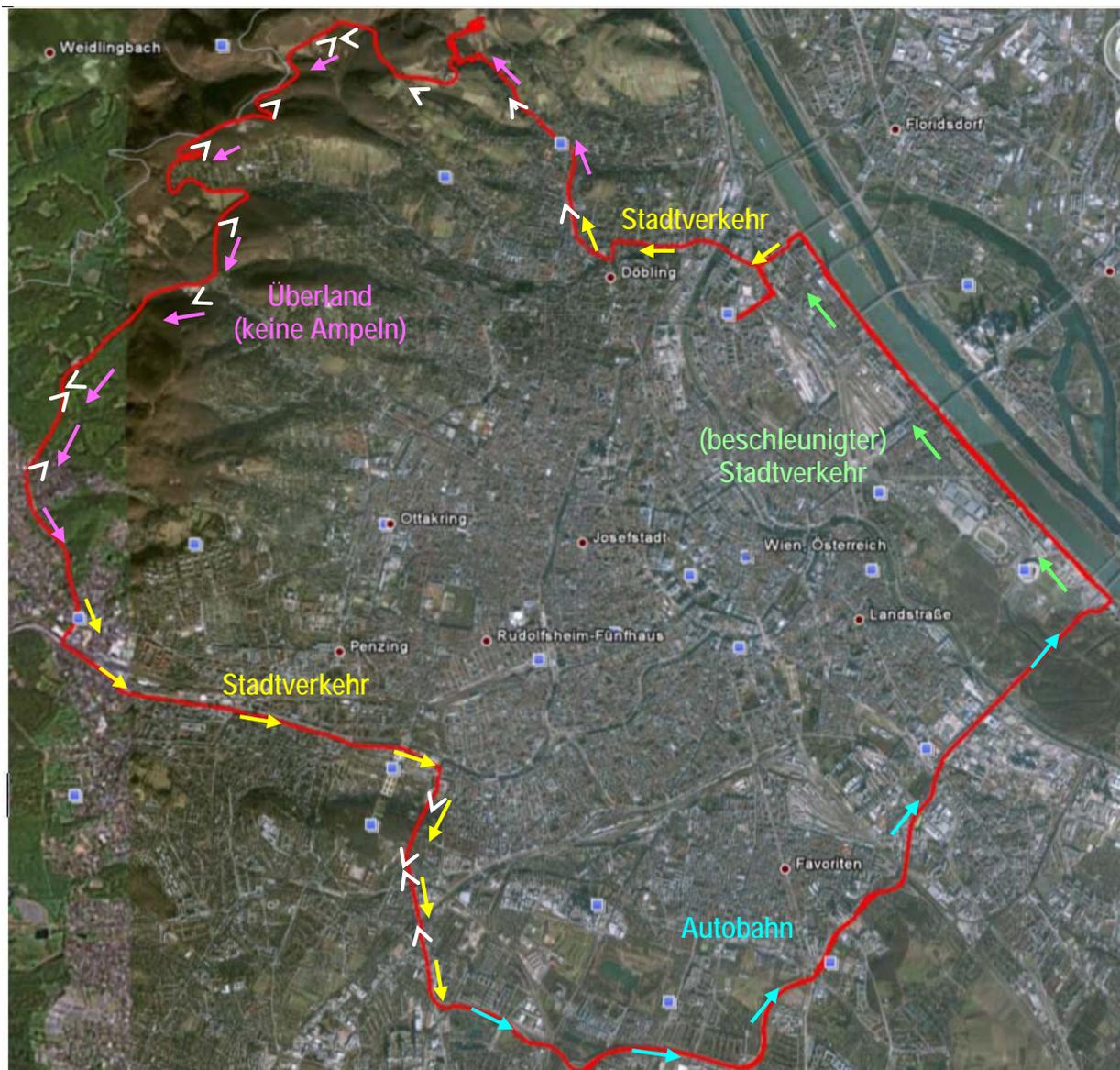


Abbildung 6.8: Teststrecke für die Messfahrten mit den Hybrid- und Elektro-PKWs. Pfeile neben dem Routenverlauf kennzeichnen die Art des Verkehrs, weiße Pfeilspitzen auf der Route kennzeichnen die Steigung der Strecke im Sinne eines Anstiegs in Pfeilrichtung

6.3.3 Messfahrten mit Hybridbus- und Nutzfahrzeugen

Für die Erfassung der Magnetfeldimmissionen in einem Hybrid-Linienbus und in den Hybrid- und Elektronutzfahrzeugen waren keine entsprechenden Leistungsprüfstände verfügbar. Die Untersuchungen wurden deshalb im realen Fahrbetrieb, unter möglichst realistischen Bedingungen durchgeführt. Wie auch im Fall der Messfahrten mit den Hybrid- und Elektro-PKWs wurde das verwendete Messsystem mittels einer autarken Stromversorgung betrieben und während der Messfahrt vollautomatisch die relevanten Messdaten aufgezeichnet. Ebenso erfolgte, wie in Kapitel 6.3.2 beschrieben, jeweils eine lückenlose filmische Dokumentation der wichtigsten Umgebungsdaten und der Fahrzeuggeschwindigkeit.

Der durch die Stromversorgung für das Messsystem (vor allem durch den Wechselrichter) zwangsläufig entstehende magnetische Störhintergrund wurde jeweils durch Messungen bei ausgeschaltetem Fahrzeug in allen während den

Messfahrten untersuchten Messpositionen erfasst und bei der Ergebnisauswertung entsprechend berücksichtigt (siehe Kapitel 6.4.2).

Eine detaillierte Beschreibung der jeweils gefahrenen Teststrecke findet sich in den jeweiligen Kapiteln mit den Messergebnissen.

6.4 Messdatenauswertung

Während aller Messungen wurde, unter den jeweils definierten Bedingungen, der Zeitverlauf der Messgröße (magnetische Flussdichte) in den Frequenzbereichen 0 Hz - 500 Hz⁸ und 10 Hz - 100 kHz in Form von jeweils drei Einzelsignalen (entsprechend den drei orthogonalen räumlichen Komponenten der Messgröße) aufgezeichnet. Auf Basis dieser Aufzeichnungen konnte einerseits der Effektivwert der magnetischen Ersatzflussdichte (gemittelt über 1 s) berechnet und andererseits nach Fast Fourier Transformation (FFT) eine spektrale Analyse der Magnetfeldimmissionen durchgeführt werden.

6.4.1 Strahlenschutztechnische Bewertung der Messergebnisse

Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der in [1] von ICNIRP festgelegten Referenzwerte für die magnetische Flussdichte, ist eine spektrale Analyse der Immissionen notwendig, um die Gesamtimmission im Verhältnis zum Referenzwert quantifizieren zu können. In [1] wird für die Beurteilung der Gesamtimmission bei Exposition gegenüber mehreren Frequenzkomponenten empfohlen, die einzelnen Spektralanteile durch den jeweils zugehörigen Referenzwert zu dividieren und die sich daraus ergebenden Verhältniszahlen aller Einzelspektralanteile zu addieren. Solange diese Summe kleiner oder gleich 1 ist, kann davon ausgegangen werden, dass in der betrachteten Expositionssituation hinsichtlich der spektralen Gesamtimmission keine Überschreitung der Referenzwerte vorliegt und daher auch von der Unbedenklichkeit im Sinne der festgelegten Basiswerte auszugehen ist. Die einzelnen Spektralanteile werden bei einfacher Auslegung der oben genannten Prozedur jeweils als Effektivwerte der Ersatzflussdichten bzw. Ersatzfeldstärken angesetzt, d.h., Phasenbeziehungen der einzelnen Spektralkomponenten untereinander bleiben unberücksichtigt, was dieser Vorgehensweise zwangsläufig einen sehr konservativen Charakter aufprägt. In der Praxis führt dies vor allem bei Expositionen gegenüber komplexen nichtsinusförmigen Zeitverläufen der Immissionen dazu, dass Expositionssituationen teilweise stark überschätzt werden. Aus diesem Grund wurde in [12] ein Verfahren definiert, mit dem die Phasenbeziehung zwischen den Einzelspektralkomponenten in vereinfachter, gleichzeitig aber immer noch konservativer Form bei der Beurteilung der Gesamtimmission berücksichtigt wird und damit die oben erwähnten systematischen Überschätzungen reduziert werden können. Dieses Verfahren lässt sich nach [12] alternativ im Zeitbereich (durch entsprechende Filterung des Zeitsignals) oder im Frequenzbereich auf Basis des Amplituden- und Phasenspektrums implementieren. Im Rahmen der vorliegenden Messdatenauswertung wurde die letztgenannte Methode gewählt, im Folgenden als „phasenrichtige Bewertung“ oder „phasenrichtige Summierung“ bezeichnet. Sofern nicht explizit anders angemerkt, handelt es sich daher bei allen in diesem Bericht im Verhältnis zu Referenzwerten angeführten Immissionsangaben (in % vom Referenzwert) immer um Ergebnisse von phasenrichtigen Bewertungen bzw. phasenrichtiger Summierung.

⁸ Der Nutzfrequenzbereich der während der Messungen eingesetzten Magnetfeldsonde des Chauvin Arnoux Messsystems beträgt 0-500 Hz.

6.4.2 Berücksichtigung bzw. Eliminierung von Hintergrundimmissionen

Da bei den durchgeführten Messungen in der Praxis Hintergrundstörfelder nur in eingeschränktem Maß eliminiert werden konnten, wurde die folgende Vorgangsweise gewählt, um diese Störanteile bestmöglich aus den Messergebnissen zu eliminieren. Als Hintergrundimmissionen werden dabei alle vom Mess-System erfassten, nicht von den untersuchten Fahrzeugen verursachten Magnetfelder im untersuchten Frequenzbereich verstanden. Bei den Messungen am Leistungsprüfstand war dies vor allem das 50 Hz Hintergrundfeld, verursacht durch das Energieversorgungsnetz. Bei den Messfahrten war vor allem die Stromversorgung des Mess-Systems Verursacher von Hintergrundstörfeldern, die vor allem bei kleineren Fahrzeugen deutlich merkbar waren, da hier eine räumliche Trennung der Stromversorgung von den Messpositionen naturgemäß nur eingeschränkt möglich war. Abbildung 6.9 zeigt als Beispiel einen typischen, von den Komponenten der Stromversorgung für das Mess-System verursachten Störhintergrund während der Messfahrten. Da die Spektralanteile des Störhintergrundes teilweise in Frequenzbereichen liegen, in denen die Referenzwerte relativ klein sind, war vor allem in Messpositionen mit geringen von den Antriebssystemen verursachten Immissionen der Anteil der Hintergrundimmissionen an der Gesamtimmission (relativ zum Referenzwert) teilweise beträchtlich und in Extremfällen sogar größer als der Immissionsanteil zufolge der Antriebssysteme.

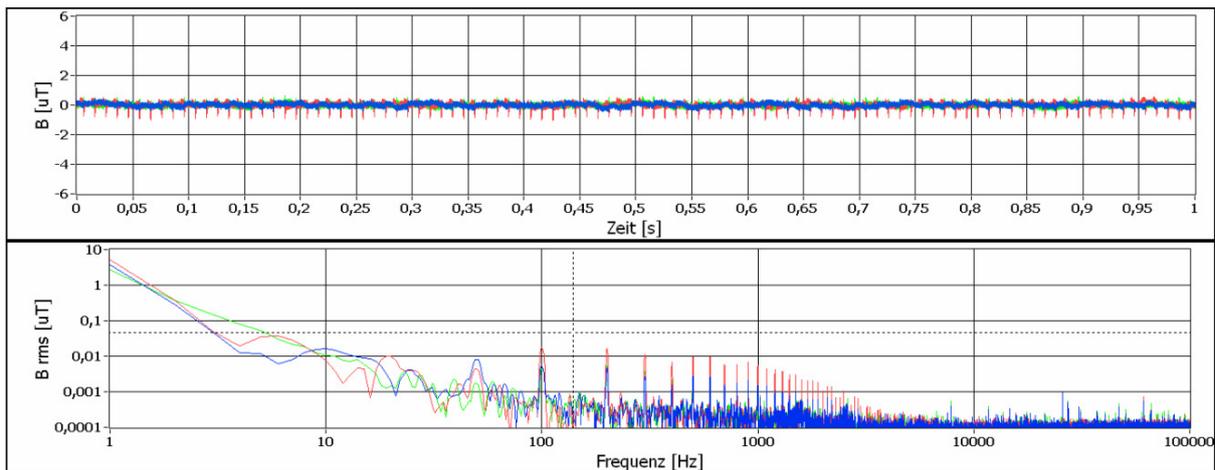


Abbildung 6.9: Typischer Störhintergrund, verursacht durch Komponenten der Stromversorgung für das Mess-System während der Messfahrten in den Fahrzeugen. Oben: Signal im Zeitbereich, unten: Spektrum des Störhintergrundes

Um dieses Problem zu lösen, wurden vor Beginn und nach Abschluss der Untersuchungen an allen untersuchten Messpunkten in den Fahrzeugen Hintergrundmessungen bei komplett abgeschaltetem Fahrzeug und vollständig installiertem Mess-System (bei Messfahrten inklusive Stromversorgung) durchgeführt. Die dabei aufgezeichneten Hintergrundimmissionen $B_{\text{rel},H}$ wurden bei der Messdatenauswertung gemäß Gleichung 6.1 vom Gesamtimmersionsmessergebnis $B_{\text{rel},H+A}$ subtrahiert, um auf den gesuchten, vom Antriebssystem verursachten Immissionsanteil $B_{\text{rel},A}$ zu kommen.

$$B_{\text{rel},A} = B_{\text{rel},H+A} - B_{\text{rel},H} \quad (6.1)$$

Die Indizes „rel“ in Gleichung (6.1) bedeuten, dass es sich bei den Termen jeweils um die im gesamten betrachteten Frequenzbereich phasenrichtig bewertete Immission bezogen auf den Referenzwert handelt. Etwaige Differenzen der Hintergrundimmissionen zwischen dem Messzeitpunkt vor und nach den

Untersuchungen werden als Beitrag zur Gesamt-Messunsicherheit betrachtet (siehe Kapitel 6.5).

Hinsichtlich der von den Fahrzeugen selbst erzeugten, jedoch nicht unmittelbar vom Antriebssystem stammenden Magnetfelder (z.B. Lichtanlage, Heizung, Ventilator etc.), wurde während aller Messungen versucht, diese Störfelder so gering als möglich zu halten, indem alle manuell beeinflussbaren elektrischen Verbraucher während der Messungen abgeschaltet blieben.

Weitere, weder vom Fahrzeug noch von der Stromversorgung des Mess-Systems stammende und damit a priori nicht kontrollierbare Hintergrundimmissionen traten naturgemäß während der Messfahrten im Realverkehr auf, was sich in einer etwas höheren Messunsicherheit der Daten aus den Messfahrten niederschlägt (siehe Kapitel 6.5). Besonders markante Störer konnten jedoch auf Basis der während aller Messfahrten immer mitgeführten Videoaufzeichnungen im Rahmen der Messdatenauswertung identifiziert werden (z.B. Annäherungen an sichtbare Energieversorgungsleitungen oder elektrische Eisenbahnanlagen etc.).

6.4.3 Problematik der Reifenmagnetisierung

In der wissenschaftlichen Literatur (z.B. [4]) ist das Phänomen niederfrequenter Magnetfeldexpositionen in Fahrzeugen aufgrund magnetisierter Reifen dokumentiert. Ursache dafür ist eine eventuell vorhandene Vormagnetisierung des Stahlgürtels im Reifen, die zufällig oder z.B. noch während des Produktionsprozesses der Reifen entstanden sein kann. Während der Fahrt stellt der Reifen daher aus physikalischer Sicht einen rotierenden Permanentmagneten dar, der magnetische Wechselfelder mit einer Grundwellenfrequenz entsprechend der Reifendrehzahl erzeugt. Diese magnetischen Wechselfelder können auch im Fahrgastraum noch beträchtliche Flussdichten im Bereich von mehreren μT erreichen [4] und stellen für die hier durchzuführenden Messungen eine potenzielle Störquelle dar, weil sie nicht ursächlich den alternativen Antriebskonzepten zuordenbar sind. Die in [4] beschriebene Methode der Entmagnetisierung der Reifen ist bei den Messungen am Leistungsprüfstand nicht ausreichend, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass auch die Stahlrollen des Leistungsprüfstandes, auf denen die Antriebsachse des Fahrzeuges läuft, magnetisiert sind.

In der Tat sind bei Vorversuchen mit einem konventionellen PKW und bei den Messungen mit den Hybrid- und Elektro-PKW's teilweise merkbare, eindeutig der Reifenmagnetisierung zuordenbare Magnetfeldanteile beobachtet worden. Die Frequenz f_0 (in Hz) der Grundwelle dieser Magnetfeldanteile kann einfach aus der Fahrzeuggeschwindigkeit v (in m/s) und dem Reifendurchmesser d (in m) gemäß

$$f_0 = \frac{v}{\pi \cdot d} \quad (6.2)$$

berechnet werden und liegt bei PKW's typischer Weise im Frequenzbereich bis zu maximal ca. 23 Hz bei 160 km/h (Tabelle 6.2).

Reifendurchmesser 62 cm	
v [km/h]	Frequenz der Grundwelle f_0
15	2,1 Hz
30	4,3 Hz
50	7,1 Hz
100	14,2 Hz
160	22,8 Hz

Tabelle 6.2: Frequenzen der Grundwelle vom Magnetfeldimmissionen zufolge von Reifenmagnetisierung für einen typischen PKW-Reifendurchmesser von 62 cm

Das Problem der Magnetisierung der Reifen und/oder der Stahlrollen des Prüfstandes musste in jedem Fall bei den Immissionsmessungen in den Fahrzeugen gesondert behandelt werden, da der Magnetisierungsgrad von Reifen und Prüfstandrollen individuell verschieden erwartet werden musste und a priori nicht feststand. Im Zuge der Immissionsmessungen wurde daher vorab der von diesen Störquellen stammende Immissionsanteil in den betrachteten Messpunkten geeignet erfasst und von den eigentlichen Immissionsmessergebnissen subtrahiert. Die Erfassung dieses Störanteils konnte, wie im Zuge von Voruntersuchungen mit einem konventionellen Fahrzeug auf dem Leistungsprüfstand getestet, durch folgende Vorgehensweise erfolgen:

1. Prüfstand abschalten (kein Belastungsmoment an den Rollen)
2. Beschleunigen des Fahrzeuges auf Maximalgeschwindigkeit
3. Gang heraus, Fahrzeugmotor und- zündung abschalten
4. Wiederholte Messung der Stör-Immissionsanteile an allen interessierenden Messpunkten im Fahrzeug bis zum Stillstand der Räder

Auf Basis dieses Vorgehens konnte für jedes zu untersuchende Fahrzeug (vor Beginn der eigentlichen Immissionsmessungen) der (hinsichtlich seiner Frequenz) von der Geschwindigkeit abhängige Stör-Immissionsanteil zufolge Reifen- und/oder Stahlrollenmagnetisierung ermittelt werden. Abbildung 6.10 zeigt Ergebnisse von gemäß obigem Verfahren durchgeführten Voruntersuchungen im Fahrzeuginneren (Fußraum des Beifahrers) mit einem konventionellen Fahrzeug.

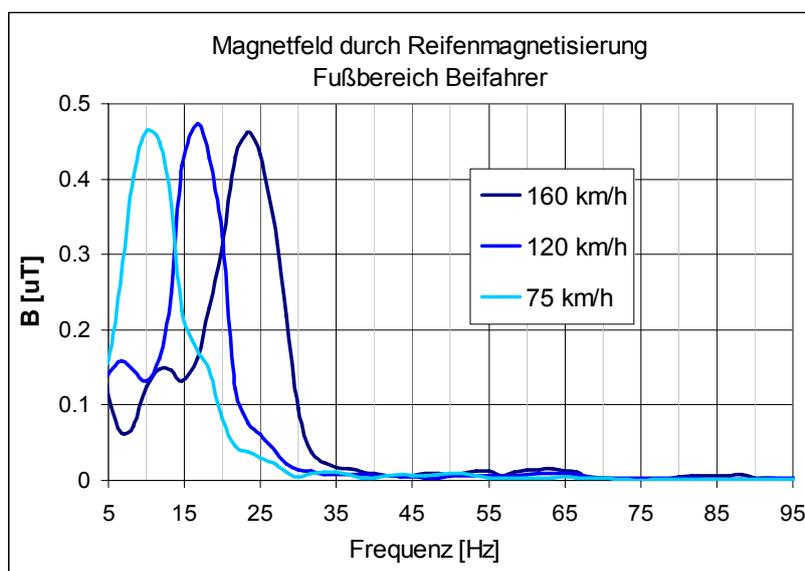


Abbildung 6.10: Im Fahrzeuginneren (Fußbereich des Beifahrers) gemessene Immissionsanteile zufolge der Reifen- und/oder Prüfstandrollenmagnetisierung

Im Vergleich dazu zeigt Abbildung 6.11 die unter den gleichen Versuchsbedingungen gemessenen Immissionen außerhalb des Fahrzeugs, nahe den Prüfstandrollen (Beifahrerseite, vorne).

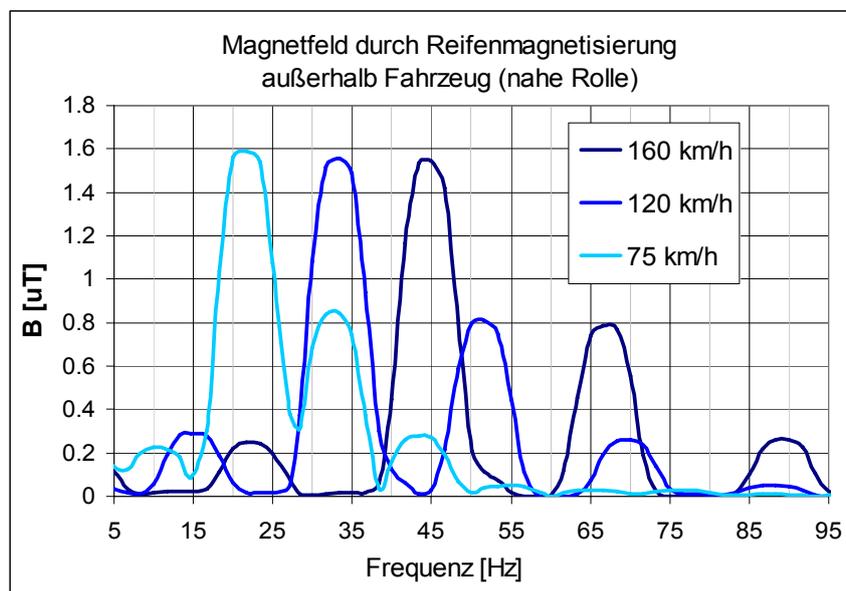


Abbildung 6.11: Außerhalb des Fahrzeuges (nahe der Prüfstandrollen) gemessene Immissionsanteile zufolge der Reifen- und/oder Prüfstandrollenmagnetisierung

Aus den in Abbildung 6.10 und Abbildung 6.11 dargestellten Messergebnissen konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Die Spektralanteile zufolge der Magnetisierung der Prüfstandrollen liegen (aufgrund des im Vergleich zu den Reifen kleineren Rollendurchmessers) bei entsprechend höheren Frequenzen als die Spektralanteile zufolge der Reifenmagnetisierung.
2. Der durch die Prüfstandrollen verursachte Anteil tritt im Fahrzeuginneren nur in sehr abgeschwächter Form zutage, da die Distanz des Fahrzeuginneren zu den Rollen wesentlich größer ist als zu den Reifen.
3. Die Erfassung der Störanteile zufolge Reifen- und/oder Prüfstandrollenmagnetisierung kann nach dem oben angeführten Verfahren zuverlässig erfolgen. Aus Messungen (in allen untersuchten Messpunkten) nach dem oben definierten Verfahren kann der Störanteil zufolge Reifen- und/oder Prüfstandrollenmagnetisierung für jeden Messpunkt als Funktion der Geschwindigkeit ermittelt und die im Zuge der eigentlichen Immissionsmessungen erfassten Messergebnisse entsprechend korrigiert werden. Um sicherzustellen, dass der Magnetisierungszustand von Reifen und Rollen und damit die Störanteile während der eigentlichen Immissionsmessungen konstant bleiben, wurden während dieser Immissionsmessungen die oben beschriebenen Störanteilmessungen regelmäßig stichprobenartig (an einem Messpunkt) wiederholt.

Die von einer Magnetisierung der Reifen stammenden Magnetfeldanteile sind naturgemäß individuell von Reifen zu Reifen unterschiedlich und treten, je nach relativer Lage der Messposition zum Reifen stark unterschiedlich zutage. In den Messergebnissen in relevantem Ausmaß feststellbar waren derartige Magnetfeldanteile nur in Messpositionen, die nahe den Reifen liegen (z.B. in PKWs im Fuß-/Unterschenkelbereich von Fahrer- und Beifahrer, sowie im Gesäß- und

Unterleibsbereich auf der hinteren Sitzreihe). Zudem ist anzumerken, dass etwaige Oberwellen dieser Magnetfeldanteile mit steigender Frequenz stark abnehmen.

Wie groß der von den Reifen verursachte Immissionsanteil in den Messpositionen jeweils ist, wurde mit der oben beschriebenen Methode im Rahmen von Vorversuchen für alle untersuchten PKWs und alle betrachteten Messpositionen erhoben. Die Ergebnisse dieser Messungen zeigten je nach Fahrzeug, Reifen und betrachteter Messposition Magnetfeldanteile im Bereich bis zu maximal 2 μT .

Bei der strahlenschutztechnischen Beurteilung der Messeergebnisse, d.h., bei der Ermittlung der Beurteilungsgröße in Form der phasenrichtig summierten, auf die Referenzwerte bezogenen Spektralanteile, wurden etwaige Immissionsanteile zufolge der Reifenmagnetisierung aus den Messdaten eliminiert. Dies erfolgte sinngemäß identisch wie die Eliminierung des Störhintergrundes. D.h., es wurde für die in den Spektren identifizierbaren und eindeutig der Reifenmagnetisierung zuordenbaren, auf die Referenzwerte bezogenen Einzelspektralanteile, die phasenrichtige Summe gebildet und von der entsprechenden Bewertungsgröße der Gesamtimmission (inkl. Reifenmagnetisierung) subtrahiert.

Naturgemäß ergibt sich bei dieser Korrektur der Roh-Messdaten, aufgrund nicht-idealer Bedingungen in der Praxis (z.B. unvermeidliche Variationen der Fahrgeschwindigkeit), allerdings eine gewisse zusätzliche Unsicherheit der Beurteilungsgröße. Da dieser Beitrag zur Gesamtunsicherheit jedoch, gemäß obigen Ausführungen, stark individuell vom Fahrzeug bzw. den Reifen, der Messposition und der Fahrgeschwindigkeit abhängt, wird er im Zuge der Ergebnisdarstellung in Kapitel 7 separat für die jeweiligen Verhältnisse (Fahrzeuge) angegeben und ist nicht Teil der in Kapitel 6.5 zusammengefassten allgemeinen Gesamt-Unsicherheitsanalyse.

6.4.4 Hintergrundfelder des Leistungsprüfstandes

Als weitere potenzielle Störquelle während der Magnetfeldmessungen in den Fahrzeugen sind die vom aktiven Leistungsprüfstand erzeugten Magnetfelder anzusehen, da die Aufprägung der Belastungsmomente auf die Stahlrollen auf elektrischem Weg realisiert ist. Zur Klärung der Frage, ob diese Magnetfelder relevante Störfeldstärken im Fahrzeuginneren bewirken können, wurden Untersuchungen mit einem konventionellem (Diesel-) Fahrzeug auf dem Leistungsprüfstand bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Belastungszuständen durchgeführt. Alle nicht notwendigen elektrischen Verbraucher im Fahrzeug (Licht, Heizung, Klimaanlage, Radio, usw.) waren während der gesamten Messdauer ausgeschaltet. Gemessen wurde jeweils in einem Messpunkt im Fahrzeuginneren (Fußraum, möglichst nahe zu den Rädern, d.h., möglichst nahe zu den Prüfstandrollen), sowie außerhalb des Fahrzeuges, direkt oberhalb der nächstliegenden Rollenbremse (< 10 cm Distanz zum Gehäuse der Rollenbremse). Aus den in Abbildung 6.12 dargestellten, repräsentativen Messergebnissen ist zu erkennen, dass die im Fahrzeuginneren auftretenden Immissionen bezüglich der spektralen Zusammensetzung nicht mit jenen nahe der Rollenbremse gemessenen korreliert sind, was darauf hindeutet, dass die von der Rollenbremse verursachten Magnetfelder im Fahrzeuginneren keine relevante Größenordnung mehr besitzen.

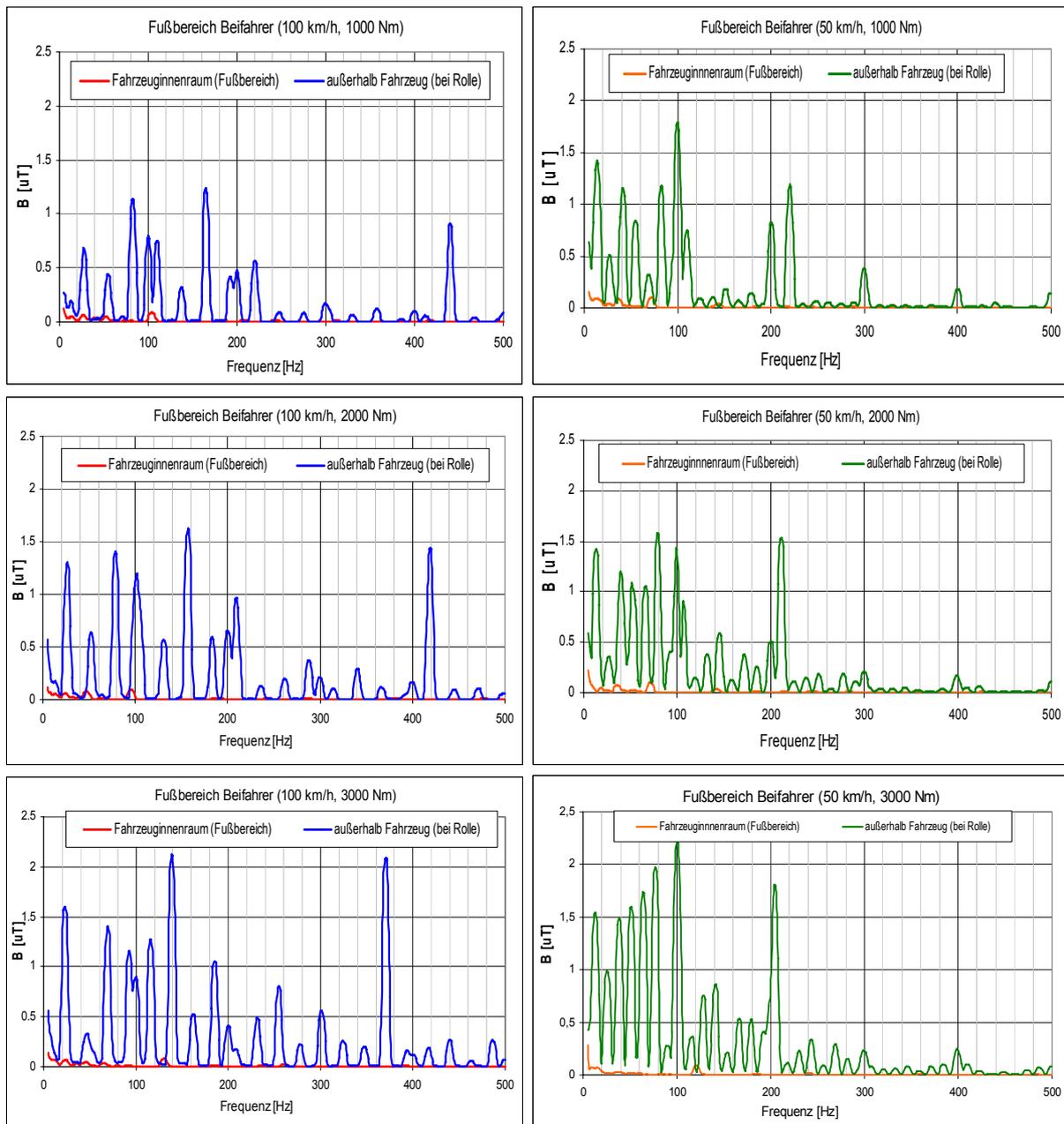


Abbildung 6.12: Messergebnisse der Untersuchungen zum möglichen Störeinfluss der Rollenbremsen auf die Magnetfeldimmissionen im Fahrzeuginneren

Dies wird auch durch den Vergleich der spektralen Gesamtmission in den beiden untersuchten Messpunkten in Abhängigkeit vom Belastungsmoment bestätigt (Abbildung 6.13). Während die nahe der Rollenbremse gemessene Gesamtmission erwartungsgemäß näherungsweise linear mit dem aufgeprägtem Belastungsmoment steigt, bleibt die Immission im Fahrzeuginneren unabhängig vom Belastungsmoment im Bereich von ca. $0,2 \mu\text{T}$ (verursacht durch Fahrzeugelektronik und Reifenmagnetisierung). Unter der Annahme eines relevanten magnetischen Störeinflusses der Rollenbremsen im Fahrzeuginneren, müssten auch dort die Immissionen einen Zusammenhang mit dem Belastungsmoment aufweisen.

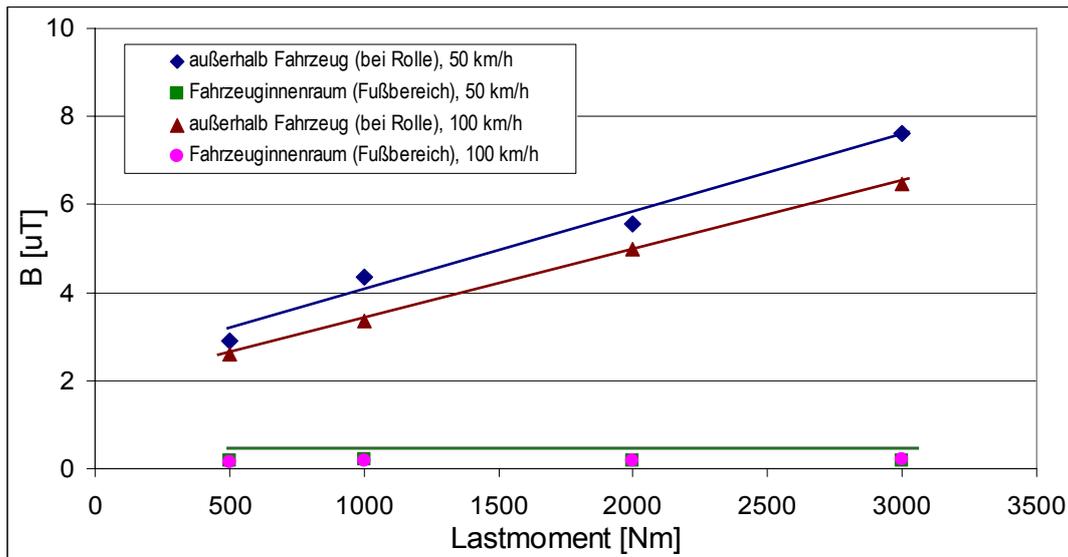


Abbildung 6.13: Effektivwert im Fahrzeuginnenen und nahe der Rollenbremsen in Abhängigkeit des Belastungsmoments

Zusammenfassend erwiesen sich daher nur die Magnetfelder, verursacht durch die Rollenbremsen des Leistungsprüfstandes im Fahrzeuginnenen als vernachlässigbar.

6.4.5 Behandlung und Beurteilung transients Vorgänge

Aufgrund dynamischer Last- und Geschwindigkeitsänderungen im Realbetrieb von Fahrzeugen (und während der Messfahrten), muss der Zeitverlauf der von den elektrischen Antriebssystemen verursachten Magnetfeldimmissionen als nicht stationär erwartet werden. Dies ist zumindest dann zu erwarten, wenn man Zeitskalen mit Längen von größer ca. 1 Sekunde betrachtet. Die Referenzwerte nach ICNIRP [1] sind grundsätzlich als Effektivwerte definiert. Da im Frequenzbereich bis 100 kHz keine Mittelungszeit für die Effektivwertbildung angegeben wird, sind die Referenzwerte grundsätzlich im Sinne stationärer Effektivwerte aufzufassen. Bei transienten oder kurzzeitigen Immissionsspitzen wird jedoch in der Ratsempfehlung 1999/519/EG [19] bezüglich der Basisgrenzwerte für die Stromdichte empfohlen, diese nicht als Effektivwerte, sondern als Momentanwerte zu betrachten⁹. In der Ratsempfehlung 1999/519/EG [19] wird bezüglich der Bewertung transients und gepulster Felder auf Basis der Referenzwerte darauf hingewiesen, dass diese im Rahmen eines konservativen Ansatzes über ihr Fourier-Spektrum bewertet werden können. Weiters wird in [1] und [19] für die Bewertung von pulsformigen Immissionen empfohlen, den Spitzenwert der Immissionsgröße mit dem Referenzwert bei der Frequenz $1/(2 \cdot t_p)$ zu vergleichen, wobei t_p die Impulsdauer ist. Da weder in [1] noch in [19] genauere Definitionen der Begriffe „transient“ und „pulsförmig“ vorgegeben sind und auch nicht spezifisch auf unterschiedliche Impulsformen eingegangen wird, ergibt sich für praktisch auftretende Signalformen ein gewisser Interpretationsspielraum bei der strahlenschutztechnischen Bewertung.

Die im Rahmen des vorliegenden Berichts gewählte Bewertung transients Magnetfelder, wird anhand des in Abbildung 6.14 dargestellten, während des Einschaltvorganges eines Hybridfahrzeuges aufgetretenen Signalverlaufs erläutert. Dieser Signalverlauf kann als ein transienter Vorgang mit einer Gesamtlänge von ca.

⁹ „The ICNIRP therefore recommends that the restrictions on current densities induced by transient or very short-term peak fields be regarded as instantaneous values which should not be time-averaged“ Zitat aus [1], Seite 509.

1 s interpretiert werden. In Abbildung 6.14 sind neben dem Zeitverlauf auch das zugehörige Ergebnis der FFT, sowie eine entsprechend dem Frequenzgang der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung gewichtete Darstellung der spektralen Verteilung des aufgezeichneten Signals gezeigt. Die Anwendung des für stationäre Signale üblichen Bewertungsschemas, d.h., die (phasenrichtige) Summierung aller durch den jeweiligen Referenzwert dividierten Spektralanteile, führt hier jedoch naturgemäß wieder nur auf eine Bewertung hinsichtlich des resultierenden Effektivwertes des aufgezeichneten Signals (des gesamten transienten Vorgangs von ca. 1 s Länge). Für das in Abbildung 6.14 dargestellte Signal führt diese Bewertung zu einer resultierenden Immission im Ausmaß von 5,4% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung. Diese Bewertung hat aber keinen Bezug zu den Momentan- bzw. Spitzenwerten der durch die einzelnen Impulse im Gewebe induzierten Stromdichten, die aber als biologisch relevant angesehen werden müssen. Würde die Zeitdauer T zwischen zwei Impulsen größer werden, würde dies naturgemäß zu einer Verringerung der oben genannten Bewertungsgröße führen, obwohl die (von jedem Impuls) im Gewebe induzierten Stromspitzenwerte natürlich unabhängig von der Impulswiederholdauer sind. Die in [1] und [19] definierte Bewertung von pulsförmigen Immissionen, nämlich den Spitzenwert der Immissionsgröße mit dem Referenzwert bei der Frequenz $1/(2 \cdot t_p)$ zu vergleichen, lässt bei der vorliegenden Signalform ebenfalls Interpretationsspielraum.

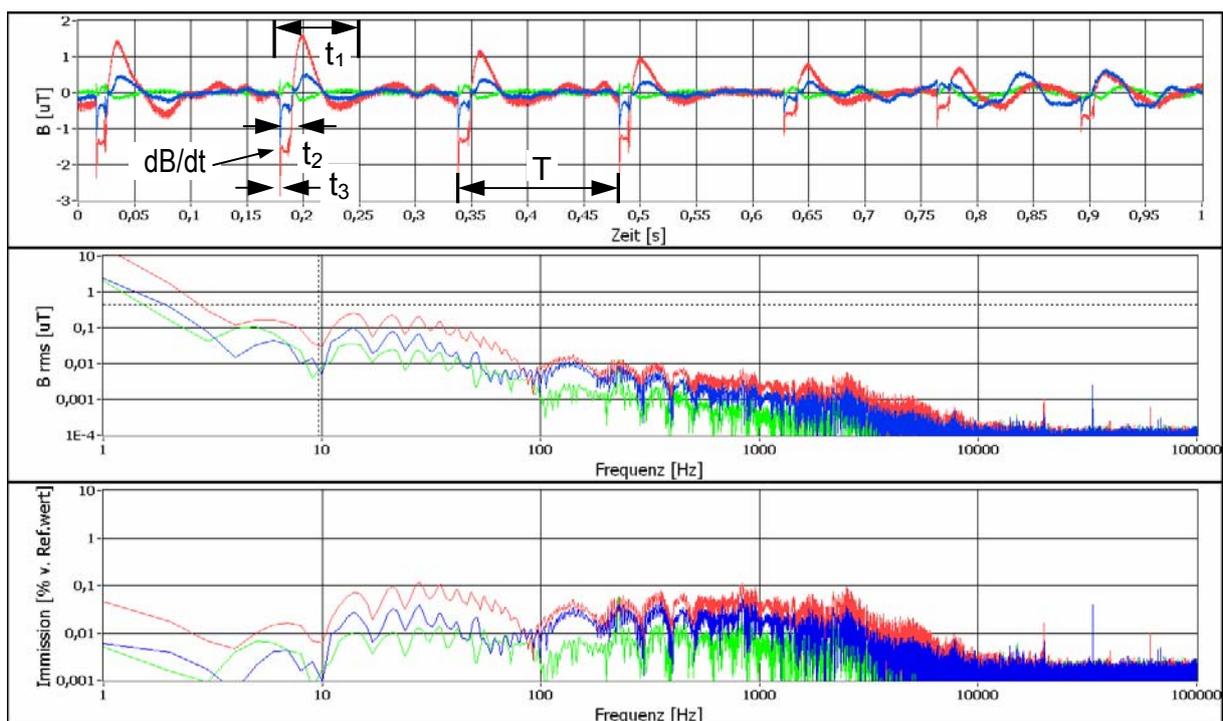


Abbildung 6.14: Transiente Magnetfeldimmission während des Einschaltvorganges eines Hybridfahrzeuges zur Erläuterung des gewählten Bewertungsverfahrens. Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Da die Referenzwerte im hier interessierenden Frequenzbereich mit steigender Frequenz abnehmen, wird diese Bewertung umso konservativer ausfallen, je kleiner die Impulsdauer t_p gewählt wird. Tabelle 6.3 zeigt dies anhand des Signalverlaufs aus Abbildung 6.14.

Aufgrund der Tatsache, dass die Referenzwerte derart abgeleitet wurden, dass auch bei homogener Befeldung des gesamten Körpers mit einer Feldstärke entsprechend dem Referenzwert die Basisgröße (Stromdichte im Zentralnervensystem) selbst bei

maximaler Feldeinkopplung unterhalb des Basisgrenzwertes bleibt, suggeriert zumindest die strengste Bewertungsgröße in Tabelle 6.3 eine unverhältnismäßig hohe Exposition im Vergleich zu den tatsächlichen Verhältnissen im Hinblick auf die tatsächlich induzierte Stromdichte im Gewebe. Dies gilt insbesondere dann, wenn der gezeigte Immissionssignalverlauf stark lokal begrenzt bzw. mit großen Gradienten auftritt, wie dies im Fall der untersuchten Fahrzeuge zumeist der Fall ist.

Signalspitzenwert x / y / z -Komponente	Impulsdauer t_p	$1/2t_p$	Referenzwert bei $1/2t_p$	Bewertungsgröße relativ zum Referenzwert x / y / z -Komponente \Rightarrow gesamt
2,9 μ T, 1,4 μ T, 0,4 μ T	$t_1 = 39$ ms	12,8 Hz	390 μ T	0,74% / 0,36% / 0,1% \Rightarrow 0,8%
	$t_2 = 13$ ms	38,5 Hz	130 μ T	2,2% / 1,1% / 0,31% \Rightarrow 2,5%
	$t_3 = 1,5$ ms	333 Hz	15 μ T	19,3% / 9,3% / 2,7% \Rightarrow 21,6%

Tabelle 6.3: Beispiel für unterschiedliche Interpretationen der Bewertung des Signalverlauf aus Abbildung 6.14

Um eine realistischere Bewertung der Exposition durch transiente Vorgänge zu ermöglichen wird auf die zeitliche Änderungsrate der magnetischen Flussdichte zurückgegriffen, die physikalisch letztendlich für die im Körper induzierte Stromdichte verantwortlich ist. Die Möglichkeit einer strahlenschutztechnischen Bewertung auf dieser Basis ist in [1] und [19] für Frequenzen bis 100 kHz explizit erwähnt.

Die Verhältnisse bei der Induktion von Körperströmen durch äußere, zeitlich veränderliche Magnetfelder können für homogene Magnetfeldverteilung vereinfacht, wie in Abbildung 6.15 gezeigt, dargestellt werden.

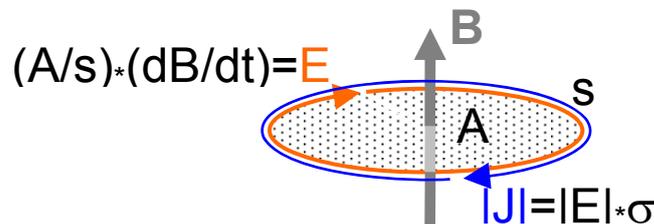


Abbildung 6.15: Vereinfachte Darstellung des Zusammenhangs von induzierter elektrischer Feldstärke E bzw. Stromdichte J und zeitlich veränderlicher magnetischer Flussdichte B, sowie der von ihr normal durchsetzten Fläche A und deren Randkurvenlänge s. (σ ... elektrische Leitfähigkeit des Gewebes)

Für das in Abbildung 6.15 gezeigte Modell ergibt sich auf Basis des in Gleichung (6.3) bereits vereinfacht dargestellten Induktionsgesetzes

$$|E| \cdot s = A \cdot \left| \frac{dB}{dt} \right| \quad (6.3)$$

Mit dem bekannten Zusammenhang zwischen elektrischer Stromdichte J und elektrischer Feldstärke E, führt dies auf

$$\frac{|J|}{\sigma} \cdot s = A \cdot \left| \frac{dB}{dt} \right| \quad (6.4)$$

und im Hinblick auf den Maximalwert der induzierten elektrischen Stromdichte im Gewebe schließlich zu

$$|J|_{\max} = \frac{A}{s} \cdot \sigma \cdot \left(\left| \frac{dB}{dt} \right| \right)_{\max} \quad (6.5)$$

A bezeichnet dabei die von der magnetischen Flussdichte normal durchsetzte Fläche, s die Länge der Randkurve von A, σ die elektrische Leitfähigkeit des Gewebes und dB/dt die zeitliche Änderungsrate der magnetischen Flussdichte.

Um bei der Bewertung dem lokal eingegrenzten Auftreten der (transienten) Immissionen Rechnung zu tragen, werden für unterschiedliche Körperregionen unterschiedliche Geometrieparameter A/s definiert (Tabelle 6.4). Die Parameter A/s wurden dabei für jede angeführte Körperregion einfach aus dem Verhältnis der (rechteckig angenommenen) Projektionsfläche (für typische Abmessungen der jeweiligen Körperregion) und deren Umfang gewonnen. Für den Kopf wurde von einem Kreisquerschnitt (Radius= 12 cm) ausgegangen. Als Gewebeleitfähigkeiten wurden im Kopf jene auf Basis von [20] in [21] abrufbaren Werte für das Kleinhirn und in allen anderen Regionen die entsprechenden Werte für Nervengewebe verwendet (jeweils Werte für 1 kHz). Der konservative Charakter dieser Annahmen wurde anhand von Computersimulationen (FDTD mit Frequenzskalierung) mit einem Ganzkörpermodell eines Erwachsenen (3 mm Auflösung) in einem homogenen Magnetfeld überprüft. Es wurden Simulationen mit drei unterschiedlichen Befeldungsrichtungen relativ zum Körpermodell (vorne-hinten, links-rechts, oben-unten) für eine Frequenz von 1 kHz durchgeführt und die dabei in den unterschiedlichen Körperregionen auftretenden maximalen Gewebestromdichten jenen Werten gegenübergestellt, die auf Basis von Gleichung (6.5) mit den in Tabelle 6.4 angeführten Geometrieparametern A/s gewonnen wurden. Die Faktoren der Überbewertung der maximalen Stromdichte in den betrachteten Körperregionen lagen dabei zwischen 3,8 (Arme) und 7,7 (Kopf), so dass ausreichende Sicherheit für die Annahme eines konservativen Charakters der oben beschriebenen Bewertungsmethode für transiente Magnetfelder vorliegt.

	A/s [m]	σ [S/m]
Füße	0,038	0,03
Unterschenkel	0,058	0,03
Oberschenkel	0,067	0,03
Rumpf	0,167	0,03
Arme	0,063	0,03
Kopf	0,060	0,12

Tabelle 6.4: Geometrieparameter A/s und Gewebeleitfähigkeiten zur Abschätzung der maximalen Gewebestromdichten durch transiente Magnetfeldimmissionen gemäß Gleichung (6.5)

Tabelle 6.5 fasst die Ergebnisse für die unterschiedlichen in Tabelle 6.4 angeführten Körperregionen und Parameter und den in Abbildung 6.14 gezeigten transienten Signalverlauf zusammen.

Angemerkt muss dabei noch werden, dass die Basisgrenzwerte für die induzierte Stromdichte gemäß [1] und [19] streng genommen mit dem Ziel des Schutzes des Zentralnervensystem, d.h., Gehirn und Rückenmark, definiert wurden und weiters als gemittelt über eine Fläche von 1 cm² normal zur Stromflussrichtung anzunehmen sind. In [19] wird diesbezüglich explizit angemerkt, dass für andere Körperteile (z.B. Gliedmaßen) höhere Stromdichtewerte zulässig sein können, ohne jedoch konkret Zahlenwerte zu nennen. Im Hinblick auf eine vereinfachte und konservative Betrachtungsweise wurde im Folgenden hinsichtlich des anzuwendenden

Basisgrenzwertes jedoch nicht näher zwischen Kopf, Rumpf und Gliedmaßen unterschieden, sondern es wurde immer der strengste Basisgrenzwert im betrachteten Frequenzbereich, nämlich 2 mA/m^2 für die oben angeführte Bewertung von transienten Vorgängen herangezogen.

max. dB/dt [mT/s] x / y / z -Komponente		Bewertungsgröße J_{\max} aus Gl.(6.5) relativ zum Referenzwert (2 mA/m^2) x / y / z -Komponente \Rightarrow gesamt
15,7 / 5,8 / 1,67	Füße	0,89% / 0,33% / 0,1% \Rightarrow 0,96%
	Unterschenkel	1,37% / 0,5% / 0,15% \Rightarrow 1,46%
	Oberschenkel	1,58% / 0,58% / 0,17% \Rightarrow 1,69%
	Rumpf	3,93% / 1,45% / 0,42% \Rightarrow 4,21%
	Arme	1,48% / 0,55% / 0,16% \Rightarrow 1,59%
	Kopf	5,65% / 2,09% / 0,60% \Rightarrow 6,06%

Tabelle 6.5: Abschätzung des Maximalwertes der durch den in Abbildung 6.14 gezeigten Magnetfeldverlauf induzierten Stromdichten in unterschiedlichen Körperregionen im Verhältnis zum strengsten Basisgrenzwert im interessierenden Frequenzbereich (2 mA/m^2), auf Basis von Gleichung (6.5)

Die strahlenschutztechnische Bewertung der Messergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln erfolgte daher immer folgendermaßen: Alle aufgezeichneten Messsignale wurden zunächst grundsätzlich entsprechend dem für stationäre Signale üblichen Verfahren, d.h., auf Basis der phasenrichtigen Summierung ihrer Einzelspektralanteile im Verhältnis zu den entsprechenden Referenzwerten bewertet. Im Fall von ausgeprägten transienten Vorgängen in den Messsignalaufzeichnungen erfolgte die Bewertung nach der oben beschriebenen Methode, um auch in diesen Fällen eine Beurteilung auf Basis einer einfachen, physikalisch sinnvollen, und immer noch konservativen Bewertungsgröße, mit eingeschränkter Überschätzung der Immissionsverhältnisse durchzuführen.

6.5 Messempfindlichkeit und Unsicherheit der Messergebnisse

Bei Verwendung der in den vorigen Kapiteln beschriebenen Messgeräte und Bewertungsmethode ergibt sich als untere Nachweisgrenze für die gesamte phasenrichtig bewertete Summe aller Spektralanteile der Magnetfeldimmissionen im Frequenzbereich von 0 Hz bis 100 kHz ein Wert von ca. 0,1-0,2% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung.

6.5.1 Unsicherheit der Messergebnisse

Hinsichtlich der im Folgenden beschriebenen Unsicherheitsbeiträge ist zunächst, um Klarheit bezüglich der Nomenklatur zu schaffen, zwischen zwei Arten von Beiträgen zu unterscheiden:

- Beiträge, die durch einen auf die Bewertungsgröße bezogene (relative) Zahlenwertangabe erfasst werden können
- Beiträge, die durch einen absoluten Zahlenwert in der Einheit der Bewertungsgröße erfasst werden können

Da im vorliegenden Fall die Bewertungsgröße selbst eine Relativgröße ist, nämlich die Magnetfeldimmission in Prozent des Referenzwertes, wird zur Vermeidung von Missverständnissen die folgende Nomenklatur verwendet:

Relative Unsicherheitsbeiträge werden in Prozent (%) angegeben. Liegt beispielsweise die Bewertungsgröße bei 20% des Referenzwertes und die relative Unsicherheit bei $\pm 10\%$, so liegt der Unsicherheitsbereich innerhalb dem die Bewertungsgröße zu erwarten ist zwischen 18% und 22% des Referenzwertes.

Absolute Unsicherheitsbeiträge werden in Prozentpunkten (%pkte) bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung angegeben. Liegt beispielsweise die Bewertungsgröße bei 20% des Referenzwertes und die absolute Unsicherheit bei $\pm 1\%$ pkt, so liegt der Unsicherheitsbereich innerhalb dem die Bewertungsgröße zu erwarten ist zwischen 19% und 21% des Referenzwertes.

Die gesamte resultierende Unsicherheit der Bewertungsgröße für die Magnetfeldimmissionen (auf den Referenzwert bezogene, phasenrichtige Summe der Spektralanteile) setzt sich aus den folgenden Beiträgen zusammen:

- a) *Messunsicherheit der verwendeten Messgeräte (Feldsonden)*, ca. $\pm 5\%$
- b) *Unsicherheit bei D/A-Wandlung und numerische Unsicherheiten bei FFT*, $< \pm 1\%$
- c) *Unsicherheit zufolge Variation der Hintergrundstörfelder am Leistungsprüfstand*
Dieser Beitrag wurde durch Vergleich der Hintergrundmessungen jeweils vor und nach den eigentlichen Immissionsmessungen ermittelt und ergab sich zu ca. $\pm 0,1\%$ pkt, bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung.
- d) *Unsicherheit zufolge der äußeren Hintergrundstörfelder während der Messfahrten*
Auf Grund der Tatsache, dass die äußeren (d.h., die nicht von den Komponenten des Mess-Systems inkl. Stromversorgung stammenden) Hintergrundstörfelder bei den Messfahrten nicht kontrollierbar sind, ist dieser Unsicherheitsbeitrag besonders schwierig zu quantifizieren. Offensichtliche, d.h., deutlich oberhalb der von den Fahrzeugen erzeugten Immissionen liegende Störanteile, deren Spektren sich in eindeutiger Weise von jenen der Fahrzeugimmissionen unterscheiden lassen, konnten im Rahmen der Messdatenauswertung relativ einfach identifiziert und eliminiert, bzw. bei der strahlenschutztechnischen Bewertung ausgeklammert werden. Störanteile mit Spektren, die sich nicht eindeutig von jenen der Fahrzeugemissionen unterscheiden lassen, sind dagegen die Hauptverursacher dieses Unsicherheitsbeitrages. Auf Basis der Analyse aller aufgezeichneten Daten und der dabei aufgetretenen, nicht auf andere Ursachen rückführbare Variationen der Bewertungsgröße kann dieser Unsicherheitsbeitrag zu ca. $\pm 0,2\%$ pkt bezüglich des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung abgeschätzt werden. Bezüglich des Referenzwertes für berufliche Exposition entspricht dies ca. $\pm 0,05\%$ pkt.
- e) *Positionierungsunsicherheit der Feldsonden*
Grundsätzlich wurde, wenn möglich, immer versucht, die Positionierungsunsicherheiten durch Verwendung der in Kapitel 6.1 beschriebenen Körperrückbildung auf ein Mindestmaß zu reduzieren. Bei den Messungen am Fahrerplatz war dies jedoch naturgemäß nicht möglich. In diesem Fall wurden die Feldsonden so nahe wie möglich an die Zielposition gebracht (z.B. neben oder unmittelbar hinter den Füßen, hinter dem Kopf, usw.). Diese dabei in Kauf zu nehmenden Abweichungen betragen typischerweise ca. 15 cm, was bei stark inhomogenen Feldern zu beträchtlichen Unsicherheiten führen kann (vor allem im Bereich der Füße). Auf Basis von systematisch durchgeführten Messungen im Beifahrer-Fußraum der Fahrzeuge konnte die Größe dieses Unsicherheitsbeitrages mit ca. $\pm 30\%$ abgeschätzt werden.

f) *Unsicherheit zufolge nichtkonstanter Fahrzeugzustände (am Leistungsprüfstand)*
Speziell beim Fahren gegen sehr hohe Lastmomente und bei geringen Geschwindigkeiten zeigte sich, dass es nicht einfach war, die Fahrzeuge während der Messungen auf konstanter Geschwindigkeit zu halten. Abweichungen von der angestrebten Sollgeschwindigkeit von bis zu $\pm 10\%$ konnten teilweise nicht vermieden werden. Wie sich diese Unsicherheit bezüglich der Fahrgeschwindigkeit auf die daraus resultierende Unsicherheit der Bewertungsgröße (phasenrichtig summierte Spektralanteile relativ zum Referenzwert) transformiert, hängt aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Referenzwerte maßgeblich vom jeweils emittierten Spektrum und damit vom jeweiligen Fahrzeugtyp ab. Auf Basis der Messdaten (spektrale Verteilung der Magnetfeldimmissionen) kann die Obergrenze dieses Unsicherheitsbeitrages mit ca. $\pm 20\%$ abgeschätzt werden.

g) *Unsicherheit zufolge Bewegungsartefakte*

Bei Magnetfeldmessungen mit bewegter Feldsonde in inhomogenen äußeren Magnetfeldern (wie im Falle der Messfahrten) treten zwangsläufig spektrale Anteile größer 0 Hz auf, sobald die Relativgeschwindigkeit zwischen äußerem inhomogenen Magnetfeld und der Feldsonde größer als null ist. Konkret sind hier unter äußere Magnetfelder alle durch diverse Quellen in der Nähe der Fahrtstrecke verursachten (realistischer Weise immer inhomogenen) Magnetfelder, aber auch das, durch ferromagnetische Bauteile oftmals lokal verzerrte, statische Erdmagnetfeld zu verstehen. Vor allem bei Fahrten im innerstädtischen Bereich konnten Schwankungen der magnetischen Flussdichte bis zu 10 Mikrottesla im Bereich von 1-2 Hz festgestellt werden, die eindeutig nicht von den Fahrzeugen, sondern durch die relativ zur Umwelt und damit zu Inhomogenitäten im Erdmagnetfeld bewegten Feldsonden verursacht wurden. Damit verknüpfte Oberwellen waren bis in den Bereich von etwa 5-10 Hz nachweisbar, nahmen jedoch schell an Intensität ab, sodass der mit diesem Effekt zusammenhängende Unsicherheitsbeitrag, bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung, unterhalb von ca. 0,2%pkt bleibt. Bezüglich des Referenzwertes für berufliche Exposition entspricht dies ca. 0,04%pkt.

Schwankungen der magnetischen Flussdichte mit messbaren Spektralanteilen bis zu einigen hundert Hertz können auch durch Erschütterungen während der Testfahrten (z.B. Bodenwellen) verursacht werden. Diese konnten jedoch im Zuge der Messdatenauswertung identifiziert und vor der Bewertung eliminiert werden.

Aus den oben angeführten Unsicherheitsbeiträgen können, unter Annahme statistischer Unabhängigkeit der Einzelbeiträge, die in Abbildung 6.16 dargestellten Unsicherheitsbereiche für die Bewertungsgröße berechnet werden. Sofern in den einzelnen Kapiteln bei der Zusammenstellung der Messergebnisse nichts explizit Anderes erwähnt wird, ist von diesen Unsicherheitsbereichen auszugehen.

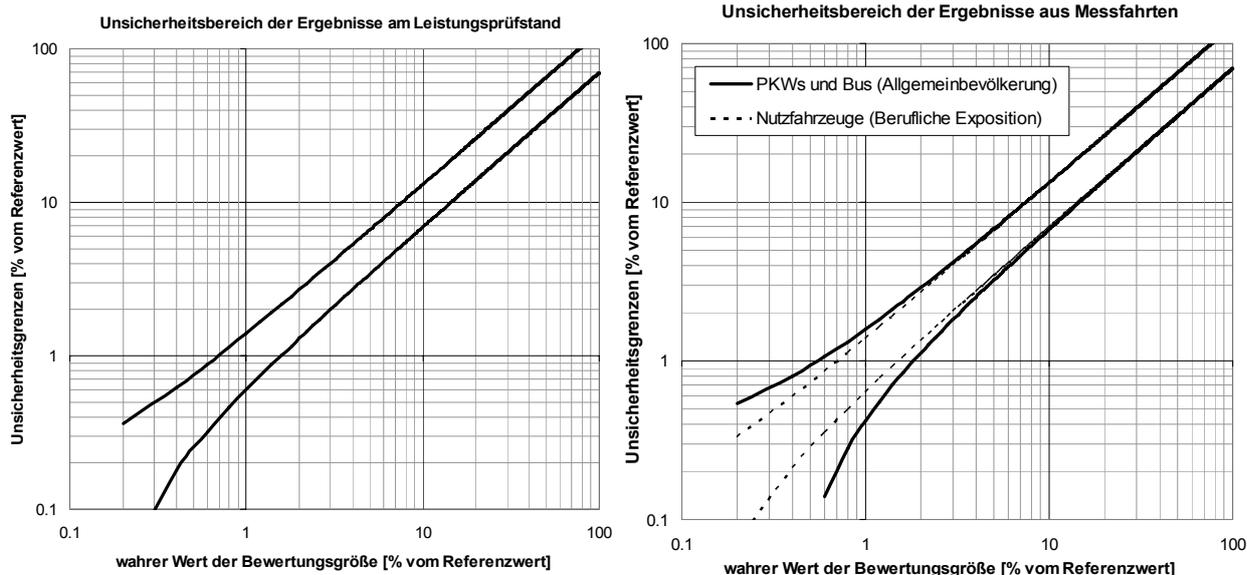


Abbildung 6.16: Unsicherheitsbereiche der Bewertungsgröße für die Untersuchungen am Leistungsprüfstand (links) und die Untersuchungen während Messfahrten (rechts)

6.5.2 Unsicherheiten bei der Beurteilung transienter Vorgänge

Wie in Kapitel 6.4.5 beschrieben, wurde für die strahlenschutztechnische Beurteilung kurzzeitiger ($\ll 1$ s) transienter Immissionen im Rahmen dieses Projekts ein Verfahren verwendet, das systematische Überbewertungen sehr stark vereinfachter Bewertungsansätze vermeiden, aber dennoch eine konservative Abschätzung der Verhältnisse bezüglich der Basiswerte erlauben soll. Die mit der hier verwendeten Bewertungsmethode transienter Immissionen verbundenen Unsicherheiten liegen naturgemäß hauptsächlich in den stark vereinfachten Annahmen bezüglich des exponierten Körperteils (Geometrie, Homogenität der elektrischen Eigenschaften), sowie der räumlichen Verteilung der Immissionsgröße (homogene Befeldung des gesamten betrachteten Körperteils wird angenommen). Wie in Kapitel 6.4.5 gezeigt, führt das verwendete Bewertungsverfahren zu Überschätzungen der Körperstromdichten um mindestens einen Faktor 3,8 – 7,7, stark abhängig von der jeweils betrachteten Körperregion. Zudem bleibt die Mittelung über 1cm^2 quer zur Stromflussrichtung und die Tatsache, dass die Basisgrenzwerte gemäß [1] und [19] für das Zentralnervensystem abgeleitet wurden und in anderen Geweben höhere Stromdichten erlaubt sein können, unberücksichtigt. In diesem Sinn ist es schwierig, für das verwendete Bewertungsverfahren eine klassische Unsicherheit im Hinblick auf die tatsächlich im menschlichen Körper auftretenden Stromdichten zu quantifizieren, wie es in Zusammenhang mit einer technisch einwandfreien Angabe von Messgrößen üblich und notwendig ist. Ähnlich wie die Angabe der SAR bei Mobiltelefonen, sind die im Rahmen des vorliegenden Berichts angeführten Bewertungsgrößen für transiente Immissionen weniger als eine Immissionsgröße im klassischen Sinn, sondern vielmehr als ein konservatives Schätzmaß der Exposition im Hinblick auf die Basiswerte zu verstehen, in Fällen, die sich einer physikalisch sinnvollen Beurteilung nach den Referenzwerten entziehen. Der den konservativen Charakter des Verfahrens spezifizierende Bereich der Überschätzung liegt, wie oben angegeben, bei mindestens einem Faktor 3,8 – 7,7, basierend auf numerischen Untersuchungen mit einem anatomischen Ganzkörpermodell und es kann daher davon ausgegangen werden, dass diese Überschätzungsfaktoren ausreichen, um interindividuelle anatomische Variationen abzudecken. Von der Konservativität des

Bewertungsverfahrens zu unterscheiden ist die mit der Anwendung des Bewertungsverfahrens verbundene Unsicherheit. In der oben angeführten Analogie der SAR-Bestimmung wären dies die mit der (relativ komplexen) SAR-Messtechnik verbundenen Unsicherheiten (z.B. zufolge, Positionierungenauigkeit des Prüflings, Positionierungenauigkeiten des Messsonden, dielektrische Eigenschaften der Gewebe simulierenden Flüssigkeiten, Kalibrierunsicherheit der Messsonden, usw.). Diese stehen allerdings in keinem unmittelbaren Zusammenhang mit der Konservativität des definierten SAR-Messverfahrens. Zurückkommend auf die mit der Anwendung des im Rahmen dieses Vorhabens verwendeten Beurteilungsverfahrens für transiente Magnetfeldimmissionen verbundene Unsicherheit bedeutet dies, dass diese identisch mit der in Kapitel 6.5.1 angeführten Unsicherheit ist, da die Bewertungsmethode, ausgehend von den Messergebnissen, ausschließlich auf analytischer Berechnung beruht.

6.6 Numerische Immissions-Prognosemodelle für die PKWs

Ziel des Vorhabens war es, möglichst allgemeingültige Aussagen für die in der Praxis unter realistischen Bedingungen auftretenden Magnetfeldimmissionen in den untersuchten Fahrzeugen machen zu können.

Für die Untersuchungen an Hybrid-PKWs und PKWs mit reinem Elektroantrieb stand ein Leistungsprüfstand und damit die Möglichkeit besonders detaillierter messtechnischer Untersuchungen zur Verfügung. Wie in den Kapiteln 6.3.1 und 6.3.2 beschrieben, konnten am Leistungsprüfstand Messungen in stationären Belastungszuständen im gesamten verfügbaren Leistungsbereich der Fahrzeuge durchgeführt werden, die durch Messungen während Fahrten im Realverkehr hinsichtlich auftretender Magnetfeldimmissionen während Brems- und Beschleunigungsmanöver ergänzt wurden. Auf Basis der dabei für jedes Fahrzeug in den unterschiedlichen Betriebszuständen in den unterschiedlichen Messpositionen erhobenen Immissionsdatensätze, wurden numerische Berechnungsmodelle erstellt, die eine Prognose der auftretenden Immissionen in den Fahrzeugen für beliebige vorgegebene Fahrzyklen erlauben. Neben den aus den Messungen am Leistungsprüfstand und den Realfahrten vorliegenden Immissionsdatensätzen (jeweils in Form der phasenrichtig summierten, auf die Referenzwerte bezogenen Spektralanteile, in Prozent des Referenzwertes) und einigen zusätzlichen fahrzeugspezifischen Daten (c_w -Wert, Gesamt-Fahrzeugmasse m , Luftangriffsfläche A , Reifendurchmesser d) sind als weitere Eingangsgrößen in die Berechnungsmodelle ein Geschwindigkeitsverlauf $v(t)$ und ein dazu synchroner Höhenverlauf $h(t)$ (oder äquivalent dazu Straßensteigungsverlauf $\alpha(t)$) über der Zeit erforderlich. Als Zeitschrittweite wurde dabei generell eine Sekunde gewählt. Abbildung 6.17 zeigt schematisch das allgemeine Prinzip der Berechnungsmodelle. Einzelheiten dazu werden in den folgenden Kapiteln beschrieben.

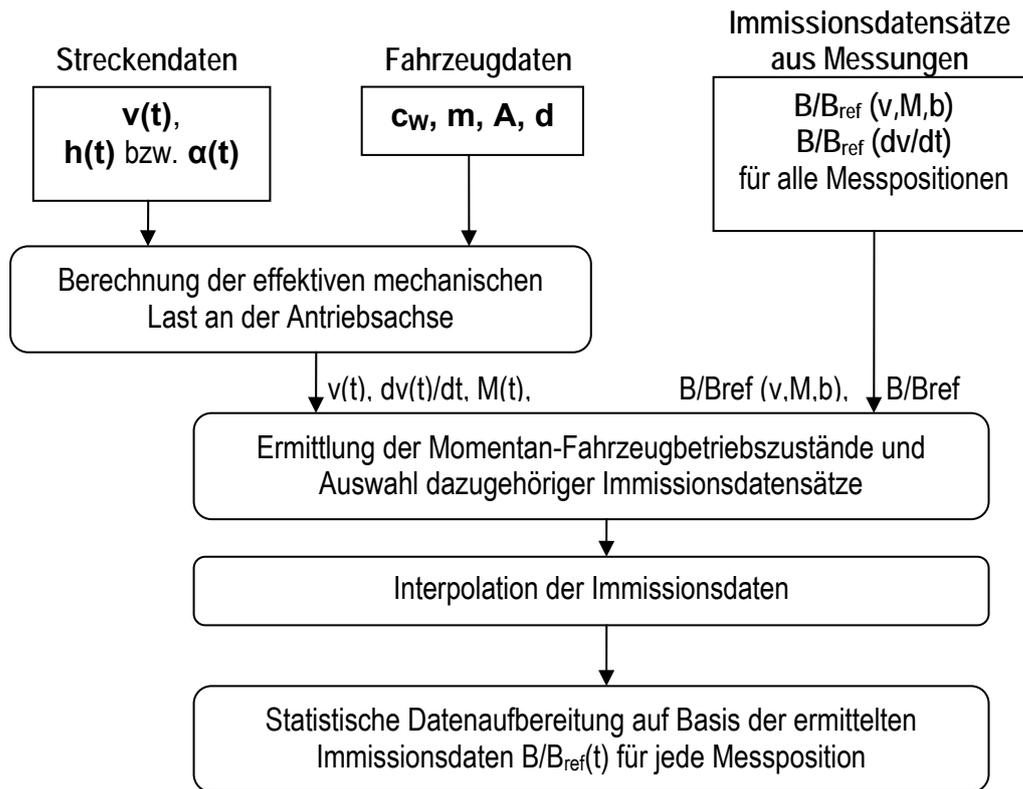


Abbildung 6.17: Vereinfachte schematische Darstellung der Immissions-Berechnungsmodelle für die untersuchten PKWs

6.6.1 Strecken- und Fahrzeugdaten

Die Streckendaten können in Form von Zeitverläufen der Fahrzeuggeschwindigkeit $v(t)$ und der Momentanhöhe $h(t)$ über beliebigem Bezugsniveau mit einer Zeitschrittweite von einer Sekunde angegeben werden. Für die Verifizierung (Kapitel 6.6.6) der Berechnungsmodelle wurden $v(t)$ und $h(t)$ auf Basis von Aufzeichnungen eines während der Messfahrten mitgeführten GPS-Datenloggers ermittelt (Abbildung 6.18). Die Fahrzeugdaten wurden den technischen Spezifikationen der Fahrzeuge entnommen (Tabelle 6.6).

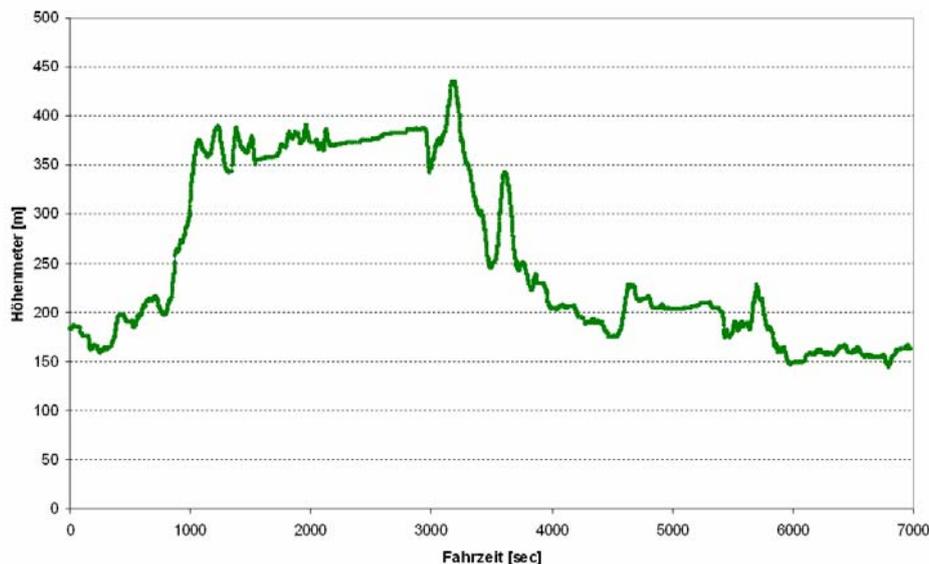


Abbildung 6.18: Höhenverlauf der ca. 60 km langen Teststrecke im Großraum Wien (vgl. Abbildung 6.8).

	Fahrzeugmasse m [kg]	Luftwiderstandsbeiwert cw [1]	Luftangriffsfläche A [m ²]
Fiat Panda Electric	980	0,36	2,1
Fiat Doblo Electric	1780	0,32	2,5
Honda Civic Hybrid	1450	0,29	2,4
Lexus GS 450h	1740	0,27	2,5
Toyota Prius	1315	0,26	2,5

Tabelle 6.6: Für die Immissionsprognosen verwendete Fahrzeugdaten

6.6.2 Immissionsdatensätze

In jedem der insgesamt 5 untersuchten PKWs wurden an 3 unterschiedlichen Sitzplätzen (Fahrerplatz, Beifahrerplatz und ein Platz auf der hinteren Sitzreihe), in jeweils 12 Messpositionen (entsprechend den unterschiedlichen Körperregionen) Immissionsmessungen in unterschiedlichen stationären Betriebs- und Lastzuständen der Fahrzeuge, sowie während Brems- und Beschleunigungsmanöver durchgeführt. Aus den Immissionsmessungen am Leistungsprüfstand (unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen) wurden für jedes Fahrzeug und jede darin betrachtete Messposition vereinfachte Funktionen $B/B_{ref}(v, M, b)$ der Immissionsgröße in Abhängigkeit des Fahrzeugbetriebszustandes b , der Fahrzeuggeschwindigkeit v und des Lastmoments M an der Abtriebsachse abgeleitet. Zusätzlich wurden auf Basis der im Zuge von Brems- und Beschleunigungsmanövern erhobenen Messdaten vereinfachte Funktionen $B/B_{ref}(dv/dt)$ der Immissionsgröße definiert. Diese beiden Funktionen für stationäre und dynamische Fahrverhältnisse, die für jede betrachtete Messposition in den Fahrzeugen aus den Messdaten abgeleitet werden konnten, bilden die Immissionsdatensätze auf die die Prognosesoftware bei der Immissionsberechnung zurückgreift. Hinsichtlich der für die unterschiedlichen Betriebszustände repräsentativen Immissionsdatensätze muss jedoch zwischen den einzelnen Fahrzeugtypen unterschieden werden.

Vollhybrid-Fahrzeuge (Toyota Prius und Lexus GS450h)

Wie bereits in Kapitel 6.3.1 angedeutet, können die grundsätzlich zur Verfügung stehenden Betriebsarten des Hybridsystems (d.h., die unterschiedlichen Energieflussmöglichkeiten) nicht beliebig manuell an- und ausgeschaltet werden, sondern werden vollautomatisch von der komplexen Regelung des Hybridsystems verwaltet. Dabei sind für die Entscheidung welcher Betriebszustand sich ergibt, neben den „von außen aufgeprägten“ mechanischen Parametern Fahrzeuggeschwindigkeit und Lastmoment, auch eine Reihe Hybridsystem-interner Größen, wie z.B. maximal zulässige Motor/Generatorströme, Ladezustand der Batterie, usw. maßgebend. Die untenstehende Tabelle 6.7 zeigt beispielsweise die während den Messungen am Leistungsprüfstand mit dem Toyota Prius beobachtbaren, sich einstellenden Betriebszustandsmöglichkeiten in Abhängigkeit von stationären Geschwindigkeits- und Lastmomentverhältnissen.

Daraus wird zunächst ersichtlich, dass im Bereich niedriger Geschwindigkeiten (bis ca. 30 km/h) grundsätzlich rein elektrischer Fahrbetrieb vorgesehen ist, sofern ausreichend Batterieladung vorhanden ist und die mechanisch erforderliche Leistung vom Elektromotor aufgebracht werden kann. Ist eine der beiden Bedingungen nicht erfüllt, schaltet sich automatisch der Verbrennungsmotor zu, wobei sich je nach Last-

und Batterieladezustand einer der Betriebszustände B oder E einstellt (siehe Tabelle 6.7). Im Bereich höherer Geschwindigkeiten (\geq ca. 30 km/h) sind die Betriebszustände B-E möglich. Welcher dieser Betriebszustände sich einstellt, hängt wiederum vom Batterieladezustand und der erforderlichen mechanischen Leistung ab. Beispielsweise wird sich bei stark entladener Batterie Betriebsart C, bzw. bei kritischem Batterieladezustand Betriebsart D auch schon bei geringer Geschwindigkeit und geringem Lastmoment einstellen. Betriebszustand B stellt sich hingegen im Fall hoher Last ein, wenn sich durch den kombinierten Antrieb hohe Effizienz erzielen lässt (Verbrennungsmotor wird im optimalen Arbeitsbereich gehalten).

Lastmoment [Nm]	Geschwindigkeit [km/h]					Legende
	15	30	50	100	160	
100	A	A	C,D	C,D	C,D	A rein elektrischer Antrieb
500	A	A	C,D	C,D	C,D	B kombinierter Antrieb (Generator versorgt E-Motor)
1000	A	B,E	B,E	B,E	C,D,E	C kombinierter Antrieb + Batterieladen (Generator versorgt E-Motor und lädt Batterie)
1500	A,B	B,E	B,E	B,C,D		D konventioneller Antrieb + Batterieladen
2000	A,B	E	E	C,D		E kombinierter (Boost-) Antrieb (Batterie versorgt E-Motor)
2500	A	B,E				
3000						

Tabelle 6.7: Beobachtete Betriebszustände während der Messungen am Leistungsprüfstand mit dem Toyota Prius

Wie Tabelle 6.7 zeigt, ist die Vorhersage des sich einstellenden Betriebszustandes allein auf Basis der Geschwindigkeit und es Lastmoments, aufgrund der komplexen Regelung und der Abhängigkeit von inneren Systemparametern nicht einfach möglich. Im Rahmen der vorhandenen Möglichkeiten können diese systeminternen Vorgänge von den Berechnungsmodellen für die Immissionsprognose in den Fahrzeugen nicht nachgebildet werden. Aus diesem Grund wurden bei der Entwicklung der Berechnungsmodelle für annähernd stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse, aus den vorhandenen in den unterschiedlichen Betriebszuständen erhobenen Messdaten, vereinfachend „pauschale“ stationäre Immissionsdatensätze (Funktionen $B/B_{ref}(v,M)$ für jede betrachtete Messposition) ermittelt. Für die Vollhybridfahrzeuge (Toyota Prius und Lexus GS450h) wurden dabei jeweils zwei stationäre Datensätze, nämlich einer für den rein elektrischen Fahrbetrieb (A) und einer pauschal für alle anderen denkbaren stationären Betriebszustände (B,C,D,E) definiert. Der Pauschaldatensatz für die Betriebszustände B-E wurde dabei durch Mittelung der Immissionsdaten der entsprechenden Betriebszustände gewonnen. Die maximalen Abweichungen dieser Mittelwerte von den tatsächlichen Messwerten bilden die Grundlage des Unsicherheitsbudgets der Prognosemodelle (Kapitel 6.6.6). Da diese Abweichungen aber unterhalb von ca. $\pm 35\%$ liegen, stellt die vereinfachende Pauschalierung der Immissionsdaten für die Betriebszustände B-E noch immer ein brauchbares Schätzmaß für die tatsächlichen Immissionen dar. Abbildung 6.19 veranschaulicht (für eine Messposition), wie aus den aus unterschiedlichen Betriebszuständen stammenden Messdaten vom Leistungsprüfstand die pauschalierten Funktionen $B/B_{ref}(v,M)$ für den stationären Betrieb der Fahrzeuge in den Betriebszuständen B-E gewonnen werden. Die durchgezogenen Graphen in Abbildung 6.19 entsprechen

dem für die Prognosemodelle verwendeten Datensatz. Zusätzlich zu den Datensätzen für die Betriebszustände B-E wurden für jede Messposition Immissionsfunktionen $B/B_{ref}(v,M)$, speziell für den rein elektrischen Fahrbetrieb, bei Geschwindigkeiten ≤ 30 km/h aus den Messdaten abgeleitet, wobei in diesem Fall einfache lineare Funktionen auf Basis der vorhandenen Messdaten bei 15 und 30 km/h angenommen wurden.

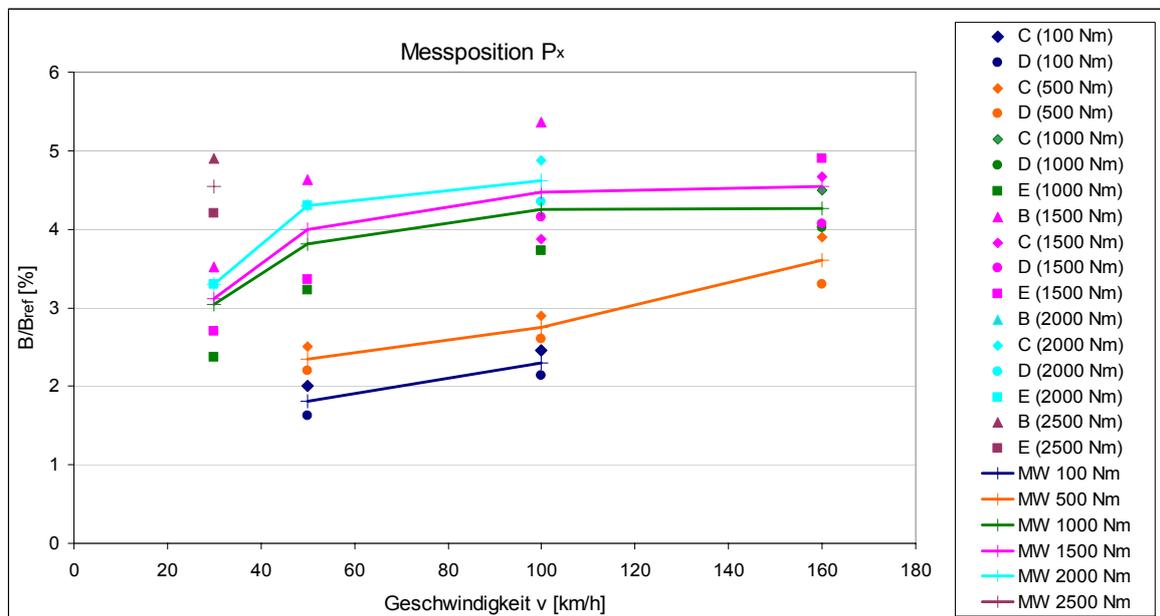


Abbildung 6.19: Veranschaulichung der Definition der für die Betriebszustände B-E pauschalierten Immissionsfunktionen $B/B_{ref}(v,M)$ für eine Messposition für die Vollhybridfahrzeuge im stationären Betrieb.

Neben den Datensätzen für den annähernd stationären Fahrbetrieb, wurden schließlich noch Immissionsdatensätze für Brems- und Beschleunigungsmanöver in Form von einfachen (linearen) Funktionen $B/B_{ref}(dv/dt)$ benötigt. Die dazu notwendigen Messdaten wurden bei eigens durchgeführten Brems- und Beschleunigungsmanövern im Bereich zwischen ca. $\pm 0,5$ und $\pm 2,5$ m/s^2 ermittelt.

Die in den Prognosemodellen implementierte Strategie bezüglich der Verwendung von stationären Immissionsdatensätzen oder Immissionsdatensätzen für Brems- und Beschleunigungsmanöver ist in Kapitel 6.6.4 beschrieben.

Aufgrund der sehr ähnlichen Konzepte der im Lexus GS450h und im Toyota Prius verbauten Hybridsysteme, lassen sich alle oben am Beispiel des Toyota Prius gezeigten Prozeduren zur Gewinnung der Immissionsdatensätze in gleicher Weise auch auf den Lexus übertragen.

Mildhybrid-Fahrzeug (Honda Civic IMA)

Im Vergleich zu den Vollhybridfahrzeugen, ist die Anzahl möglicher Betriebszustände beim untersuchten Honda Civic IMA naturgemäß wesentlich geringer. Bei den Messungen am Leistungsprüfstand waren alle drei prinzipiell möglichen Betriebszustände beobachtbar, nämlich konventioneller Fahrbetrieb (Antrieb ausschließlich durch Benzinmotor ohne Laden der Batterie), Assist-Betrieb, bei dem der aus der Batterie gespeiste Elektromotor zusätzliches Drehmoment im Antriebsstrang bereitstellt, und im Fall von kritischem Batterieladezustand konventioneller Fahrbetrieb bei gleichzeitigem Laden der Batterie. Tabelle 6.8 fasst die während der Messungen am Leistungsprüfstand unter annähernd stationären

Bedingungen beobachtbaren Betriebszustände des Honda Civic IMA zusammen. Sofern die Batterie ausreichend geladen ist, wird bei hohen mechanischen Lasten zusätzliches Drehmoment vom Elektromotor bereitgestellt, um den Verbrennungsmotor möglichst effizient betreiben zu können. Bei geringer Last, bzw. bei kritischem Batterieladezustand, wird die Batterie geladen.

Lastmoment [Nm]	Geschwindigkeit [km/h]					Legende
	15	30	50	100	160	
100	A,C	A,C	A,C	A,C	A,C	A Konventioneller Fahrbetrieb (ohne Batterieladen)
500	A,C	A	A	B	B	B Assist-Betrieb
1000	A	A,B	B	B		C Konventioneller Fahrbetrieb mit Batterieladen
1500	A,C	A,C	A			

Tabelle 6.8: Beobachtete Betriebszustände während der Messungen am Leistungsprüfstand mit dem Honda Civic IMA

Die am Leistungsprüfstand erhobenen Messdaten zeigen interessanter Weise, entgegen den Erwartungen, keine deutlich geringeren Immissionswerte im Betriebszustand A im Vergleich zu Betriebszustand C. Bei gleichen Geschwindigkeits- und Lastbedingungen lagen die Abweichungen der Immissionsgröße im Bereich unter $\pm 25\%$ vom Mittelwert. Aus diesem Grund wurde für Betriebsart A und C, ähnlich wie im vorigen Abschnitt bei den Vollhybridfahrzeugen, gemeinsame Datensätze für die Prognosesoftware auf Basis der Messdaten definiert. Für den Bereich hoher mechanischer Lasten wurden Datensätze aus den Messdaten für den Assist-Betrieb (Betriebsart B) aus den Messdaten abgeleitet.

Neben den Datensätzen für den annähernd stationären Fahrbetrieb, wurden in gleicher Weise wie für die Vollhybridfahrzeuge auch Immissionsdatensätze für Brems- und Beschleunigungsmanöver in Form von einfachen (linearen) Funktionen $B/B_{ref}(dv/dt)$ ermittelt. Die dazu notwendigen Messdaten wurden bei eigens durchgeführten Brems- und Beschleunigungsmanövern im Bereich zwischen ca. $\pm 0,5$ und $\pm 2,0 \text{ m/s}^2$ ermittelt.

Elektro-Fahrzeuge (Panda Electric, Doblo Electric)

Im Fall der betrachteten Elektrofahrzeuge konnten die Immissionsdatensätze in einfacher Weise aus den am Leistungsprüfstand ermittelten stationären Messdaten abgeleitet werden, da hier keine unterschiedlichen Betriebszustände in oben beschriebenen Sinn möglich sind. Zur Ermittlung der Immissionen während dynamischer Fahrmanöver, wurden wie auch bei den anderen Fahrzeugtypen Immissionsmessungen während Brems- und Beschleunigungsmanöver (Bereich ca. $0,5\text{-}1,5 \text{ m/s}^2$) durchgeführt, auf deren Grundlage die entsprechenden Immissionsdatensätze abgeleitet werden konnten.

Zusätzlich zu den am Leistungsprüfstand gewonnenen (pauschalieren) Immissionsdatensätzen für stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse und den Immissionsdatensätzen aus den Brems- und Beschleunigungsmanövern, wurden schließlich für alle untersuchten Messpositionen in den Fahrzeugen die Immissionen bei Stillstand des Fahrzeugs, aber eingeschaltetem elektrischem System, erfasst. Diese Situation entspricht, z.B. dem Warten an einer Ampel oder bei Verkehrsstillstand und ist vor allem im Stadtverkehr relevant.

Die in den Prognosemodellen implementierte Strategie bezüglich der Verwendung der unterschiedlichen Typen von Immissionsdatensätzen (stationär, dynamisch oder Fahrzeugstillstand) ist in Kapitel 6.6.4 beschrieben.

6.6.3 Berechnung der effektiven mechanischen Last

Der Fahrwiderstand eines Kraftfahrzeugs kann auf Basis einfacher physikalischer Beziehungen abgeschätzt werden und setzt sich aus unterschiedlichen Komponenten zusammen.

Für die hier betrachtete Modellbildung sind der Luftwiderstand, der Steigungswiderstand, der Rollwiderstand, sowie der Beschleunigungswiderstand zu berücksichtigen. Anteile zufolge erhöhter Trägheit rotierender Massen im Antriebsstrang bleiben unberücksichtigt, da sie bei der hier vorliegenden Betrachtungsweise als „innere Größen“ gesehen werden müssen, die implizit in den Immissionsmessdaten bereits berücksichtigt sind. Die Tatsache, dass hinsichtlich des Rollwiderstandes unterschiedliche Verhältnisse bei den Messungen am Leistungsprüfstand (nur die Reifen der Antriebsachse rollen) und während der Messfahrten (alle Reifen rollen) herrschten, ist als zusätzlicher Unsicherheitsbeitrag der Berechnungsmodelle zu sehen (siehe Kapitel 6.6.6).

Die einzelnen Fahrwiderstandsanteile berechnen sich gemäß Gleichungen (6.6) bis (6.9), wobei den einzelnen Formelzeichen folgende Bedeutungen zukommen

F_{Luft} ... Luftwiderstand	F_{Steig} ...Steigungswiderstand	F_{Roll} ...Rollwiderstand
ρ_{Luft} ...Massendichte der Luft	c_WLuftwiderstandsbeiwert	A Luftangriffsfläche
v Fahrzeuggeschwindigkeit	mFahrzeug-Gesamtmasse	α Straßen-Neigungswinkel
gErdbeschleunigung	aFahrzeugbeschleunigung	F_aBeschleunigungswiderstand
f_{Roll}Rollwiderstandskoeffizient		

$$F_{Luft} = \frac{\rho_{Luft}}{2} \cdot c_W \cdot A \cdot v^2 \quad (6.6)$$

$$F_{Roll} = m \cdot g \cdot f_{Roll} \cdot \cos(\alpha) \quad (6.7)$$

$$F_{Steig} = m \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (6.8)$$

$$F_a = m \cdot a = m \cdot \frac{dv}{dt} \quad (6.9)$$

In die Formel für den Luftwiderstand ist genau genommen die Relativgeschwindigkeit von Fahrzeug und Luftteilchen zu nehmen. Vereinfachend wird hier jedoch Luftstillstand angenommen (also kein Wind) und damit die Fahrzeuggeschwindigkeit eingesetzt.

Für die gesamte Antriebsleistung $P_{Antrieb}$ ergibt sich damit

$$P_{Antrieb} = (F_{Luft} + F_{Roll} + F_{Steig} + F_a) \cdot v \quad (6.10)$$

woraus auf triviale Weise über die Winkelgeschwindigkeit und den Reifendurchmesser auf das Lastdrehmoment umgerechnet werden kann.

Auf die oben gezeigte Weise kann daher, ausgehend von den Strecken- und Fahrzeugdaten, zusätzlich zu Momentan-Geschwindigkeit und Momentan-Beschleunigung für jeden Zeitschritt ein Momentan-Lastmoment ermittelt werden.

Für die Massendichte der Luft wurde in allen Fällen $1,2 \text{ kg/m}^3$ und für den Rollwiderstandskoeffizient ein mittlerer Wert von 0,02 angenommen.

6.6.4 Ermittlung der Momentan-Fahrzeugbetriebszustände und dazugehöriger Immissionsdatensätze

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits mehrfach angedeutet, sind die sich in der Praxis bei Hybridfahrzeugen einstellenden Fahrzeug-Betriebszustände von einer ganzen Reihe von äußeren (Geschwindigkeit, mechanischer Last, usw.) und inneren (z.B. Ladezustand der Batterie, etc.) Systemparametern abhängig und werden dynamisch von der Hybridregelung organisiert. Diese komplexen Regelmechanismen konnten naturgemäß in den erstellten einfachen Berechnungsmodellen für die Immissionsprognose nicht nachgebildet werden. Auf Basis der am Leistungsprüfstand während der Messfahrten und gezielten Brems- und Beschleunigungsmanövern gewonnenen Messergebnissen zeigte sich, dass dies auch nicht notwendig ist und dass auch mit einem vereinfachten Ansatz eine Immissionsprognose mit akzeptabler Genauigkeit möglich ist. Wie in Kapitel 6.6.2 beschrieben, wurden aus den durchgeführten Messungen für jedes Fahrzeug und jede Messposition vier Typen von Immissionsdatensätzen aufbereitet, nämlich

- Immissionsdaten für stationäre Geschwindigkeits- Lastverhältnisse
- Immissionsdaten für Beschleunigungsmanöver
- Immissionsdaten für Bremsmanöver
- Immissionsdaten für Fahrzeugstillstand

Auf Basis der aus Strecken- und Fahrzeugdaten ermittelten Momentangeschwindigkeit $v(t)$ und Momentanbeschleunigung $dv(t)/dt$ wird in den Berechnungsmodellen gemäß Abbildung 6.20 eine Entscheidung getroffen, welcher Datensatztyp für die Immissionsprognose verwendet wird.

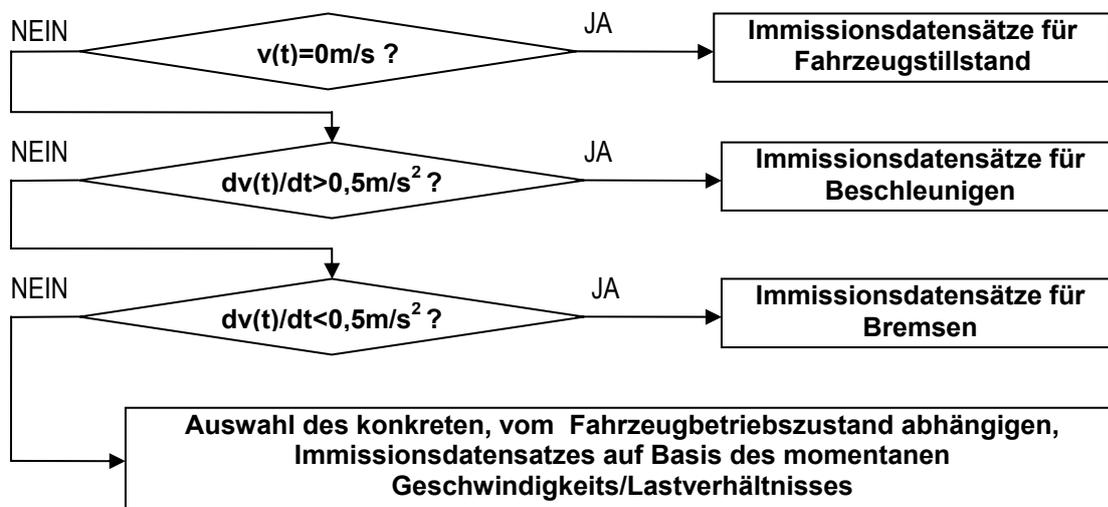


Abbildung 6.20: In den Berechnungsmodellen implementierte Entscheidungsstrategie

6.6.5 Interpolation der Immissionsdatensätze

Die Immissionsdatensätze liegen je nach Typ in unterschiedlicher Form vor:

Immissionsdatensätze für stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse liegen, wie in Abbildung 6.21 als Beispiel gezeigt, in Form von zweidimensionalen diskreten Funktionen in Abhängigkeit von Geschwindigkeit und Lastmoment $B/B_{ref}(v,M)$ vor. Die Ermittlung der tatsächlichen Immissionen für beliebige Geschwindigkeiten und Lasten erfolgt durch einfache lineare Interpolation zwischen benachbarten Stützstellen.

Die Immissionsdatensätze für Brems- und Beschleunigungsmanöver werden in Form von eindimensionalen, linearen Funktionen $B/B_{ref}(dv/dt)$ repräsentiert, ermittelt aus Immissionswerten bei ca. $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ und bei einer oberen Grenze für Brems- und Beschleunigungsmanöver (je nach Fahrzeug zwischen $\pm 1,5 \text{ m/s}^2$ und $\pm 2,5 \text{ m/s}^2$).

Die Immissionsdatensätze bei Fahrzeugstillstand bestehen lediglich aus einem Immissionswert $B/B_{ref}(v=0)$ pro untersuchter Messposition.

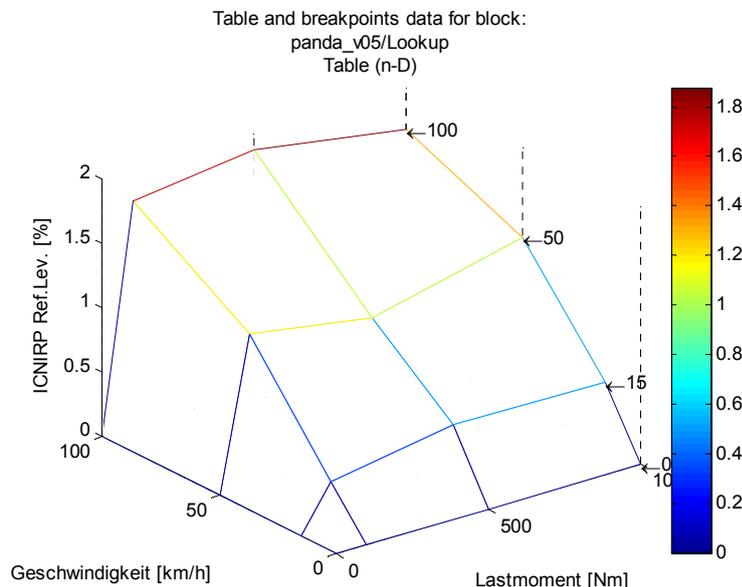


Abbildung 6.21: Beispiel für einen Immissionsdatensatz für stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse

Realisiert wurden die Berechnungsmodelle mit Hilfe des Softwarepakets MATLAB-Simulink.

6.6.6 Evaluierung und Unsicherheiten der Berechnungsmodelle

Die Unsicherheiten der Berechnungsmodelle bezüglich der Immissionsprognosen werden hauptsächlich durch die in Kapitel 6.6.2 beschriebenen notwendigen Vereinfachungen bei der Ableitung der Immissionsdatensätze bestimmt. Weiters stellen auch die vereinfachenden Annahmen der mechanischen Zusammenhänge (Kapitel 6.6.3), die Interpolationen der Datensätze, das „sprunghafte Umschalten“ zwischen den Datensätzen auf Basis starrer Entscheidungen (Kapitel 6.6.4), sowie Unsicherheiten bezüglich der Momentangeschwindigkeit und der Höhenaufzeichnungen relevante Unsicherheitsbeiträge dar. Eine Evaluierung der Berechnungsmodelle wurde auf Basis eines Vergleichs der Immissionen während einer Messfahrt entlang der in Kapitel 6.3.2 beschriebenen, ca. 60 km langen Teststrecke und den entsprechenden Berechnungsergebnissen durchgeführt. Die für

die Berechnungsmodelle als Eingangsgrößen notwendigen Geschwindigkeits- und Höhenverläufe über der Zeit wurden während der Messfahrten mittels eines GPS-Datenloggers aufgezeichnet. Abbildung 6.22 bis Abbildung 6.26 zeigen Vergleiche der prognostizierten Immissionsdaten mit den tatsächlichen, während der Testfahrt entlang der in Abbildung 6.8 gezeigten Strecke gemessenen Immissionen für alle untersuchten PKWs in Form von relativen Häufigkeiten der aufgetretenen Immissionen. Aufgrund der notwendigen Vereinfachungen in den Modellen bestehen teilweise relativ große Abweichungen bezüglich der Verteilungsform. Bezüglich des Mittelwerts und der Streuung der Immissionswerte zeigt sich jedoch gute Übereinstimmung zwischen prognostizierten und gemessenen Werten.

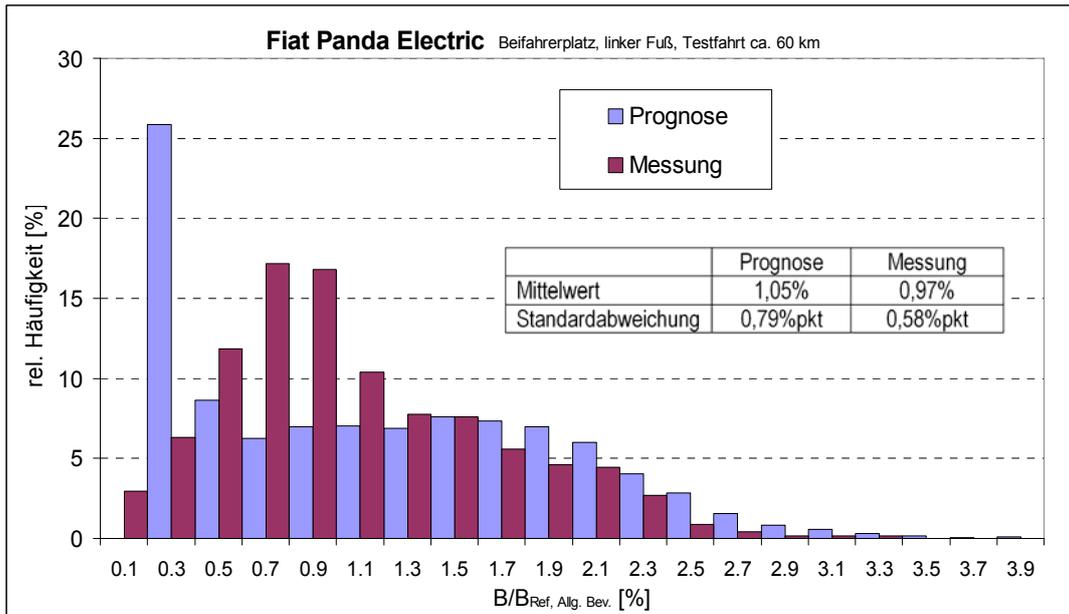


Abbildung 6.22: Vergleich von Prognose- und Messdaten im Fiat Panda Electric während der Fahrt entlang einer ca. 60 km langen Teststrecke gemäß Abbildung 6.8

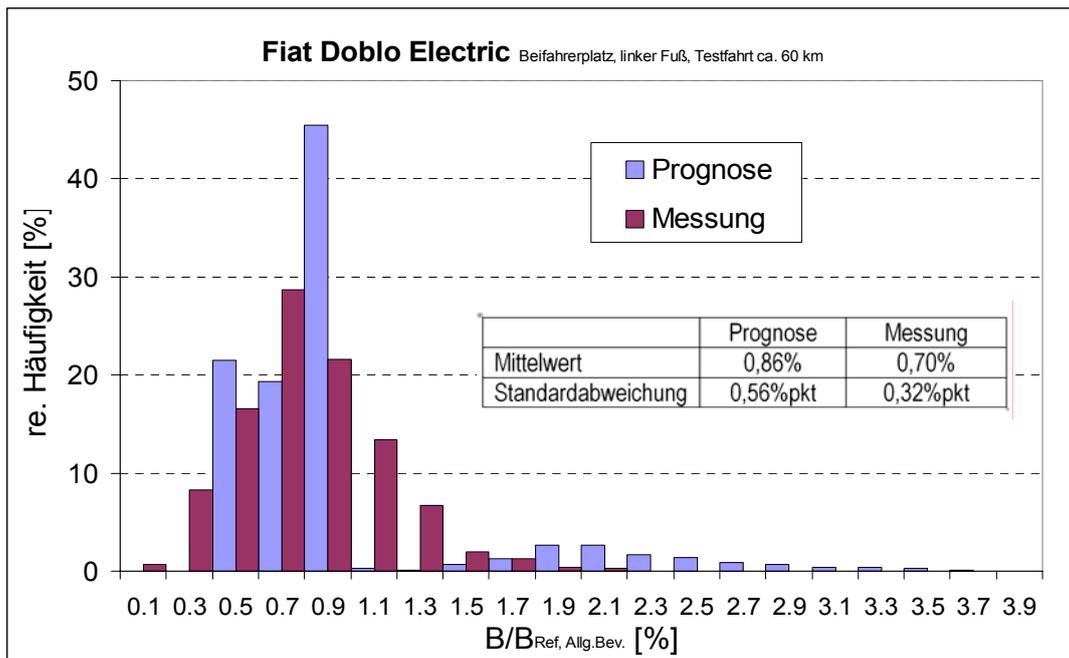


Abbildung 6.23: Vergleich von Prognose- und Messdaten im Fiat Doblo Electric während der Fahrt entlang einer ca. 60 km langen Teststrecke gemäß Abbildung 6.8

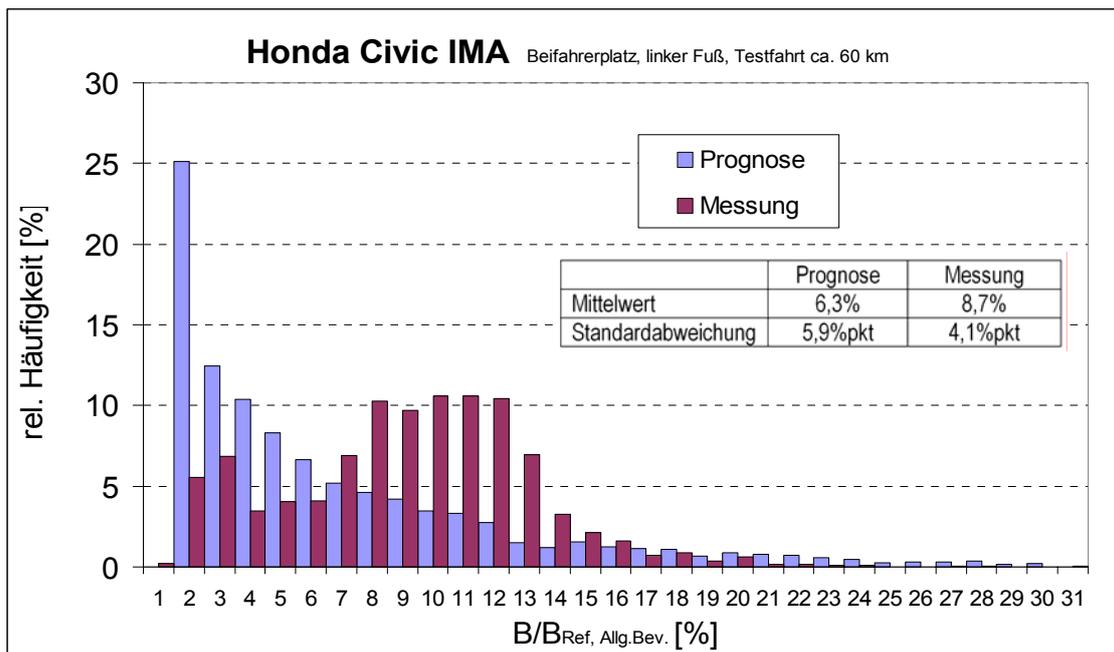


Abbildung 6.24: Vergleich von Prognose- und Messdaten im Honda Civic IMA während der Fahrt entlang einer ca. 60 km langen Teststrecke gemäß Abbildung 6.8

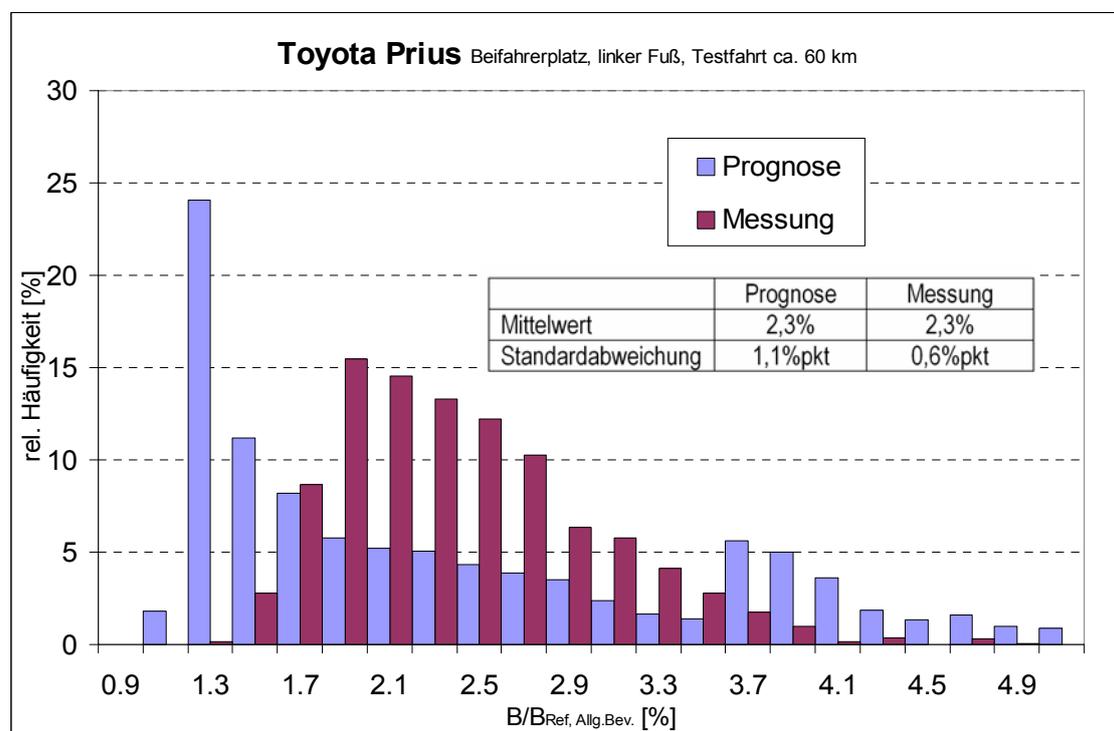


Abbildung 6.25: Vergleich von Prognose- und Messdaten im Toyota Prius während der Fahrt entlang einer ca. 60 km langen Teststrecke gemäß Abbildung 6.8

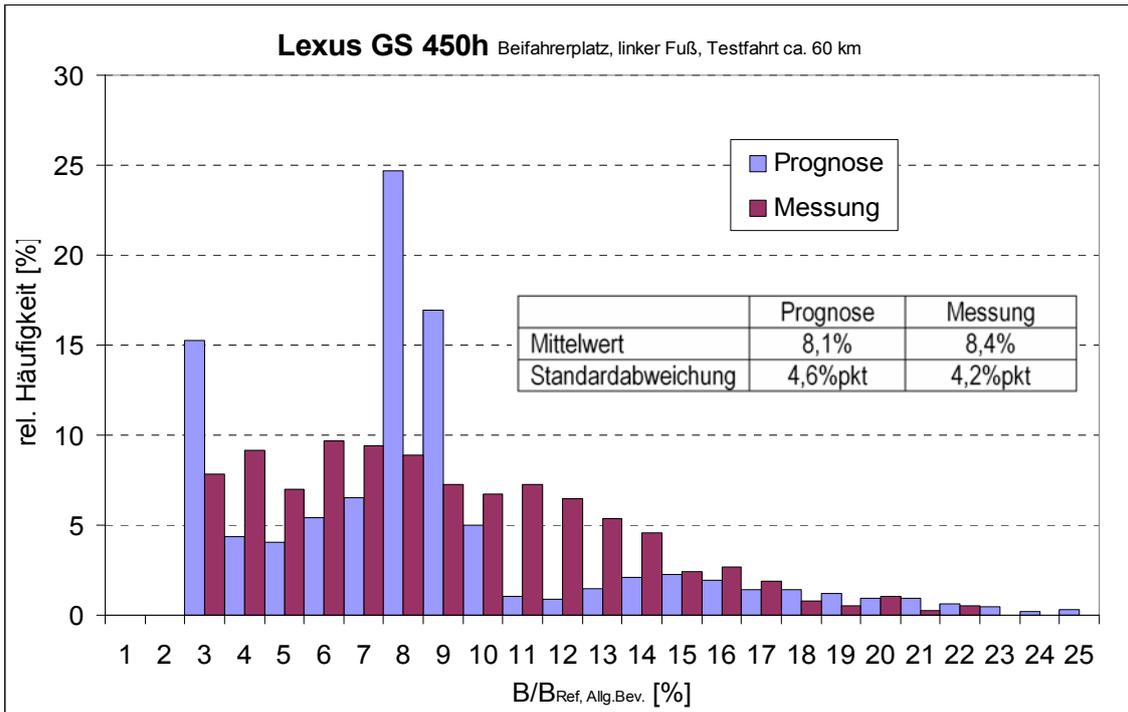


Abbildung 6.26: Vergleich von Prognose- und Messdaten im Lexus GS 450h während der Fahrt entlang einer ca. 60 km langen Teststrecke gemäß Abbildung 6.8

Auf Basis dieser Prognosemodelle wurden die Immissionen beim Fahren des in [22] definierten NEDC-Fahrzyklus (Abbildung 6.27) berechnet (siehe Kapitel 7), wobei als Höhenfunktion $h(t)=0$, d.h., Fahren in einer Ebene angenommen wurde.

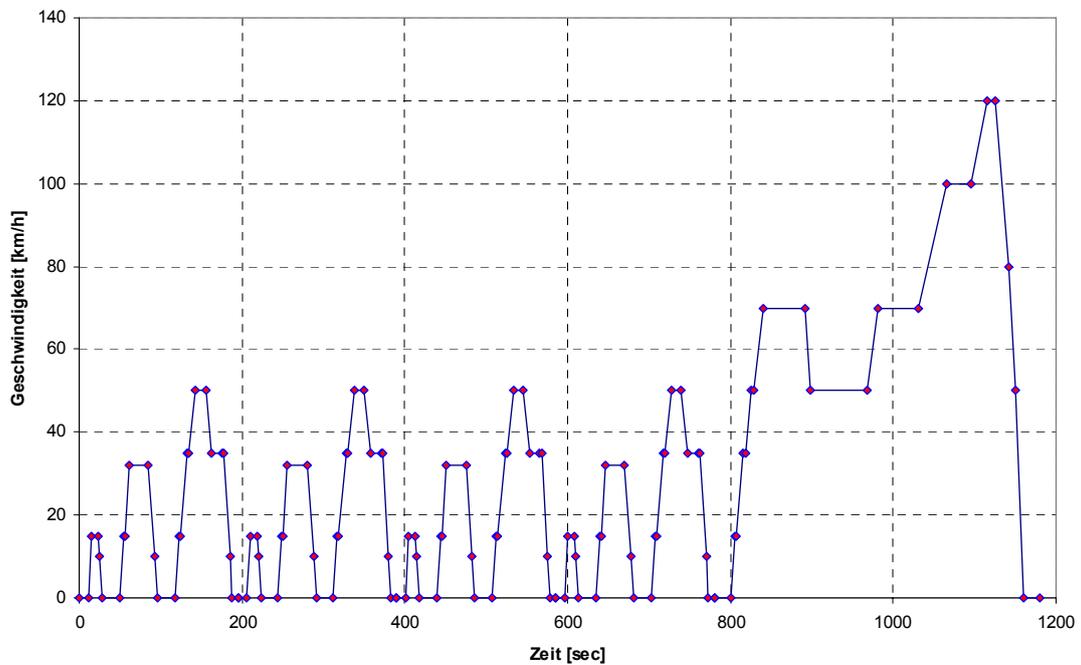


Abbildung 6.27: Der NEDC Fahrzyklus gemäß [22]

7 MESSERGEBNISSE

In den folgenden Kapiteln werden die im Rahmen der durchgeführten Messungen in den untersuchten Fahrzeugen erhobenen Immissionsdaten zusammengefasst. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt dabei primär anhand der strahlenschutztechnisch relevanten Bewertungsgröße, nämlich der phasenrichtigen Summe der auf die Referenzwerte bezogenen Einzelspektralanteile der Magnetfeldimmission. Diese wird durchgängig in % des Referenzwertes angegeben, wobei in den PKWs und auf den Fahrgastplätzen im Nahverkehrsbus die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung und in den Nutzfahrzeugen, sowie am Fahrerplatz des Nahverkehrsbusses die Referenzwerte für berufliche Exposition herangezogen wurden. Die phasenrichtige Summierung der auf die Referenzwerte bezogenen Einzelspektralanteile erfolgte dabei in allen Fällen über den gesamten interessierenden Frequenzbereich von 0 Hz -100 kHz (vgl. Kapitel 6.2 bzw. 6.4). Bei allen Angaben dieser Bewertungsgröße sind etwaige zufolge von Reifenmagnetisierung aufgetretenen Immissionsanteile bereits eliminiert.

Zusätzlich zu dieser Bewertungsgröße werden zur Veranschaulichung teilweise Zeitbereichsdarstellungen der Immissionsgröße gezeigt. Diese Darstellungen entsprechen den aufgezeichneten Signalen vom Analogausgang der verwendeten Feldsonde ELT 400, d.h., dem Immissionssignal im Frequenzbereich von 10 Hz bis 100 kHz (vgl. Kapitel 6.2), und zeigen auch etwaige zufolge von Reifenmagnetisierung aufgetretenen Magnetfeldanteile. In den meisten Fällen werden zusätzlich zu den Zeitbereichsdarstellungen auch die zugehörigen (Effektivwert-) Spektren, sowie die mit dem Frequenzgang der Referenzwerte gewichteten (Effektivwert-)Spektren dargestellt, um einen Eindruck über die Relevanz der einzelnen Spektralkomponenten im Hinblick auf die resultierende, auf die Referenzwerte bezogene, Immission zu vermitteln. Alle derartigen Frequenzbereichsdarstellungen zeigen den Frequenzbereich 1 Hz bis 100 kHz und enthalten ebenfalls auch etwaige zufolge von Reifenmagnetisierung aufgetretenen Spektralanteile. Das Spektrum im Frequenzbereich von 1 Hz – 10 Hz wurde dabei aus den Messungen mit dem Chauvin Arnoux Feldmeter, das Spektrum im Frequenzbereich 10 Hz-100 kHz aus den Messungen mit dem ELT400 Feldmeter gewonnen (vgl. Kapitel 6.2).

Weiters erfolgen fallweise Angaben zum Effektivwert der Magnetfeldimmissionen. Diese Angaben entsprechen dem Effektivwert im Frequenzbereich von 10 Hz – 100 kHz (inklusive etwaiger Magnetfeldanteile zufolge etwaiger Reifenmagnetisierung). Der Frequenzbereich unterhalb von 10 Hz wurde für die Effektivwertdarstellung ausgeblendet, da er in den meisten Fällen von den in Kapitel 6.5 erwähnten Bewegungsartefakten dominiert war und dadurch zu unverhältnismäßigen Verfälschungen (in Richtung einer Erhöhung) des tatsächlichen Gesamt-Effektivwertes der Immissionen führte.

Abgesehen von den exemplarischen graphischen Darstellungen der Immissionsspektren sind detaillierte quantitative Angaben bezüglich der spektralen Zusammensetzung der Immissionen schwierig, da diese stark abhängig von der Drehzahl des Elektromotors/generators und damit vom jeweiligen momentanen Fahrzeugbetriebszustand, der Fahrzeuggeschwindigkeit und der mechanischen Last variiert. Um dennoch einen quantitativen Überblick über das Immissionsspektrum zu geben, sind für jeden untersuchten Hybrid- und Elektro-PKW die Frequenzbereiche angegeben, die jeweils 50%, 75% und 90% der Gesamtimmission beinhalten, wobei diese Daten auf Basis der Messdaten vom Leistungsprüfstand ermittelt wurden. Um

auch (zumindest größenordnungsmäßig) einen Vergleich der in den Fahrzeugen maximal auftretenden Immissionen mit den 50 Hz-Immissionen des Energieversorgungsnetzes zu ermöglichen, werden schließlich auch die Maximalimmissionen im Frequenzbereich 40-60 Hz an den untersuchten Sitzplätzen in Form des resultierenden Effektivwertes der Immissionen innerhalb dieses Frequenzbereichs angegeben. Diese Angaben sind jeweils bezüglich etwaiger Magnetfeldkomponenten zufolge der Reifenmagnetisierung bereits korrigiert.

7.1 PKWs mit Elektro-Hybridantrieb

Dem Zeitgeist entsprechend werben derzeit praktisch alle großen Autohersteller mit dem Schlagwort Hybridtechnik. Wenngleich es eine Tatsache ist, dass die Elektro-Hybridtechnik in den Entwicklungsabteilungen der Hersteller gegenwärtig mit Sicherheit eines der zentralen Themen ist, sind bisher nur von sehr wenigen Herstellern Serienfahrzeuge mit Elektro-Hybridantrieb auf den europäischen Markt gebracht worden. Berücksichtigt man weiters, dass es sich bei einigen der beworbenen Hybrid-PKWs nur um Mikro-Hybridkonzepte handelt, bleiben schlussendlich nur drei Marken, die gegenwärtig zumindest Mild- oder Vollhybridfahrzeuge am europäischen Markt haben, nämlich Honda, Toyota und Lexus. Daher wurde jeweils ein Hybridfahrzeug jeder der genannten Marken in die Untersuchungen aufgenommen.

7.1.1 Honda Civic IMA 2006

Beim Honda Civic IMA (Serie 2006) handelt es sich um ein Mild-Hybrid Konzept. D.h., ein zusätzlich zum Verbrennungsmotor vorhandener Elektromotor kann bei Bedarf (z.B. Beschleunigen oder Bergauffahren) zusätzliches Drehmoment bereitstellen (Assist-Betrieb), wodurch der Hauptantriebsmotor (Verbrennungsmotor) etwas kleiner und damit sparsamer dimensioniert werden kann. Beim Bremsen, bzw. beim Bergabfahren, arbeitet der Motor als Generator und lädt die Batterie (Rekuperation). Die Regelung des Hybridsystems sorgt automatisch dafür, dass der Batterieladezustand einen festgelegten kritischen Wert nicht unterschreitet. D.h., wird durch lang anhaltende Dauerbelastung dieser kritische Batterieladezustand erreicht, so steht kein zusätzliches Drehmoment vom Elektromotor mehr zur Verfügung, sondern das Fahrzeug wird konventionell (vom Verbrennungsmotor) angetrieben, wobei gleichzeitig (wenn immer es die Lastverhältnisse zulassen) die Batterie wieder geladen wird (Elektromotor arbeitet, angetrieben vom Verbrennungsmotor, als Generator). Zusätzlich ist eine Start/Stopp Automatik implementiert, die bei Stillstand des Fahrzeugs den Verbrennungsmotor ab- und beim Wiederauffahren wieder einschaltet.

Die aus strahlenschutztechnischer Sicht wichtigsten technischen Daten des Fahrzeugs sind im Folgenden zusammengestellt.

Batteriespannung:	ca. 158 V
Elektromotorart:	1 Stk. 3~ Synchronmotor mit Permanentmagnetläufer
E-Motornennleistung:	15 kW
Verbrennungsmotor:	1.3 Liter, 70 kW
Ort des E-Motors:	in einer Einheit mit Verbrennungsmotor (links) vorne
Batterie:	in Rückenlehne der Rückbank integriert
Leistungselektronik (Inverter):	in Rückenlehne der Rückbank (rechte Seite) integriert
Verkabelung Inverter-Motor:	im Fahrzeugboden in der rechten Fahrzeughälfte
Antriebsachse:	vorne

Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2 verdeutlichen Details zur Anordnung der einzelnen Fahrzeugkomponenten und Abbildung 7.3 zeigt das untersuchte Fahrzeug während der Messungen unter stationären Betriebsbedingungen am Leistungsprüfstand.

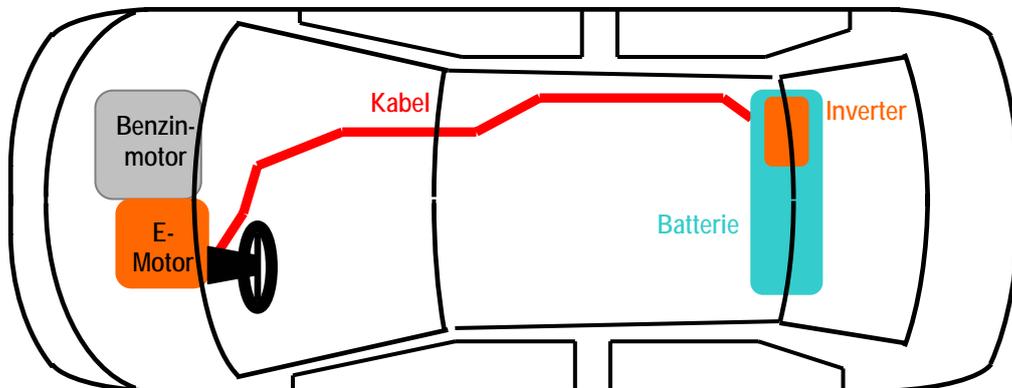


Abbildung 7.1: Schema der Anordnung der Systemkomponenten im Honda Civic IMA



Abbildung 7.2: Blick in den Motorraum des Honda Civic IMA

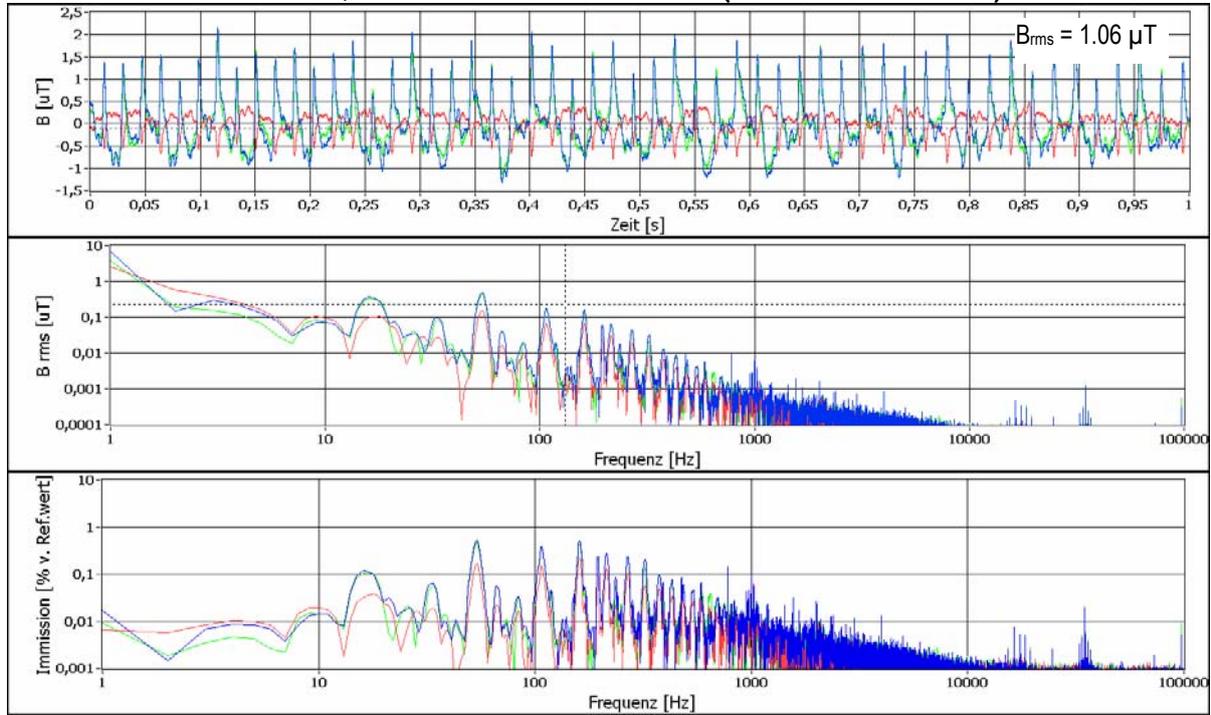


Abbildung 7.3: Der Honda Civic IMA auf dem Leistungsprüfstand

Abbildung 7.4 und Abbildung 7.5 zeigen Beispiele von gemessenen Immissionen im Fußbereich des Beifahrerplatzes unter jeweils stationären Verhältnissen bei

unterschiedlichen Geschwindigkeiten, sowie bei Beschleunigungs- und Bremsmanövern. Die Abbildungen zeigen erwartungsgemäß, dass sich mit steigender Geschwindigkeit die relevanten Spektralanteile der Immissionen zunehmend zu höheren Frequenzen verlagern (Abbildung 7.4).

Beifahrer, linker Fuß: 30 km/h 1000 Nm (normaler Fahrbetrieb)



Beifahrer, linker Fuß: 100 km/h 1000 Nm (Assist-Betrieb)

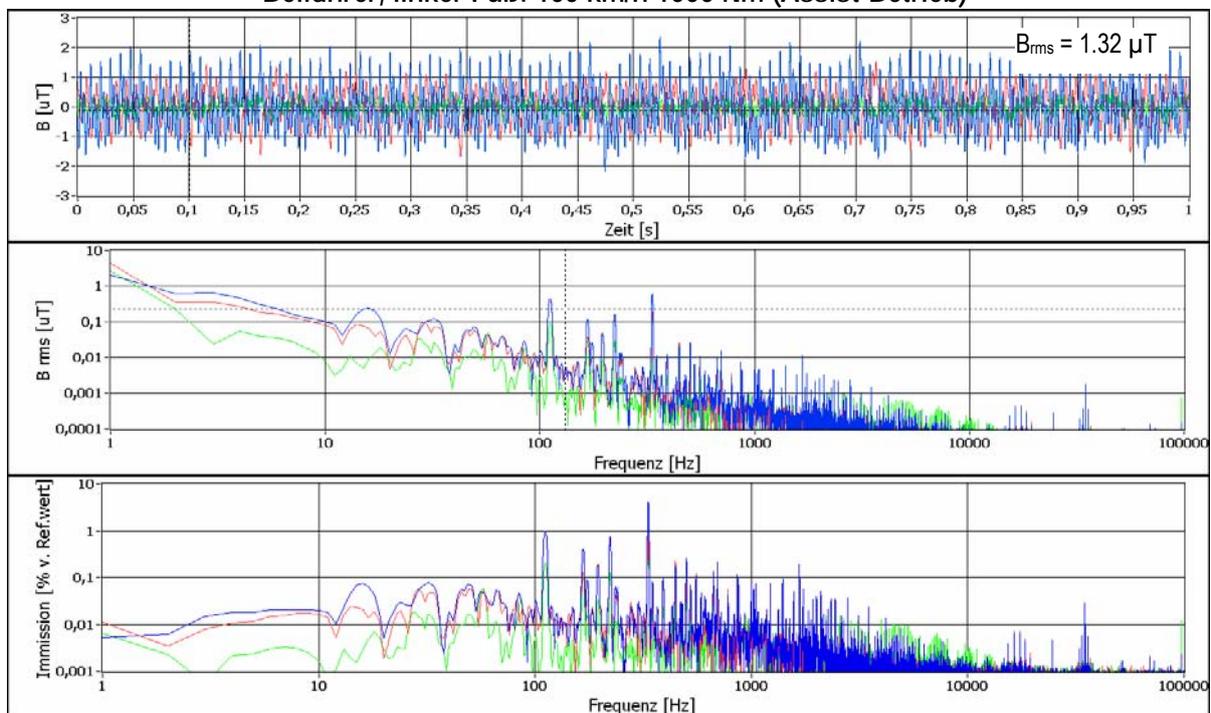


Abbildung 7.4: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Beifahrers unter stationären Verhältnissen bei 1000 Nm mechanischer Last an der Antriebsachse und 30 km/h (obere 3 Teilbilder) bzw. 100 km/h (untere 3 Teilbilder) Jeweils oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Die größten Immissionen treten bei starken Beschleunigungs- und Bremsmanövern auf (Abbildung 7.5).

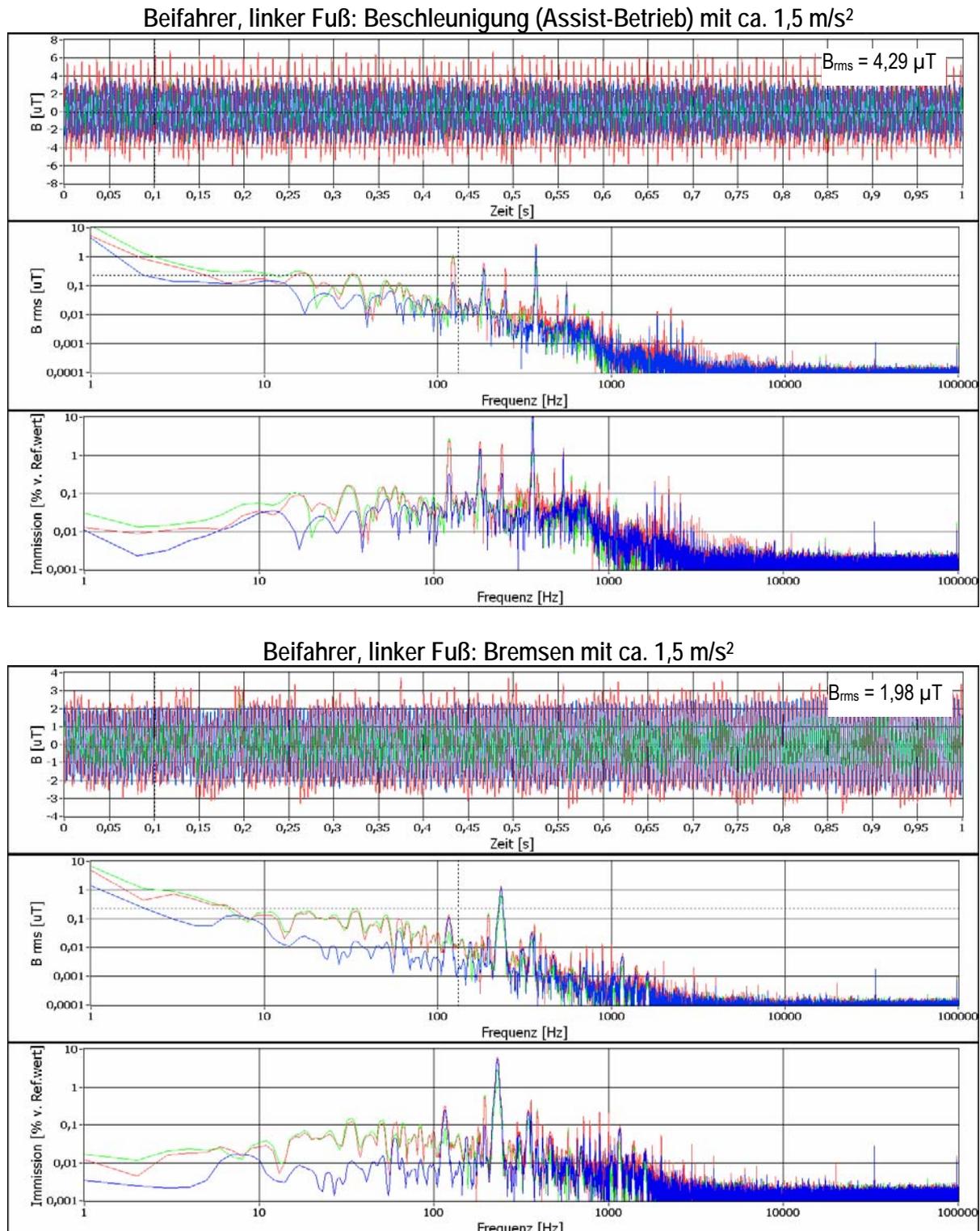


Abbildung 7.5: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Beifahrers während eines Beschleunigungs- (obere 3 Teilbilder) und eines Bremsmanövers (untere 3 Teilbilder) Jeweils oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Immissionsanteile zufolge Reifenmagnetisierung traten beim Honda nur geringfügig im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer zutage und wurden bei der Ermittlung der

resultierenden Bewertungsgröße (Abbildung 7.6 bis Abbildung 7.8 und Abbildung 7.12) eliminiert. Die dadurch entstehende zusätzliche Unsicherheit der Bewertungsgröße liegt für Messpositionen im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer bei weniger als $\pm 0,2\%$ pkt.

Tabelle 7.1 gibt einen quantitativen Überblick über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen, sowie über die Maximalimmission im Frequenzbereich 40-60 Hz.

	Beifahrer	Fahrer	Rückbank		$B_{rms,max}$ im Frequenzbereich 40-60 Hz
f 50%	32 - 584 Hz	61 – 1510 Hz	37 – 1025 Hz	Beifahrer	0,98 μ T
f 75%	17 - 864 Hz	42 – 1830 Hz	17 – 1419 Hz	Fahrer	1,14 μ T
f 90%	10 - 1025 Hz	32 – 3025 Hz	17 – 2835 Hz	Rückbank	1,51 μ T

Tabelle 7.1: Frequenzbereiche innerhalb derer 50%, 75% und 90% der resultierenden Gesamtimmission im Honda Civic IMA liegen (linker Tabellenteil), sowie der Maximalwert der Immissionen im Frequenzbereich 40-60 Hz (rechter Tabellenteil)

Abbildung 7.6 fasst die unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen am Leistungsprüfstand im Honda Civic IMA erhobenen Magnetfeldimmissionen zusammen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den gesamten untersuchten Geschwindigkeits- und Lastmomentbereich¹⁰ (von 15-160 km/h bzw. von 100-1500 Nm an der Antriebsachse). Die Fehlerindikatoren bezeichnen Maximal- und Minimalwerte. Die größten Immissionswerte traten am rechten Sitzplatz der hinteren Sitzreihe auf und erreichten (unter stationären Verhältnissen) lokal im Fußbereich bzw. im Unterleibsbereich bis zu ca. 12% bzw. ca. 10% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung nach [1] bzw. [19]. In der vorderen Sitzreihe zeigten sich die lokalen Immissionsmaxima jeweils im Fußbereich, jeweils auf der zur Fahrzeugmitte näheren Seite.

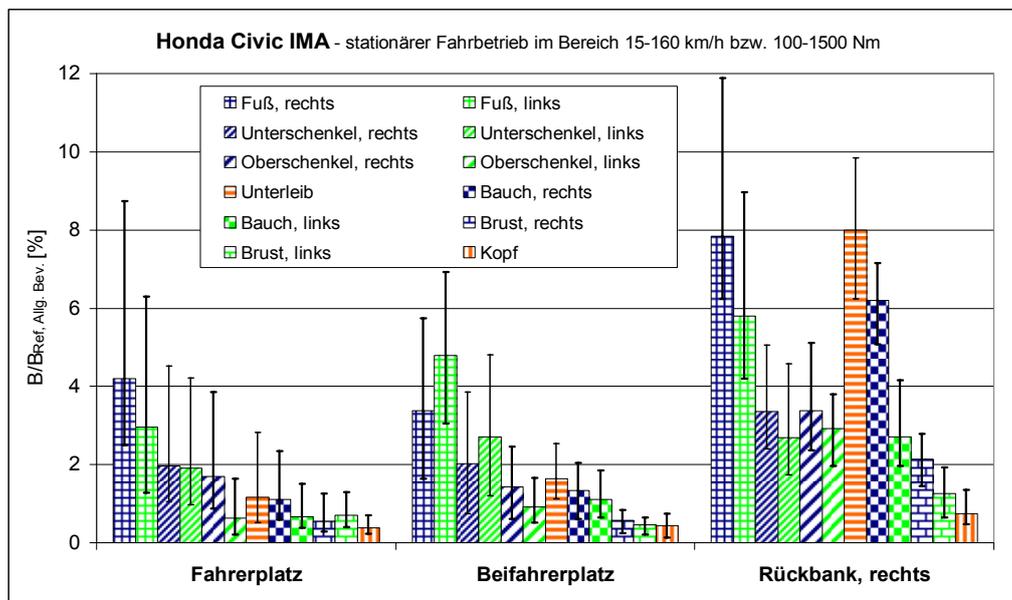


Abbildung 7.6: Zusammenfassung der im Honda Civic IMA am Leistungsprüfstand gemessenen Immissionen unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert für die unterschiedlichen Geschwindigkeits- und Lastzustände, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

¹⁰ Naturgemäß konnte bei hohen Lasten nicht mehr der gesamte angegebene Geschwindigkeitsbereich abgedeckt werden. Konkret waren beim Honda Civic IMA kurzfristig (ca. 1 Minute lang) Belastungen bis maximal 160 km/h bei 500 Nm, bis maximal 100 km/h bei 1000 Nm und bis maximal 50 km/h bei 1500 Nm möglich.

Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8 zeigen die während Brems- und Beschleunigungsmanöver erhobenen Magnetfeldimmissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den untersuchten Beschleunigungsbereich von ca. $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ bis ca. $\pm 2,0 \text{ m/s}^2$. Die Fehlerindikatoren bezeichnen wieder Maximal- und Minimalwerte. Die lokalen Immissionsmaxima erreichen hier im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer beim Beschleunigen Werte zwischen 30% und 35% und beim Bremsen zwischen 14% und 23% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung nach [1] bzw. [19] und liegen damit deutlich höher als die Vergleichswerte unter stationären Lastbedingungen an diesen Positionen. Auf der Rückbank zeigen sich gegenüber den stationären Verhältnissen ebenfalls höhere Immissionswerte beim Beschleunigen, die jedoch geringer sind als jene im Fußbereich der vorderen Sitzreihe.

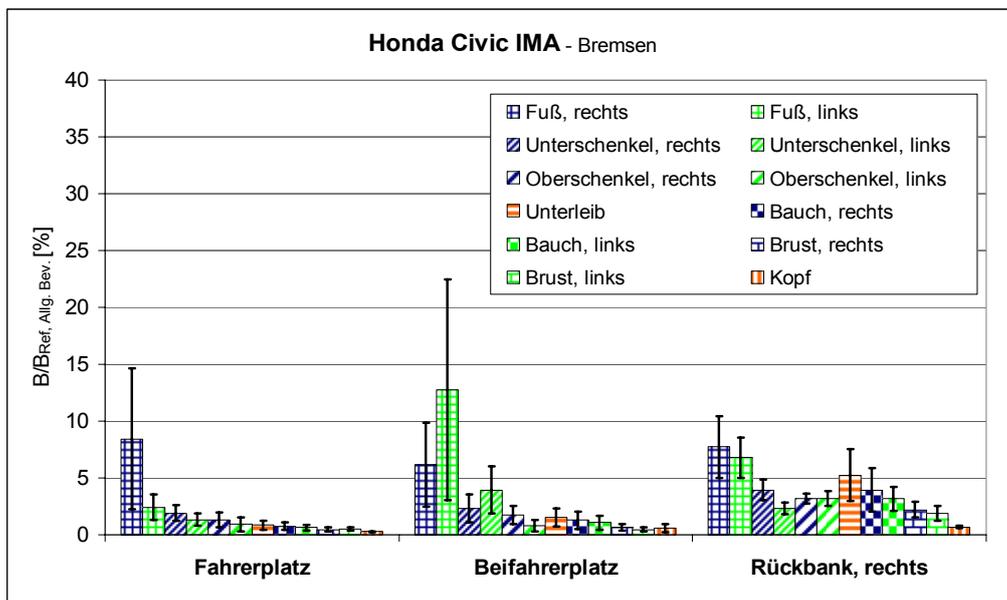


Abbildung 7.7: Zusammenfassung der im Honda Civic IMA bei Bremsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

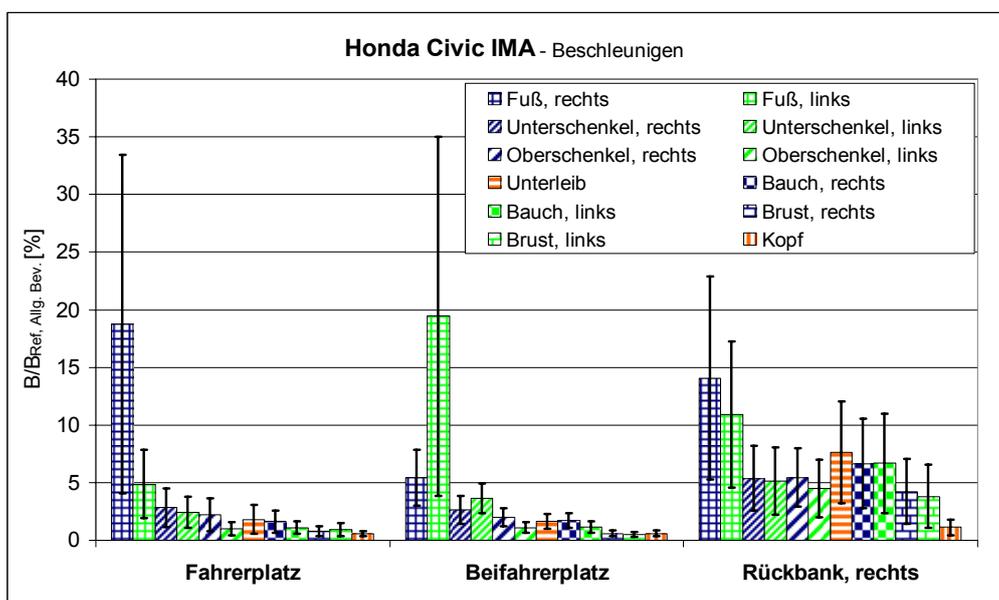


Abbildung 7.8: Zusammenfassung der im Honda Civic IMA bei Beschleunigungsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

Abbildung 7.9 fasst die Immissionen bei eingeschaltetem Fahrzeug im Stillstand zusammen. Während in diesem Zustand die Maximalimmissionen in der vorderen Sitzreihe lokal kaum mehr als 1% des Referenzwertes betragen, dominieren hier die Immissionen auf der untersuchten Sitzposition der Rückbank mit lokalen Maxima im Fuß- bzw. Unterleibs- und Bauchbereich zwischen 2% und knapp über 3% des Referenzwertes. Dies ist offensichtlich eine Konsequenz des Kabelverlaufs und der in der Rückenlehne der hinteren Sitzbank untergebrachten Leistungselektronik.

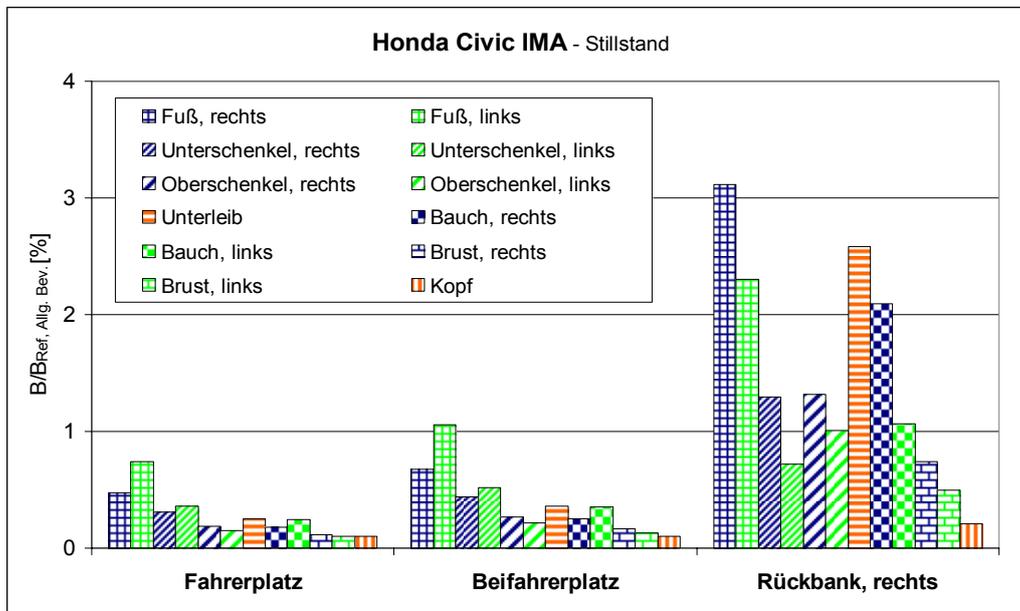


Abbildung 7.9: Zusammenfassung der im Honda Civic IMA bei Stillstand des Fahrzeugs gemessenen Immissionen.

Bezüglich kurzfristig auftretender transienter Magnetfeldimmissionen fasst Abbildung 7.10 die relevantesten Befunde zusammen (jeweils im Fußbereich des Beifahrers). Das obere Teilbild entspricht der Situation beim Einschalten des Fahrzeug-Systems. Der dabei aufgetretene Maximalwert der zeitlichen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte lag bei ca. 200 mT/s. Bei Verwendung der in Kapitel 6.4.5 beschriebenen Bewertungsmethode entspricht dies einer kurzzeitigen Exposition von ca. 11% des strengsten Basisgrenzwertes für die im Gewebe induzierte Stromdichte (2 mA/m²).

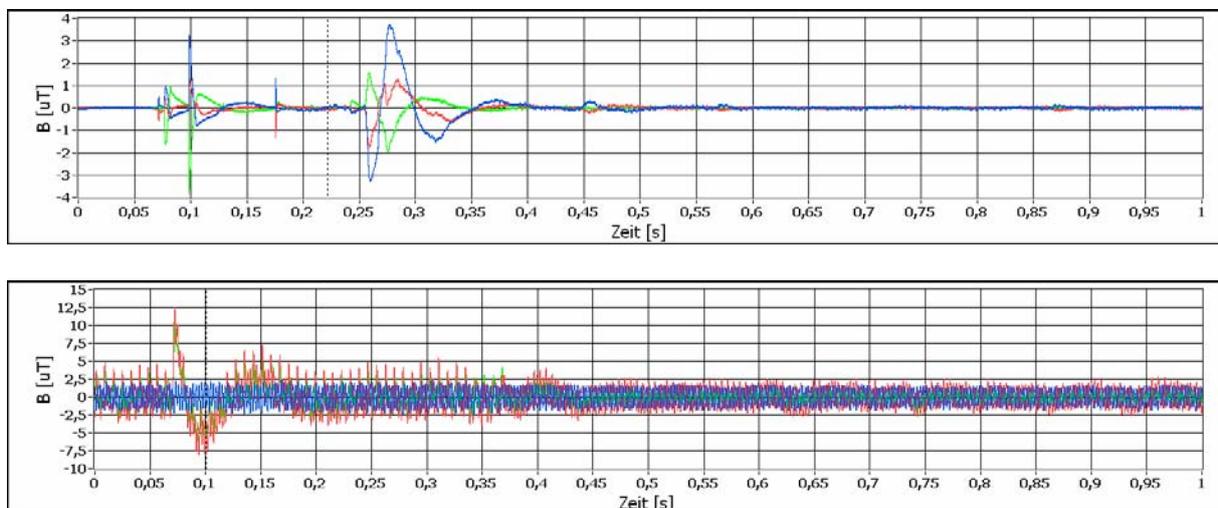


Abbildung 7.10: Kurzfristig auftretende transiente Magnetfelder im Honda Civic IMA, jeweils gemessen im Fußbereich des Beifahrers. Oben: Starten des Systems, unten: Transiente beim Übergang vom Assist- in den Rekuperationsbetrieb.

Für die im unteren Teilbild von Abbildung 7.10 dargestellte Transiente, die beim Übergang vom Assist- zum Rekuperationsbetrieb beobachtbar war, lag das maximale dB/dt bei ca. 10 mT/s, entsprechend ca. 0,6% des genannten Basisgrenzwertes.

Abbildung 7.11 zeigt die mit dem in Kapitel 6.6 beschriebenen Berechnungsmodell ermittelte Prognose der Immissionen beim Fahren des in [22] definierten NEDC-Fahrzyklus in Form der relativen Häufigkeiten der Immissionswerte an den Messpositionen jedes untersuchten Platzes, die sich im Zuge der Messungen als die am höchsten exponierten Stellen erwiesen.

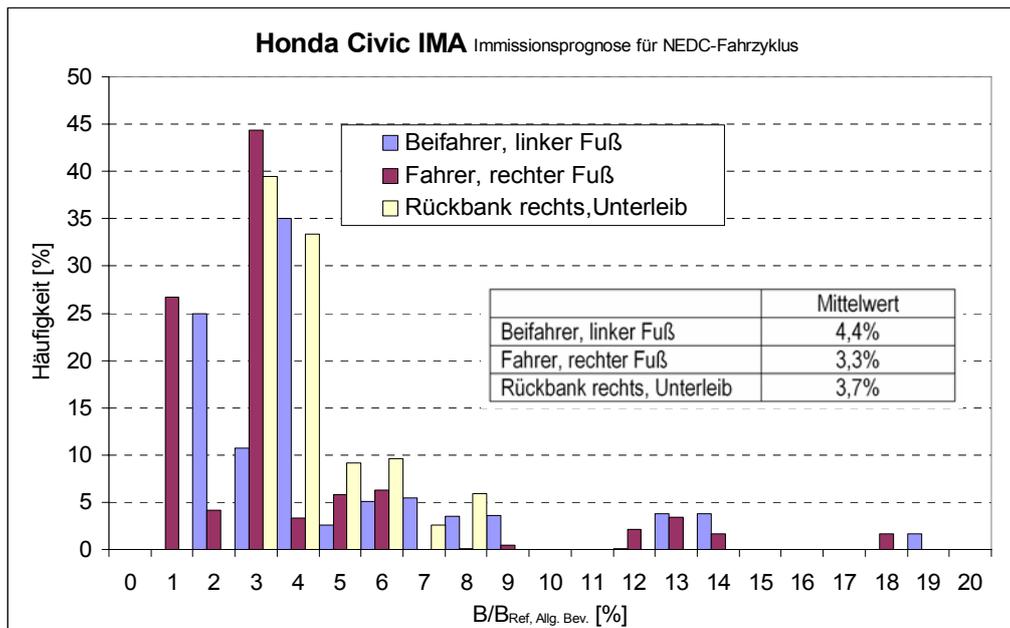


Abbildung 7.11: Immissionsprognose im Honda Civic IMA, beim Fahren des NEDC-Fahrzyklus

Augrund der großen Kooperationsbereitschaft der Honda Austria GmbH war es zusätzlich zu den Untersuchungen am Leistungsprüfstand und der Fahrt entlang der Teststrecke in Wien (Kapitel 6.3.2) möglich, erweiterte Messfahrten zu machen. Im Zuge dieser insgesamt ca. 3 Stunden dauernden Fahrt, die Stadt- Überland (mit bis zu ca. 10% Steigungen) und Autobahnabschnitte enthielt, wurden Messungen im Fußbereich des Beifahrers und im Unterleibsbereich des rechten Sitzes auf der Rückbank durchgeführt. Abbildung 7.12 fasst diese Messergebnisse zusammen.

Zusammenfassend zeigen die Untersuchungen im Honda Civic IMA, dass bei starkem Bremsen (Rekuperation) bzw. starkem Beschleunigen (Assist-Betrieb) lokal begrenzt im Fußbereich von Fahrer- und Beifahrer Immissionswerte von bis zu 23% bzw. 35% der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung auftreten können. Im stationären Fahrbetrieb zeigen sich im Allgemeinen geringere Immissionen als beim Bremsen und Beschleunigen, wobei in diesem Fall die Immissionen auf dem rechten Sitzplatz der Rückbank durchwegs oberhalb der Immissionen auf Fahrer- und Beifahrersitz liegen, was offensichtlich eine Folge des speziellen Kabelverlaufs und der in der Lehne der Rückbank integrierten Batterie und Leistungselektronik ist. Maximale Immissionswerte im Bereich des Rumpfes und des Kopfes liegen auf den Vordersitzen deutlich unterhalb der Werte im Fußbereich, bei maximal ca. 3% (Rumpf) bzw. ca. 1% (Kopf) des Referenzwertes. Auf der Rückbank können diese Werte bis zu ca. 10% (Rumpf) bzw. 1,5% (Kopf) erreichen. Im Vergleich zu den

genannten Maximalwerten der Immissionen können die zeitgemittelten Immissionen im praktischen Fahrbetrieb etwas niedriger erwartet werden (siehe Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12).

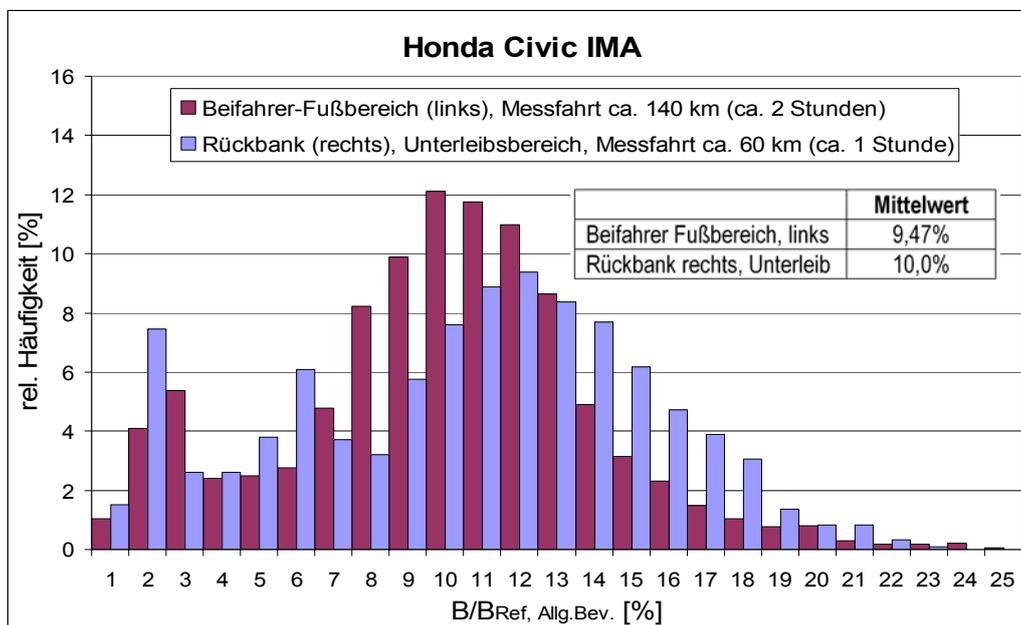


Abbildung 7.12: Relative Häufigkeiten der gemessenen Magnetfeldimmissionen während erweiterter Messfahrten

7.1.2 Toyota Prius

Das Systemkonzept des Toyota Prius entspricht einem leistungsverzweigten Vollhybrid. Dementsprechend sind rein elektrisches Fahren (bis ca. 30 km/h) und verschiedene kombinierte Antriebsarten, bei denen der Verbrennungsmotor und der(die) Elektromotor(en) Antriebsleistung erzeugen, bzw. im Generatorbetrieb die Batterie laden, möglich (vgl. Kapitel 6.6.2).

In welchem der möglichen Betriebszustände sich das Fahrzeug gerade befindet, wird durch eine komplexe Regelung in Abhängigkeit von den äußeren mechanischen Lastanforderungen und inneren Parametern (z.B. Batterieladezustand), unter der Prämisse eines möglichst effizienten (Benzin sparenden) Betriebs bestimmt. Wie bei jedem Vollhybrid ist eine Start/Stop Automatik implementiert, die bei Stillstand des Fahrzeugs den Verbrennungsmotor ab- und beim Wiederauffahren wieder einschaltet.

Die aus strahlenschutztechnischer Sicht wichtigsten technischen Daten des Fahrzeugs sind im Folgenden zusammengestellt. Abbildung 7.13 und Abbildung 7.14 verdeutlichen Details zur Anordnung der einzelnen Fahrzeugkomponenten.

Batteriespannung:	201,6 V
Elektromotorart:	2 Stk. 3~ Synchronmotor mit Permanentmagnetläufer
E-Motorgenerator 1	33 kW, max. 500V Klemmenspannung (Generator)
E-Motorgenerator 2	50 kW, max. 500V Klemmenspannung (Motor)
Verbrennungsmotor:	1.5 Liter, 70 kW
Ort der E-Motoren/generatoren:	in einer Einheit mit Verbrennungsmotor vorne, links
Batterie:	im Kofferraumboden unmittelbar hinter Rückbank
Leistungselektronik (Inverter):	im Motorraum über E-Motoren
Verkabelung Inverter-Batterie:	im Fahrzeugboden (siehe Abbildung 7.13)
Antriebsachse:	vorne

Abbildung 7.15 zeigt das untersuchte Fahrzeug während der Messungen unter stationären Betriebsbedingungen am Leistungsprüfstand.

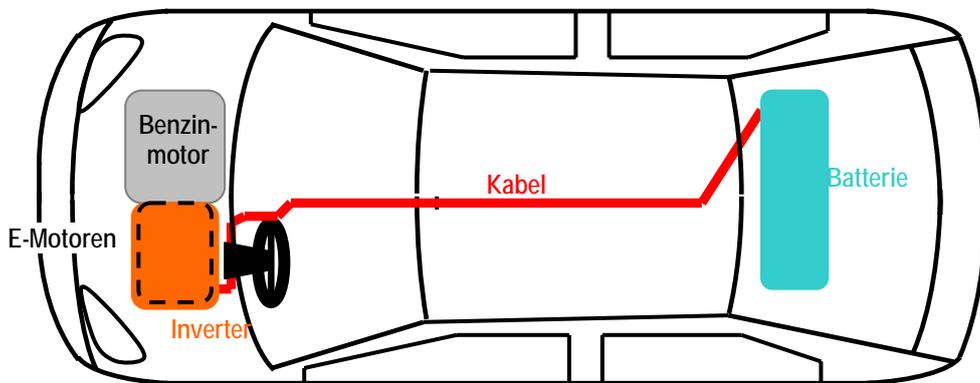


Abbildung 7.13: Schema der Anordnung der Systemkomponenten im Toyota Prius

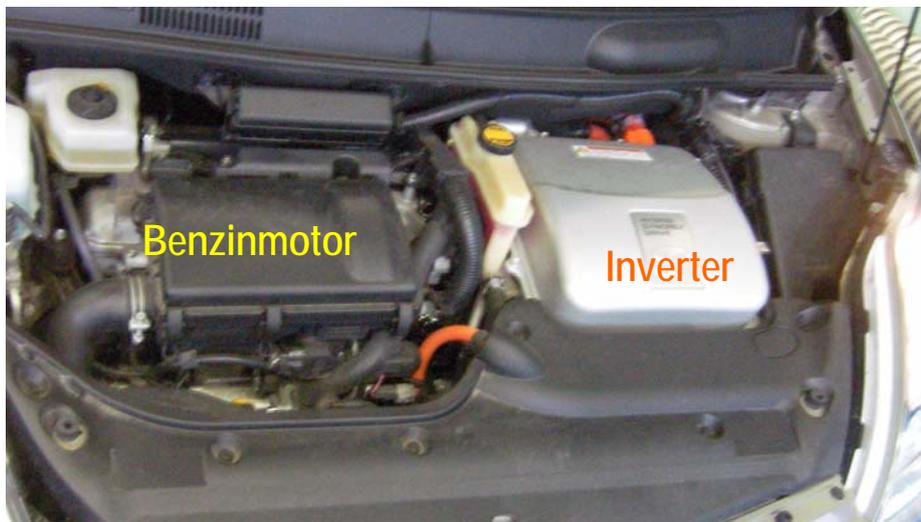


Abbildung 7.14: Motorraum des Toyota Prius



Abbildung 7.15: Der Toyota Prius auf dem Leistungsprüfstand

Abbildung 7.16 und Abbildung 7.17 zeigen Beispiele der Magnetfeldimmissionen im Toyota Prius für jeweils stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse bei rein elektrischem Fahren (Abbildung 7.16) und Fahren im Betriebszustand bei dem Antriebskraft sowohl vom Verbrennungsmotor als auch vom Elektromotor erzeugt und gleichzeitig die Batterie geladen wird (Abbildung 7.17). Abbildung 7.18 zeigt Beispiele für die Immissionen bei Beschleunigungs- und Bremsmanövern. Auch in diesem Fahrzeug zeigen sich im Verhältnis zum Referenzwert deutlich höhere Immissionen während dynamischer Fahrverhältnisse als während stationärer Verhältnisse.

Immissionsanteile zufolge Reifenmagnetisierung traten beim Toyota Prius nur geringfügig im Fußbereich, vor allem am Beifahrerplatz, auf (bis zu ca. 1% des Referenzwertes) und wurden bei der Ermittlung der resultierenden Bewertungsgröße (Abbildung 7.19 bis Abbildung 7.21 und Abbildung 7.25) eliminiert. Die dadurch entstehende zusätzliche Unsicherheit der Bewertungsgröße liegt für Messpositionen im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer bei weniger als 0,3%pkt.

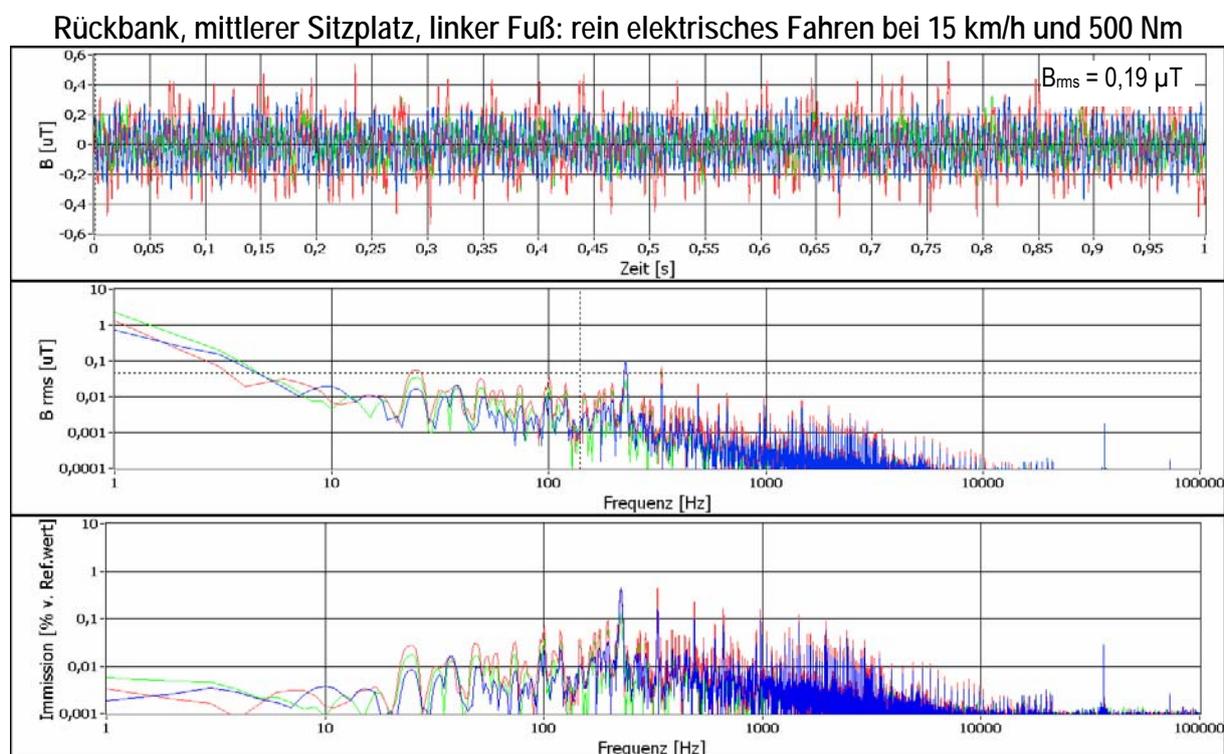
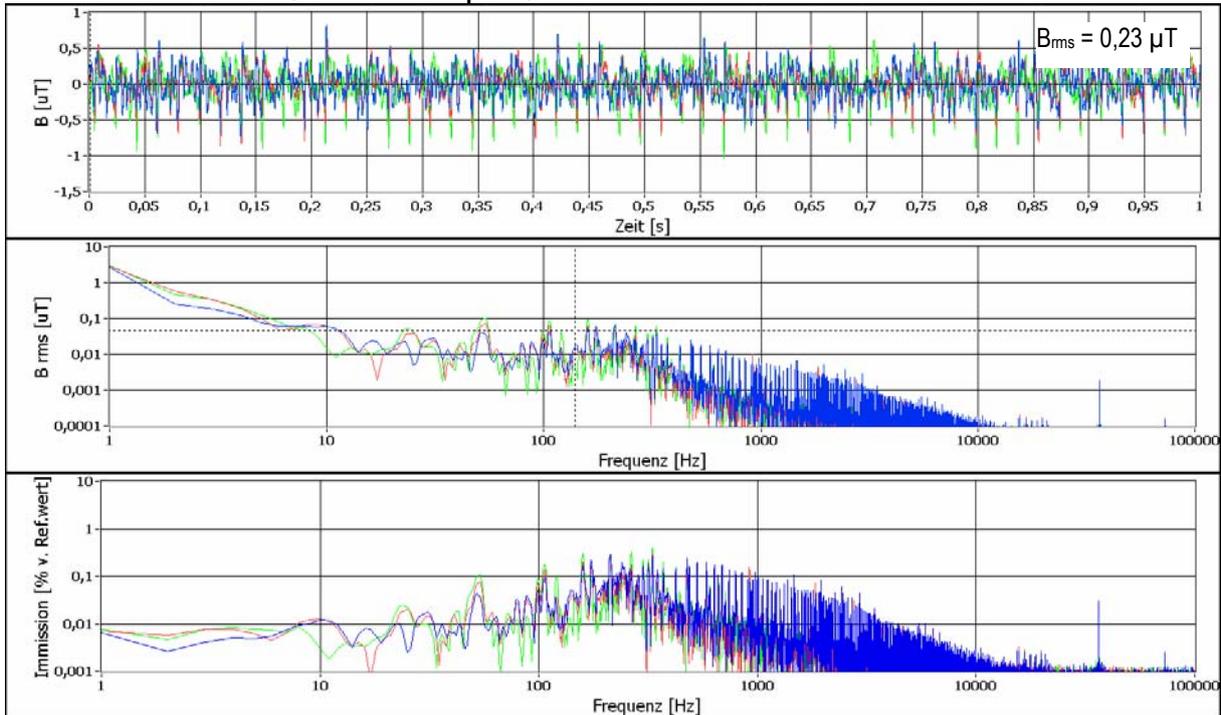


Abbildung 7.16: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des mittleren Sitzplatzes auf der Rückbank unter stationären Verhältnissen beim rein elektrischen Fahren mit 15 km/h gegen 500 Nm mechanische Last an der Antriebsachse
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Rückbank, mittlerer Sitzplatz, linker Fuß: stationär 30 km/h bei 1000 Nm



Rückbank, mittlerer Sitzplatz, linker Fuß: stationär 100 km/h bei 1000 Nm

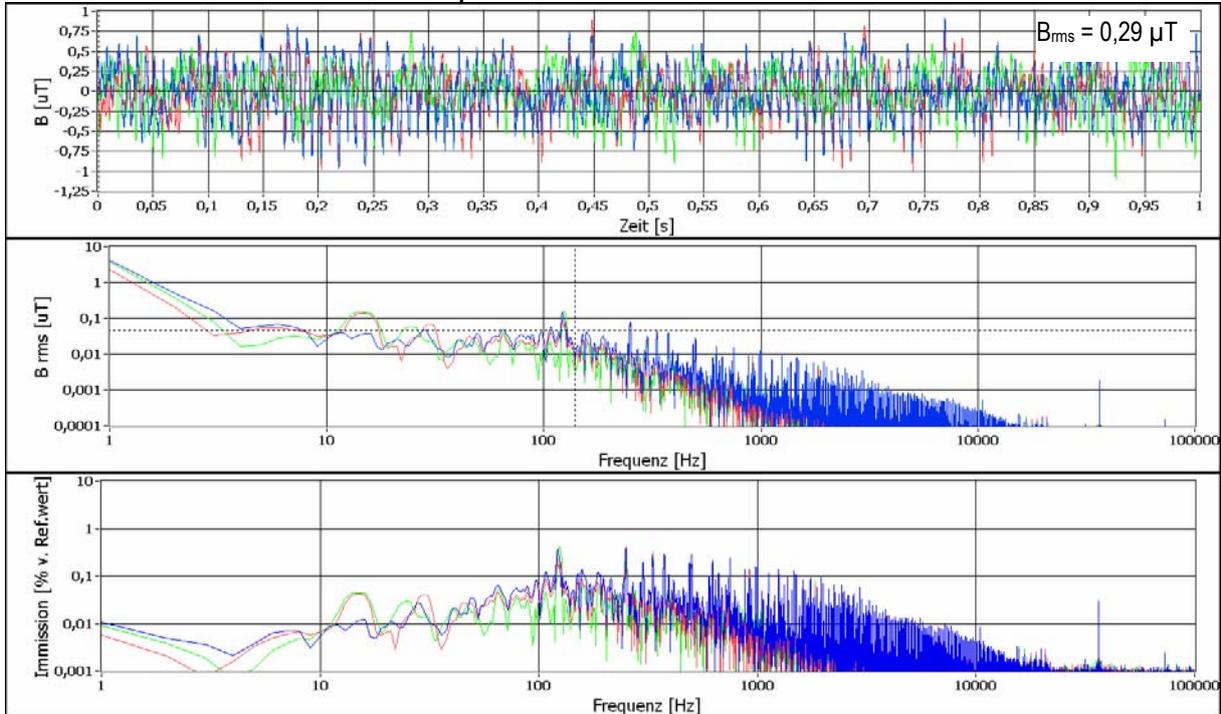
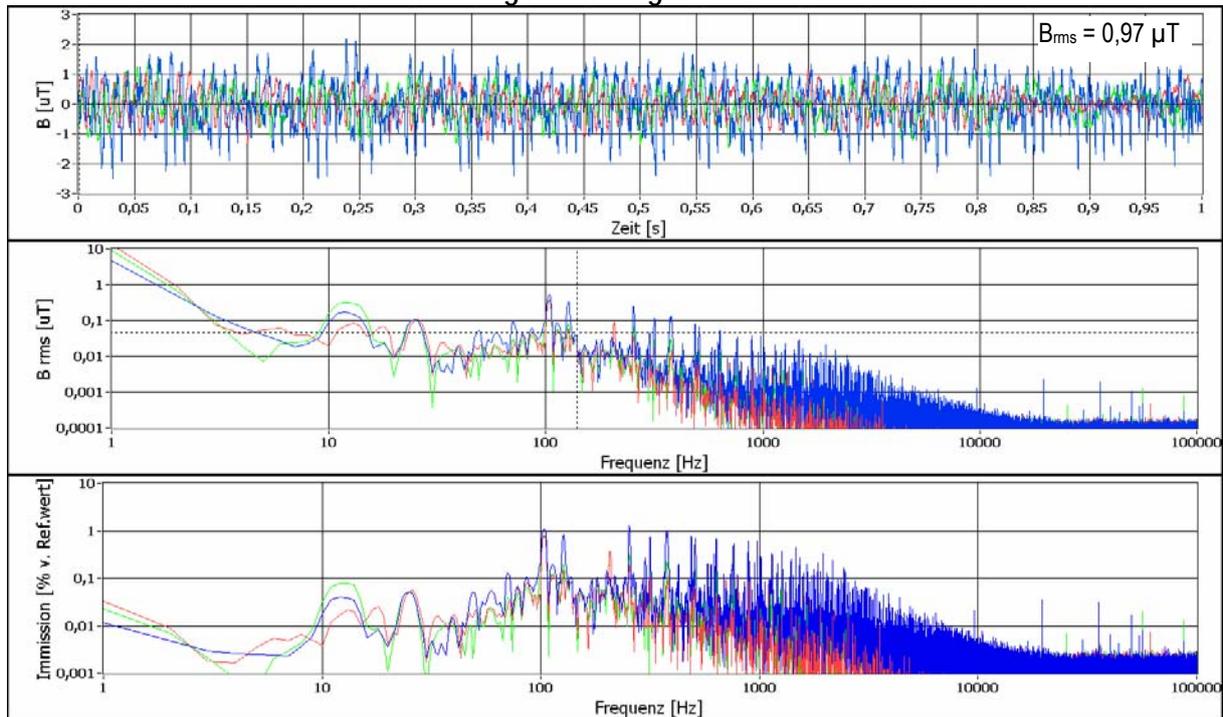


Abbildung 7.17: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des mittleren Sitzplatzes auf der Rückbank unter stationären Verhältnissen bei 1000 Nm mechanischer Last an der Antriebsachse und 30 km/h (obere 3 Teilbilder) bzw. 100 km/h (untere 3 Teilbilder). Jeweils oben: Zeitsignal (10 Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Rückbank, mittlerer Sitzplatz, linker Fuß: Boost während Beschleunigung (bergauf),
Momentangeschwindigkeit ca. 80 km/h



Rückbank, mittlerer Sitzplatz, linker Fuß: Rekuperation beim Bremsen (bergauf),
Momentangeschwindigkeit ca. 70 km/h

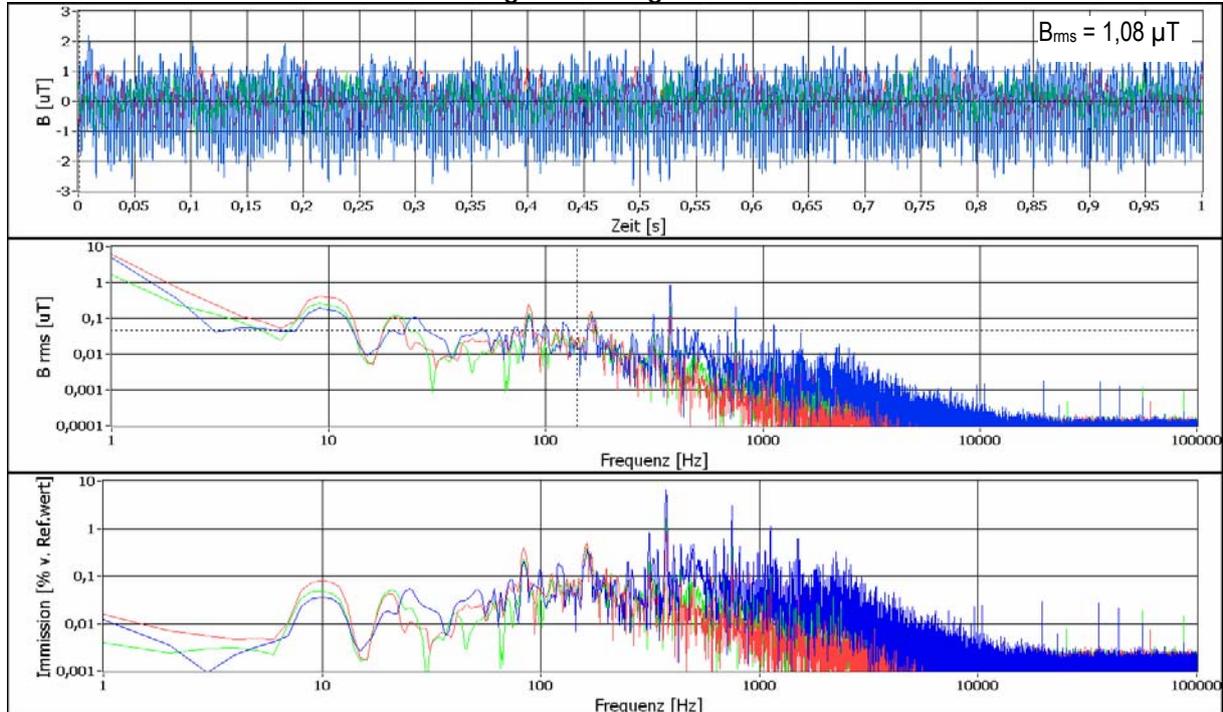


Abbildung 7.18: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des mittleren Sitzplatzes auf der Rückbank während eines Beschleunigungs- (obere 3 Teilbilder) und eines Bremsmanövers (untere 3 Teilbilder)
Jeweils oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Tabelle 7.2 gibt einen quantitativen Überblick über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen, sowie die Maximalimmission im Frequenzbereich 40-60 Hz.

	Beifahrer	Fahrer	Rückbank		$B_{rms,max}$ im Frequenzbereich 40-60 Hz
f 50%	31 - 1464 Hz	16 - 1861 Hz	75 - 1465 Hz	Beifahrer	0,32 μ T
f 75%	25 - 2440 Hz	16 - 2440 Hz	61 - 1846 Hz	Fahrer	0,38 μ T
f 90%	16 - 4879 Hz	16 - 4879 Hz	25 - 4879 Hz	Rückbank	0,21 μ T

Tabelle 7.2: Frequenzbereiche innerhalb derer 50%, 75% und 90% der resultierenden Gesamtimmission im Toyota Prius liegen (linker Tabellenteil), sowie der Maximalwert der Immissionen im Frequenzbereich 40-60 Hz (rechter Tabellenteil)

Abbildung 7.19 fasst die unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen am Leistungsprüfstand im Toyota Prius messtechnisch erhobenen Magnetfeldimmissionen zusammen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den gesamten untersuchten Geschwindigkeits- und Lastmomentbereich¹¹ (von 15-160 km/h bzw. von 100-2500 Nm an der Antriebsachse). Die Fehlerindikatoren bezeichnen Maximal- und Minimalwerte. Die größten Immissionswerte traten im Unterschenkelbereich des mittleren Sitzplatzes auf und erreichten (unter stationären Verhältnissen) lokal bis zu ca. 10% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung nach [1] bzw. [19]. In der vorderen Sitzreihe zeigten sich die lokalen Immissionsmaxima jeweils im Fußbereich, mit maximal ca. 7,5% (Fahrer) bzw. 5,5% (Beifahrer) des Referenzwertes jeweils auf der zur Fahrzeugmitte näheren Seite.

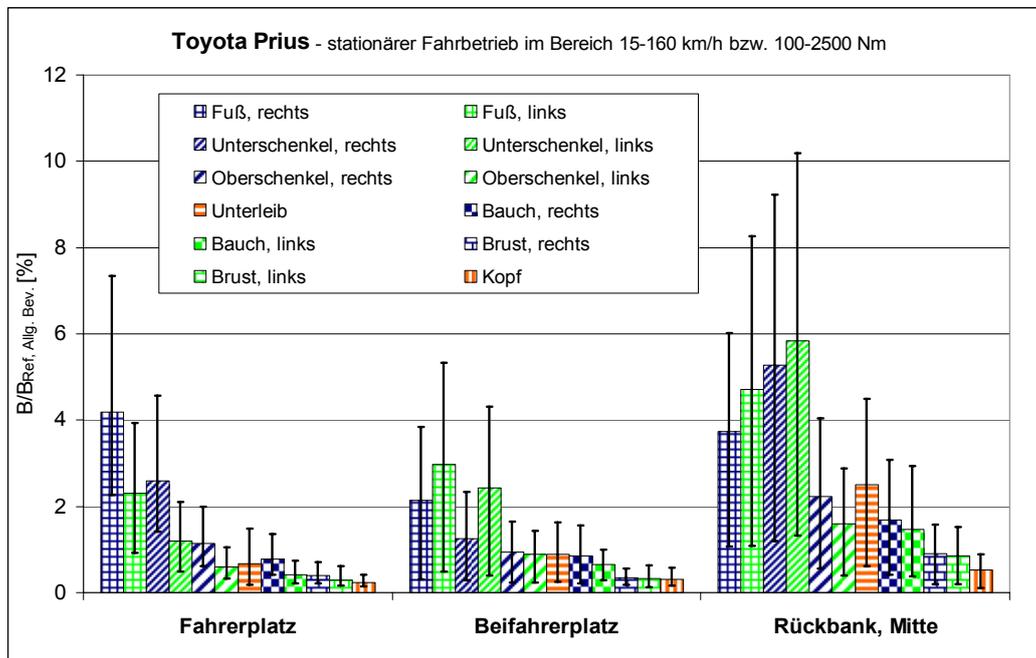


Abbildung 7.19: Zusammenfassung der im Toyota Prius am Leistungsprüfstand gemessenen Immissionen unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert für die unterschiedlichen Geschwindigkeits- und Lastzustände, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

¹¹ Naturgemäß konnte bei hohen Lasten nicht mehr der gesamte angegebene Geschwindigkeitsbereich abgedeckt werden. Konkret waren beim Toyota Prius kurzfristig (ca. 1 Minute lang) Belastungen bis maximal 160 km/h bei 1000 Nm, bis maximal 100 km/h bei 2000 Nm und bis maximal 30 km/h bei 2500 Nm möglich.

Abbildung 7.20 und Abbildung 7.21 zeigen die während Brems- und Beschleunigungsmanöver erhobenen Magnetfeldimmissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den untersuchten Beschleunigungsbereich von ca. $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ bis ca. $\pm 2,0 \text{ m/s}^2$. Die Fehlerindikatoren bezeichnen wieder Maximal- und Minimalwerte. Im Bereich des mittleren Sitzplatzes auf der Rückbank sind die lokalen Immissionsmaxima beim Beschleunigen und Bremsen etwas mehr als doppelt so groß wie unter stationären Verhältnissen. Auf den vorderen Sitzplätzen zeigen sich nur geringe Unterschiede zwischen den Maximalimmissionen unter stationären und dynamischen Verhältnissen, jedoch ebenfalls mit höheren Immissionswerten beim Bremsen und Beschleunigen.

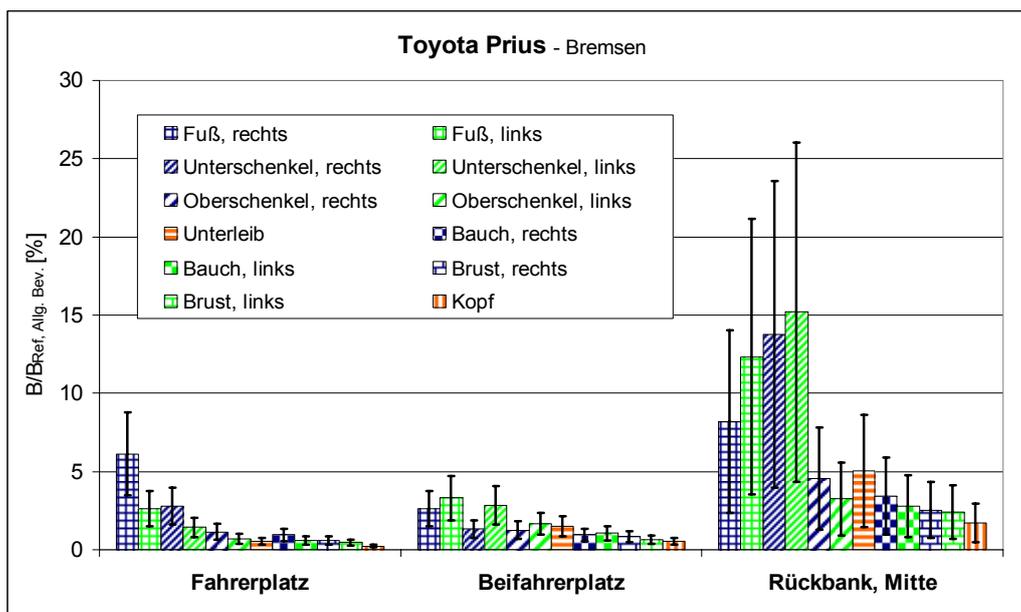


Abbildung 7.20: Zusammenfassung der im Toyota Prius bei Bremsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

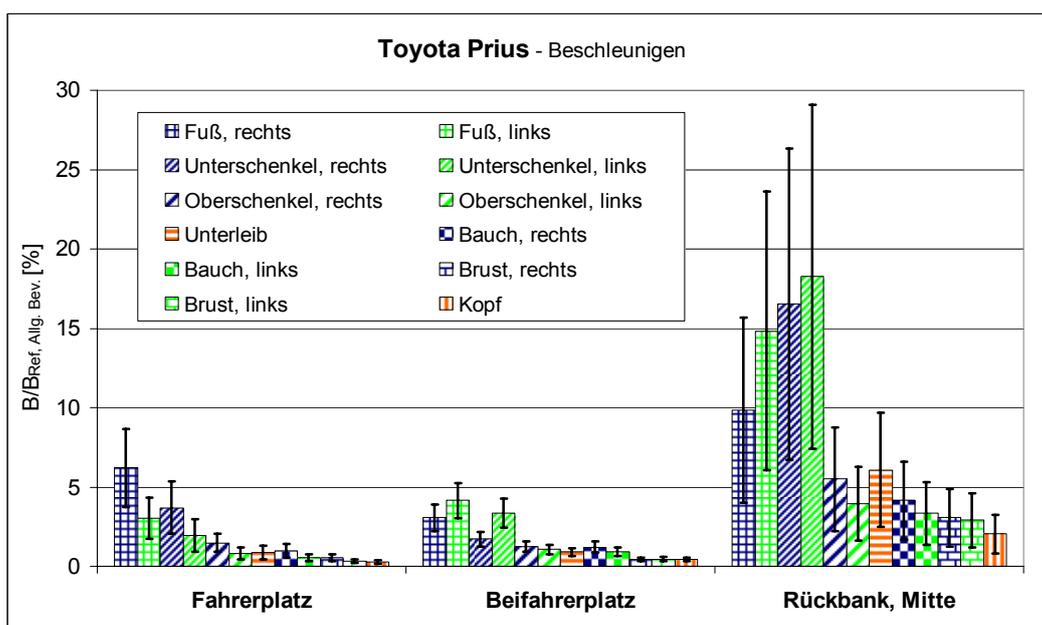


Abbildung 7.21: Zusammenfassung der im Toyota Prius bei Beschleunigungsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

Abbildung 7.22 fasst die Immissionen bei eingeschaltetem Fahrzeug im Stillstand zusammen. Im Bereich der Füße und Unterschenkel liegen die Immissionen auf allen Sitzplätzen im Bereich zwischen 0,5% und 2,5% des Referenzwertes. In allen anderen Positionen bleiben die Immissionswerte unterhalb von 1%, im Kopf- und Rumpfbereich unterhalb von 0,6% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung.

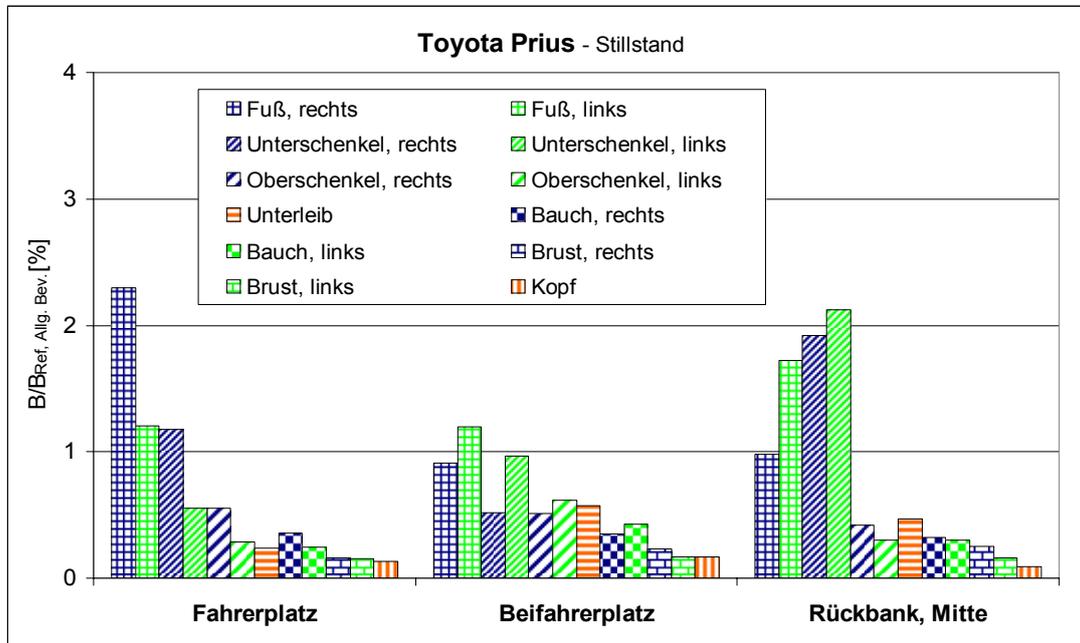


Abbildung 7.22: Zusammenfassung der im Toyota Prius bei Stillstand des Fahrzeugs gemessenen Immissionen.

Bezüglich kurzfristig auftretender transienter Magnetfeldimmissionen zeigt Abbildung 7.23 den im Laufe der Untersuchungen einzig beobachteten Fall, der beim Einschalten des Fahrzeug-Systems auftrat. Der dabei aufgetretene Maximalwert der zeitlichen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte lag bei ca. 100 mT/s. Bei Verwendung der in Kapitel 6.4.5 beschriebenen Bewertungsmethode entspricht dies einer kurzzeitigen Exposition von ca. 6% des strengsten Basisgrenzwertes für die im Gewebe induzierte Stromdichte (2 mA/m²).

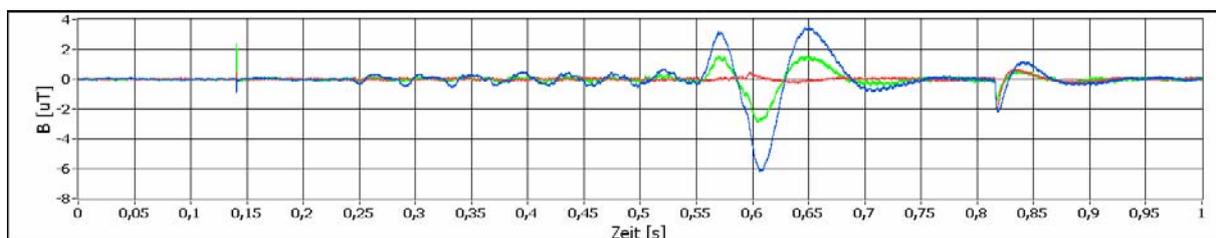


Abbildung 7.23: Kurzfristig auftretende transiente Magnetfelder im Toyota Prius während dem Systemstart, gemessen im Fußbereich des Beifahrers

Abbildung 7.24 zeigt die mit dem in Kapitel 6.6 beschriebenen Berechnungsmodell ermittelte Prognose der Immissionen beim Fahren des in [22] definierten NEDC-Fahrzyklus in Form der relativen Häufigkeiten der Immissionswerte an den Messpositionen jedes untersuchten Platzes, die sich im Zuge der Messungen als die am höchsten exponierten Stellen erwiesen.

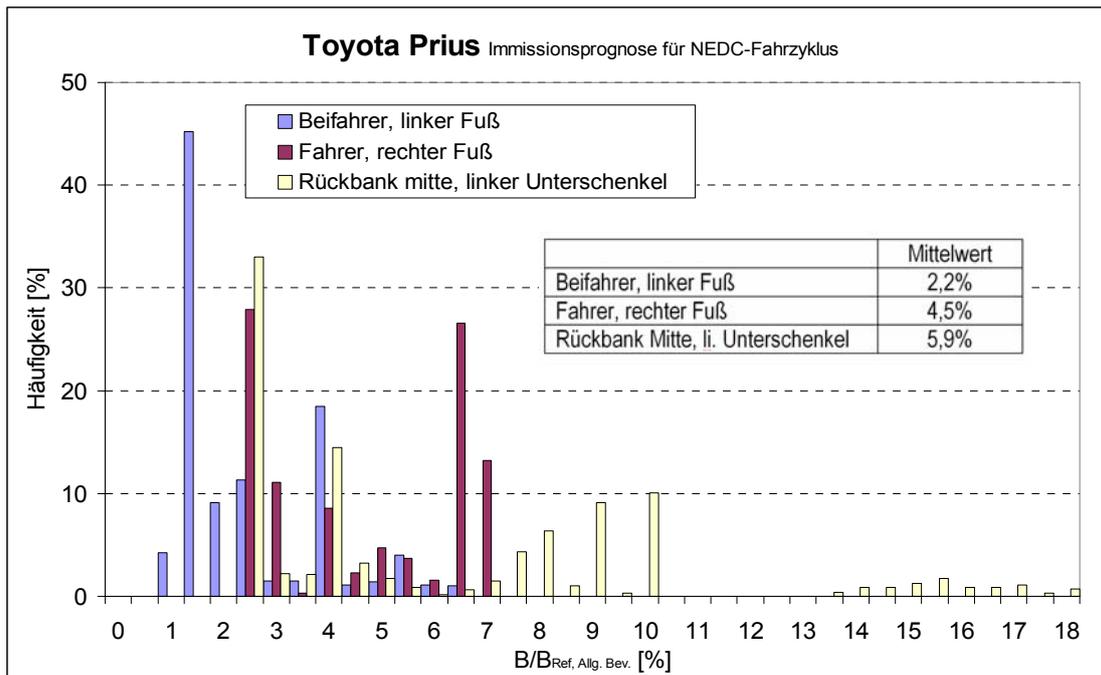


Abbildung 7.24: Immissionsprognose im Toyota Prius, beim Fahren des NEDC-Fahrzyklus

Da der Toyota Prius bereits als frei zugängliches Mietfahrzeug verfügbar ist, war es zusätzlich zu den Untersuchungen am Leistungsprüfstand und der Fahrt entlang der Teststrecke in Wien (Kapitel 6.3.2) möglich, erweiterte Messfahrten durchzuführen. Im Zuge dieser insgesamt ca. 3 Stunden dauernden Fahrt, die Stadt- Überland- (mit bis zu ca. 10% Steigungen) und Autobahnabschnitte enthielt, wurden Messungen im Fußbereich des Beifahrers und im Fußbereich des mittleren Sitzes auf der Rückbank durchgeführt. Abbildung 7.25 fasst diese Messergebnisse zusammen.

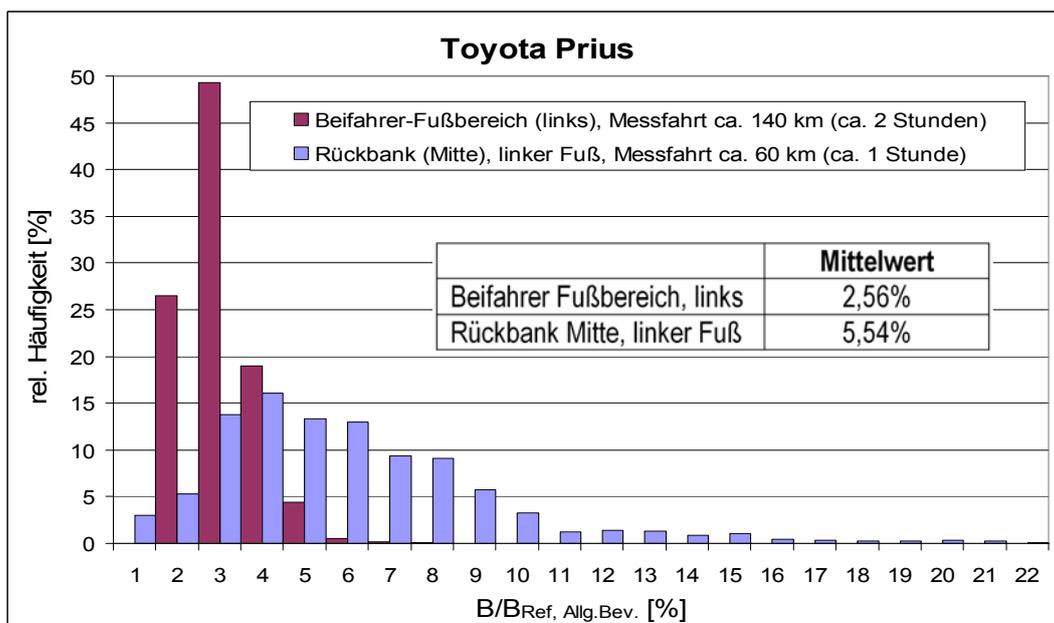


Abbildung 7.25: Relative Häufigkeiten der gemessenen Magnetfeldimmissionen während erweiterter Messfahrten

Zusammenfassend zeigten die Untersuchungen im Toyota Prius in den vorderen Sitzpositionen im Bereich der Füße Maximalimmissionen von durchwegs unter 10% der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung. Im Kopf- und Rumpfbereich lagen die Maximalwerte unterhalb von 2,5%. Offensichtlich bedingt durch den speziellen Kabelverlauf wurden auf der Rückbank im Bereich des mittleren Sitzplatzes etwas größere Immissionen als auf den vorderen Sitzplätzen festgestellt. Im stationären Fahrbetrieb wurden im Unterschenkelbereich dieses Sitzplatzes bis zu ca. 10%, beim Bremsen bzw. Beschleunigen bis zu ca. 26% bzw. 29% des Referenzwertes festgestellt. Im Kopf und Rumpfbereich blieben die gemessenen Immissionen jedoch auch auf der Rückbank unterhalb von maximal ca. 5% im Fall stationärer Fahrverhältnisse und unterhalb von maximal ca. 10% beim Bremsen und Beschleunigen. Im Vergleich zu den genannten Maximalwerten der Immissionen können die zeitgemittelten Immissionen im praktischen Fahrbetrieb etwas niedriger erwartet werden (siehe Abbildung 7.24 und Abbildung 7.25).

7.1.3 Lexus GS450h

Wie beim Toyota Prius handelt es sich beim Lexus GS 450h um einen leistungsverzweigten Vollhybrid. Dementsprechend sind auch bei diesem Fahrzeug rein elektrisches Fahren (bis ca. 50 km/h) und verschiedene kombinierte Antriebsarten, bei denen der Verbrennungsmotor und der(die) Elektromotor(en) Antriebsleistung erzeugen, bzw. im Generatorbetrieb die Batterie laden, möglich (vgl. Kapitel 6.6.2).

In welchem der möglichen Betriebszustände sich das Fahrzeug gerade befindet, wird durch eine komplexe Regelung in Abhängigkeit von den äußeren mechanischen Lastanforderungen und inneren Parametern (z.B. Batterieladezustand), unter der Prämisse eines möglichst effizienten (Benzin sparenden) Betriebs bestimmt. Wie bei jedem Vollhybrid ist eine Start/Stopp Automatik implementiert, die bei Stillstand des Fahrzeugs den Verbrennungsmotor ab- und beim Wiederauffahren wieder einschaltet.

Die aus strahlenschutztechnischer Sicht wichtigsten technischen Daten des Fahrzeugs sind im Folgenden zusammengestellt. Abbildung 7.26 und Abbildung 7.27 verdeutlichen Details zur Anordnung der einzelnen Fahrzeugkomponenten.

Batteriespannung:	288 V
Elektromotorart:	2 Stk. 3~ Synchronmotor mit Permanentmagnetläufer
E-Motorgenerator 1:	134 kW, max. 650V Klemmenspannung (Generator)
E-Motorgenerator 2:	147 kW, max. 650V Klemmenspannung (Motor)
Verbrennungsmotor:	3.5 Liter, 218 kW
Ort der E-Motoren/generatoren:	in einer Einheit mit Verbrennungsmotor vorne, Mitte
Batterie:	im Kofferraumboden unmittelbar hinter Rückbank
Leistungselektronik (Inverter):	im Motorraum, rechts
Verkabelung Inverter-Batterie:	im Fahrzeugboden (siehe Abbildung 7.26)
Antriebsachse:	hinten

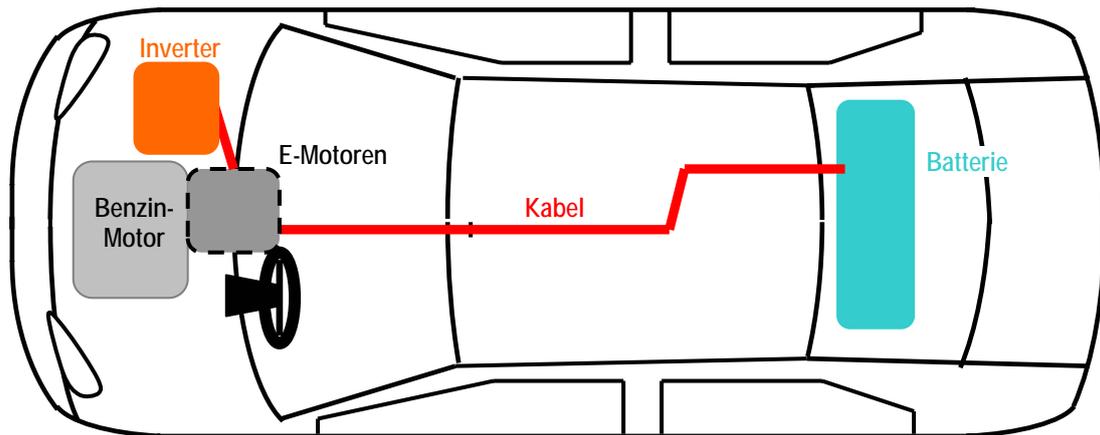


Abbildung 7.26: Schema der Anordnung der Systemkomponenten im Lexus GS 450h

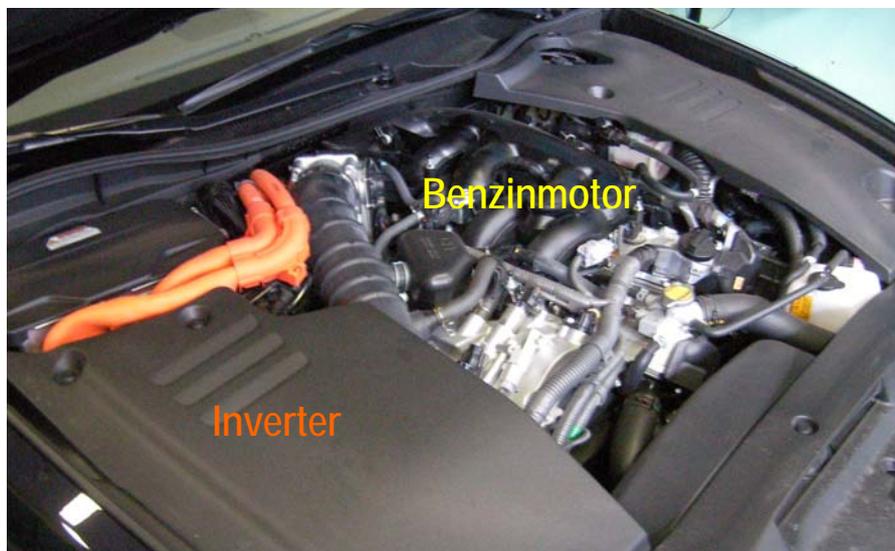


Abbildung 7.27: Motorraum des Lexus GS 450h

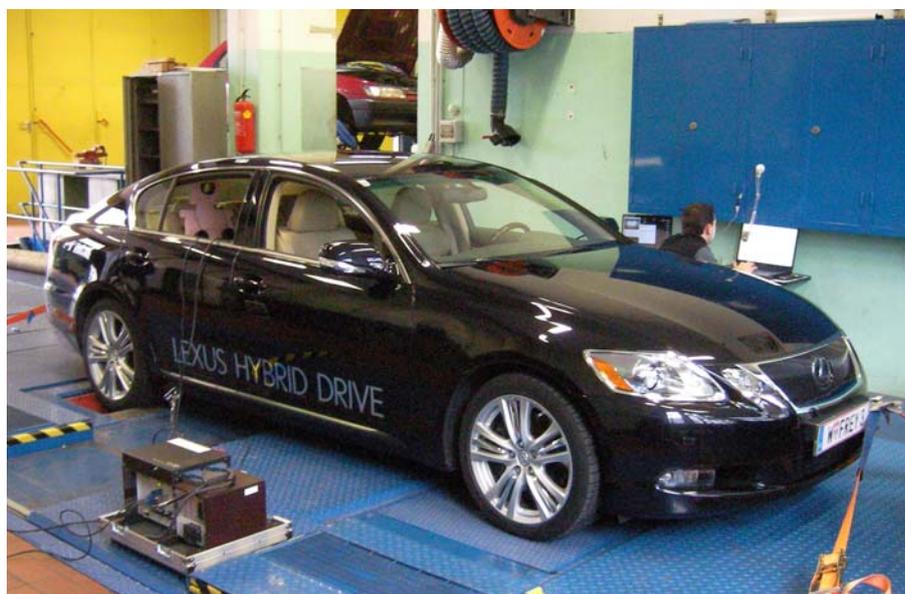


Abbildung 7.28: Lexus GS 450h auf dem Leistungsprüfstand

Abbildung 7.29 und Abbildung 7.30 zeigen Beispiele der Magnetfeldimmissionen im Lexus GS 450h für jeweils stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse bei rein elektrischem Fahren (Abbildung 7.29) und Fahren im Betriebszustand bei dem Antriebskraft, sowohl vom Verbrennungsmotor, als auch vom Elektromotor erzeugt und gleichzeitig die Batterie geladen wird (Abbildung 7.30). Abbildung 7.31 zeigt Beispiele für die Immissionen bei Beschleunigungs- und Bremsmanövern. Auch in diesem Fahrzeug zeigen sich im Verhältnis zum Referenzwert deutlich höhere Immissionen während dynamischer Fahrverhältnisse, als während stationärer Verhältnisse.

Immissionsanteile zufolge Reifenmagnetisierung traten beim Lexus GS 450h nur geringfügig im Fußbereich des Fahrerplatzes und auf der Rückbank im Unterleibsbereich (bis zu max. ca. 0,5% des Referenzwertes) auf und wurden bei der Ermittlung der resultierenden Bewertungsgröße (Abbildung 7.32 bis Abbildung 7.34) eliminiert. Die dadurch entstehende zusätzliche Unsicherheit der Bewertungsgröße liegt für Messpositionen im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer bei weniger als 0,2%pkt.

Tabelle 7.3 gibt einen quantitativen Überblick über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen, sowie die Maximalimmission im Frequenzbereich 40-60 Hz.

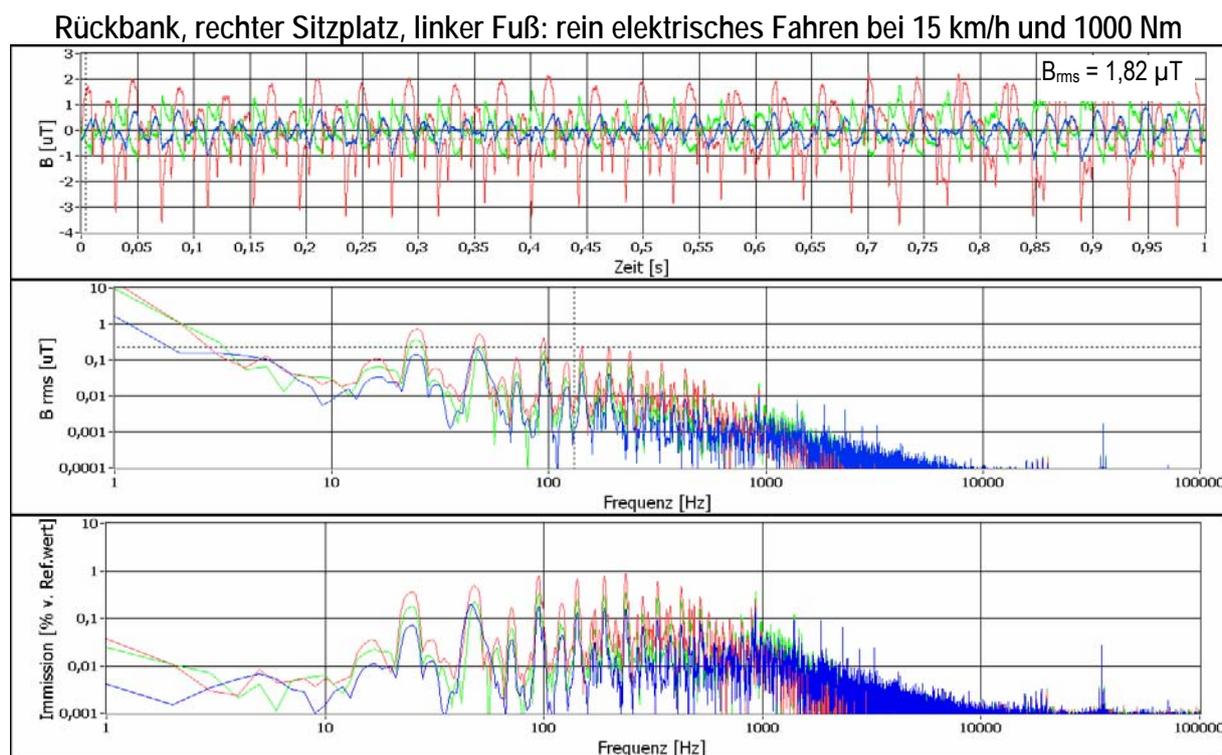
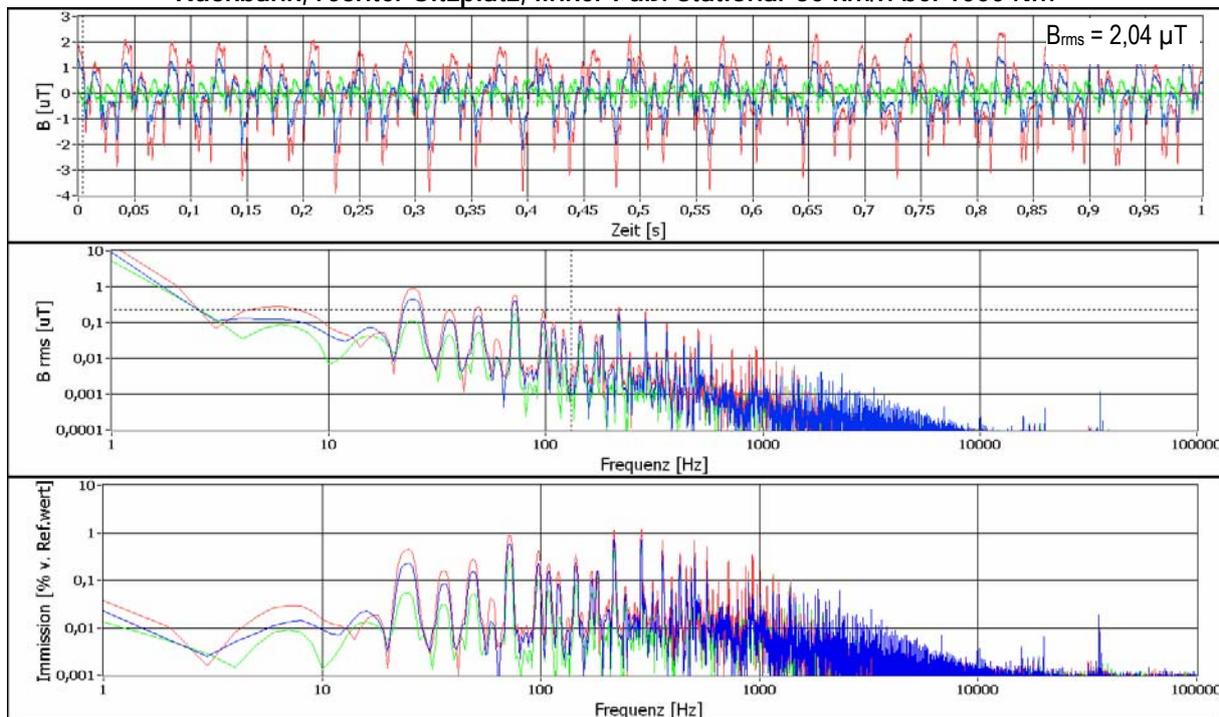


Abbildung 7.29: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des rechten Sitzplatzes auf der Rückbank unter stationären Verhältnissen beim rein elektrischen Fahren mit 15 km/h gegen 1000 Nm Last an der Antriebsachse
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Rückbank, rechter Sitzplatz, linker Fuß: stationär 50 km/h bei 1000 Nm



Rückbank, rechter Sitzplatz, linker Fuß: stationär 160 km/h bei 1000 Nm

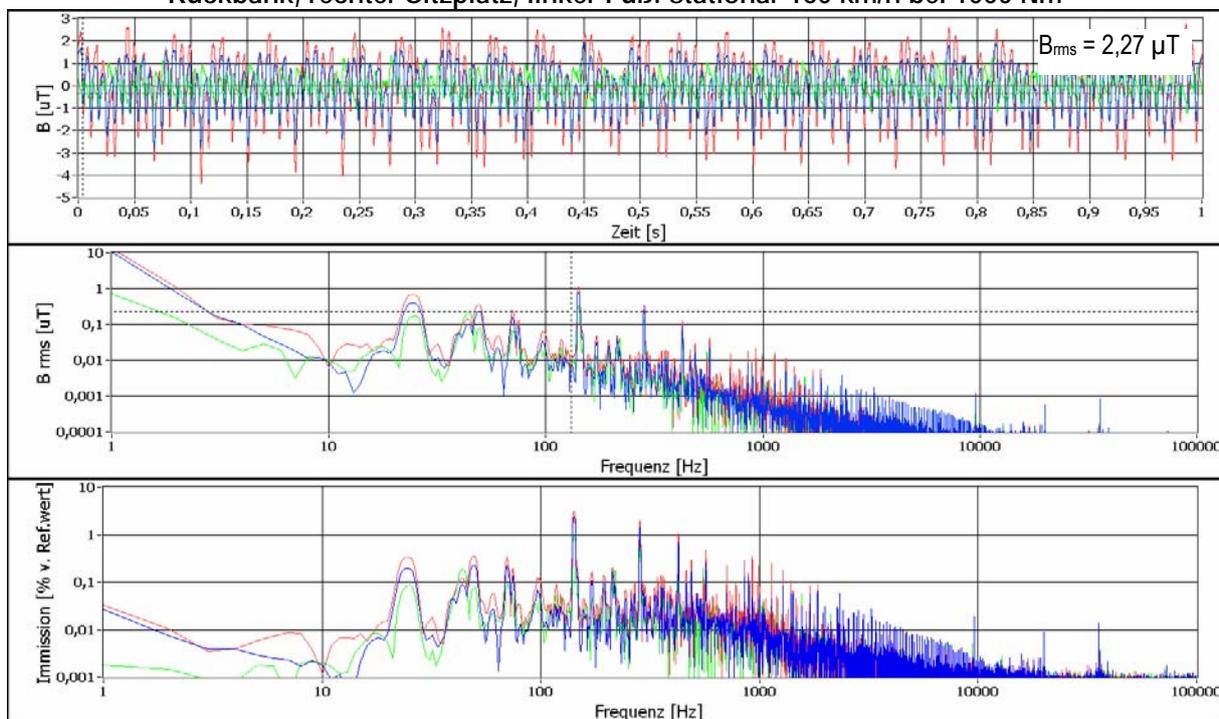
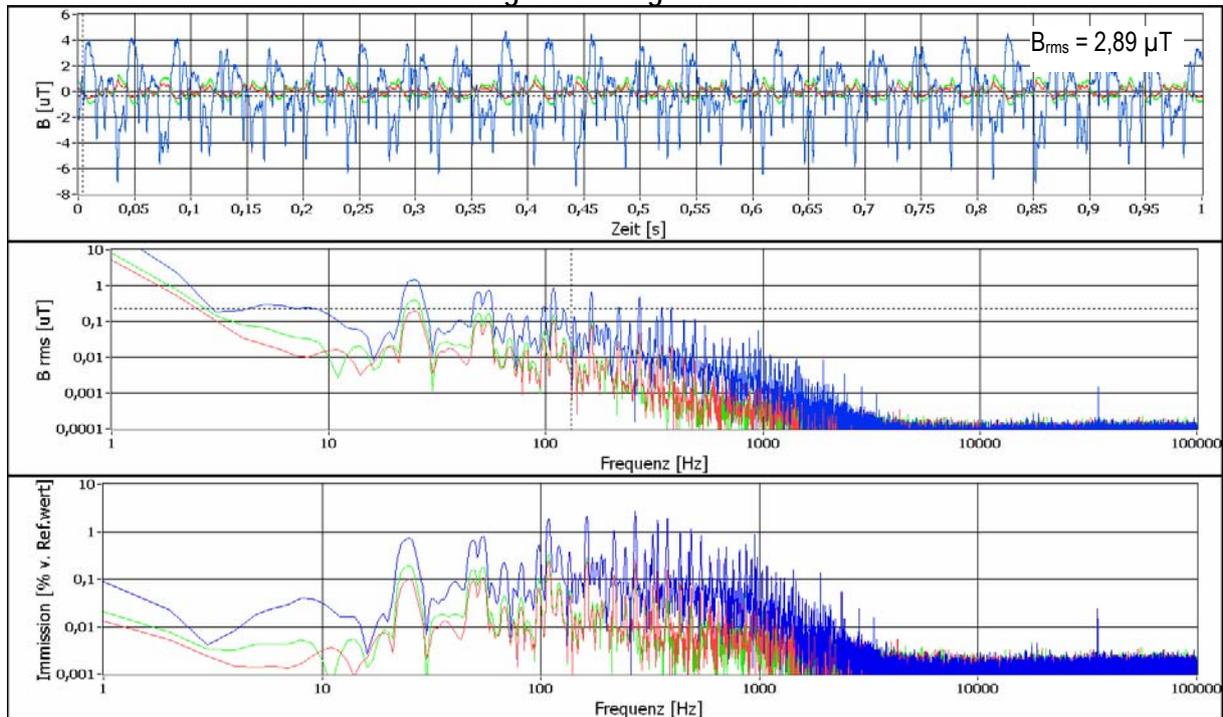


Abbildung 7.30: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des rechten Sitzplatzes auf der Rückbank unter stationären Verhältnissen bei 1000 Nm mechanischer Last an der Antriebsachse und 50 km/h (obere 3 Teilbilder) bzw. 160 km/h (untere 3 Teilbilder). Jeweils oben: Zeitsignal (10 Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Rückbank, rechter Sitzplatz, linker Fuß: Boost während Beschleunigung,
Momentangeschwindigkeit ca. 80 km/h



Rückbank, rechter Sitzplatz, linker Fuß: Rekuperation beim Bremsen,
Momentangeschwindigkeit ca. 50 km/h

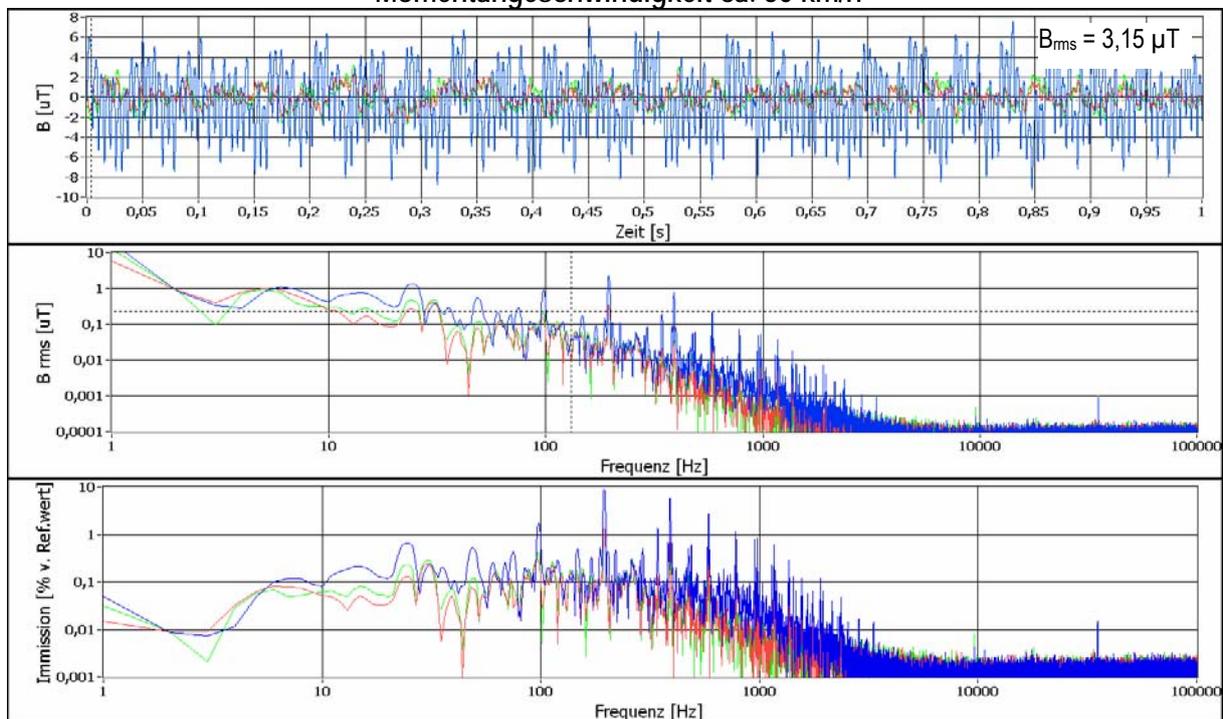


Abbildung 7.31: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des rechten Sitzplatzes auf der Rückbank während eines Beschleunigungs- (obere 3 Teilbilder) und eines Bremsmanövers (untere 3 Teilbilder)
Jeweils oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

	Beifahrer	Fahrer	Rückbank	$B_{rms,max}$ im Frequenzbereich 40-60 Hz	
f 50%	25 - 927 Hz	69-1171 Hz	25 - 562 Hz	Beifahrer	0,56 μ T
f 75%	25 - 1135 Hz	25-1396 Hz	25 - 1001 Hz	Fahrer	0,52 μ T
f 90%	25 - 1859 Hz	25-2323 Hz	25 - 1402 Hz	Rückbank	1,75 μ T

Tabelle 7.3: Frequenzbereiche innerhalb derer 50%, 75% und 90% der resultierenden Gesamtimmission im Lexus GS 450h liegen (linker Tabellenteil), sowie der Maximalwert der Immissionen im Frequenzbereich 40-60 Hz (rechter Tabellenteil)

Abbildung 7.32 fasst die unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen am Leistungsprüfstand im Lexus GS 450h messtechnisch erhobenen Magnetfeldimmissionen zusammen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den gesamten untersuchten Geschwindigkeits- und Lastmomentbereich¹² (von 15-160 km/h bzw. von 100-3000 Nm an der Antriebsachse). Die Fehlerindikatoren bezeichnen Maximal- und Minimalwerte. Die größten während der Untersuchungen am Leistungsprüfstand erhobenen lokalen Immissionswerte (zwischen 13% und 16% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung) traten jeweils im Fußbereich der drei untersuchten Sitzplätze (Fahrer-, Beifahrer- und rechter hinterer Sitzplatz) sowie im Unterleibsbereich auf der Rückbank auf.

Abbildung 7.33 und Abbildung 7.34 zeigen die während Brems- und Beschleunigungsmanöver erhobenen Magnetfeldimmissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den untersuchten Beschleunigungsbereich von ca. $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ bis ca. $\pm 2,5 \text{ m/s}^2$. Die Fehlerindikatoren bezeichnen wieder Maximal- und Minimalwerte. Im Vergleich zu den stationären Fahrverhältnissen liegen die maximalen Immissionswerte beim Bremsen und Beschleunigen am Fahrer und Beifahrerplatz ca. um einen Faktor 1,5 höher. Am untersuchten Sitzplatz der Rückbank liegt dieser Faktor bei ca. 2.

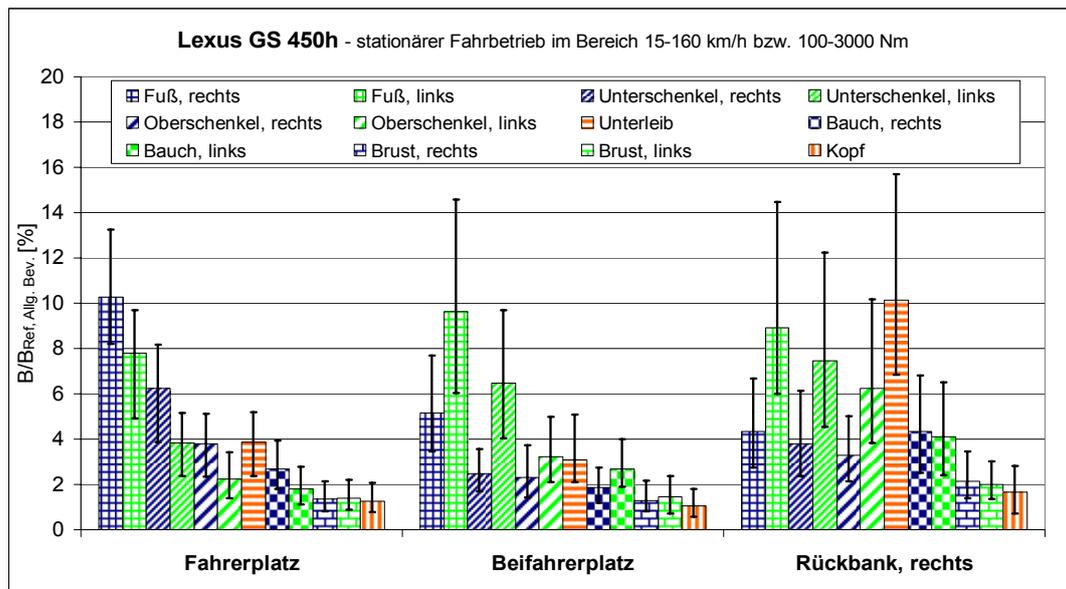


Abbildung 7.32: Zusammenfassung der im Lexus GS 450h am Leistungsprüfstand gemessenen Immissionen unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert für die unterschiedlichen Geschwindigkeits- und Lastzustände, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

¹² Naturgemäß konnte bei hohen Lasten nicht mehr der gesamte angegebene Geschwindigkeitsbereich abgedeckt werden. Konkret waren beim Lexus GS 450h kurzfristig (ca. 1 Minute lang) Belastungen bis maximal 160 km/h bei 2500 Nm und bis maximal 50 km/h bei 2500 Nm möglich.

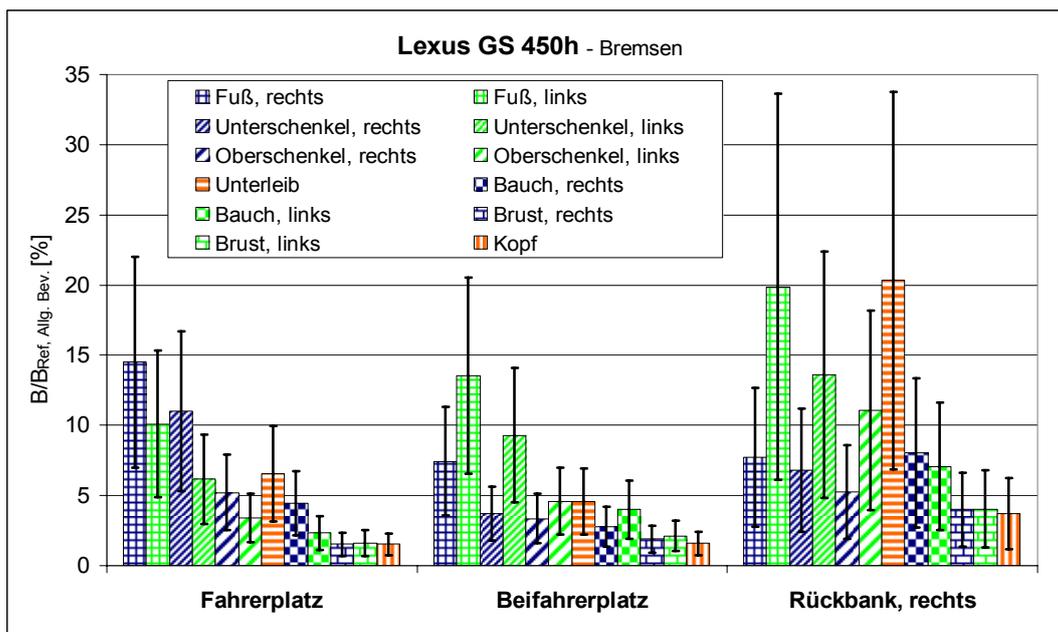


Abbildung 7.33: Zusammenfassung der im Lexus GS 450h bei Bremsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

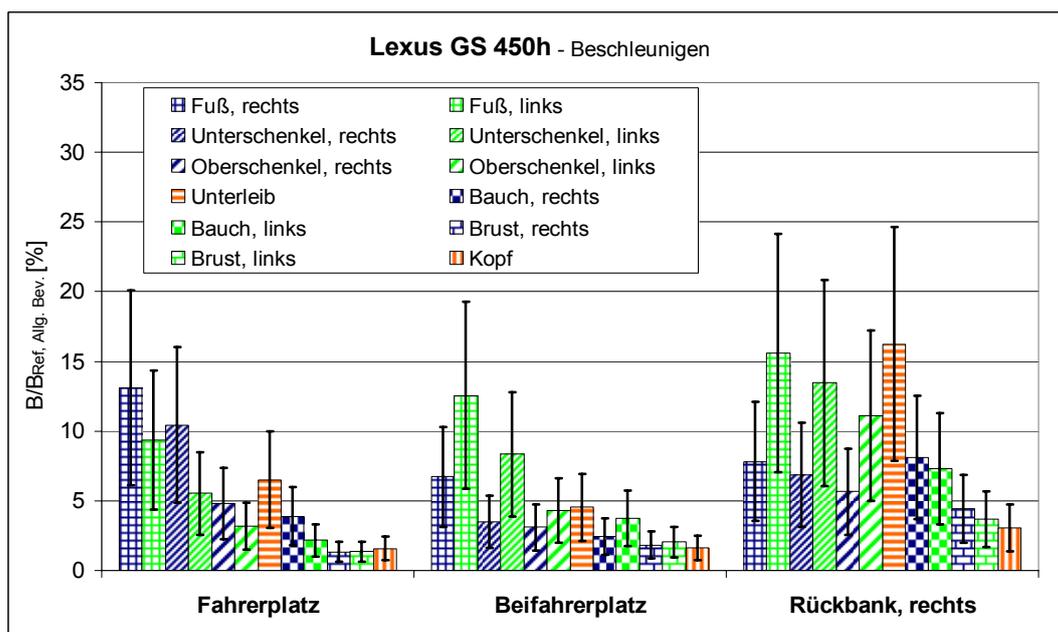


Abbildung 7.34: Zusammenfassung der im Lexus GS 450h bei Beschleunigungsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

Abbildung 7.35 fasst die Immissionen bei eingeschaltetem Fahrzeug im Stillstand zusammen. Im Bereich der Füße und Unterschenkel liegen die Immissionen auf allen Sitzplätzen im Bereich zwischen 0,5% und 2,8% des Referenzwertes. Auf den vorderen Sitzplätzen bleiben die Immissionswerte in allen anderen Messpositionen unterhalb von ca. 1,2%, im Kopf- und Brustbereich unterhalb von 0,5% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung. Am rechten Sitzplatz der Rückbank liegt die Exposition im Oberschenkel- Unterleibs und Bauchbereich etwas höher als auf den vorderen Sitzplätzen, im Kopf- und Rumpfbereich jedoch ebenfalls unterhalb von 0,5% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung.

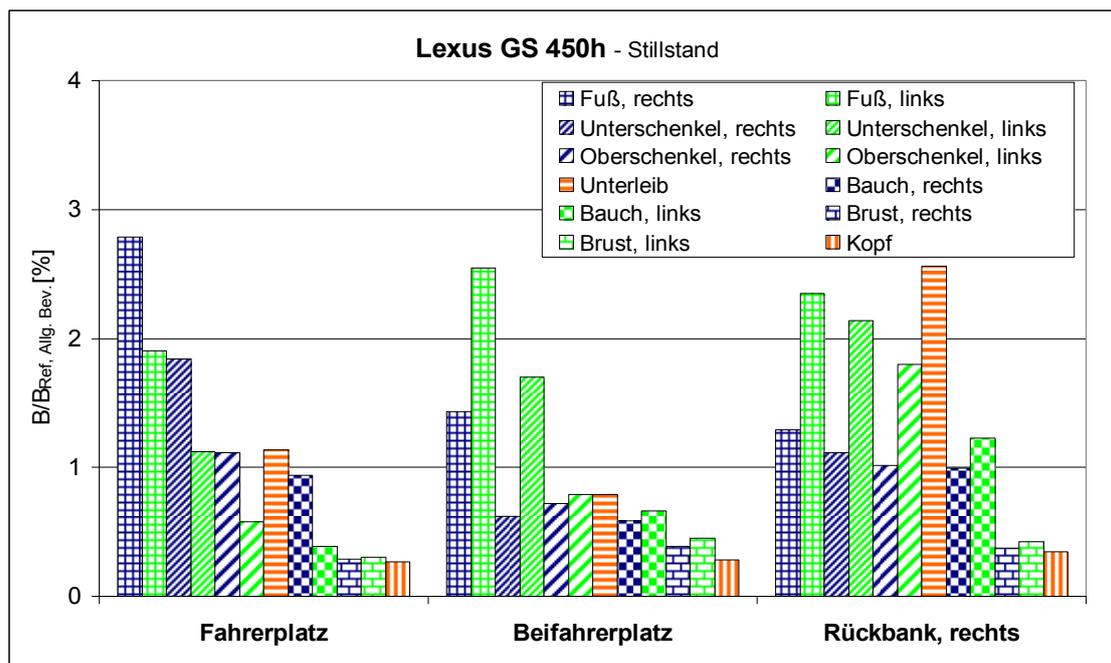


Abbildung 7.35: Zusammenfassung der im Lexus GS 450h bei Stillstand des Fahrzeugs gemessenen Immissionen.

Bezüglich kurzfristig auftretender transienter Magnetfeldimmissionen zeigt Abbildung 7.36 den im Laufe der Untersuchungen einzig relevanten und beobachteten Fall, der beim Umschalten vom Rekuperationsbetrieb auf rein elektrisches Fahren auftrat. Der dabei aufgetretene Maximalwert der zeitlichen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte lag bei ca. 16 mT/s. Bei Verwendung der in Kapitel 6.4.5 beschriebenen Bewertungsmethode entspricht dies einer kurzzeitigen Exposition von ca. 1% des strengsten Basisgrenzwertes für die im Gewebe induzierte Stromdichte (2 mA/m²).

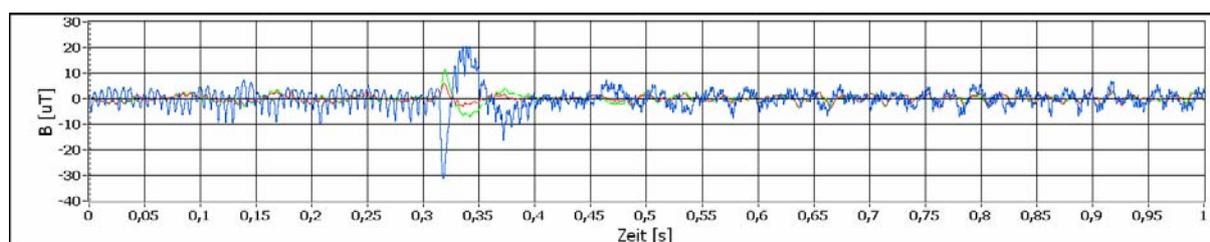


Abbildung 7.36: Kurzfristig auftretende transiente Magnetfelder im Lexus GS 450h während dem Umschalten von Rekuperationsbetrieb auf elektrisches Fahren, gemessen im Fußbereich des rechten Sitzplatzes der Rückbank

Abbildung 7.37 zeigt die mit dem in Kapitel 6.6 beschriebenen Berechnungsmodell ermittelte Prognose der Immissionen beim Fahren des in [22] definierten NEDC-Fahrzyklus in Form der relativen Häufigkeiten der Immissionswerte an den Messpositionen jedes untersuchten Platzes, die sich im Zuge der Messungen als die am höchsten exponierten Stellen erwiesen.

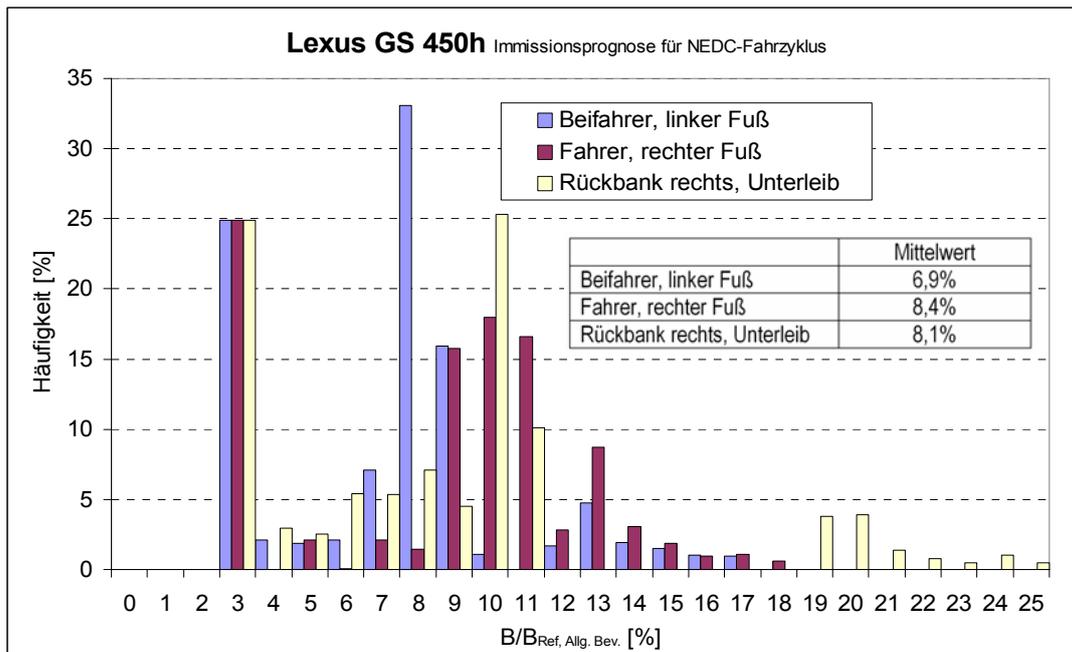


Abbildung 7.37: Immissionsprognose im Lexus GS 450h, beim Fahren des NEDC-Fahrzyklus

Zusammenfassend zeigten die Untersuchungen im Lexus GS 450h in den vorderen Sitzpositionen im Bereich der Füße Maximalimmissionen (beim Bremsen und Beschleunigen) von durchwegs unter 22% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung. Im Kopf- und Rumpfbereich lagen diese Maximalwerte unterhalb von 10%. Unter stationären Verhältnissen waren im Fußbereich der vorderen Sitzplätze bis zu ca. 15%, im Rumpfbereich bis zu ca. 5% und im Kopfbereich bis zu ca. 2% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung feststellbar.

Offensichtlich bedingt durch den speziellen Kabelverlauf und/oder die Lage der Batterie(anspeisung) wurden auf der Rückbank im Bereich des rechten Sitzplatzes etwas größere Immissionen als auf den vorderen Sitzplätzen festgestellt. Beim Bremsen und Beschleunigen lagen die Maximalimmissionen im Fuß- und Unterleibsbereich bei ca. 34% (Bremsen) bzw. ca. 25% (Beschleunigen), im Brust- und Kopfbereich durchwegs unterhalb von 7% des Referenzwertes. Bei stationären Verhältnissen ergaben sich auf der Rückbank Immissionswerte zwischen 14% und 16%, im Brust- und Kopfbereich weniger als ca. 4% des ICNIRP-Referenzwertes.

7.2 PKWs mit reinem Elektroantrieb

Im Bereich der PKWs mit reinem Elektroantrieb sind in jüngerer Vergangenheit seitens der großen Autohersteller in Europa nur Prototypen vorgestellt worden. In einigen Fällen ist man offenbar bereits in unmittelbare Nähe der Serienreife gerückt (z.B. Elektro-Smart) oder befindet sich derzeit am Serien-Produktionsstart (z.B. Tesla Roadster). Eine Verfügbarkeit von Elektrofahrzeugen großer Autohersteller am europäischen Markt war im Zeitraum dieses Vorhabens jedoch nicht gegeben. Allerdings haben einige wenige, auf elektrische Antriebstechnik spezialisierte Betriebe begonnen, Fahrgestelle von bekannten Autoherstellern mit elektrischen Antrieben auszustatten, um damit zumindest Kleinserien solcher Fahrzeuge auf den Markt zu bringen. Einer dieser Betriebe, die französische Firma NEWTEON stattet

Fahrgestelle von PKWs und Nutzfahrzeugen einiger bekannter Hersteller mit Elektroantrieben aus und hat mittlerweile ein europaweites Vertriebsnetz aufgebaut. Durch die Unterstützung des österreichischen Vertriebspartners von NEWTEON war es möglich, Immissionsmessungen in zwei unterschiedlichen Elektro-PKWs durchzuführen.

7.2.1 Panda Electric (Fa. NEWTEON)

Dieses, auf dem Fahrgestell des bekannten Fiat Panda beruhende Fahrzeug, besitzt einen 30 kW Elektromotor (3~Asynchronmaschine), der fix übersetzt die Vorderachse antreibt. Die Leistungselektronik (Inverter) befindet sich wie der Motor im Motorraum, vorne. Die Batterie ist unterhalb der Kofferraumbodens untergebracht. Beim Bremsen, bzw. Bergabfahren, steht Rekuperationsbetrieb zur Verfügung. Bei voll geladener Batterie sind bei Fahrten in der Ebene Reichweiten bis zu 120 km möglich. Aufgrund der wenig effizienten Rekuperation sinkt diese Reichweite bei Fahrten mit ausgedehnten Bergaufstrecken drastisch. Die in Kapitel 6.3.2 beschriebene, ca. 60 km lange Rundfahrt konnte jedoch problemlos absolviert werden.

Die aus strahlenschutztechnischer Sicht wichtigsten technischen Daten des Fahrzeugs sind im Folgenden zusammengestellt. Abbildung 7.38 und Abbildung 7.39 verdeutlichen Details zur Anordnung der einzelnen Fahrzeugkomponenten.

Batteriespannung:	ca. 207 V
Elektromotorart:	1 Stk. 3~ Asynchronmotor
E-Motorgenerator :	30 kW,
Ort des E-Motors/generators:	vorne
Batterie:	im Kofferraumboden unmittelbar hinter Rückbank
Leistungselektronik (Inverter):	im Motorraum, direkt über Motor
Verkabelung Inverter-Batterie:	im Fahrzeugboden, ca. Fahrzeugmitte
Antriebsachse:	vorne

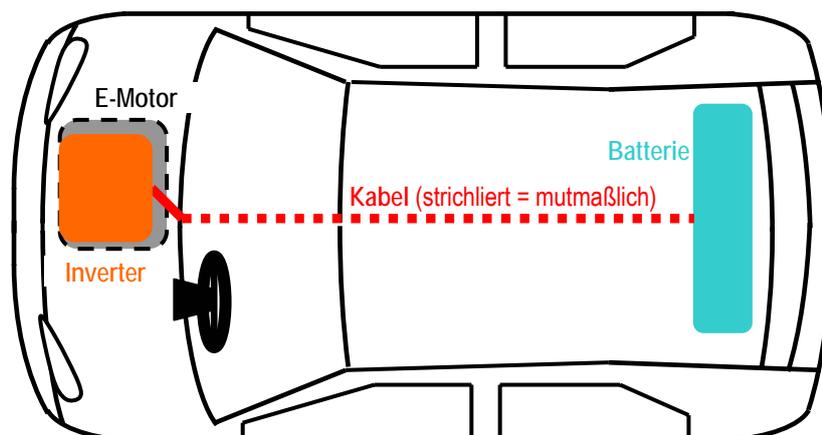


Abbildung 7.38: Schema der Anordnung der Systemkomponenten im Panda Electric. Die strichlierte Darstellung von Abschnitten des Kabelverlaufs bedeutet, dass darüber nur gemutmaßt werden konnte, da der tatsächliche Verlauf nicht einsehbar war und dazu auch keine Herstellerangaben verfügbar waren.



Abbildung 7.39: Motorraum des Panda Electric



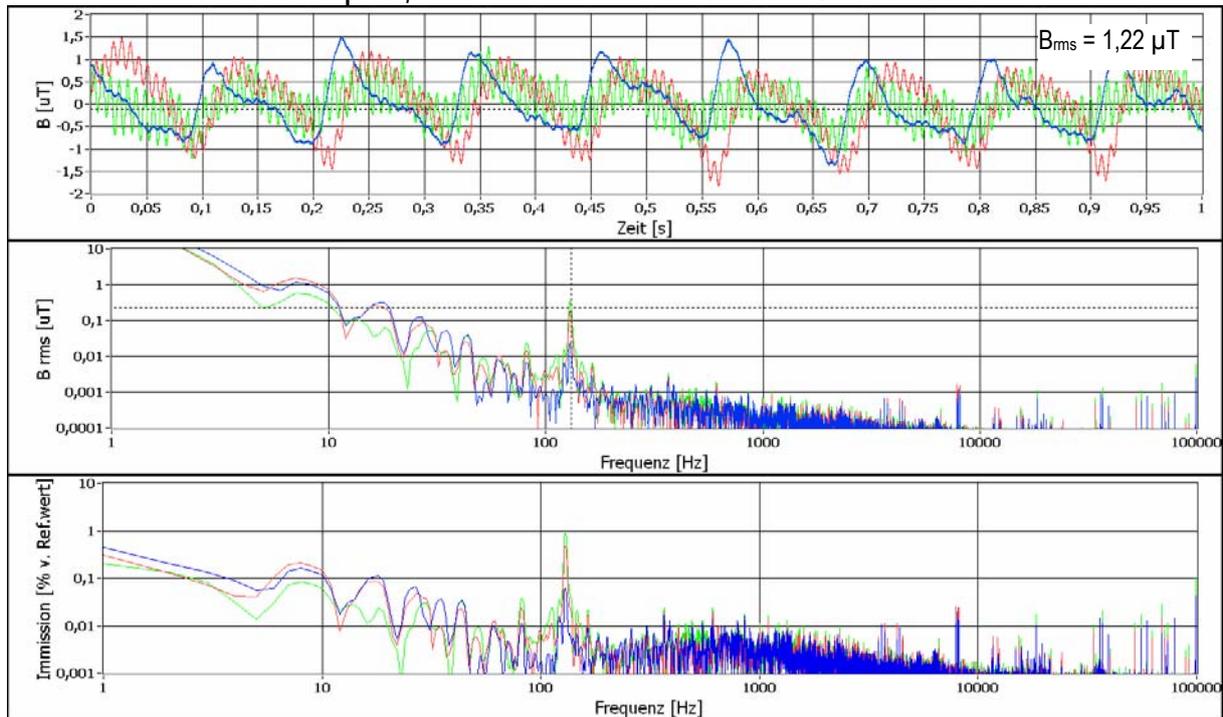
Abbildung 7.40: Panda Electric auf dem Leistungsprüfstand

Abbildung 7.41 zeigt Beispiele der Magnetfeldimmissionen im Panda Electric für jeweils stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse. Entsprechend der Einfachheit des Antriebssystems zeigt sich eine strenge Geschwindigkeits/Frequenzproportionalität der Haupt-Spektralkomponente.

Immissionsanteile zufolge Reifenmagnetisierung traten beim Panda Electric besonders stark im Fußbereich des Beifahrers auf (bis zu 1% des Referenzwertes) (siehe Abbildung 7.41) und wurden bei der Ermittlung der resultierenden Bewertungsgröße (Abbildung 7.42 bis Abbildung 7.44) eliminiert. Die dadurch entstehende zusätzliche Unsicherheit der Bewertungsgröße liegt für Messpositionen im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer bei weniger als 0,3%pkt.

Tabelle 7.4 gibt einen quantitativen Überblick über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen, sowie über die Maximalimmission im Frequenzbereich 40-60 Hz.

Beifahrerplatz, linker Fuß: Fahren bei ca. 50 km/h und 100 Nm



Beifahrerplatz, linker Fuß: Fahren bei ca. 90 km/h und 100 Nm

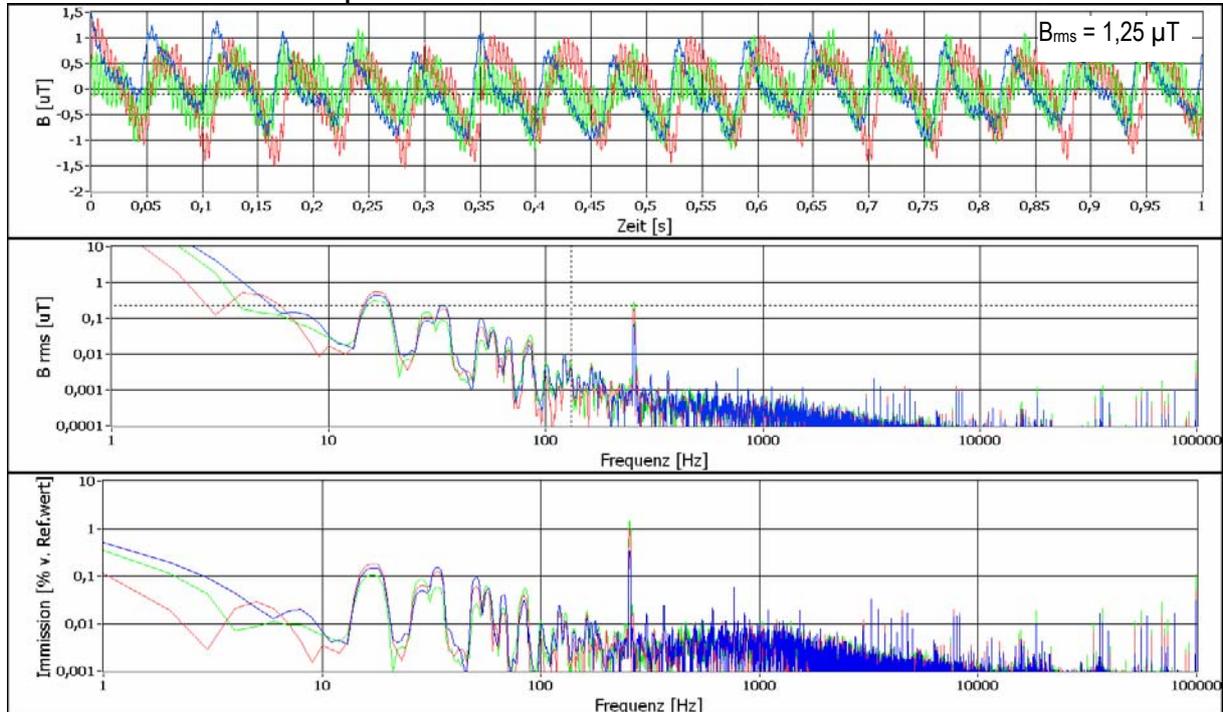


Abbildung 7.41: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Beifahrers unter stationären Verhältnissen bei 100 Nm mechanischer Last an der Antriebsachse und 50 km/h (obere 3 Teilbilder) bzw. 90 km/h (untere 3 Teilbilder). Jeweils oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen. Der Spektralanteil bei ca. 14 Hz (inkl. zugehörige Oberwellen) ist durch Reifenmagnetisierung verursacht und wurde für die Berechnung der Immissionen eliminiert.

	Beifahrer	Fahrer	Rückbank		$B_{rms,max}$ im Frequenzbereich 40-60 Hz
f 50%	18 - 256 Hz	18 - 367 Hz	12 - 661 Hz	Beifahrer	0,48 μ T
f 75%	12 - 3480 Hz	12 - 3667 Hz	12 - 3504 Hz	Fahrer	0,21 μ T
f 90%	12 - 8001 Hz	12 - 8164 Hz	12 - 8001 Hz	Rückbank	0,17 μ T

Tabelle 7.4: Frequenzbereiche innerhalb derer 50%, 75% und 90% der resultierenden Gesamtimmission im Panda Electric liegen (linker Tabellenteil), sowie der Maximalwert der Immissionen im Frequenzbereich 40-60 Hz (rechter Tabellenteil)

Abbildung 7.42 fasst die unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen am Leistungsprüfstand im Panda Electric messtechnisch erhobenen Magnetfeldimmissionen zusammen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den gesamten untersuchten Geschwindigkeits- und Lastmomentbereich (von 15-100 km/h bzw. von 100-1000 Nm an der Antriebsachse). Die Fehlerindikatoren bezeichnen Maximal- und Minimalwerte. Die größten während der Untersuchungen am Leistungsprüfstand erhobenen lokalen Immissionswerte traten im Fußbereich des Beifahrers auf und lagen bei ca. 2,6% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung. Im Kopf- und Rumpfbereich ergaben sich im stationären Fahrbetrieb Immissionen von durchwegs weniger als 1% des Referenzwertes.

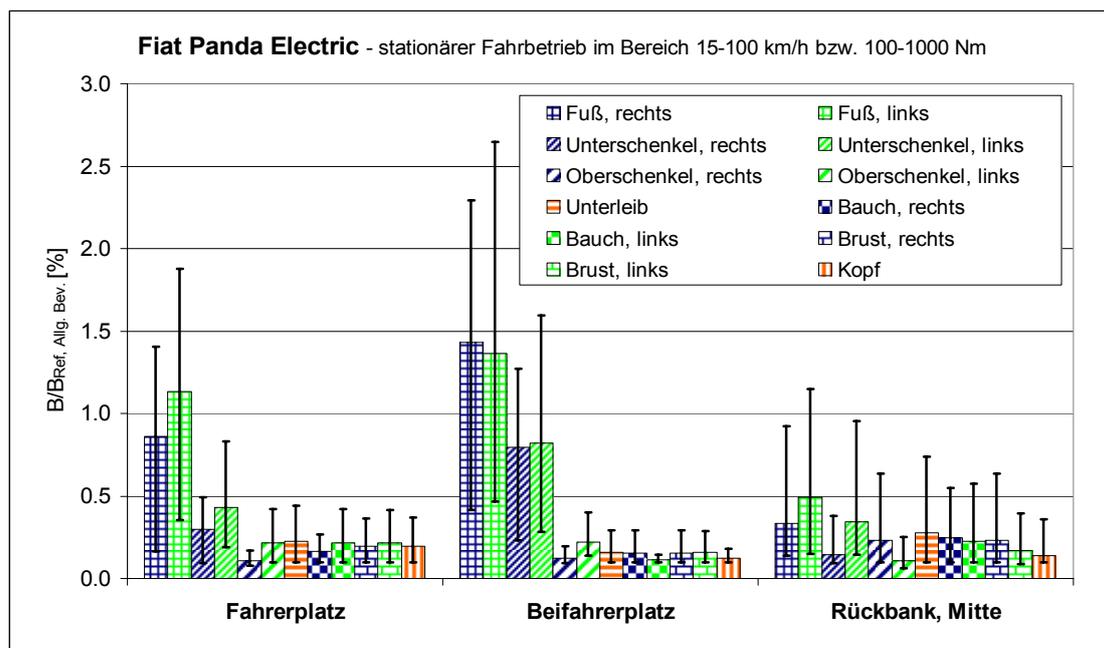


Abbildung 7.42: Zusammenfassung der im Panda Electric am Leistungsprüfstand gemessenen Immissionen unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert für die unterschiedlichen Geschwindigkeits- und Lastzustände, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

Abbildung 7.43 und Abbildung 7.44 zeigen die während Brems- und Beschleunigungsmanöver erhobenen Magnetfeldimmissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den untersuchten Beschleunigungsbereich von ca. $\pm 0,5 \text{ m/s}^2$ bis ca. $\pm 1,5 \text{ m/s}^2$. Die Fehlerindikatoren bezeichnen wieder Maximal- und Minimalwerte. Im Vergleich zu den stationären Fahrverhältnissen liegen die maximalen Immissionswerte beim Bremsen in den meisten Messpositionen niedriger. Beim Beschleunigen ergeben sich im Fußbereich von Fahrer- und Beifahrerplatz etwas höhere Immissionen als im stationären Fahrbetrieb, der Maximalwert der

Immissionen (im Fußbereich des Beifahrers) liegt aber auch hier bei weniger als 3,2% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung.

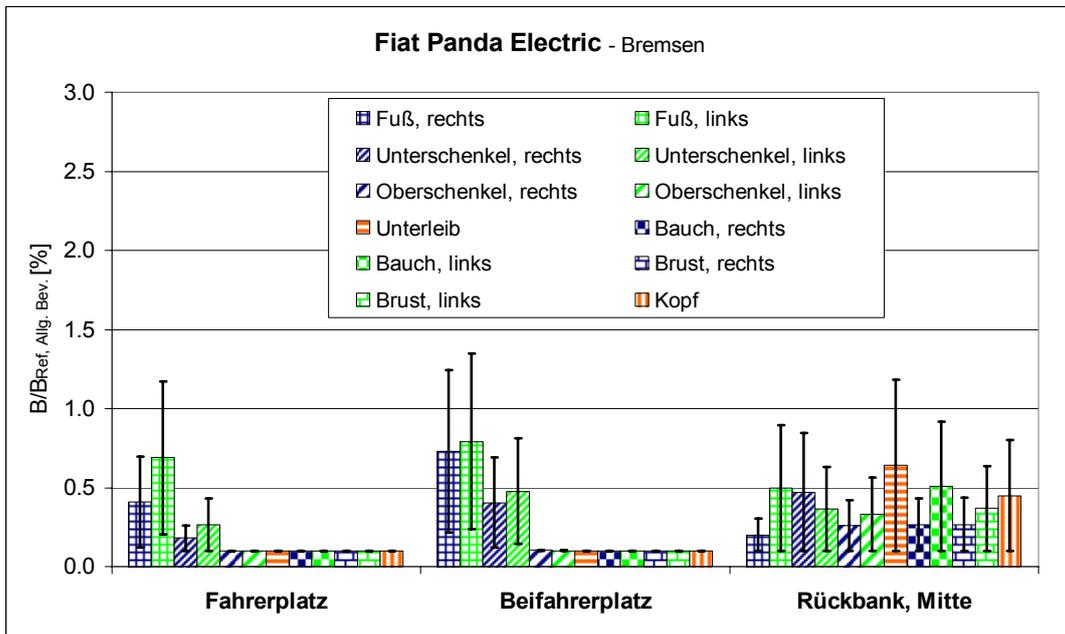


Abbildung 7.43: Zusammenfassung der im Panda Electric bei Bremsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

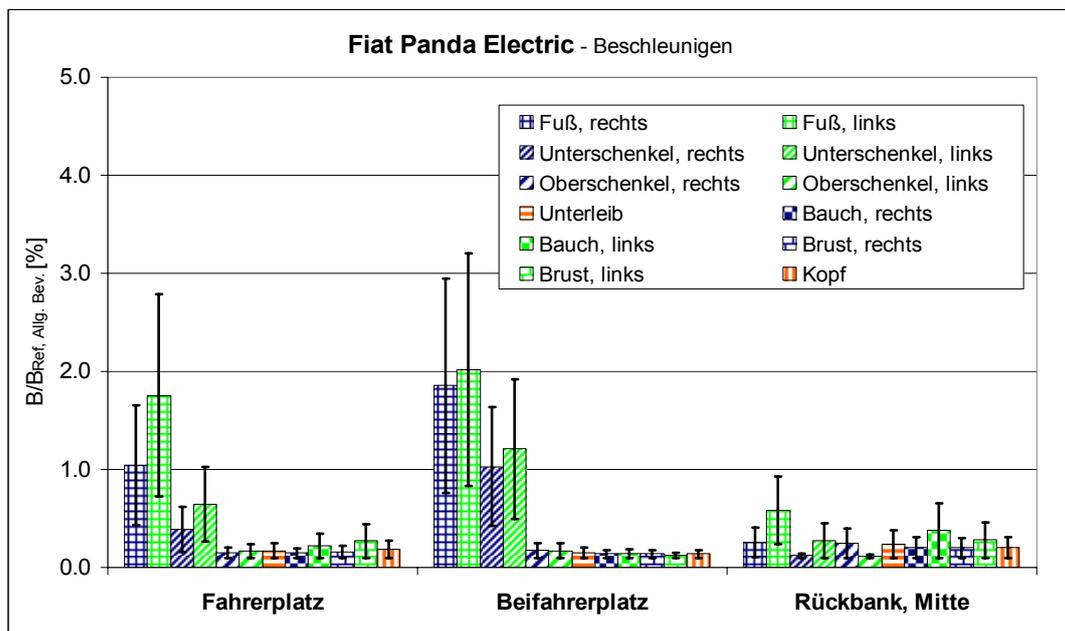


Abbildung 7.44: Zusammenfassung der im Panda Electric bei Beschleunigungsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

Im Stillstand des Fahrzeugs lagen die Magnetfeldimmissionen an allen betrachteten Messpositionen im Fahrzeug unterhalb der Nachweisgrenze des Messverfahrens, d.h., bei weniger als ca. 0,15% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung.

Bezüglich kurzfristig auftretender transients magnetischer Felder zeigt Abbildung 7.45 die relevantesten im Laufe der Untersuchungen beobachtbaren Signale. Der dabei aufgetretene Maximalwert der zeitlichen Änderungsrate der magnetischen

Flussdichte lag bei ca. 90 mT/s. Bei Verwendung der in Kapitel 6.4.5 beschriebenen Bewertungsmethode entspricht dies einer kurzzeitigen Exposition von ca. 5% des strengsten Basisgrenzwertes für die im Gewebe induzierte Stromdichte (2 mA/m^2).

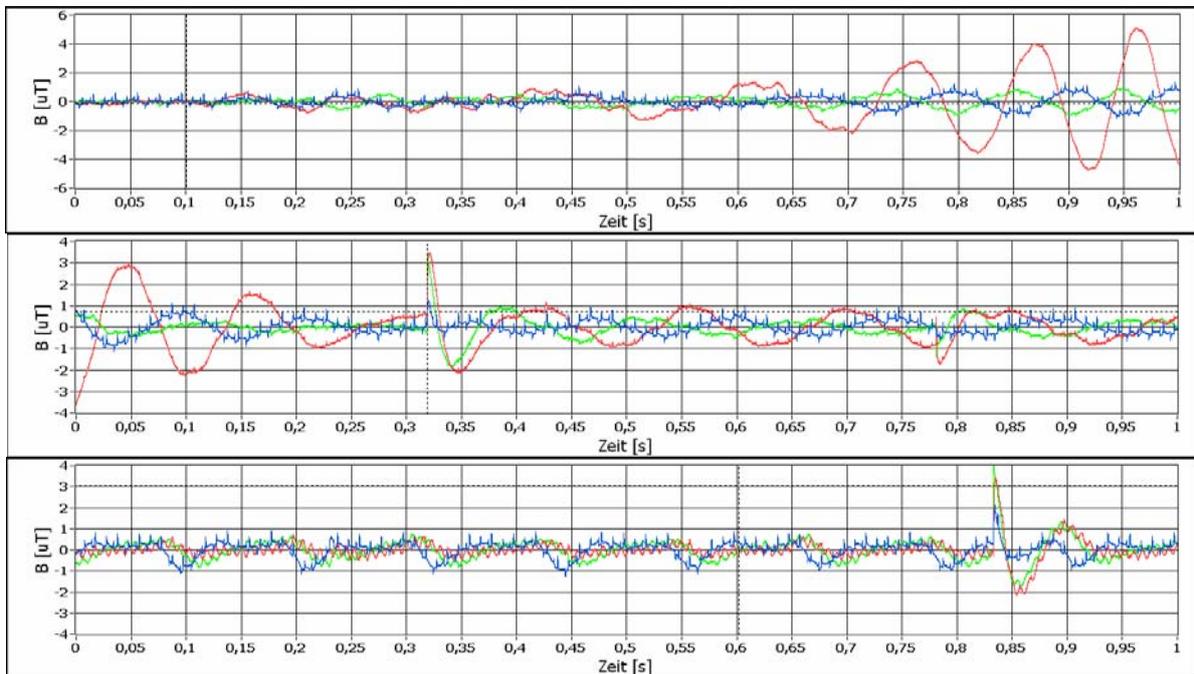


Abbildung 7.45: Kurzfristig auftretende transiente Magnetfelder im Panda Electric. Oben: Anfahrstrom; Mitte: nicht näher definierbare, aber wiederholt auftretende Transiente im Fahrbetrieb; unten: während dem Umschalten auf Rekuperationsbetrieb auftretende Transiente

Abbildung 7.46 zeigt die mit dem in Kapitel 6.6 beschriebenen Berechnungsmodell ermittelte Prognose der Immissionen beim Fahren des in [22] definierten NEDC-Fahrzyklus in Form der relativen Häufigkeiten der Immissionswerte an den Messpositionen jedes untersuchten Platzes, die sich im Zuge der Messungen als die am höchsten exponierten Stellen erwiesen.

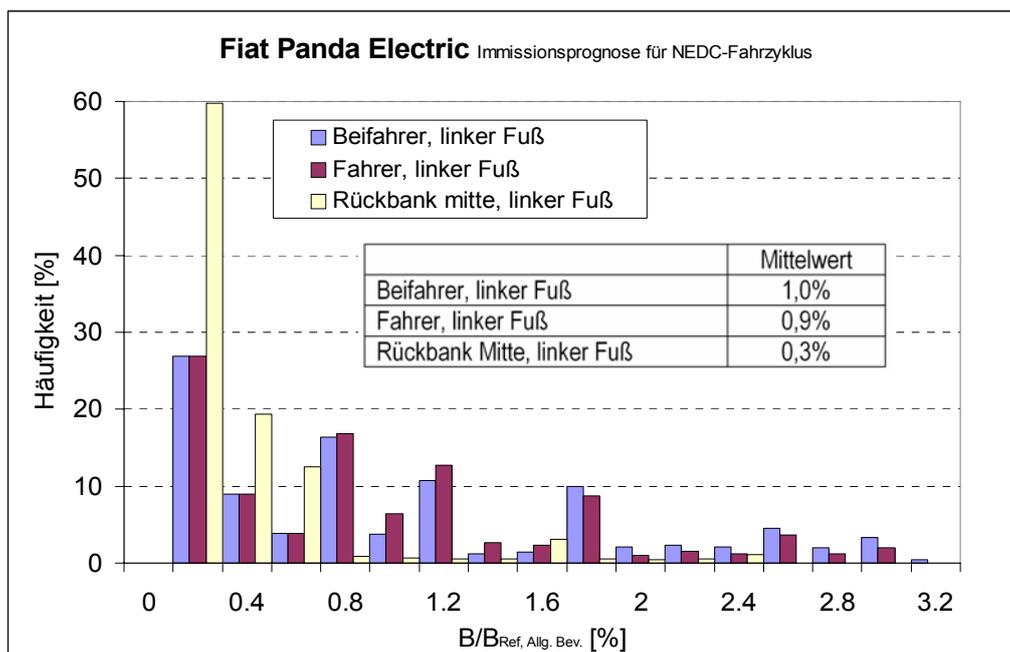


Abbildung 7.46: Immissionsprognose im Panda Electric, beim Fahren des NEDC-Fahrzyklus

Zusammenfassend zeigten die Untersuchungen im Panda Electric sehr geringe Immissionswerte von durchwegs weniger als 3,2% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung. Die größten Immissionswerte zeigten sich im Fußbereich des Beifahrers beim Beschleunigen. Im Kopf- und Rumpfbereich ergaben sich an keiner der untersuchten Messposition mehr als ca. 1,2% (beim Bremsen), bzw. nicht mehr als 0,8% (im stationären Fahrbetrieb) des Referenzwertes.

7.2.2 Doblo Electric (Fa. NEWTEON)

Dieses Fahrzeug beruht auf dem Fahrgestell des Fiat Doblo und besitzt einen 30 kW Elektromotor (3~Asynchronmaschine), der über ein Getriebe die Vorderachse antreibt. Die Leistungselektronik (Inverter) befindet sich wie der Motor im Motorraum, vorne. Die Batterie ist im Kofferraum untergebracht. Beim Bremsen bzw. Bergabfahren steht Rekuperationsbetrieb zur Verfügung. Ähnlich wie beim Panda Electric sind mit voll geladener Batterie bei Fahrten in der Ebene Reichweiten bis zu 120 km möglich. Auch bei diesem Fahrzeug sinkt diese Reichweite bei Fahrten mit ausgedehnten Bergaufstrecken drastisch. Die in Kapitel 6.3.2 beschriebene, ca. 60 km lange Rundfahrt konnte jedoch ebenfalls problemlos absolviert werden.

Die aus strahlenschutztechnischer Sicht wichtigsten technischen Daten des Fahrzeugs sind im Folgenden zusammengestellt. Abbildung 7.47 und Abbildung 7.48 verdeutlichen Details zur Anordnung der einzelnen Fahrzeugkomponenten.

Batteriespannung:	ca. 216 V
Elektromotorart:	1 Stk. 3~ Asynchronmotor
E-Motorgenerator :	30 kW
Ort des E-Motors/generators:	vorne
Batterie:	im Kofferraum, unmittelbar hinter Rückbank
Leistungselektronik (Inverter):	im Motorraum, direkt über Motor
Verkabelung Inverter-Batterie:	im Fahrzeugboden, linke Seite
Antriebsachse:	vorne

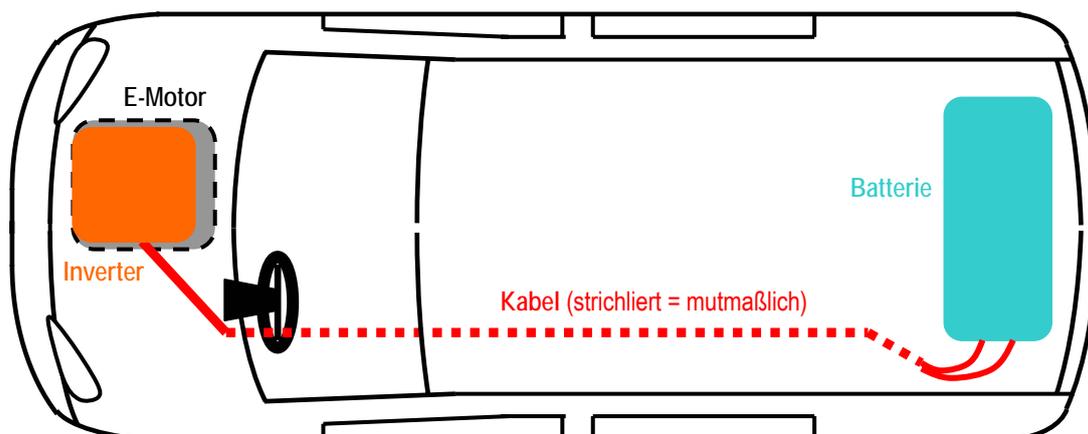


Abbildung 7.47: Schema der Anordnung der Systemkomponenten im Doblo Electric. Die strichlierte Darstellung von Abschnitten des Kabelverlaufs bedeutet, dass darüber nur gemutmaßt werden konnte, da der tatsächliche Verlauf nicht einsehbar war und dazu auch keine Herstellerangaben verfügbar waren.

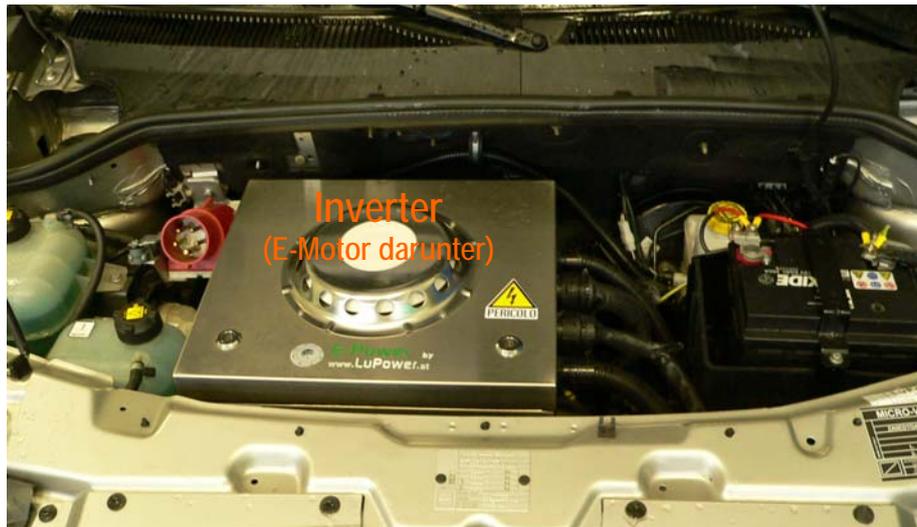


Abbildung 7.48: Motorraum des Doblo Electric



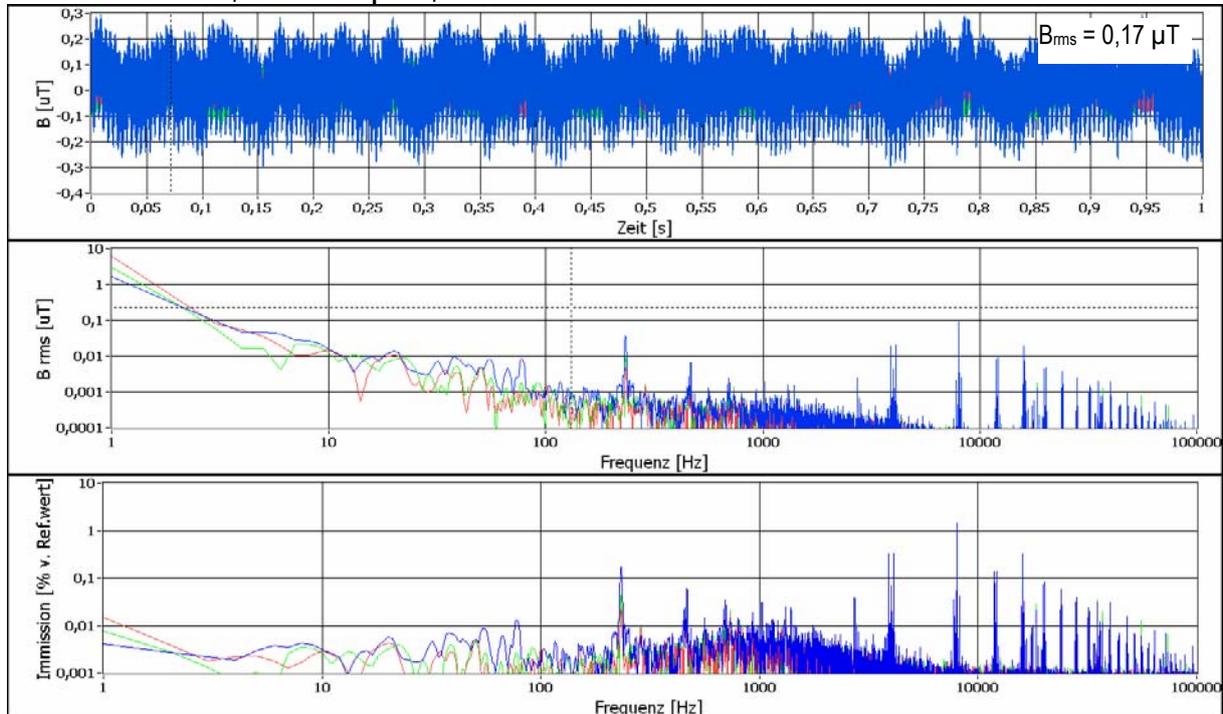
Abbildung 7.49: Doblo Electric auf dem Leistungsprüfstand

Abbildung 7.50 zeigt einen Vergleich der Magnetfeldimmissionen im Doblo Electric für jeweils gleiche stationäre Geschwindigkeits- und Lastverhältnisse im Fußbereich des Beifahrers und im Unterleibsbereich des linken Sitzplatzes auf der Rückbank. Während im Fußbereich des Beifahrers der Motorstrom einen deutlichen Immissionsbeitrag liefert, sind die Immissionen am untersuchten Platz der Rückbank offensichtlich hauptsächlich durch hochfrequente Anteile des vom Inverter der Batterie entnommenen Stromes bestimmt. Die Tatsache der wesentlich höheren Immissionen auf der Rückbank (vgl. Abbildung 7.51 bis Abbildung 7.54) ist plausibel, da unmittelbar hinter dem Sitz (im Kofferraum sichtbar) Kabel (mit 5-10 cm Abstand zwischen Einzelleitern) zur Batterie führen.

Relevante Immissionsanteile zufolge Reifenmagnetisierung traten beim Doblo Electric nur im Fußbereich des Fahrers und Beifahrers auf (bis zu ca. 0,4% des Referenzwertes) und wurden bei der Ermittlung der resultierenden Bewertungsgröße (Abbildung 7.51 bis Abbildung 7.53) eliminiert. Die dadurch entstehende zusätzliche

Unsicherheit der Bewertungsgröße liegt für Messpositionen im Fußbereich von Fahrer und Beifahrer bei weniger als 0,2%pkt.

Rückbank, linker Sitzplatz, Unterleibsbereich: Fahren bei ca. 15 km/h und 500 Nm



Beifahrerplatz, linker Fuß: Fahren bei ca. 15 km/h und 500 Nm

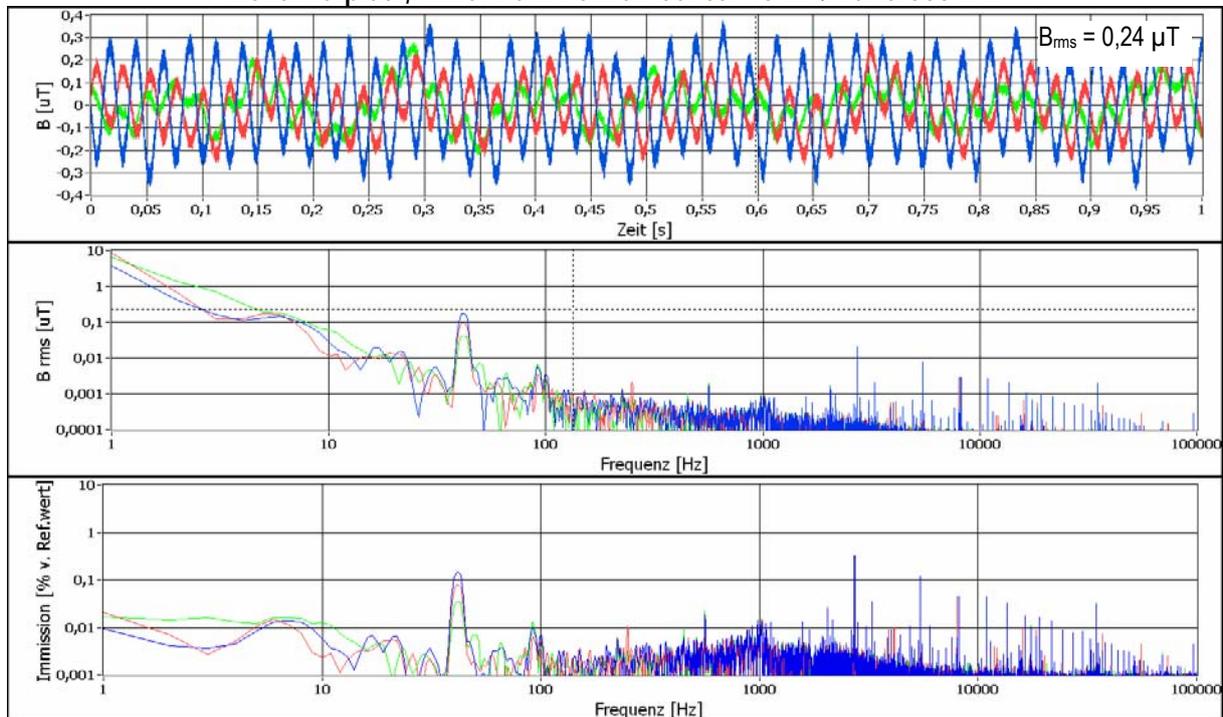


Abbildung 7.50: Vergleich von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Beifahrers (untere 3 Teilbilder) und im Unterleibsbereich des linken Sitzplatzes auf der Rückbank (obere 3 Teilbilder) unter stationären Verhältnissen bei 500 Nm mechanischer Last an der Antriebsachse und 15 km/h. Jeweils oben: Zeitsignal (10 Hz bis 100 kHz), jeweils Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), jeweils unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen.

Tabelle 7.4 gibt einen quantitativen Überblick über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen, sowie die Maximalimmission im Frequenzbereich 40-60 Hz.

	Beifahrer	Fahrer	Rückbank		$B_{rms,max}$ im Frequenzbereich 40-60 Hz
f 50%	32 - 2722 Hz	32 - 2722 Hz	563 - 16000 Hz	Beifahrer	0,31 μ T
f 75%	16 - 5444 Hz	32 - 5444 Hz	100 - 35073 Hz	Fahrer	0,16 μ T
f 90%	16 - 8164 Hz	16 - 8164 Hz	17 - 35144 Hz	Rückbank	0,13 μ T

Tabelle 7.5: Frequenzbereiche innerhalb derer 50%, 75% und 90% der resultierenden Gesamtimmission im Doblo Electric liegen (linker Tabellenteil), sowie der Maximalwert der Immissionen im Frequenzbereich 40-60 Hz (rechter Tabellenteil)

Abbildung 7.51 fasst die unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen am Leistungsprüfstand im Doblo Electric messtechnisch erhobenen Magnetfeldimmissionen zusammen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert der an der jeweiligen Messposition gefundenen Immissionen über den gesamten untersuchten Geschwindigkeits- und Lastmomentbereich (von 15-90 km/h bzw. von 100-1000 Nm an der Antriebsachse). Die Fehlerindikatoren bezeichnen Maximal- und Minimalwerte. Am Fahrer- und Beifahrerplatz lagen die am Leistungsprüfstand gemessenen Immissionen durchwegs unterhalb von 3% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung, wobei im Rumpf- und Kopfbereich sogar nur weniger als 1% feststellbar war. Auf der Rückbank, vor allem im Unterleibs- und Bauchbereich, zeigten sich jedoch, durch die in Abbildung 7.50 dargestellten und oben erwähnten Verhältnisse, wesentlich höhere Immissionswerte als auf den vorderen Sitzen. Im Unterleibsbereich wurden auf diesem Sitzplatz unter stationären Verhältnissen Immissionen bis zu ca. 14,5%, im Kopfbereich noch bis zu ca. 4% des ICNIRP-Referenzwertes gemessen.

Beim Bremsen (Abbildung 7.52) ergaben sich am Fahrer- und Beifahrerplatz etwa um einen Faktor 2-3 gegenüber den stationären Verhältnissen erhöhte Immissionen, auf der Rückbank war dieser Unterschied nur unwesentlich.

Beim Beschleunigen (Abbildung 7.53) waren die Immissionen auf der Rückbank und am Fahrerplatz deutlich erhöht und erreichten im Unterleibsbereich am untersuchten Platz auf der Rückbank maximal ca. 25% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung.

Auch im Stillstand des eingeschalteten Fahrzeugs zeigten sich die höchsten Immissionswerte (bis zu ca. 1,7% des Referenzwertes) auf dem linken Sitzplatz der Rückbank (Abbildung 7.54).

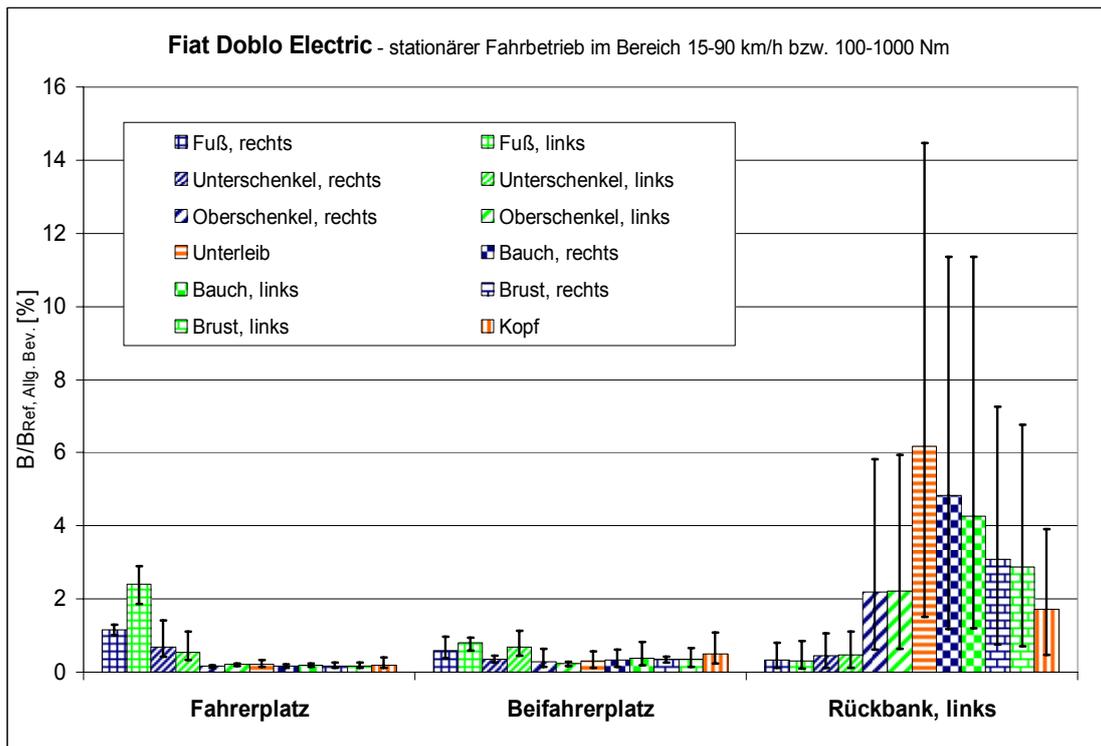


Abbildung 7.51: Zusammenfassung der im Doblo Electric am Leistungsprüfstand gemessenen Immissionen unter stationären Geschwindigkeits- und Lastverhältnissen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert für die unterschiedlichen Geschwindigkeits- und Lastzustände, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

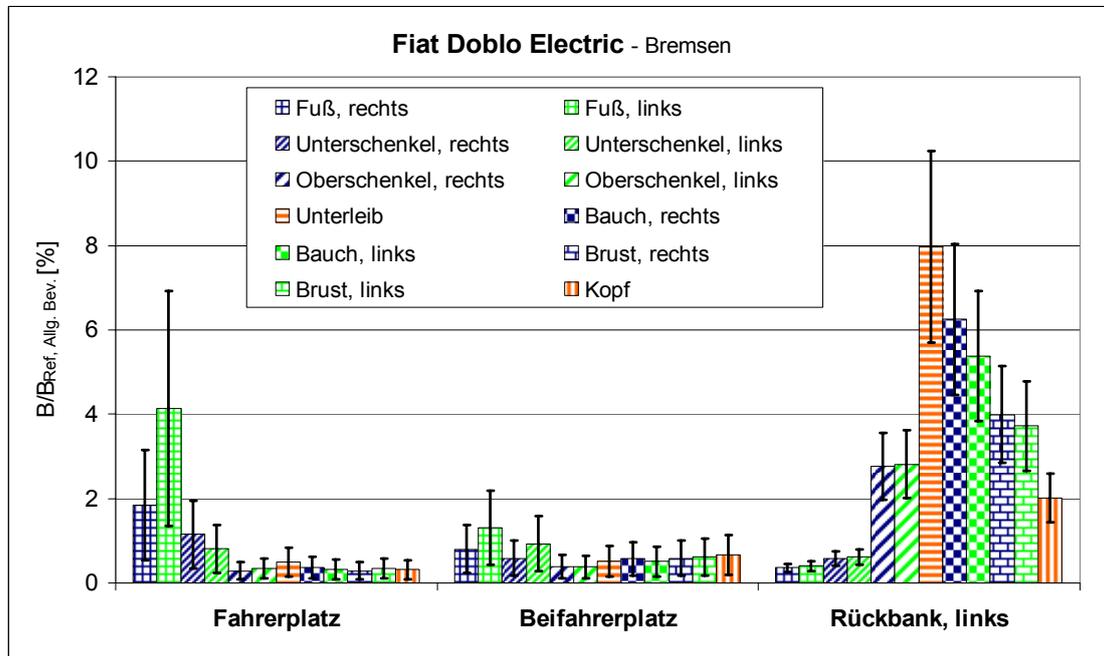


Abbildung 7.52: Zusammenfassung der im Doblo Electric bei Bremsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

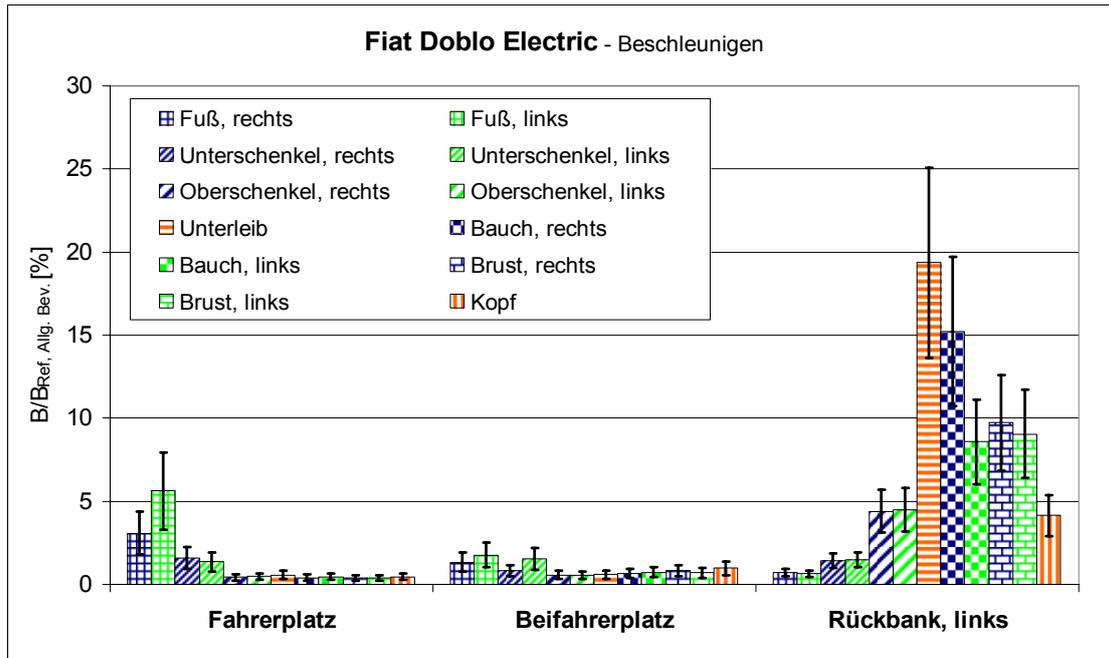


Abbildung 7.53: Zusammenfassung der im Doblo Electric bei Beschleunigungsmanövern gemessenen Immissionen. Die Balkenhöhe entspricht jeweils dem Mittelwert, der Fehlerindikator zeigt Maximal- und Minimalwert.

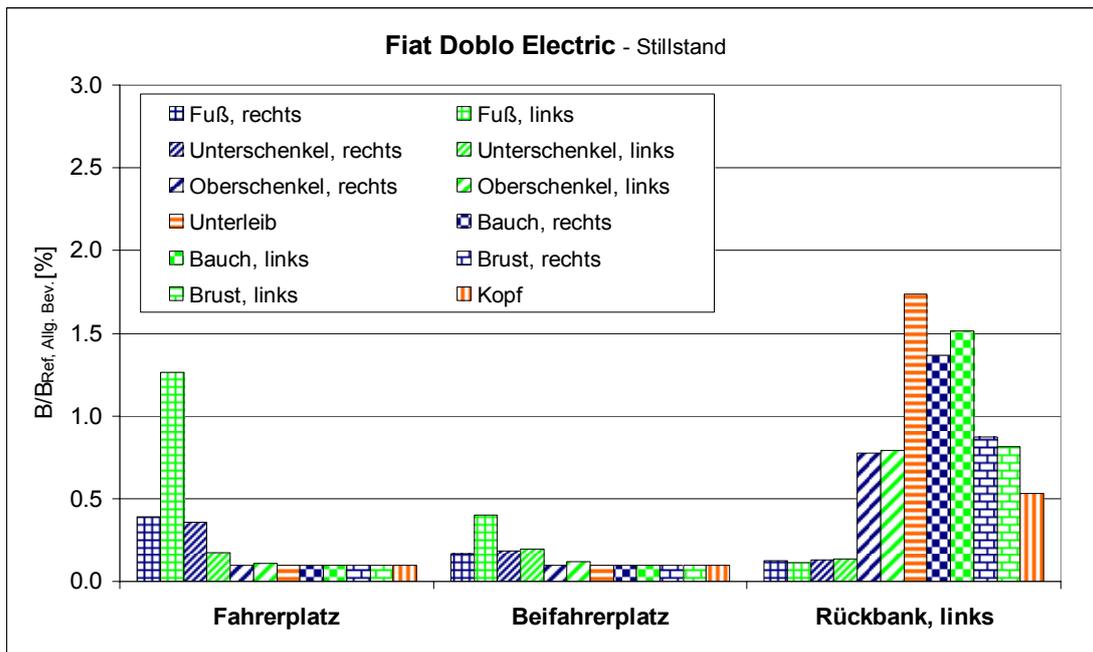


Abbildung 7.54: Zusammenfassung der im Doblo Electric bei Stillstand des Fahrzeugs gemessenen Immissionen.

Bezüglich kurzfristig auftretender transients Magnetfeldimmissionen zeigt Abbildung 7.55 die relevantesten im Laufe der Untersuchungen im Doblo Electric beobachtbaren Signale. Der dabei aufgetretene Maximalwert der zeitlichen Änderungsrate der magnetischen Flussdichte lag bei ca. 100 mT/s. Bei Verwendung der in Kapitel 6.4.5 beschriebenen Bewertungsmethode entspricht dies einer kurzzeitigen Exposition von ca. 6% des strengsten Basisgrenzwertes für die im Gewebe induzierte Stromdichte (2 mA/m²).

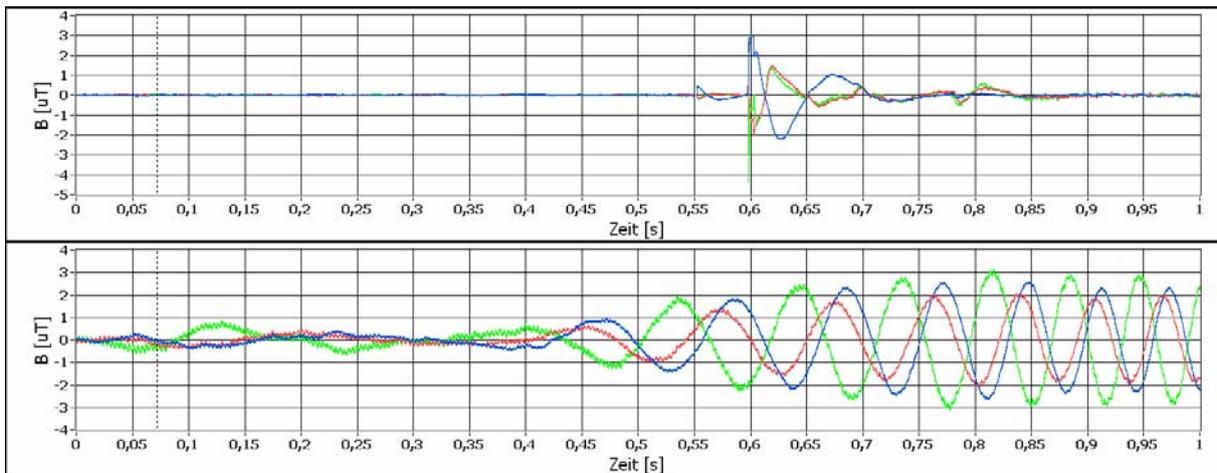


Abbildung 7.55: Kurzfristig auftretende transiente Magnetfelder im Doblo Electric.
Oben: Einschalten des Fahrzeugs; unten: Anfahren

Abbildung 7.56 zeigt die mit dem in Kapitel 6.6 beschriebenen Berechnungsmodell ermittelte Prognose der Immissionen beim Fahren des in [22] definierten NEDC-Fahrzyklus in Form der relativen Häufigkeiten der Immissionswerte an den Messpositionen jedes untersuchten Platzes, die sich im Zuge der Messungen als die am höchsten exponierten Stellen erwiesen.

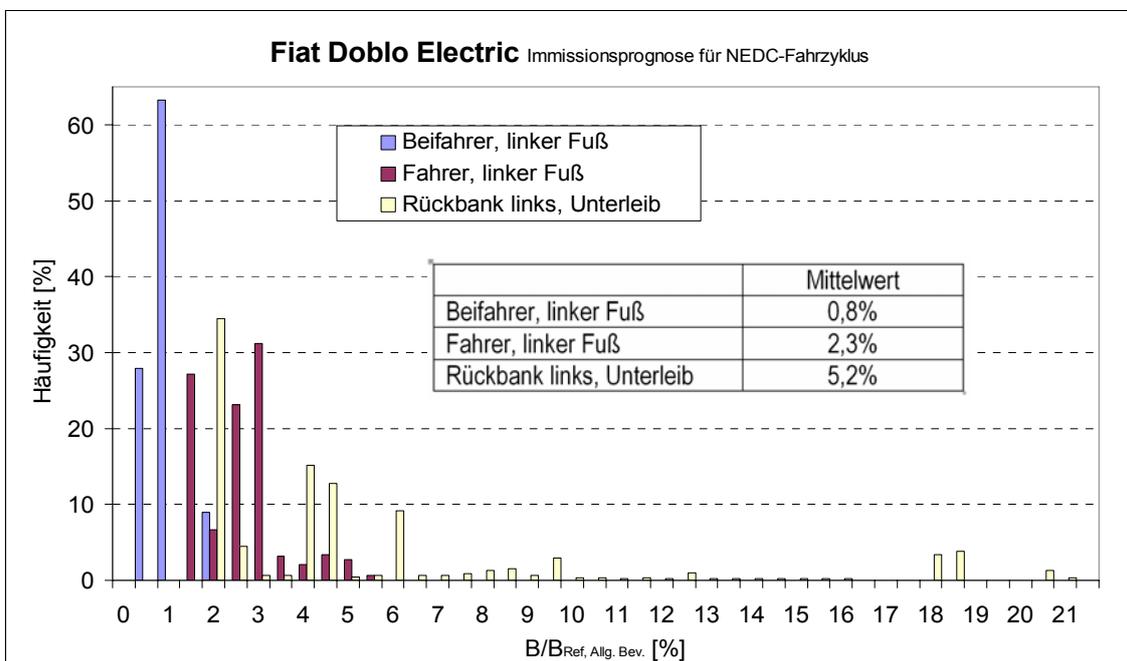


Abbildung 7.56: Immissionsprognose im Doblo Electric, beim Fahren des NEDC-Fahrzyklus

Zusammenfassend zeigten die Untersuchungen im Doblo Electric am Fahrer- und Beifahrerplatz Immissionswerte von durchwegs weniger als 7% des ICNIRP-Referenzwertes, mit deutlichen Maxima im Bereich der Füße. Im Rumpf und Kopfbereich lagen die Maximalimmissionen bei weniger als 1% des Referenzwertes. Vergleichsweise höhere Immissionen traten, offensichtlich verursacht durch die Lage der Batterie bzw. der zur Batterie führenden Kabel, auf der Rückbank am linken

Sitzplatz, vor allem im Unterleibs- und Bauchbereich auf. Hier konnten Werte von bis zu 25% beim Beschleunigen bzw. ca. 14% im stationären Fahrbetrieb festgestellt werden. Auch im Kopf lagen auf diesem Sitzplatz die Immissionen beim Beschleunigen noch knapp oberhalb von 5% des ICNIRP-Referenzwertes.

7.3 Immissionsvergleich anhand des NEDC-Fahrzyklus

Ein Vergleich der für den NEDC-Fahrzyklus auf Basis der numerischen Prognosemodelle errechneten Immissionsdaten mit den Messwerten aus den Fahrten im Realverkehr, zeigt bezüglich des Immissionsmittelwertes Abweichungen bis zu einem Faktor 2,7 (vgl. Abbildung 7.11 und Abbildung 7.12). Die größten Abweichungen traten dabei bei Fahrzeugen, bzw. Messpositionen auf, bei denen die Immissionen zwischen stationärem Betrieb und Bremsen, bzw. Beschleunigen, große Unterschiede aufwiesen (z.B. Honda Civic IMA, vgl. Abbildung 7.6 mit Abbildung 7.7 und Abbildung 7.8). Bei Fahrzeugen, bzw. Messpositionen mit nur geringern Immissions-Unterschieden zwischen stationärem Betrieb und Bremsen, bzw. Beschleunigen, zeigten die für den NEDC-Fahrzyklus berechneten Immissionsmittelwerte nur geringfügige Abweichungen zu den Immissionsmittelwerten aus den Realfahrten (z.B. Panda Electric, vgl. Abbildung 6.22 mit Abbildung 7.46, und Doblo Electric, vgl. Abbildung 6.23 mit Abbildung 7.56). Dies deutet darauf hin, dass der NEDC-Fahrzyklus nur wenig für eine standardisierte Immissionserfassung in den Fahrzeugen geeignet ist. Als Hauptgrund dafür ist wahrscheinlich die Rekuperation zu sehen, die vor allem beim Bremsen aktiv wird und, wie gezeigt, in einigen Fahrzeugmodellen zu teilweise relativ hohen Immissionswerten führt. Demgegenüber enthält der NEDC-Fahrzyklus überwiegend Bremsphasen mit Beschleunigungswerten deutlich unterhalb von -1 m/s^2 , was eher einem Ausrollen (passives Bremsen durch Reibungs- und Luftwiderstand), als aktiven Bremsmanövern entspricht. Im Hinblick auf die Charakterisierung des Treibstoffverbrauchs in konventionellen Fahrzeugen, für die der NEDC-Fahrzyklus definiert wurde, stellt diese Tatsache ein eher untergeordnetes Problem dar, da sich der Treibstoffverbrauch während des Bremsens kaum vom Standgas-Verbrauch unterscheidet. Für die Charakterisierung der Magnetfeldimmissionen, die aufgrund der Rekuperation während des Bremsens erheblich größer als während stationärer Verhältnisse sein können, erscheint der NEDC-Fahrzyklus aus oben genannten Gründen daher als wenig geeignet.

7.4 Nahverkehrsbus mit Elektro-Hybridantrieb

Als Vertreter der Kategorie Nahverkehrsbus stand aufgrund der freundlichen Unterstützung der *Bochum-Gelsenkirchener Straßenbahn AG (BOGESTRA)* und des Fahrzeugherstellers *Solaris Bus & Coach* ein Omnibus der Type **Urbino 18 Hybrid** für Immissionsmessungen zur Verfügung.

7.4.1 Messungen im Urbino 18 Hybrid (Solaris Bus & Coach)

Das Fahrzeug mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 28 t (Leergewicht ca. 17 t) ist mit einem Mischhybrid-Antrieb ausgestattet, der (automatisch geregelt) sowohl parallel als auch leistungsverzweigt arbeiten kann. Es besitzt dazu zwei Elektromotoren mit je 75 kW Nennleistung und einen 250 kW Vierzylinder-Dieselmotor. Die Elektromotoren liefern einerseits zusätzliches Antriebsmoment, um den Dieselmotor im optimalen Arbeitsbereich halten zu können und andererseits

Energie zum Laden der im vorderen Wagenteil auf dem Dach befindlichen Batterie. Abbildung 7.57 zeigt den untersuchten Fahrzeugtyp.

Die im Hinblick auf die Magnetfeldimmissionen relevanten technischen Daten des Fahrzeugs können wie folgt zusammengefasst werden:

Batteriespannung:	ca. 500 V
Motorart:	2 Stk. 3~ Synchronmotor mit Permanentmagnetläufer
Motornennleistung:	2 x 75 kW
Ort des Motors:	zwischen vorderer und mittlerer Achse auf der linken Seite
Batterie:	auf dem Dach im vorderen Wagenbereich
Leistungselektronik (Inverter):	linke Fahrzeugseite oberhalb Fenstersitz
Verkabelung:	Kabelschacht hinter Fenstersitz unter Inverter



Abbildung 7.57: Der untersuchte Fahrzeugtyp, Urbino 18 Hybrid

Abbildung 7.58 zeigt schematisch den Grundriss des Fahrzeugs mit eingezeichneter Lage der untersuchten Sitz- bzw. Stehplätze und der wichtigsten Fahrzeugkomponenten (Motor, Inverter, Batterie, Kabelschacht). Die Auswahl der untersuchten Fahrgastplätze erfolgte auf Basis von Übersichtsmessungen vor Beginn der eigentlichen Untersuchungen. Sitzplätze A-C wurden dabei möglichst nahe den elektrischen Komponenten gewählt, um die zu erwartenden maximalen Immissionen zu erfassen. Sitzplatz D wurde dagegen bewusst in möglichst großer Entfernung zu den Antriebssystemkomponenten gewählt, um einen Vergleich zwischen maximalen und minimalen Immissionen im Fahrzeug anstellen zu können. Die genaue Lage des Inverters, des Motors und des Kabelschachts erschließt sich auch aus Abbildung 7.59 und Abbildung 7.60a-c.

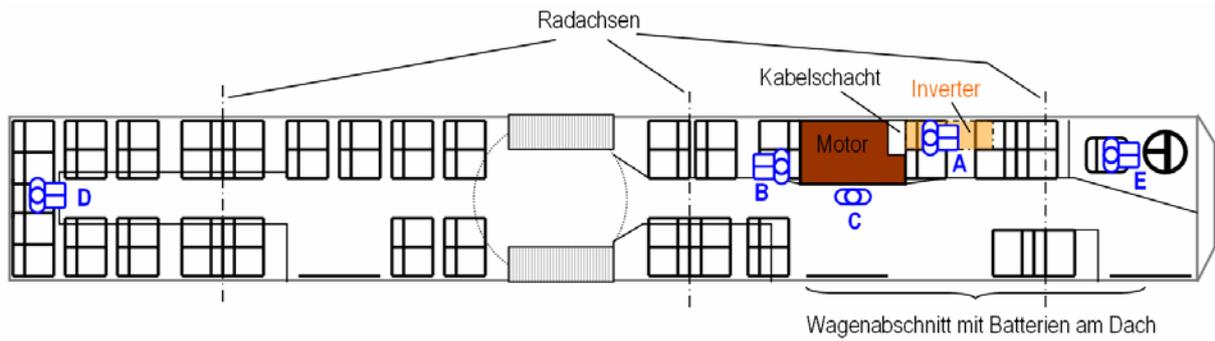


Abbildung 7.58: Schema (Grundriss) des Fahrzeugs mit Lage des Motors, der Batterien, des Kabelschachts und den untersuchten Sitzplätzen A-E



Abbildung 7.59: Hybridelektronik oberhalb des untersuchten Sitzplatzes A, bei abgenommener Abdeckung (vgl. Abbildung 7.58)

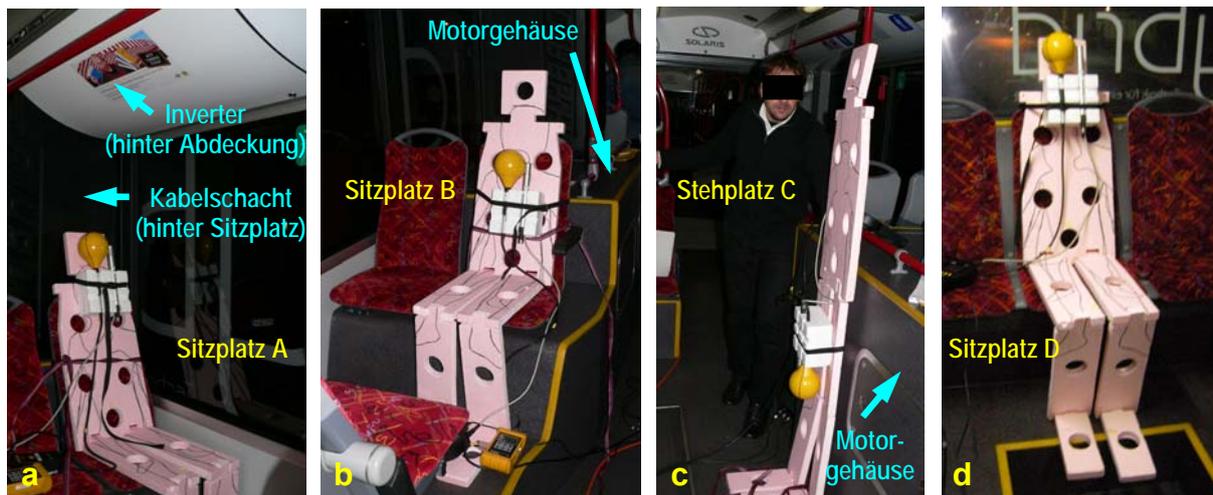


Abbildung 7.60: Untersuchte Passagierplätze A-D (vgl. Abbildung 7.58)

Zur Bestimmung der räumlichen Verteilung der Magnetfeldimmissionen an den untersuchten Fahrgastplätzen und dem Fahrerplatz, wurden Immissionsmessungen während Fahrten entlang einer vordefinierten, ca. 5 km langen Testroute (Rundstrecke mit Fahrzeit, je nach Ampelphasen, zwischen 7,5 und 10,5 Minuten) im Stadtgebiet von Bochum durchgeführt, die sowohl Flachstücke, als auch leichte

Steigungen enthielt. Zusätzlich wurden bei jeder Fahrt zur Simulation von Haltestellen jeweils 5 Anhalte- und Anfahrmanöver durchgeführt (Abbildung 7.61).

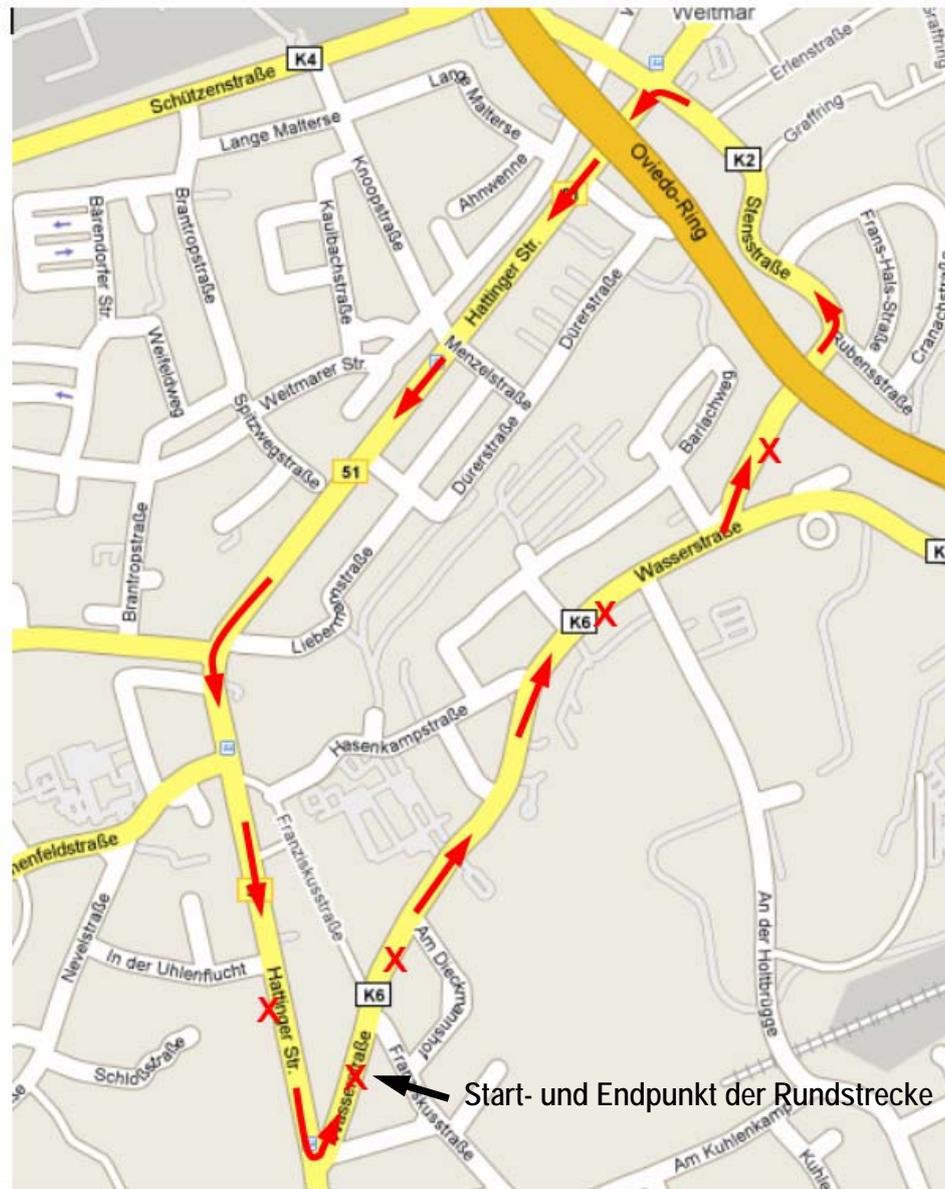


Abbildung 7.61: Festgelegte Route für die Immissionsmessungen in Bochum. Kreuze markieren Haltepunkte.

Durch wiederholtes Fahren der Testroute unter jeweils möglichst gleichen Bedingungen wurden an unterschiedlichen Messpositionen an den untersuchten Plätzen (jeweils eine Messposition pro Fahrt) die Magnetfeldimmissionen frequenzselektiv gemessen, so dass eine repräsentative Dokumentation der räumlichen und zeitlichen Magnetfeldverteilung an den untersuchten Plätzen unter typischen Betriebsbedingungen erfolgen konnte. Alle Messungen erfolgten nachts, zwischen 21³⁰ und 02³⁰, ohne Fahrgäste (nur insgesamt 5 Personen inklusive Fahrer im Bus). An jedem der untersuchten Plätze A-E wurden die Immissionsmessungen grundsätzlich in 5 unterschiedlichen Körperregionen (Füße, Knie, Unterleib, Brust, Kopf) durchgeführt. Ausnahmen bildeten der Fahrerplatz (E) und Sitzplatz im Fahrzeugheck (D), an denen keine Immissionsmessungen im Kniebereich durchgeführt wurden. An Platz D wurde auf diese Messposition aufgrund der homogenen, ohnehin kaum über dem magnetischen Hintergrund liegenden

Immissionen verzichtet und am Fahrerplatz war die Positionierung der Messsonden im Kniebereich während der Fahrt nicht möglich. Die Messpositionen „Unterleib“, „Brust“ und Kopf“ entsprechen am Fahrerplatz einer Positionierung der Messsonden unmittelbar an der Rückseite der Lehne des Fahrersitzes in der jeweils entsprechenden Höhe. An allen anderen Plätzen wurde für die Positionierung der Messsonden und die Zuordnung zu Körperregionen das in 6.1 beschriebene einfache Körpermodell verwendet (Abbildung 7.60).

Mögliche von einer Magnetisierung der Reifen stammende Magnetfeldkomponenten können aufgrund des großen Reifendurchmessers und der relativ geringen Geschwindigkeiten nur im Frequenzbereich deutlich unterhalb von 10 Hz erwartet werden. Gemeinsam mit dem Faktum relativ großer Distanzen der Messpositionen zu den Reifen und der Tatsache, dass sich im Zuge der Datenauswertungen keinerlei Hinweise auf solche Magnetfeldkomponenten ergaben, können relevante Immissionsanteile ($>0,1\%$ des Referenzwertes) zufolge einer möglichen Magnetisierung der Reifen ausgeschlossen werden.

Bezüglich der Messergebnisse für Sitzplatz A und den Fahrerplatz ist gegenüber den in Kapitel 6.5 angegebenen Unsicherheitsbereichen von einer um ca. max. $\pm 1\%$ erhöhten Messunsicherheit bezogen auf den Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung auszugehen (entspricht ca. $\pm 0,2\%$ bezüglich des Referenzwertes für berufliche Exposition). Der Grund dafür war eine zusätzliche Stromversorgung für ein Notebook (eines den Messungen beiwohnenden Mitarbeiters des Busherstellers), das fallweise in ca. 1-2 m Entfernung zu diesen Positionen in Betrieb war.

Abbildung 7.62 bis Abbildung 7.66 zeigen zunächst die während den Messfahrten in den unterschiedlichen Messpositionen aufgetretenen Magnetfeldimmissionen als Funktion der Zeit, dargestellt als phasenrichtig summierte (0 Hz-100 kHz), auf den Referenzwert bezogene Einzelspektralkomponenten in Prozent vom Referenzwert. Für die untersuchten Fahrgastplätze wurden die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung, für den Fahrerplatz die Referenzwerte für berufliche Exposition gemäß [1] herangezogen. Die unterschiedlichen Graphen (für jeweils eine Messposition) sind hinsichtlich des Startzeitpunktes jeder Runde (jeder Messposition) synchronisiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt wurden, ist jedoch eine Synchronisation der Messdaten entlang der gesamten Zeitachse nicht möglich (aufgrund von z.B. unterschiedlicher Ampelphasen entlang der Testroute).

Die mit Abstand größten Immissionen ergaben sich dabei am Fahrgastsitzplatz A unmittelbar unterhalb der Leistungselektronik und unmittelbar vor dem Kabelschacht, mit Immissionsspitzenwerten (gemittelt über 1 Sekunde) von bis zu 19,2% vom Referenzwert im Kopfbereich (Abbildung 7.62). In anderen Körperregionen traten deutlich geringere Immissionswerte auf, monoton abnehmend in Richtung der Füße. Die vor allem im Kopfbereich deutlich hervortretenden Immissionsspitzen (über ca. 15% vom Referenzwert) konnten dabei eindeutig Brems- und Beschleunigungs- (Anfahr-)Manövern zugeordnet werden. Im „gleitenden“ Fahrbetrieb lagen die Immissionswerte im Kopfbereich auf Sitzplatz A zwischen ca. 10% und 15%. Im Stillstand des angeschalteten Fahrzeuges (in Haltestellen und bei Ampeln) ergaben sich im Kopfbereich des Sitzplatzes A üblicherweise Immissionswerte von ca. 6%-8% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung. In seltenen Fällen konnten auch im Stillstand Immissionswerte im Kopfbereich zwischen 10% und 15% festgestellt werden, die offensichtlich durch Batterieladevorgänge hervorgerufen wurden.

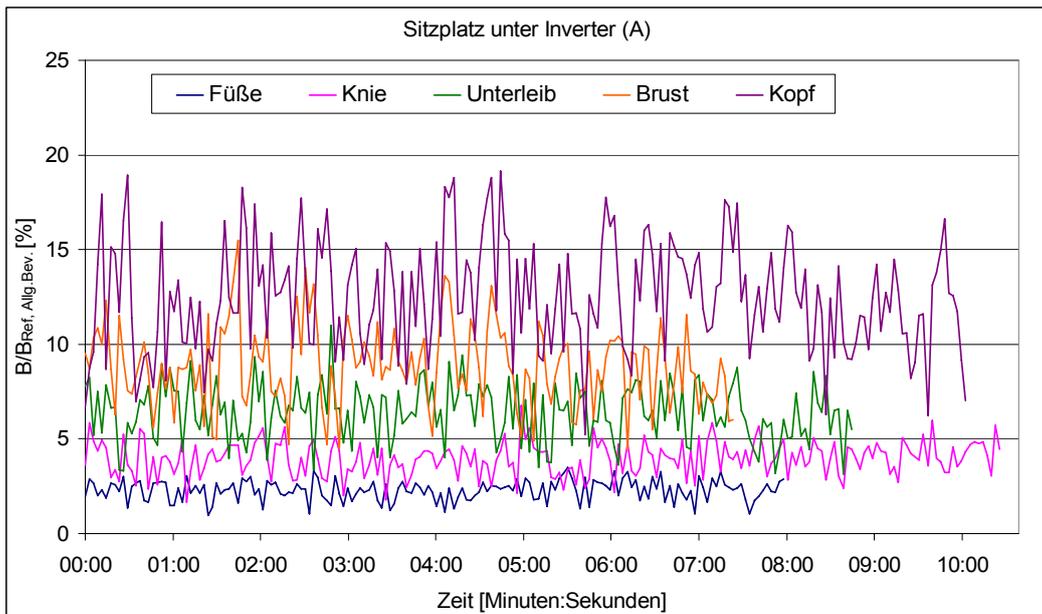


Abbildung 7.62: Magnetfeldimmissionen am Sitzplatz A, direkt unter der Leistungselektronik

An allen anderen untersuchten Fahrgastplätzen waren die vom Fahrzeug verursachten Magnetfeldimmissionen deutlich geringer und lagen an Sitzplatz B bei maximal 3,6% (im Unterleibsbereich, Abbildung 7.63), an Stehplatz C bei maximal 6,1% (im Bereich der Knie, Abbildung 7.64) und an Sitzplatz D bei unter 1% (Abbildung 7.65), wobei die Immissionen an Sitzplatz D bereits deutlich von äußeren Hintergrundimmissionen dominiert wurden. Dies wird durch die in Abbildung 7.65 erkennbare pauschale Erhöhung der Immissionen um etwa 0,4%pkt zwischen Minuten 5:00 und 8:45 deutlich. Dieser Zeitabschnitt entspricht dem Streckenabschnitt auf der Hattinger Straße (vgl. Abbildung 7.61), die im Vergleich zum Rest der Strecke als sehr dicht bebaut gesehen werden muss und mit elektrischer Straßenbeleuchtung ausgestattet ist, was die pauschal leicht erhöhten Immissionen in diesem Streckenabschnitt plausibel macht.

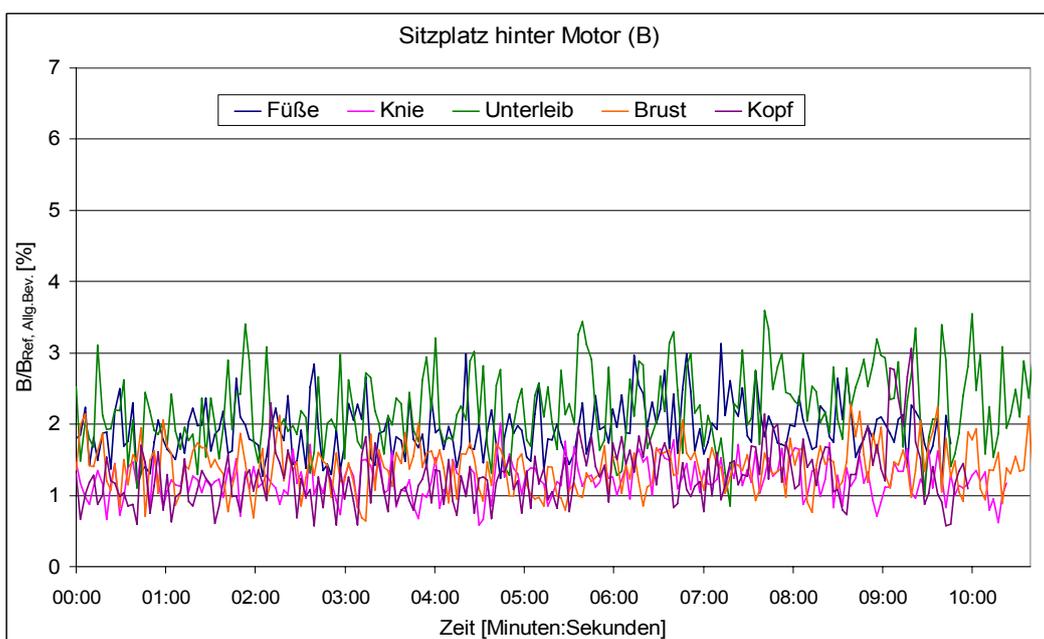


Abbildung 7.63: Magnetfeldimmissionen am Sitzplatz B, direkt hinter dem Motorgehäuse

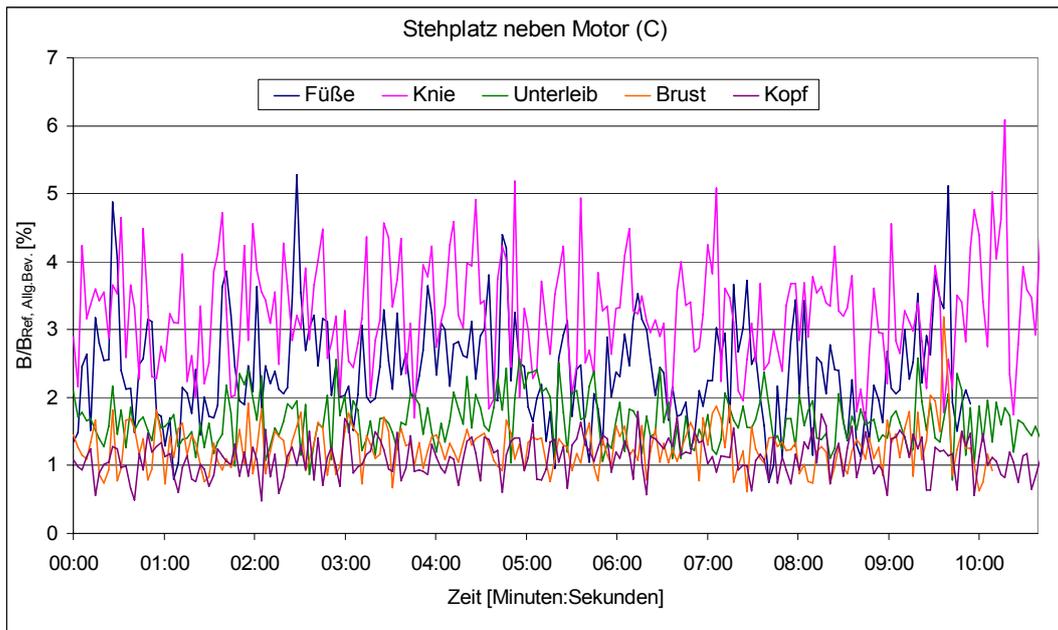


Abbildung 7.64: Magnetfeldimmissionen am Stehplatz C, direkt neben dem Motorgehäuse

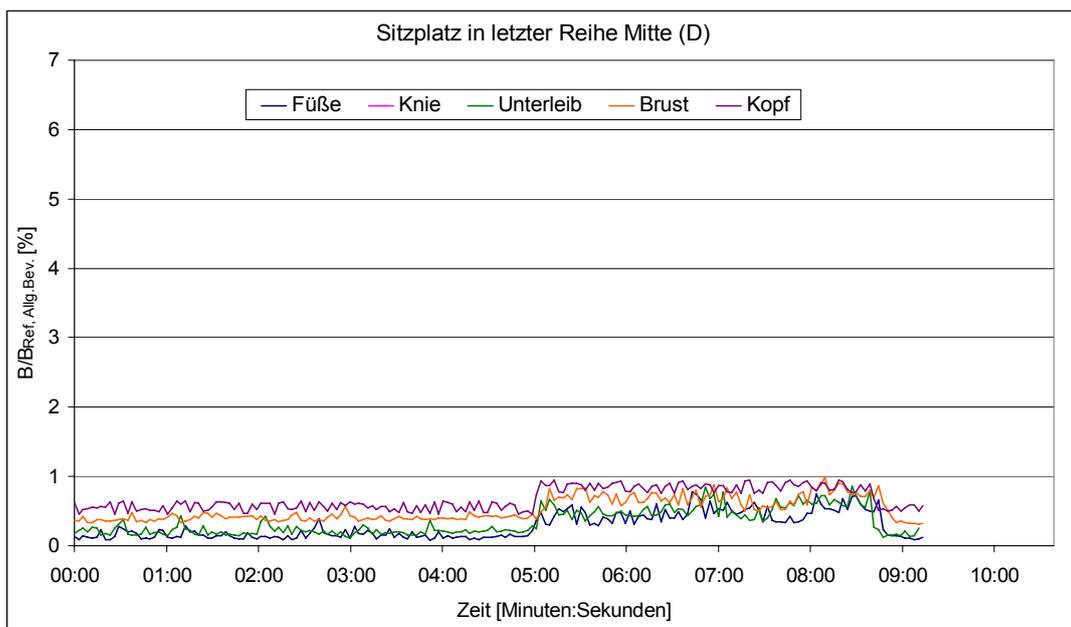


Abbildung 7.65: Magnetfeldimmissionen am Sitzplatz D, in der hintersten Sitzreihe

Abbildung 7.66 zeigt schließlich die Immissionen während der Messfahrten am Fahrerplatz, wobei diesbezüglich nochmals angemerkt wird, dass diese auf die Referenzwerte für berufliche Exposition bezogen sind. In absoluter Sichtweise waren die Immissionen am Fahrerplatz etwas geringer als an Sitzplatz A, jedoch größer als an den übrigen untersuchten Fahrgastplätzen. Die maximal gemessenen Immissionen am Fahrerplatz entsprechen ca. 2,6% des Referenzwertes für berufliche Exposition. Für einen direkten Vergleich der Immissionen am Fahrerplatz mit jenen an den Fahrgastplätzen, können die in Abbildung 7.66 gezeigten Immissionen durch Multiplikation mit 5 näherungsweise auf die Werte bezogen auf die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung umgerechnet werden.

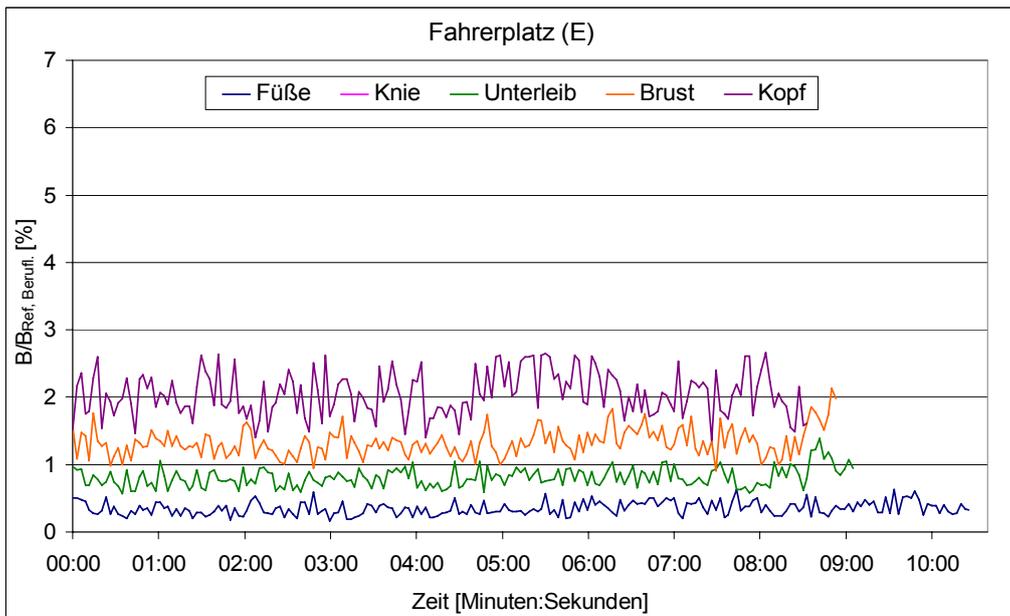


Abbildung 7.66: Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz E

Abbildung 7.67 fasst die Messergebnisse in übersichtlicher Form zusammen, wobei die Balkenhöhen arithmetische Mittelwerte und die Fehlerindikatoren Maximal- und Minimalwerte der Immissionen an den entsprechenden Positionen kennzeichnen.

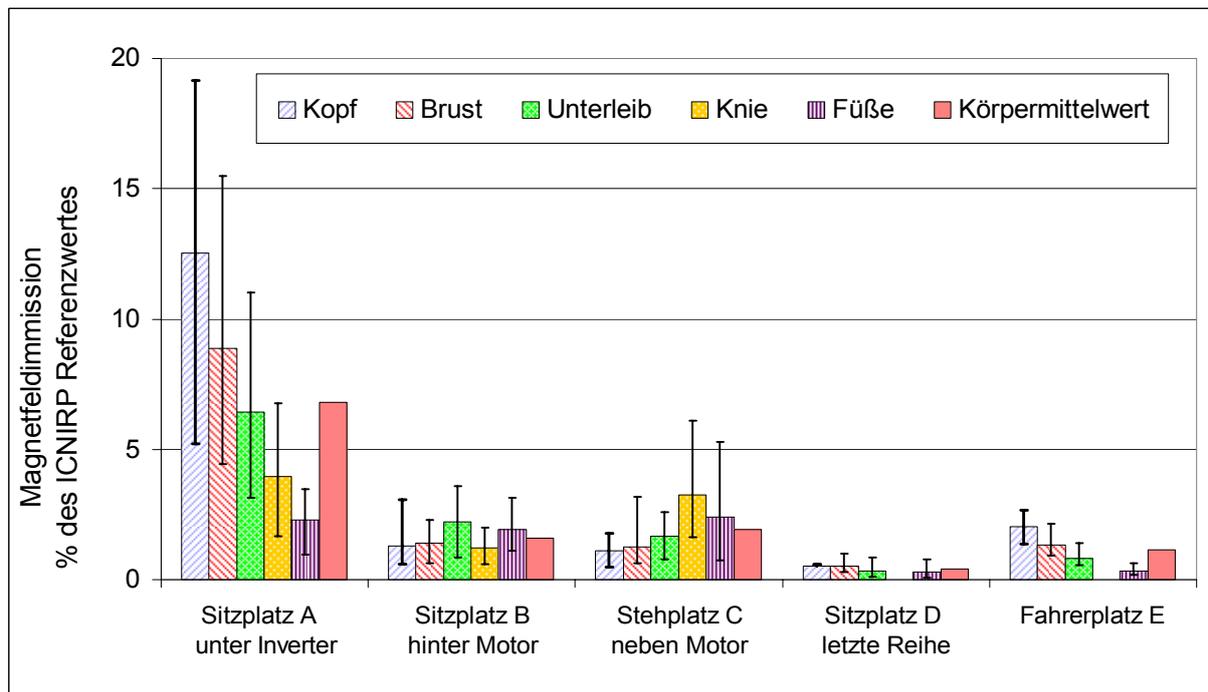


Abbildung 7.67: Zusammenfassung der Messergebnisse im Urbino18 Hybrid. Für die Fahrgastplätze A-D wurden die ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung, für den Fahrerplatz E die ICNIRP-Referenzwerte für berufliche Exposition zur Bewertung der Immissionen herangezogen

Abbildung 7.68 illustriert die Häufigkeitsverteilungen der Immissionswerte während der Messfahrten anhand der Immissionen im Kopfbereich an Sitzplatz A (unter Inverter) und im Kniebereich des Stehplatzes C (neben Motor).

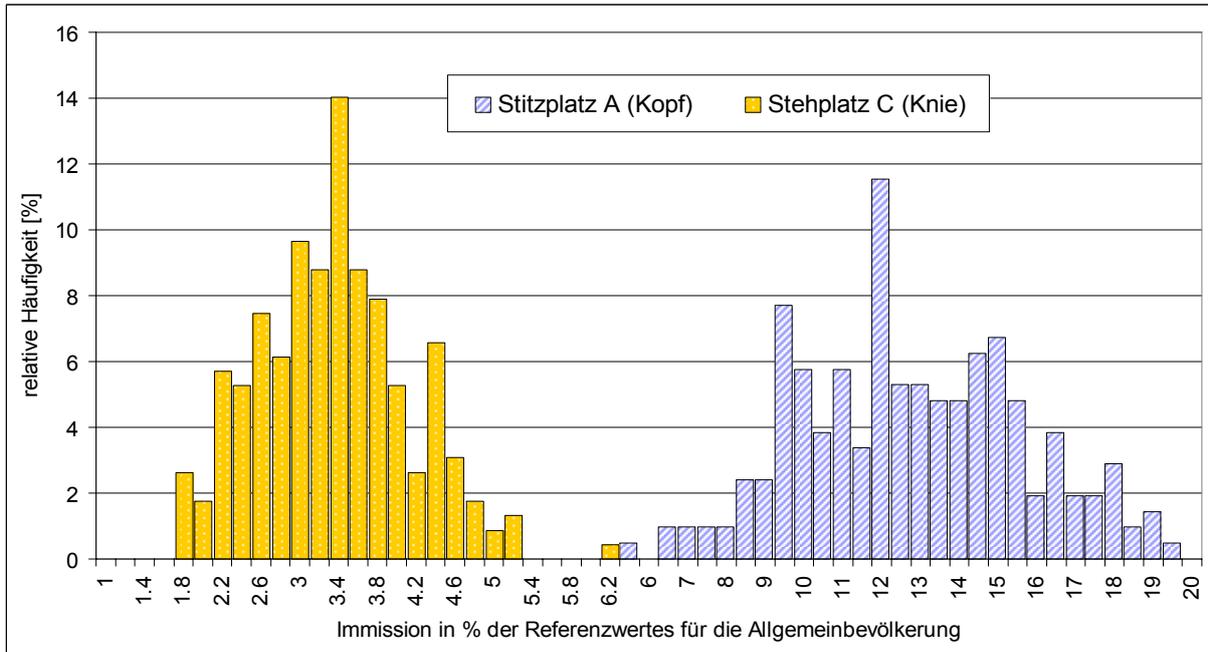


Abbildung 7.68: Relative Häufigkeiten der Immissionswerte im Kopfbereich von Sitzplatz A und im Kniebereich von Stehplatz C

Zur Veranschaulichung der spektralen Zusammensetzung der Immissionen zeigen Abbildung 7.69 bis Abbildung 7.72 einige typische Signalverläufe und deren Spektren.

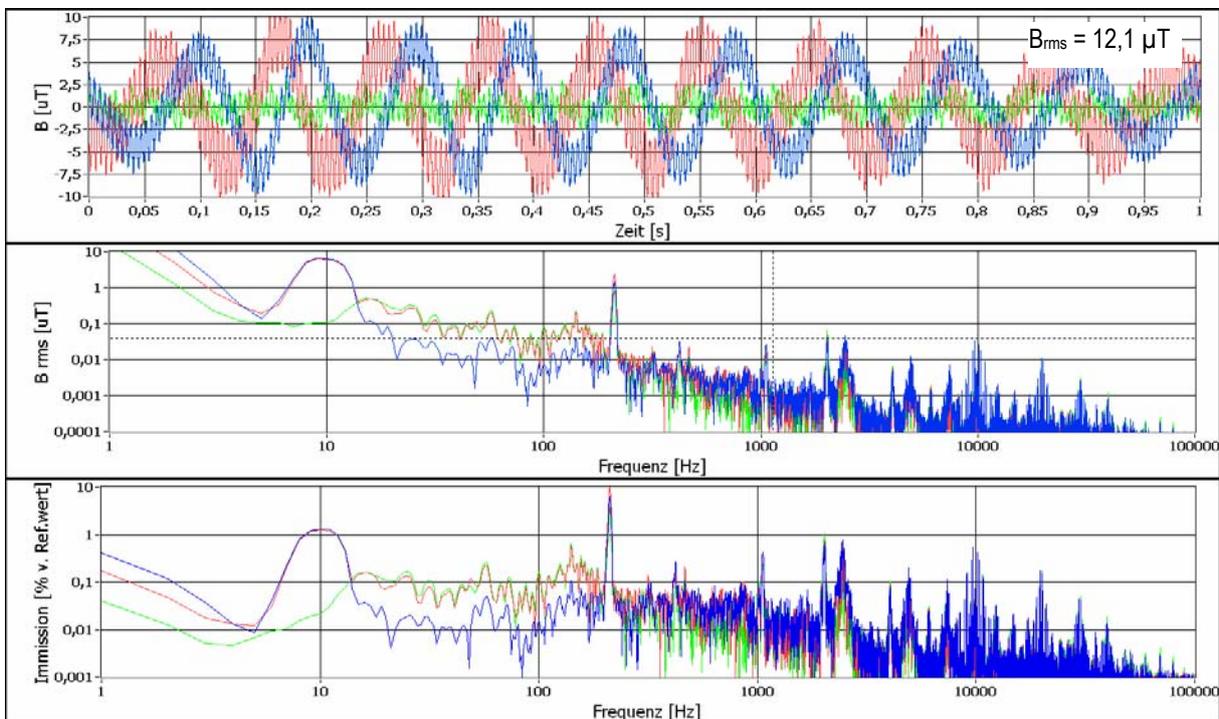


Abbildung 7.69: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Kopfbereich des Sitzplatzes A während eines kurzen Stücks Fahren im Schrittempo. Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

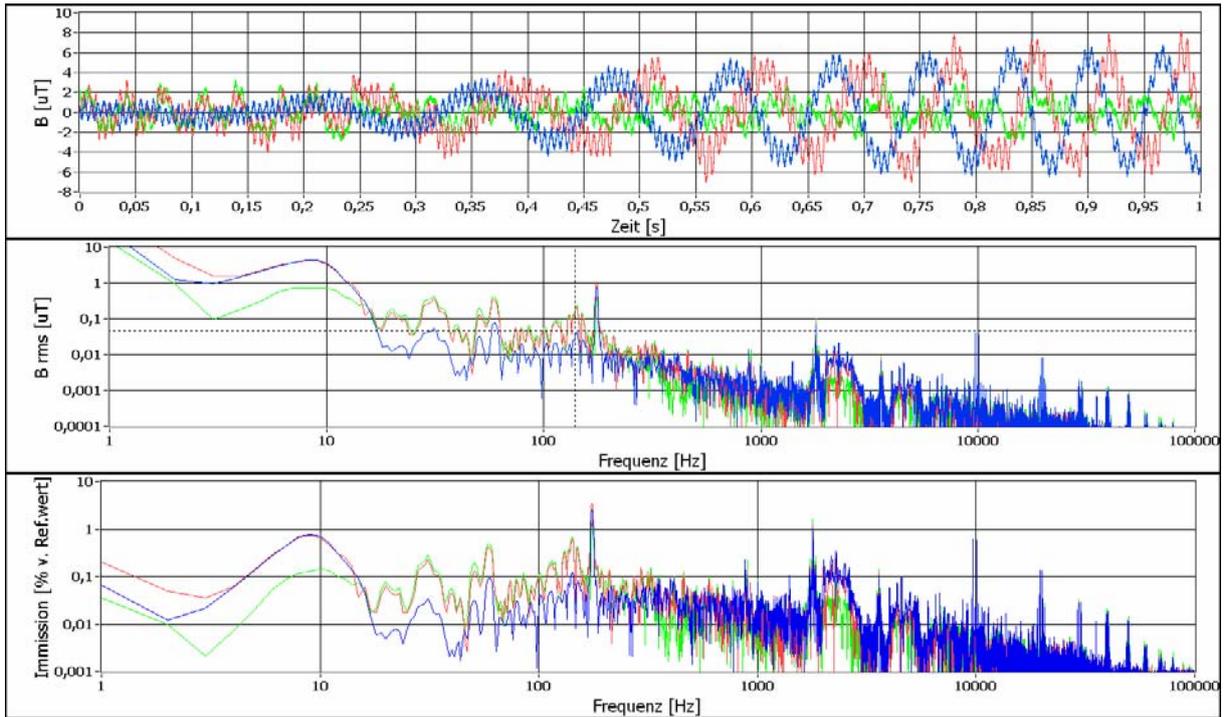


Abbildung 7.70: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Kopfbereich des Sitzplatzes A während des Anfahrens. Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

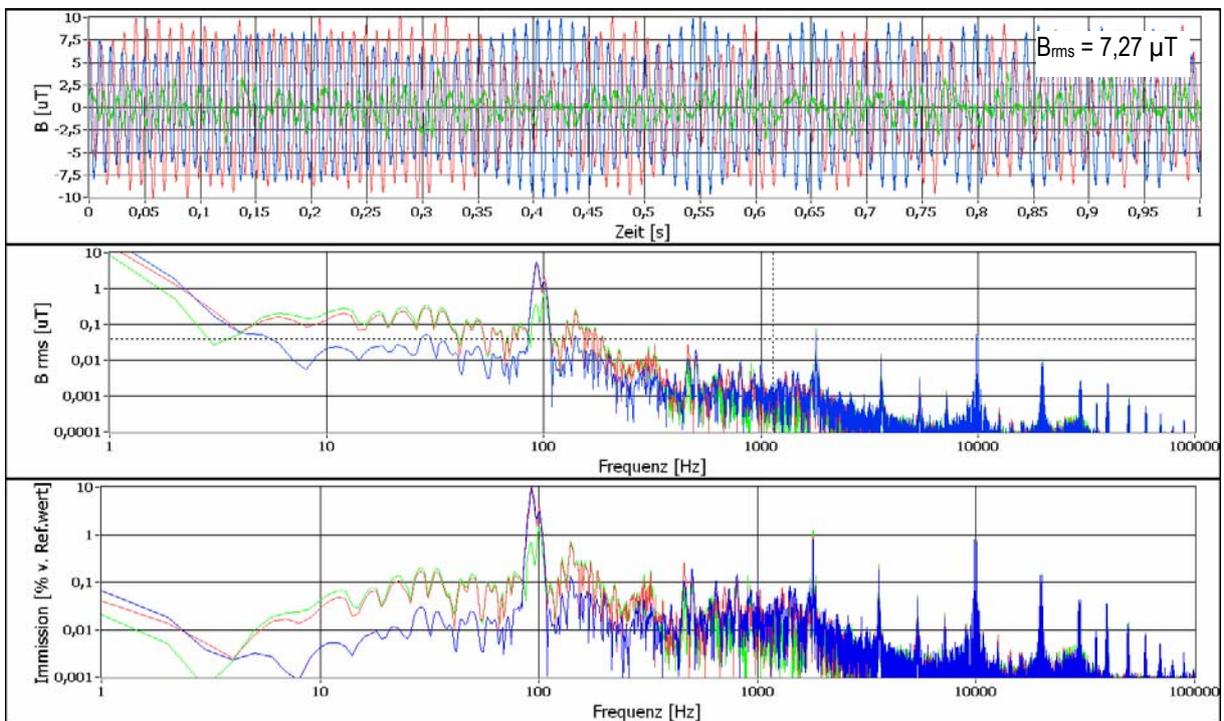


Abbildung 7.71: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Kopfbereich des Sitzplatzes A während des Anbremsens einer Haltestelle. Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

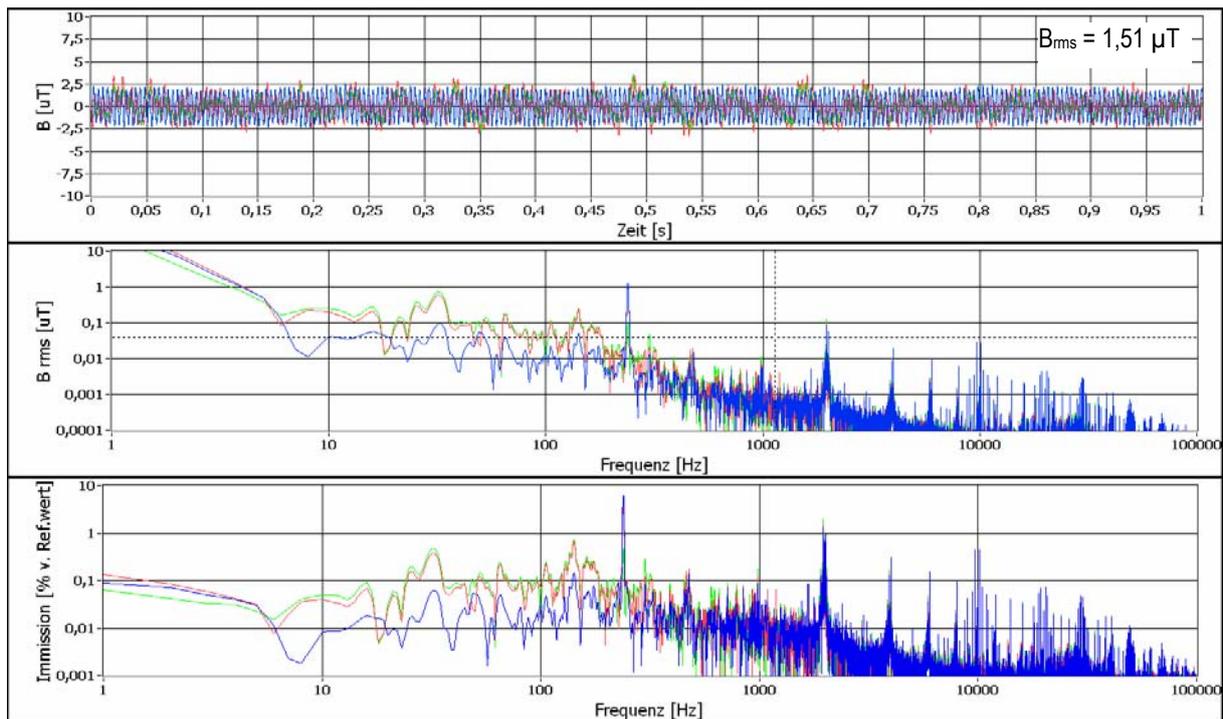


Abbildung 7.72: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Kopfbereich des Sitzplatzes A während der Fahrt mit ca. 50 km/h
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Zusammenfassend kann bezüglich der im Nahverkehrsbus Urbino18 Hybrid von den elektrischen Komponenten des Antriebssystems verursachten zu erwartenden Magnetfeldimmissionen festgestellt werden, dass die Leistungselektronik als Hauptverursacher gesehen werden muss. Die Sitzplätze am Fenster unmittelbar unterhalb des Inverters und besonders der zusätzlich unmittelbar vor dem Kabelschacht befindliche Sitzplatz A sind daher relativ hohen Magnetfeldimmissionen ausgesetzt, die im Bereich des Kopfes durchschnittlich größer auf den Sitzplätzen sitzender Personen Werte bis knapp unter 20% des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung erreichen können (beim Anfahren und Bremsen des Fahrzeugs). Kurzfristig höhere lokale Expositionen im Kopfbereich sind bei weiterer Annäherung an die Abdeckung der Inverterelektronik (Abbildung 7.59) denkbar (z.B. für einen während des Bremsens bzw. Anfahrens sich gerade vom Sitzplatz A erhebenden, bzw. noch nicht sitzenden Fahrgastes). Eine Überschreitung des Referenzwertes erscheint jedoch auf Basis der vorliegenden Messdaten als sehr unwahrscheinlich. An allen anderen untersuchten Fahrgastplätzen ergaben sich deutlich geringere Immissionswerte, insbesondere anzumerken ist die Tatsache, dass die in unmittelbarer Nähe des Motors befindlichen Sitz- und Stehplätze deutlich weniger exponiert sind als die Sitzplätze nahe des Inverters. In größerer Entfernung zu den Antriebskomponenten (z.B. im hinteren Wagenteil) nehmen die Immissionen stark ab und sind schließlich in der letzten Sitzreihe bereits vernachlässigbar gering (nicht mehr vom allgemeinen magnetischen Hintergrund zu unterscheiden). Die am Fahrerplatz gemessenen Maximalimmissionen (im Kopfbereich) lagen mit ca. 2,7% deutlich unterhalb des Referenzwertes für berufliche Exposition.

7.5 Nutzfahrzeug mit Elektro-Hybridantrieb

In dieser Fahrzeugkategorie sind in Europa zwar von einigen Herstellern bereits Fahrzeugkonzepte und Prototypen vorgestellt worden, Serienfahrzeuge sind am Markt allerdings noch nicht erhältlich.

Dennoch war es, aufgrund der freundlichen Unterstützung der *Daimler AG* (Stuttgart, Deutschland) möglich, Messungen in einem derzeit bei der Deutsche Post DHL in einem Flottenversuch eingesetzten Hybrid LKW-Prototypen durchzuführen.

7.5.1 Messungen im Atego Blue TEC Hybrid LKW (Daimler AG)

Das Fahrzeug mit einem zulässigen Gesamtgewicht von 12 t ist mit einem Parallel-Hybrid-Antrieb ausgestattet, bei dem ein 44 kW Elektromotor/generator mit einem 160 kW Vierzylinder-Dieselmotor kombiniert wurde. Das Anfahren erfolgt dabei je nach Fahrpedalstellung rein elektrisch. Im niedrigen Drehzahlbereich unterstützt der Elektromotor den Dieselmotor, so dass dieser im optimalen Arbeitsbereich bleibt. Beim Bremsen bzw. Bergabfahren (Motorbremswirkung) erfolgt Rekuperation zur Wiederaufladung der Batterien. Das Fahrzeugkonzept ist vor allem für Fahrzyklen mit vielen Anhalte- und Anfahrmanövern ausgelegt (z.B. Zustelldienste, Müllabfuhr, usw.). Ferner ist im Fahrzeug eine Motor-Start-Stopp-Funktion, die vom Fahrer aktiviert werden kann, implementiert. Die im Hinblick auf die Magnetfeldemissionen relevanten technischen Daten des Fahrzeugs können wie folgt zusammengefasst werden:

Batteriespannung:	ca. 400 V
Motorart:	3~ Synchronmotor/generator mit Permanentmagnetläufer
Motorspitzenleistung:	44 kW
Batterie:	seitlich unterhalb der Kastenaufbau (zwischen Vorder- und Hinterachse)
Elektromotor in Getriebeglocke	(zwischen Vorder- und Hinterachse)
Leistungselektronik (Inverter):	nahe Fahrzeugboden, ca. 1 m hinter Fahrerkabine

Abbildung 7.73 zeigt das untersuchte Fahrzeug.



Abbildung 7.73: Das untersuchte Fahrzeug, der Atego Blue TEC Hybrid

In einem ersten Schritt wurden zunächst Messungen im Fußbereich des Fahrerplatzes auf einem Betriebshof der Daimler AG während langsamer Vorwärts- und Rückwärtsfahrt (Rangieren) des Fahrzeugs durchgeführt. In diesen Betriebszuständen wird das Fahrzeug rein elektrisch angetrieben. Der magnetische Störhintergrund (hauptsächlich 50 Hz) auf dem Betriebshof lag bei ca. 40-50 nT (Effektivwert, 10 Hz-100 kHz), gemessen im Fahrzeug in ausgeschaltetem Zustand. Die Stromversorgung (Wechselrichter) für das Messsystem wirkte sich im Störhintergrund der Messungen nur geringfügig aus, da es am hinteren Ende der Ladefläche platziert wurde (Distanz zu den Messpositionen ca. 5m). In einer phasenrichtigen spektralen Bewertung entspricht der Störhintergrund 0,02-0,05% des ICNIRP-Referenzwertes für berufliche Exposition.

Der sich nach Anschalten des Fahrzeugs im Stillstand im Fußbereich des Fahrers einstellende Immissionswert lag bei ca. 130-150 nT, wobei die dafür relevanten, durch das Fahrzeug verursachten Spektralanteile (>0,01% vom Referenzwert) bei etwa 275 Hz und ca.1400 Hz lagen (Abbildung 7.74). Dies entspricht einer vom Fahrzeug verursachten spektralen Gesamtimmission (0 Hz-100 kHz) im Fußbereich des Fahrerplatzes von 0,05-0,1% des ICNIRP-Referenzwert für berufliche Exposition.

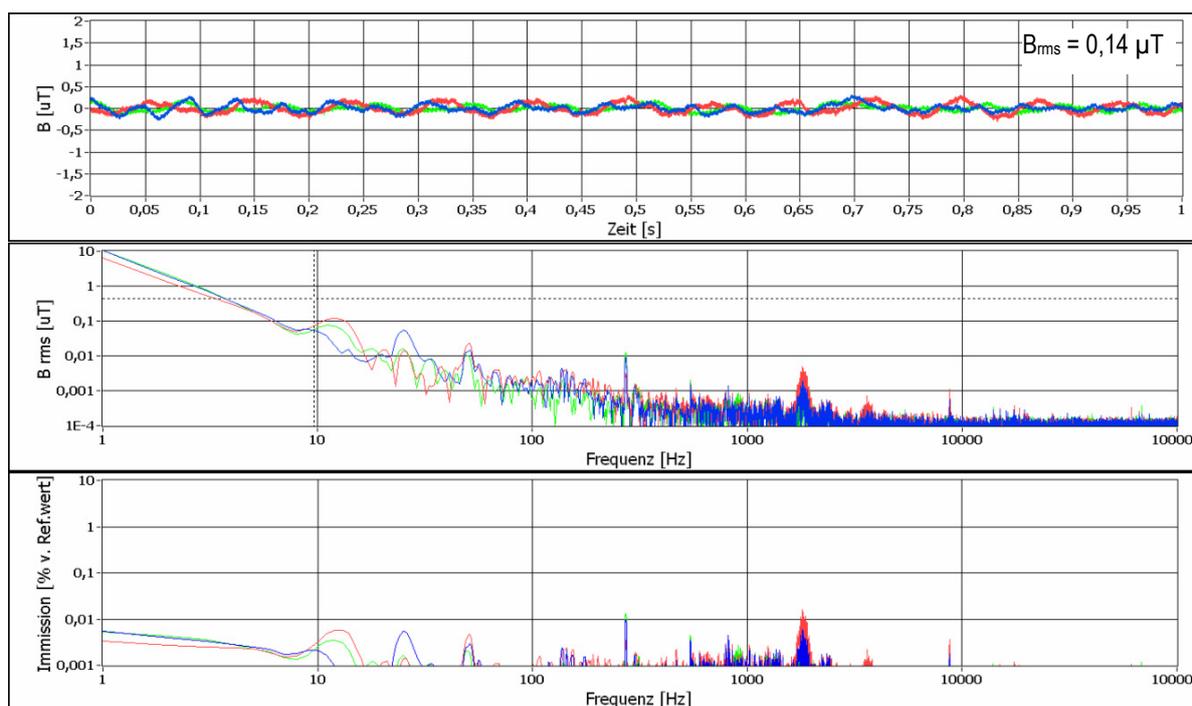


Abbildung 7.74: Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Fahrers nach Einschalten des Fahrzeugs (im Stillstand).
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für berufliche Exposition gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Während des Rangierens (rein elektrisches Vorwärts- und Rückwärtsfahren bzw. Bremsen) zeigten sich Effektivwerte der magnetischen Flussdichte im Bereich 100-400 nT (Abbildung 7.75, grüner Graph). Die resultierende Immission im Verhältnis zum ICNIRP-Referenzwert für berufliche Exposition lag während der Rangiermanöver im Bereich 0,1-0,7% (Abbildung 7.75, blauer Graph). Abbildung 7.76 und Abbildung 7.77 zeigen Beispiele von während des Rangierens aufgezeichneten Signalausschnitten und deren Spektren. Die Grundwelle der niederfrequenten Spektralanteile variierte beim Rangieren (abhängig von der

Geschwindigkeit) zwischen 10 Hz und ca. 30 Hz und die des höherfrequenten Anteils zwischen 1500 Hz und 4500 Hz. Offensichtlich handelt es sich bei dem höherfrequenten Anteil um eine Schaltfrequenz in der Leistungselektronik, die ca. einen Faktor 150 oberhalb des niederfrequenten Anteils liegt. Der höchste Immissionswert ergab sich durch eine Transiente während des Einschaltens des Fahrzeuges (Abbildung 7.78) und lag bei ca. 1,1% des ICNIRP-Referenzwertes für berufliche Exposition, bei einfacher, phasenrichtiger Bewertung anhand des Spektrums des in Abbildung 7.78 dargestellten, eine Sekunde langen Signalverlaufs. Eine realistischere Beurteilung dieses transienten Vorgangs gemäß dem in Kapitel 6.4.5 definierten Verfahren führt auf eine Exposition der FüÙe im AusmaÙ von ca. 0,2% des Basisgrenzwertes für berufliche Exposition.

Angemerkt muss in diesem Zusammenhang werden, dass transiente Magnetfelder während des Einschaltens des Fahrzeugs nicht ein Spezifikum von Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten sind. Auch das Einschalten der Zündung, bzw. das Starten bei konventionellen Fahrzeugen, verursacht teilweise transiente Magnetfelder mit beachtlich hohen Spitzenwerten, bzw. zeitlichen Änderungsraten.

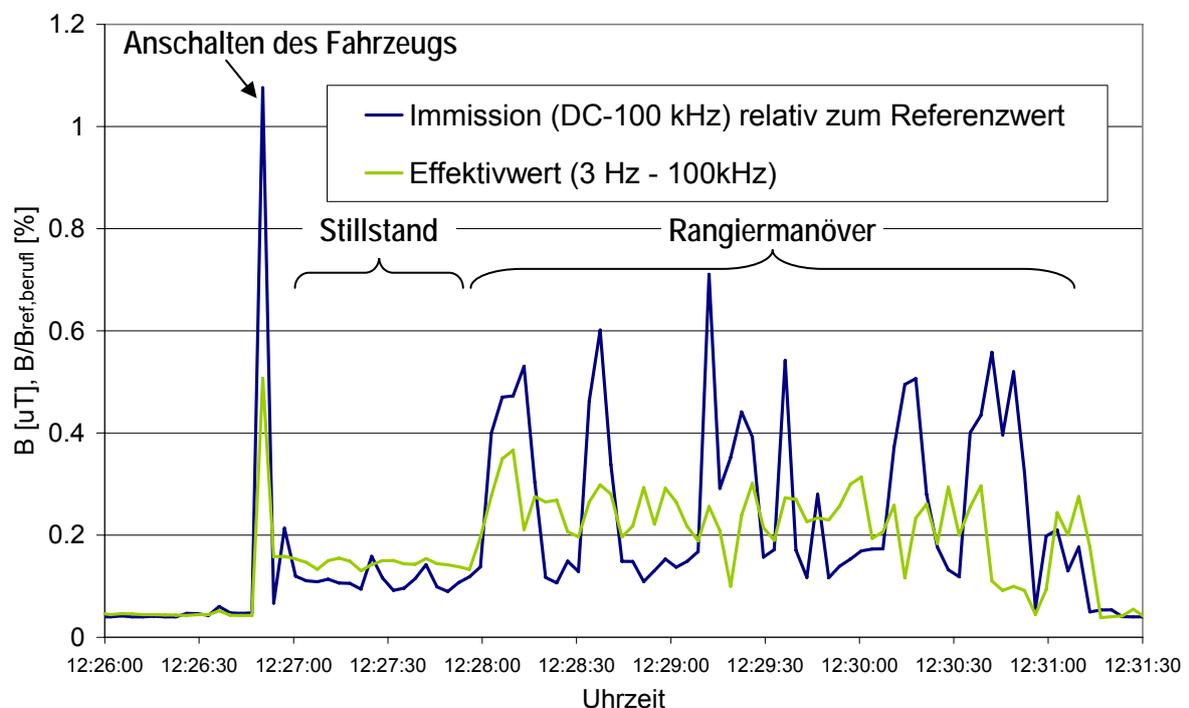


Abbildung 7.75: Effektivwert der magnetischen Flussdichte und resultierende Magnetfeldimmission relativ zum ICNIRP-Referenzwert für berufliche Exposition im Fußbereich des Fahrers während Rangiermanöver (langsames Vorwärts- und Rückwärtsfahren).

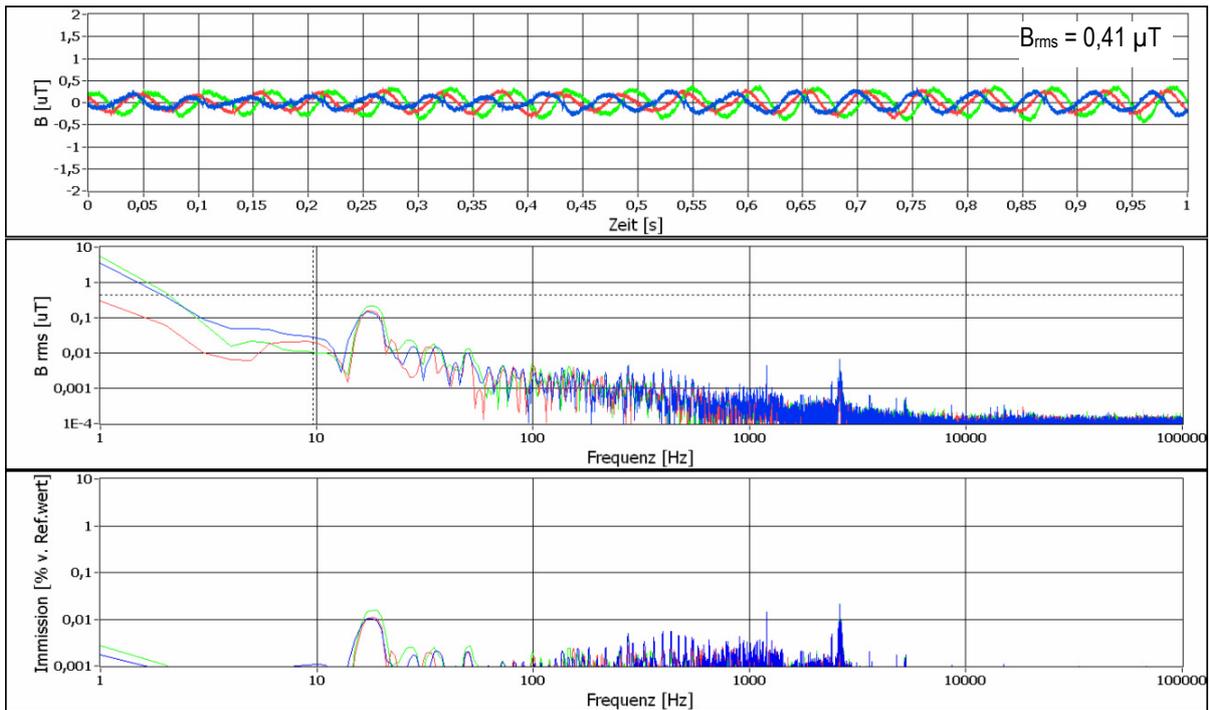


Abbildung 7.76: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Fahrers während Rangiermanöver (Bremsvorgang).
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für berufliche Exposition gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

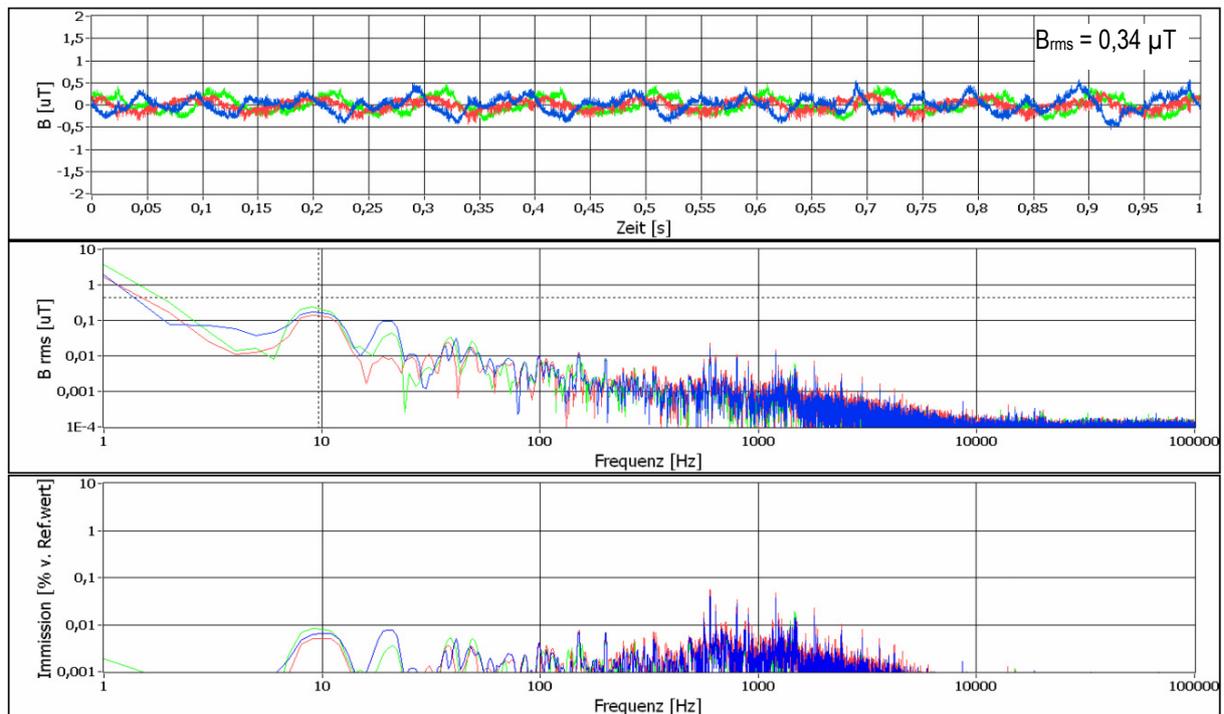


Abbildung 7.77: Beispiel von Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Fahrers während Rangiermanöver (Anfahren).
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für berufliche Exposition gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

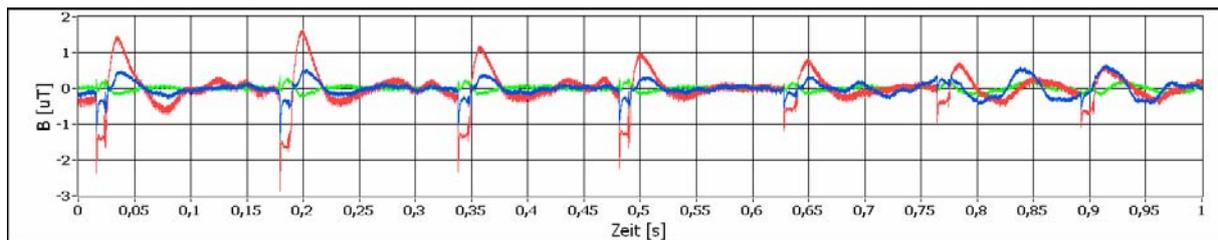


Abbildung 7.78: Transienter Magnetfeldverlauf im Fußbereich des Fahrers während des Einschaltens des Fahrzeugs.

Um die räumliche Verteilung der Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz während realistischer Fahrbedingungen zu erfassen, wurden Immissionsmessungen während Fahrten entlang einer vordefinierten, ca. 26 km langen Testroute (Fahrzeit ca. 30 Minuten) durchgeführt, die sowohl Flachstücke, als auch ca. 8% Steigungen enthielt. Durch wiederholtes Fahren der Testroute unter jeweils möglichst gleichen Bedingungen, wurden an unterschiedlichen Messpositionen am Fahrerplatz (jeweils eine Messposition pro Fahrt) die Magnetfeldimmissionen frequenzselektiv gemessen, so dass eine repräsentative Dokumentation der räumlichen und zeitlichen Magnetfeldverteilung am Fahrerplatz unter typischen Betriebsbedingungen erfolgen konnte.

Abbildung 7.79 zeigt die mittels GPS-Logger dokumentierte Testroute im Großraum Stuttgart (Großheppach-Aichwald und zurück).

Abbildung 7.80 und Abbildung 7.81 fassen die Messergebnisse grafisch zusammen. Dargestellt sind jeweils die Immissionen in den unterschiedlichen Messpositionen am Fahrerplatz während jeweils einer Runde auf der Testroute.

Abbildung 7.80 zeigt zunächst die gemessenen Effektivwerte. Die unterschiedlichen Graphen (für jeweils eine Messposition) sind hinsichtlich des Startzeitpunktes jeder Runde (jeder Messposition) synchronisiert. Aufgrund der Tatsache, dass die Fahrten im öffentlichen Straßenverkehr durchgeführt wurden, ist jedoch eine Synchronisation der Messdaten entlang der gesamten Zeitachse nicht möglich (aufgrund von z.B. unterschiedlicher Ampelphasen und unterschiedlichem Verkehrsaufkommen entlang der Testroute). Ähnlich wie bei den Messungen im Rangierbetrieb liegt der durch das Fahrzeug verursachte Anteil am Effektivwert der magnetischen Flussdichte im Fußbereich des Fahrers bei maximal ca. 400 nT. In allen anderen Messpositionen (Unterleib, Brust, Kopf) ist dieser Anteil deutlich geringer, etwa bis maximal 200 nT. Alle Immissionswerte größer als die genannten Maximalwerte konnten eindeutig auf äußere Feldquellen (Hochspannungsleitungen der Energieversorgung und des Eisenbahnnetzes) zurückgeführt werden. Einzige Ausnahmen diesbezüglich waren kurzzeitige Immissionen während des Einschaltens des Fahrzeugs (siehe auch Messungen im Rangierbetrieb) und eine während der ersten Fahrt (Messungen im Fußbereich) erforderliche Notbremsung. In diesen Situationen lag der Anteil am Effektivwert der magnetischen Flussdichte im Fußbereich des Fahrers im Bereich von ca. 500 nT. Zur Orientierung sind die Immissionsspitzen zufolge äußerer Feldquellen in Abbildung 7.80 entsprechend der Streckenabschnittsbezeichnung in Abbildung 7.79 gekennzeichnet.



Abbildung 7.79: Testroute (rot) entlang der Immissionsmessungen an unterschiedlichen Messpositionen am Fahrerplatz durchgeführt wurden. Blaue Linien markieren den Verlauf von Hochspannungsfreileitungen. Durch grüne Kreise markierte Streckenabschnitte bezeichnen Bereiche, in denen die Magnetfeldimmissionen, verursacht durch die Hochspannungsfreileitungen, deutlich größer waren, als die durch das Fahrzeug verursacht (siehe Text).

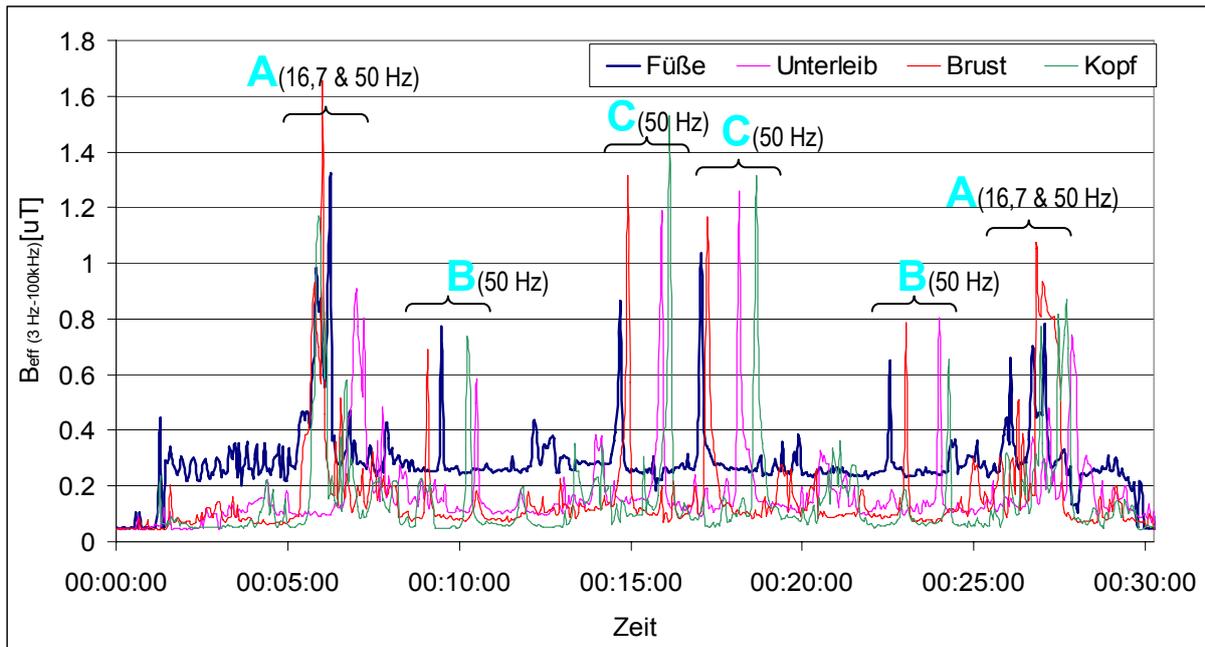


Abbildung 7.80: Effektivwert (3 Hz-100 kHz) der Magnetfeldimmissionen in unterschiedlichen Messpositionen am Fahrerplatz während der Fahrt entlang der Testroute. Die dargestellten Messwerte beinhalten auch Immissionsanteile verursacht durch äußere Feldquellen (Hochspannungsleitungen entlang der Testroute). Streckenabschnitte in denen der Effektivwert von äußeren Feldquellen dominiert war, sind entsprechend markiert (vgl. mit Abbildung 7.79)

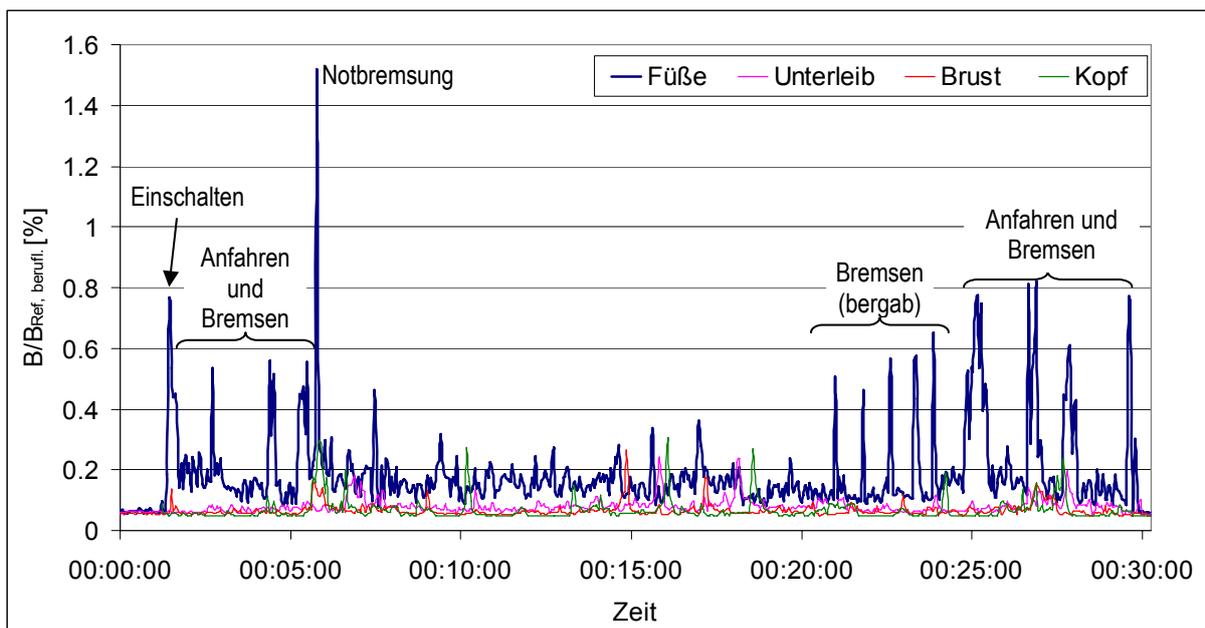


Abbildung 7.81: Resultierende Magnetfeldimmissionen (relativ zum ICNIRP-Referenzwert für berufliche Exposition) in unterschiedlichen Messpositionen am Fahrerplatz während der Fahrt entlang der Testroute.

Abbildung 7.81 zeigt schließlich die Messergebnisse in Form der resultierenden Magnetfeldimmissionen (0 Hz bis 100 kHz) im Verhältnis zum ICNIRP-Referenzwert für berufliche Exposition. Zunächst wird deutlich, dass die Immissionsanteile der äußeren Feldquellen (16,7 und 50 Hz), obwohl hinsichtlich des Effektivwertes dominierend, einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtimmission (max. ca. 0,3 Prozentpunkte) haben, da die Referenzwerte für 16,7 und 50 Hz, relativ zu

jenen für die höherfrequenten Immissionsanteilen, verursacht durch das Fahrzeug, groß sind (1500 μ T für 16,7 Hz, 500 μ T für 50 Hz).

Deutlich aus dem nach dem Einschalten des Fahrzeuges vorhandenen magnetischen Hintergrund (ca. 150 nT bzw. ca. 0,1% des ICNIRP Referenzwertes) hervor treten nur kurzzeitige Immissionsspitzen im Fußbereich des Fahrers beim Anfahren und Bremsen des Fahrzeugs (vgl. Abbildung 7.81). Diese liegen, ähnlich wie bereits während des Rangierbetriebes beobachtet, üblicherweise im Bereich unterhalb von 1% des Referenzwertes. Die einzige beobachtete Ausnahme waren die kurzzeitigen Immissionen während einer Notbremsung. Dabei wurden im Fußbereich des Fahrers kurzzeitig ca. 1,5% des ICNIRP-referenzwertes für berufliche Exposition festgestellt.

In den anderen untersuchten Messpositionen (Unterleib, Brust, Kopf) sind die resultierenden, vom Fahrzeug verursachten Immissionen deutlich geringer als im Fußbereich. Sie liegen durchwegs an oder knapp oberhalb der Nachweisgrenze von 0,05% des Referenzwertes.

Eine relevante Beeinflussung der Messergebnisse durch eine mögliche Magnetisierung der Reifen kann ausgeschlossen werden. Aufgrund des relativ großen Reifendurchmessers (85 cm) und der relativ geringen gefahrenen Geschwindigkeiten (max. 80 km/h), liegt die maximale, aufgrund von möglicher Reifenmagnetisierung zu erwartende Grundwellenfrequenz bei ca. 8 Hz. Eine diesbezügliche, fahrgeschwindigkeitskorrelierte Analyse aller vorhandenen Messdaten zeigte keine relevanten Spektralanteile (>0,05% des Referenzwertes) in den untersuchten Messpositionen, die auf eine mögliche Reifenmagnetisierung zurückgeführt werden könnten.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass die durch das Antriebssystem des untersuchten Hybrid LKWs Atego Blue TEC Hybrid am Fahrerplatz verursachten magnetischen Immissionen sehr gering sind. Die im normalen Fahrbetrieb beim Anfahren und Bremsen zu erwartenden lokalen Immissionen liegen im Fußbereich unterhalb von 1% des ICNIRP-Referenzwertes für berufliche Exposition, in allen anderen Körperbereichen, sogar noch deutlich darunter. Diese Tatsache ist insofern wenig überraschend, als sich alle wesentlichen elektrischen Komponenten des Antriebssystems (Batterien, Inverter, Elektromotor) in relativ großer Distanz zum Fahrer (und auch zum Beifahrer) befinden.

7.6 Nutzfahrzeug mit reinem Elektroantrieb

Aus der Bestandsaufnahme (Kapitel 2.2.2) ergaben sich einige interessante Fahrzeuge in dieser Kategorie. Vor allem der sehr medienwirksam als Elektro-Nutzfahrzeug mit Straßenzulassung angekündigte **EcoCarrier** wurde für messtechnische Untersuchungen in Erwägung gezogen. Leider waren, trotz mehrmaliger Kontaktierung weder der Hersteller (Fa. EcoCraft Automotive Management GmbH & Co KG, Wunsdorf, Deutschland) noch die kontaktierten Betreiber der gegenwärtig bereits verfügbaren Fahrzeug-Prototypen bereit, die Messungen durchführen zu lassen, sodass für dieses Fahrzeug keine Immissionsmessdaten erhoben werden konnten.

Ein weiteres, aufgrund des Verhältnisses von Batteriespannung zu Maximalleistung interessant erscheinendes Fahrzeug ist der **Elektroschlepper Modell 780** der Fa. **PEFRA AG**, das aufgrund der freundlichen Unterstützung des Herstellers messtechnisch untersucht werden konnte.

7.6.1 Messungen im PEFRA-Elektroschlepper Modell 780

Die aus strahlenschutztechnischer Sicht wichtigsten technischen Daten des Fahrzeugs können wie folgt zusammengefasst werden (siehe auch [23]).

Batteriespannung: 80 V
Motorart: 3~ Asynchronmotor
Motornennleistung: 28 kW
Batterie: unterhalb der Ladefläche (hinter Fahrerkabine)
Motor und Leistungselektronik (Inverter): im Bereich der Hinterachse
Keine Rekuperation

Alle Messungen wurden im Betrieb des Fahrzeugs mit einer Zuglast von ca. 9 t (Gesamtgewicht ca. 13,5 t) während der Fahrt entlang einer vordefinierten ca. 500 m langen Testroute auf einem Werksgelände durchgeführt, wobei die Testroute sowohl Flachstücke, als auch ca. 10% Steigungen enthielt, die zur Maximalbelastung (Maximalstrom) des Motors führten. Durch wiederholtes Fahren der Testroute unter jeweils annähernd gleichen Bedingungen wurden an unterschiedlichen Messpositionen am Fahrerplatz (jeweils eine Messposition pro Fahrt) die Magnetfeldimmissionen frequenzselektiv gemessen, so dass eine repräsentative Dokumentation der räumlichen und zeitlichen Magnetfeldverteilung am Fahrerplatz unter typischen Betriebsbedingungen erfolgen konnte.

Abbildung 7.82 und Abbildung 7.83 zeigen Fotos des Fahrzeugs während den Messungen.



Abbildung 7.82: Untersuchter Elektroschlepper 780 von Fa. PEFRA. Das NIFSPEC Mess-System (inkl. autarker Stromversorgung) befindet sich auf der Ladefläche direkt hinter der Fahrerkabine (unter Regenschutzplane)



Abbildung 7.83: Untersuchter Elektroschlepper 780 mit ca. 9 t Schleplast während der Messfahrten

Das NIFSPEC-Mess-System und die dazugehörige Stromversorgung wurden während der Messfahrten auf der Ladefläche direkt hinter der Fahrerkabine platziert. Aufgrund der räumlichen Nähe der Stromversorgung zu den untersuchten Messpunkten am Fahrerplatz, waren vom Wechselrichter verursachte Störanteile in den Messsignalen vorhanden (Abbildung 7.84). Dieser Störhintergrund wurde vor Beginn der Messungen (bei abgeschaltetem Elektroschlepper) in allen betrachteten Messpunkten erfasst und bei der Auswertung der Messergebnisse gemäß der in Kapitel 6.4.2 beschriebenen Methode berücksichtigt. D.h., alle im Folgenden angeführten Messergebnisse sind bereits hinsichtlich des Störhintergrundes bereinigt.

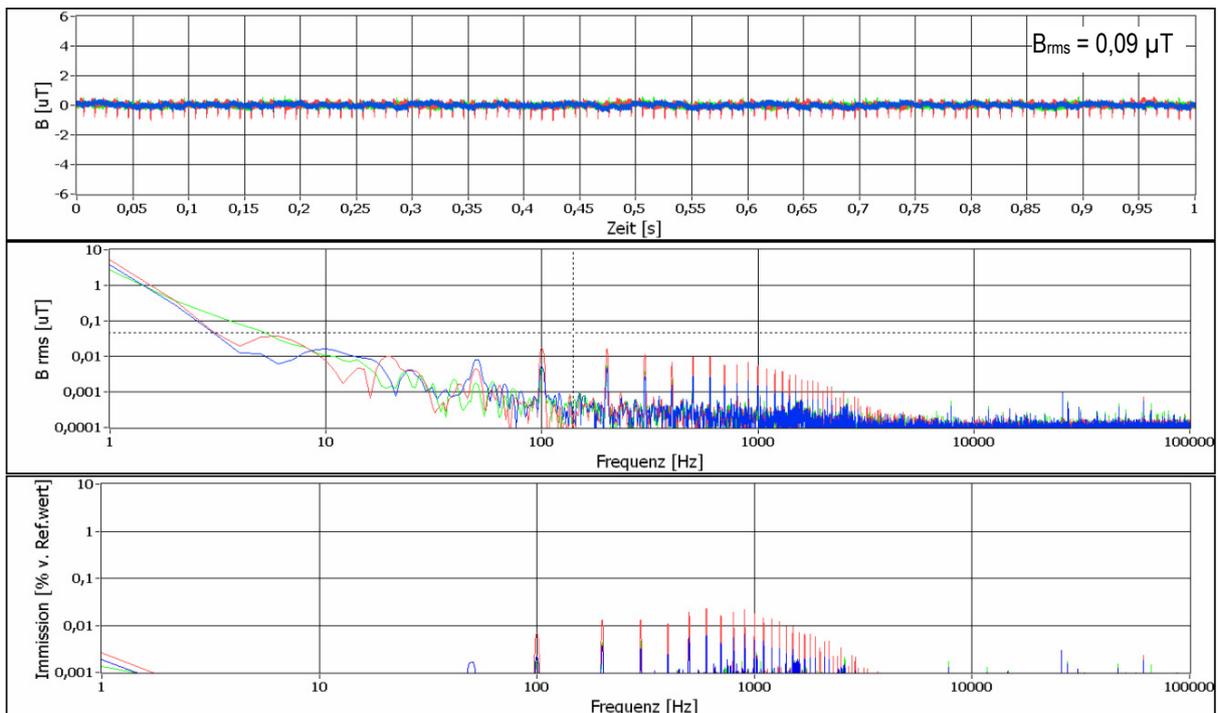


Abbildung 7.84: Magnetischer Störhintergrund im Unterleibsbereich des Fahrersitzes, verursacht durch die Stromversorgung des Mess-Systems (Elektroschlepper ausgeschaltet). Oben: Signal im Zeitbereich (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für berufliche Exposition gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

Abbildung 7.85 zeigt das Messergebnis in Form des Zeitverlaufs der Magnetfeldimmissionen während der Messfahrten in den unterschiedlichen Messpunkten am Fahrersitz. Angegeben sind jeweils der Effektivwert der magnetischen Flussdichte (grüner Graph) und die Magnetfeldimmission relativ zum ICNIRP-Referenzwert für berufliche Exposition (blauer Graph). Das Maximum der Magnetfeldimmissionen trat im Bereich des Unterleibes auf (gemessen auf Höhe der Sitzfläche, unmittelbar hinter der Sitzlehne). Dies ist zugleich jene Position mit der geringsten Distanz (ca. 30-40 cm) zu den Batterieanschlussklemmen und -kabeln unmittelbar hinter der Fahrerkabine, unterhalb der Ladefläche. In dieser Position lagen die Immissionen während der Messfahrt im Bereich zwischen 0,68% und 0,92% des Referenzwertes. In den anderen untersuchten Messpunkten mit größerer Distanz zu den Batterien sind die Immissionen deutlich geringer (Füße 0,05%-0,17%, Unterschenkel 0,15%-0,25%, Oberschenkel 0,30%-0,60%, Bauch 0,45%-0,65%, Brust 0,21%-0,39%, Kopf 0,19%-0,31%). Zumindest in den Positionen mit etwas höheren Immissionswerten (Oberschenkel, Unterleib und Bauch) bilden sich auch die beiden Rampen-Auffahrten als leicht erhöhte Immissionswerte ab.

Bezüglich der spektralen Zusammensetzung der Immissionen zeigen Abbildung 7.86 bis Abbildung 7.88 erwartungsgemäß fahrgeschwindigkeitskorrelierte Spektralanteile. Die bezüglich der resultierenden Immission (relativ zum Referenzwert) dominierenden Anteile traten bei ca. 110 Hz (7 km/h), ca. 160 Hz (10 km/h) und ca. 240 Hz (15 km/h) auf.

Kurzzeitig auftretende transiente Verläufe des Magnetfeldes ergaben sich beim Anfahren und bei ruckartigen Laständerungen infolge der Dynamik des Schleppgewichts (Abbildung 7.89). Die dabei auftretenden Flankensteilheiten und Signalamplituden waren jedoch relativ gering, so dass damit verknüpfte im Gewebe induzierte Stromdichtespitzen im Verhältnis zum Basisgrenzwert als unkritisch eingestuft werden können (vgl. Kapitel 6.4.5).

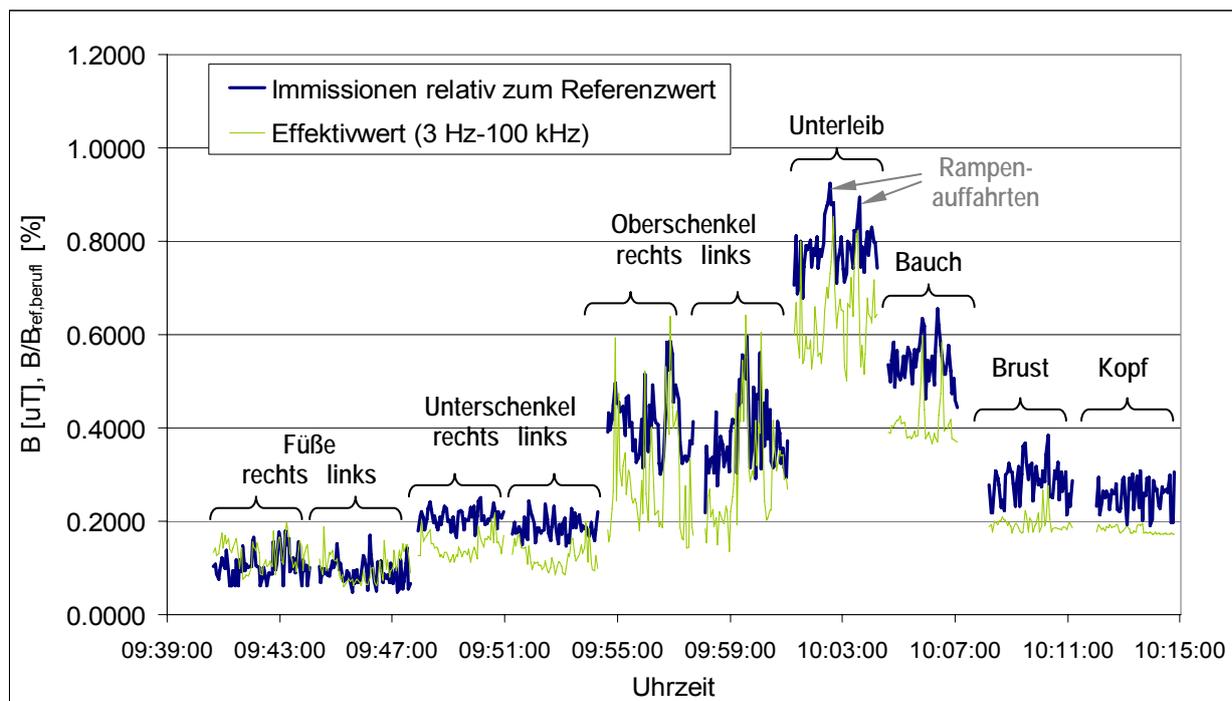


Abbildung 7.85: Magnetfeldimmissionen in Prozent des ICNIRP-Referenzwertes in den unterschiedlichen Körperregionen am Fahrerplatz des Elektroschleppers 780 (Fa. PEFRA) während der jeweils ca. 3-minütigen Fahrten entlang der Testroute

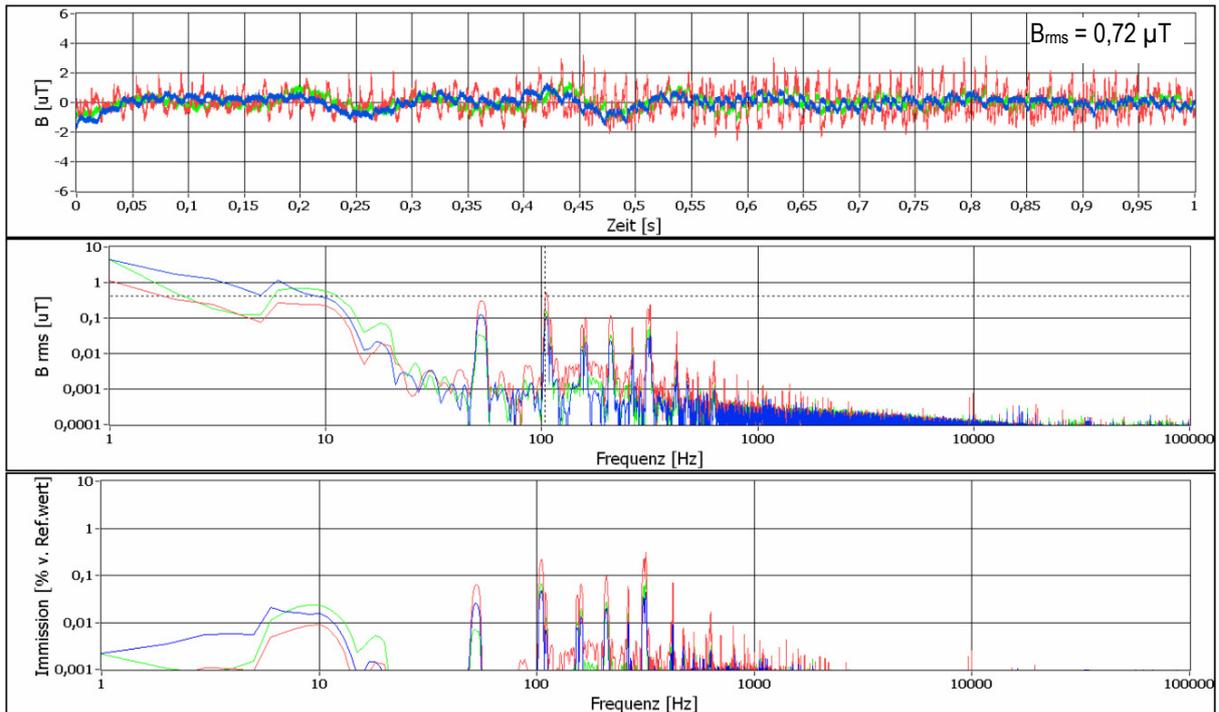


Abbildung 7.86: Magnetische Induktion im Unterleibsbereich des Fahrersitzes, bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 7 km/h. Oben: Signal im Zeitbereich (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für berufliche Exposition gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen. Die Frequenzbereichsdarstellungen sind bereits hinsichtlich des Störhintergrundes bereinigt.

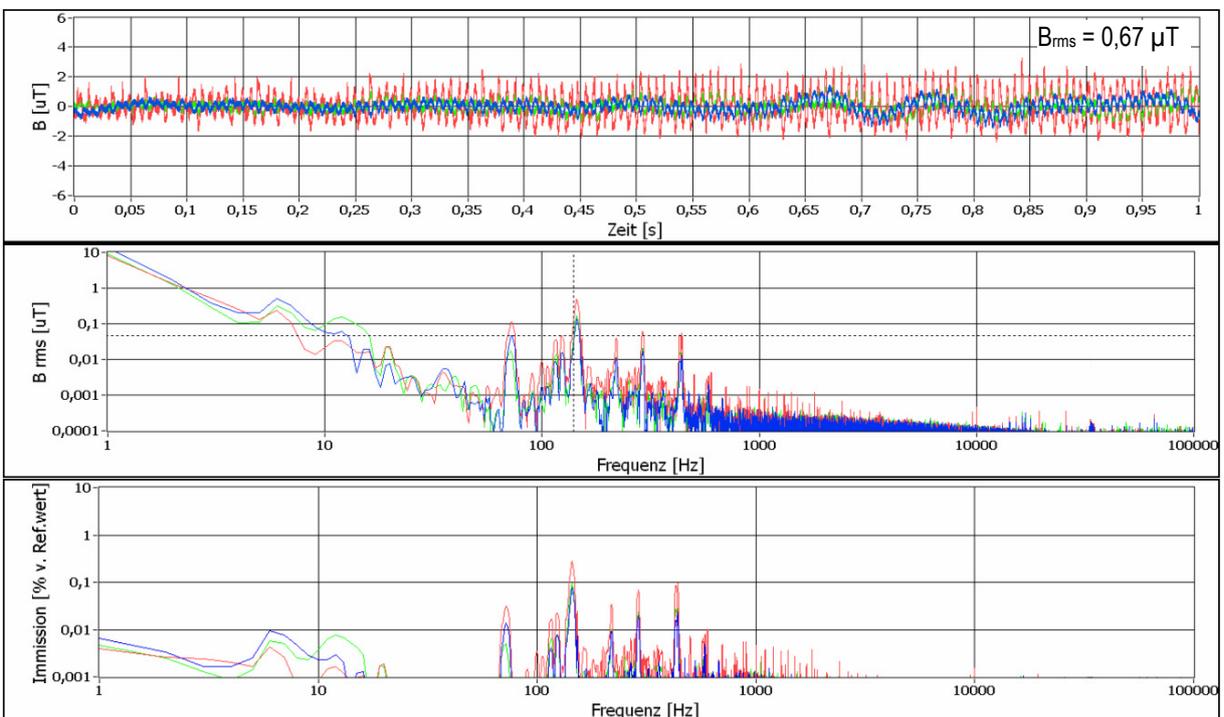


Abbildung 7.87: Magnetische Induktion im Unterleibsbereich des Fahrersitzes, bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 10 km/h. Oben: Signal im Zeitbereich (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für berufliche Exposition gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen. Die Frequenzbereichsdarstellungen sind bereits hinsichtlich des Störhintergrundes bereinigt.

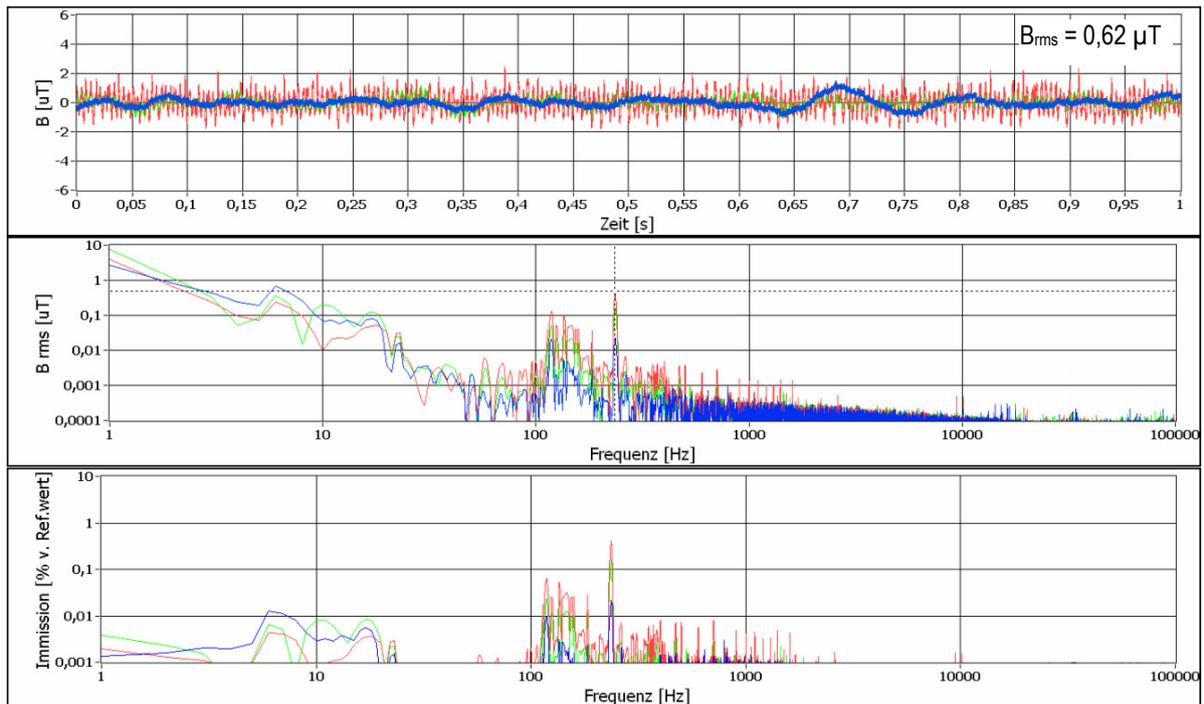


Abbildung 7.88: Magnetische Induktion im Unterleibsbereich des Fahrersitzes, bei einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 15 km/h. Oben: Signal im Zeitbereich (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für berufliche Exposition gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen. Die Frequenzbereichsdarstellungen sind bereits hinsichtlich des Störhintergrundes bereinigt.

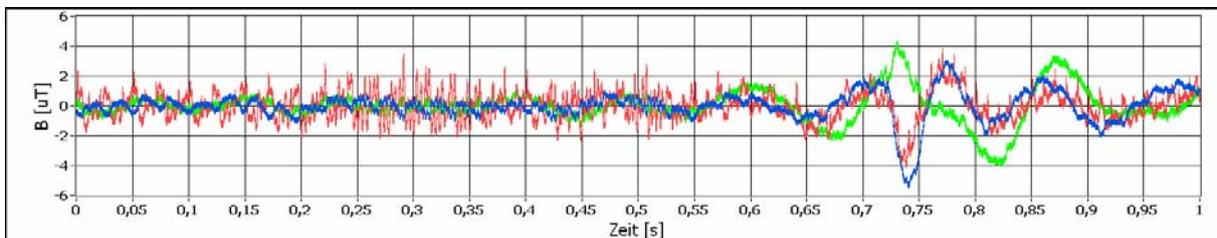


Abbildung 7.89: Transienter Magnetfeldverlauf während einer ruckartigen Laständerung zufolge der Dynamik des Schleppgewichts.

Zusammenfassend kann daher festgestellt werden, dass die durch das Antriebssystem des untersuchten Elektroschlepper 780 am Fahrerplatz verursachten magnetischen Immissionen sehr gering sind. Die im normalen Fahrbetrieb beim Anfahren und Bremsen zu erwartenden lokalen Immissionen liegen im Unterleibsbereich unterhalb von 1% des ICNIRP-Referenzwertes für berufliche Exposition, in allen anderen Körperbereichen darunter.

8 VERGLEICH DER MAGNETFELDDIMMISSIONEN IN NEUEN HYBRID- UND ELEKTROFAHRZEUGEN MIT JENEN IN ETABLIERTEN FAHRZEUGTECHNOLOGIEN

In den folgenden Kapiteln werden in der wissenschaftlichen Literatur verfügbare bzw. im Internet publizierte, und (soweit feststellbar) auf fundierten Messmethoden beruhende Messdaten über Magnetfelddimmissionen in diversen Fahrzeugen zusammengefasst und mit den im Rahmen dieses Vorhabens erhobenen Immissionsdaten verglichen. Hinsichtlich der aus der Literatur entnommenen Daten erfolgte dabei eine Einschränkung auf für den europäischen Raum relevanten Fahrzeugtechnologien.

8.1 Vergleich mit Magnetfelddimmissionen in elektrischen Schienenfahrzeugen

8.1.1 Vorliegende Daten aus der Literatur

Magnetfelddimmissionen in diversen elektrischen Schienenfahrzeugen sind in der Literatur vor allem für Eisenbahnzüge in relativ großer Anzahl verfügbar. Das Hauptaugenmerk dieser Publikationen richtet sich jedoch in den meisten Fällen auf die Exposition der Lokomotivführer. So finden sich beispielsweise in [24]-[29] eine Vielzahl von Messdaten, die an der Position des Fahrers in unterschiedlichen Triebfahrzeugen der Schweizer Bundesbahn erhoben wurden. Die Messungen in [24]-[29] wurden jeweils mit Breitbandfeldsonden durchgeführt und die Ergebnisse dementsprechend einfach als Flussdichtewerte angegeben. Eine frequenzselektive Bewertung der Messergebnisse mit Berücksichtigung etwaiger Oberwellen erfolgte dabei leider nicht.

Ergebnisse von Magnetfeldmessungen in Fahrgasträumen von unterschiedlichen Eisenbahnzügen (inklusive S-Bahn, Transrapid und ICE) finden sich in [30]-[34]. Auch hier wird keine spezielle frequenzselektive Bewertung durchgeführt, sondern Breitbandergebnisse angegeben, teilweise jedoch zumindest mit Hinweisen auf den Frequenzbereich, der die dominierenden Spektralanteile enthält. Eine sehr ausführliche Arbeit mit umfangreichen Messungen in unterschiedlichen Zügen der Fernbahn, S-Bahn, U-Bahn und Straßenbahn (sowohl im Fahrgastbereich als auch in der Fahrerkabine) ist in [35] dokumentiert. Diese Messungen wurden zwar auch mit Breitbandfeldsonden durchgeführt, es werden jedoch immer auch grafische Darstellungen der spektralen Zusammensetzung der Immissionen angeführt, die zumindest eine näherungsweise Gesamtbeurteilung im Hinblick auf die frequenzabhängigen Referenzwerte erlauben.

In [36] werden numerische Berechnungen der Magnetfelddimmissionen in Fahrgasträumen zukünftiger in Italien zum Einsatz kommender Hochgeschwindigkeitszüge präsentiert.

Magnetfelddimmissionswerte in Straßenbahnen und U-Bahnen sind schließlich in [30] und [37] dokumentiert, wobei hier zumindest zwischen Gleichfeld- und ELF-Messwerten unterschieden wird. Eine detaillierte spektrale Bewertung ist jedoch auch hier nicht verfügbar.

Abbildung 8.1 fasst die aus der Literatur [24] - [37] entnommenen Magnetfelddimmissionsdaten graphisch, in Form der aus den Publikationen ableitbaren Wertebereiche (min-max), zusammen.

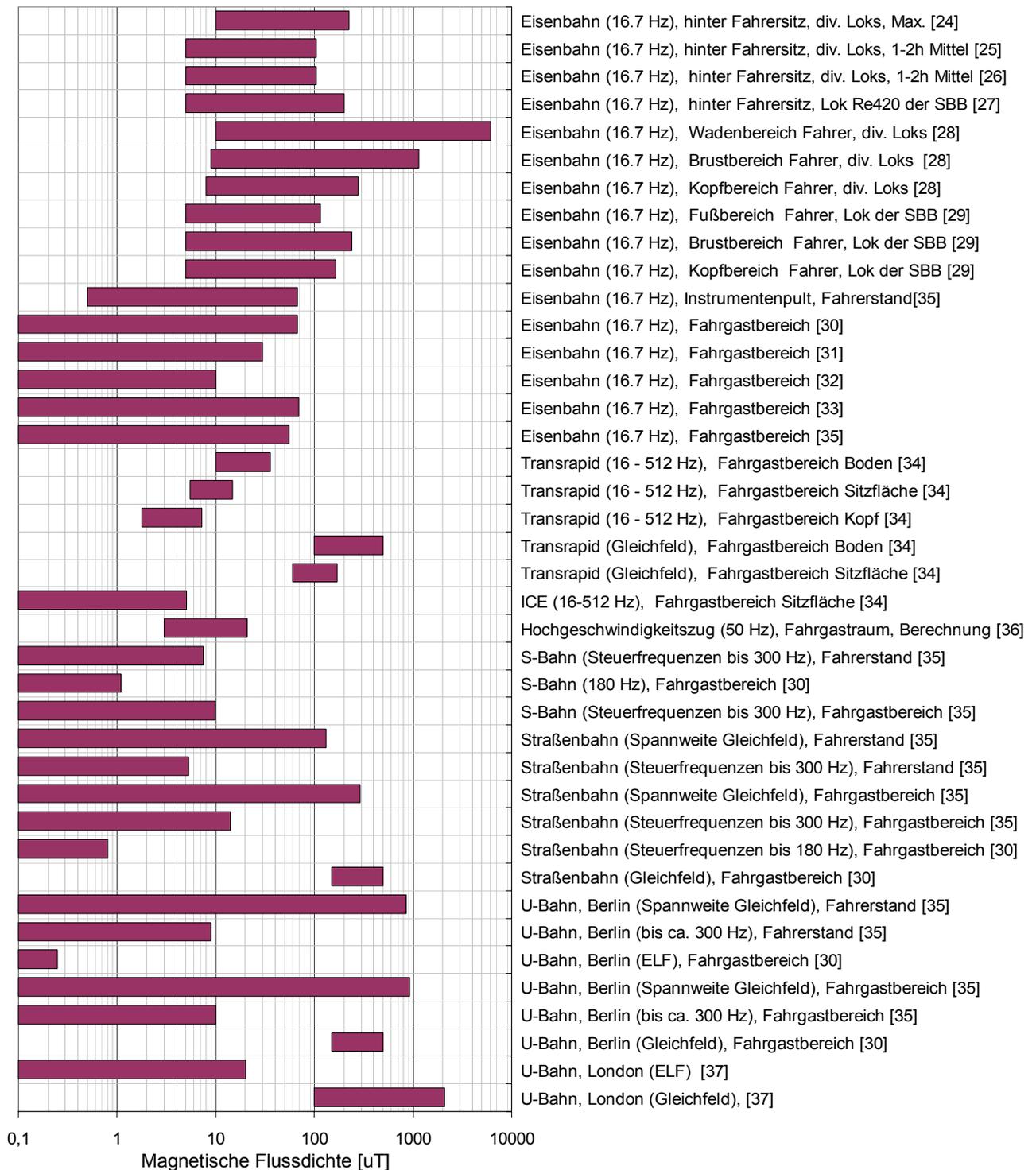


Abbildung 8.1: Zusammenfassung der aus der Literatur entnommenen Magnetfeldimmissionen in diversen elektrischen Schienenfahrzeugen.

8.1.2 Zusätzliche eigene Messungen im Rahmen des Projekts

Zusätzlich zur Literaturrecherche wurden auch eigene Messungen während einer mehrstündigen Bahnfahrt in Ostösterreich (Wien-Mürzzuschlag und zurück) durchgeführt. Die Messungen erfolgten mittels des Mess-Systems ELT400 (Narda Safety and Test Solutions) im Frequenzbereich 1 Hz - 100 kHz, in einem

Messmodus, der es erlaubt, die Magnetfeldimmissionen direkt im Verhältnis zum ICNIRP-Referenzwert [1] für die Allgemeinbevölkerung auszulesen, bzw. automatisch alle 4 Sekunden auf einem Notebook abzuspeichern. In diesem Modus des ELT400 Handgerätes wird der in [12] beschriebene Algorithmus zur Bewertung nichtsinusförmiger Immissionen im Zeitbereich implementiert. D.h., die damit aufgezeichneten Messdaten entsprechen der phasenrichtigen Summe, der auf den jeweiligen Referenzwert bezogenen Einzelspektralanteile und können damit den in Kapitel 7 dokumentierten Immissionsdaten in den Hybrid- und Elektrofahrzeugen unmittelbar gegenübergestellt werden.

Abbildung 8.2 fasst die Messergebnisse in Form des Zeitverlaufs der Magnetfeldimmissionen zusammen. Unterschiedliche Farben der Graphen bedeuten jeweils aufgrund notwendigen Umsteigens geänderte Bedingungen hinsichtlich der Lokomotive, der Wagengarnitur und des untersuchten Sitzplatzes. Die kurzzeitig auftretenden, relativ hohen Immissionswerte zwischen ca. 00:51:00 und 00:52:00 wurden im Stillstand während eines Triebwagenwechsels gemessen.

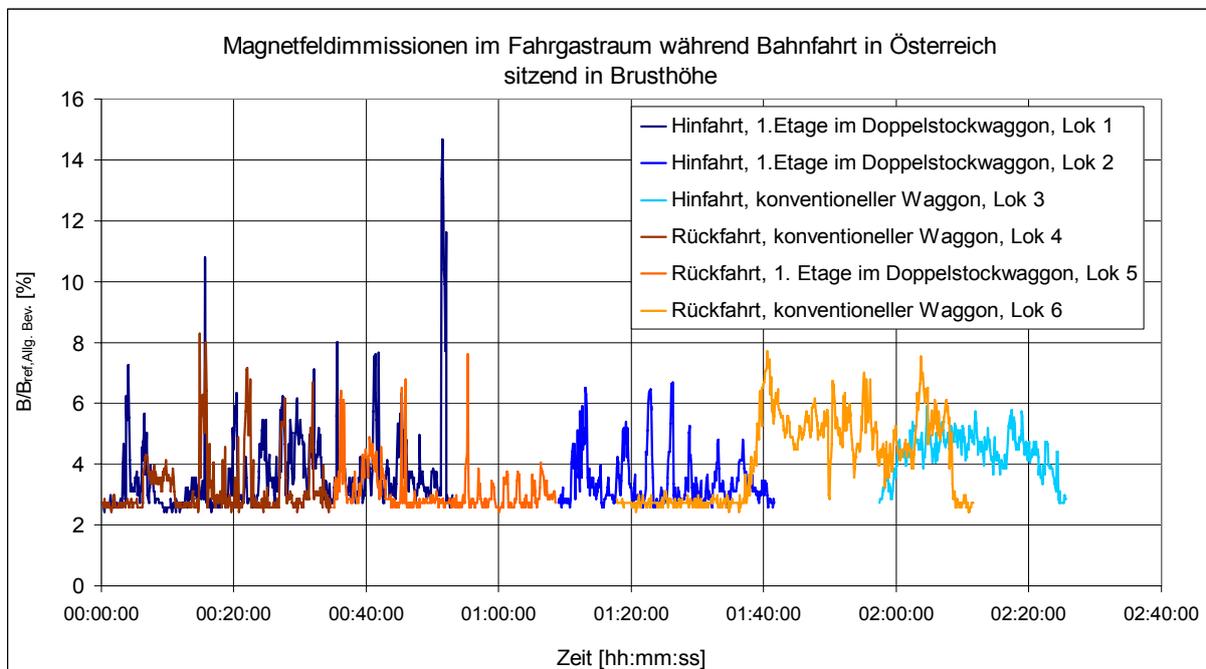


Abbildung 8.2: Magnetfeldimmissionen als Funktion der Zeit an diversen Sitzplätzen im Fahrgastraum während einer mehrstündigen Bahnfahrt mit unterschiedlichen Zügen der Österreichischen Bundesbahnen. Unterschiedliche Farben der Graphen markieren unterschiedliche Züge bzw. Wagengarnituren.

Abbildung 8.3 fasst alle in Abbildung 8.2 als Funktion der Zeit dargestellten Immissionsdaten in Form einer Häufigkeitsverteilung bei einem Immissionsmittelwert von 3,67% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung [1] zusammen.

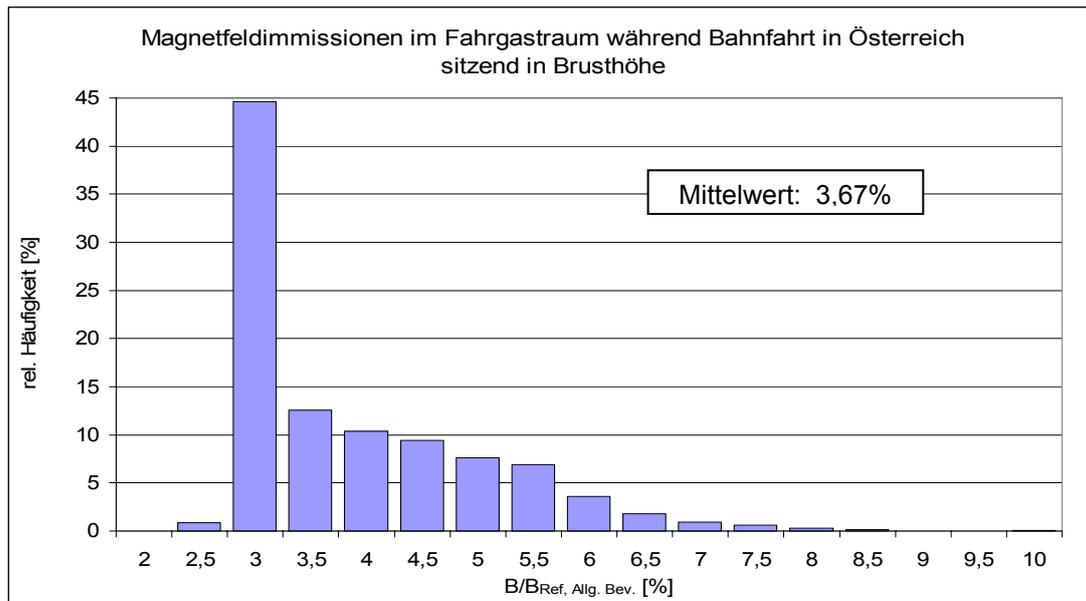


Abbildung 8.3: Häufigkeitsverteilung der an diversen Sitzplätzen im Fahrgastraum während einer mehrstündigen Bahnfahrt mit unterschiedlichen Zügen der Österreichischen Bundesbahnen gemessenen Magnetfeldimmissionen (1 Hz – 100 kHz).

8.1.3 Vergleich der Immissionsdaten

Aufgrund der eingangs erwähnten Tatsache, dass die in der Literatur dokumentierten Magnetfeldwerte in den Schienenfahrzeugen in fast allen Fällen ohne Detailinformationen über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen angegeben sind, ist ein exakter, strahlenschutztechnisch sinnvoller Vergleich mit den in den Hybrid- und Elektrofahrzeugen auf Basis frequenzselektiver Messungen erhobenen Immissionsdaten schwierig. Abbildung 8.4 und Abbildung 8.5 sind Versuche derartiger Vergleiche, wobei die der Literatur entnommenen Daten jeweils auf den Referenzwert der angegebenen Grundfrequenz, bzw. die manchmal angegebene „dominante Frequenz“ bezogen wurden. Aufgrund der Frequenzabhängigkeit der Referenzwerte im hier interessierenden Frequenzbereich können die in den Abbildungen dargestellten Werte, je nach Art der Angabe und tatsächlicher Zusammensetzung der gemessenen Spektren, die tatsächliche Situation daher erheblich unterbewerten. Dies gilt insbesondere für die Fälle in denen nur die Grundwellenfrequenz (z.B. 16.7 Hz) angegeben wurde, ohne möglicherweise vorhandene Oberwellen zu berücksichtigen. Abbildung 8.4 stellt einen Vergleich hinsichtlich der Exposition der Allgemeinbevölkerung und Abbildung 8.5 einen entsprechenden Vergleich hinsichtlich beruflicher Exposition für die Nutzfahrzeuge mit Hybrid- und Elektroantrieb dar.

Aus Abbildung 8.4 ist zunächst ersichtlich, dass die Spitzenimmissionswerte in Schienenfahrzeugen in etwa in der gleichen Größenordnung liegen, wie die Spitzenimmissionswerte in den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKW. Eine Ausnahme stellt dabei lediglich der Panda Electric dar, der durchwegs wesentlich geringere Spitzenimmissionen erzeugt. Die Tatsache, dass die Spitzenimmissionswerte an manchen Sitzplätzen in den PKWs geringfügig oberhalb der aus den Eisenbahnzügen bekannten Spitzenimmissionen liegen, muss jedoch differenziert gesehen werden. Dies vor allem deshalb, weil die Spitzenimmissionswerte aus den PKWs in den meisten Fällen, aufgrund der Nähe zu den Quellen, lokal stark begrenzt, d.h., mit hohen Feldgradienten auftreten, und

zumindest auf Fahrer und Beifahrerplatz auf den Bereich der Füße, bzw. Unterschenkel, beschränkt bleiben. Im Bereich des Kopfes und des Rumpfes sind die Spitzenimmissionswerte in den PKWs, zumindest auf den Sitzplätzen der vorderen Reihe, deutlich geringer als die Spitzenimmissionswerte in den Schienenfahrzeugen. Aufgrund der wesentlich größeren Entfernungen zu den Feldverursachern im Falle der Fahrgastplätze in den Schienenfahrzeugen, sind dort dementsprechend geringere Feldgradienten zu erwarten und die angegebenen Werte können damit, zumindest größenordnungsmäßig, als repräsentativ für den gesamten Körper (und damit für Kopf und Rumpf) angesehen werden (vgl. Werte für Transrapid in Abbildung 8.4). Unter Einbeziehung der Körperregion-spezifischen Detaillerggebnisse aus Kapitel 7 ist daher davon auszugehen, dass die Immissionen im Kopf- und Rumpfbereich in den untersuchten Hybrid- und Elektrofahrzeugen eher geringer sind, als die entsprechenden Werte in Eisenbahnzügen. Im Bereich der Rückbank kann diese Argumentation zumindest für die Modelle Honda Civic IMA, Lexus GS450h und Fiat Doblo Electric nicht aufrecht erhalten werden, da in diesen Fahrzeugen auf der Rückbank die Immissionen auch im Unterleibs- und Bauchbereich in etwa in der gleichen Größenordnung liegen, wie die Immissionen, die auf Basis der vorhandenen Literatur im Fahrgastraum von Eisenbahnzügen erwartet werden können. Eine generelle und eindeutige Aussage, ob die Magnetfeldimmissionen in elektrischen Schienenfahrzeugen oder in Fahrzeugen mit modernen alternativen Antriebskonzepten größer sind, lässt sich jedoch nicht machen, da einerseits, eine systematische und entsprechend detaillierte Dokumentation von Immissionen in Schienenfahrzeugen nicht verfügbar ist, und andererseits, weil die Magnetfeldimmissionen in den Hybrid- und Elektro-PKWs, wie in Kapitel 7 gezeigt, stark vom konkreten Aufbau des Fahrzeugs (Anordnung der elektrischen Komponenten des Antriebssystems) abhängig sind.

Ein Vergleich der Immissionen im untersuchten Hybrid-Nahverkehrsbus mit jenen in vergleichbaren Schienenfahrzeug basierten Verkehrsmitteln (S-Bahn, Straßenbahn, U-Bahn) zeigt ähnliche Immissionswerte, wobei davon auszugehen ist, dass die Magnetfeldimmissionen im Hybridbus räumlich wesentlich inhomogener verteilt sein werden, als in den Schienenfahrzeugen. Nah an den Komponenten des Antriebssystems (unter dem Inverter) sind die Maximalimmissionswerte im Hybridbus in etwa vergleichbar mit den in der Literatur dokumentierten Maximalimmissionen in S-Bahn, U-Bahn und Straßenbahn. Allerdings können die Immissionen fernab der elektrischen Komponenten im Hybridbus wesentlich geringer erwartet werden, als in den Schienenfahrzeugen, da dort im gesamten Fahrgastbereich relevante Immissionsanteile zufolge der Speiseleitung (Oberleitung bzw. Stromschiene) erwartet werden müssen. Bezüglich der Immissionen am Fahrerplatz im Verhältnis zum Referenzwert für berufliche Exposition zeigt der Vergleich in Abbildung 8.5 geringere Immissionen in den untersuchten Hybrid- und Elektro-Nutzfahrzeugen, als in den Triebfahrzeugen der Eisenbahnzüge.

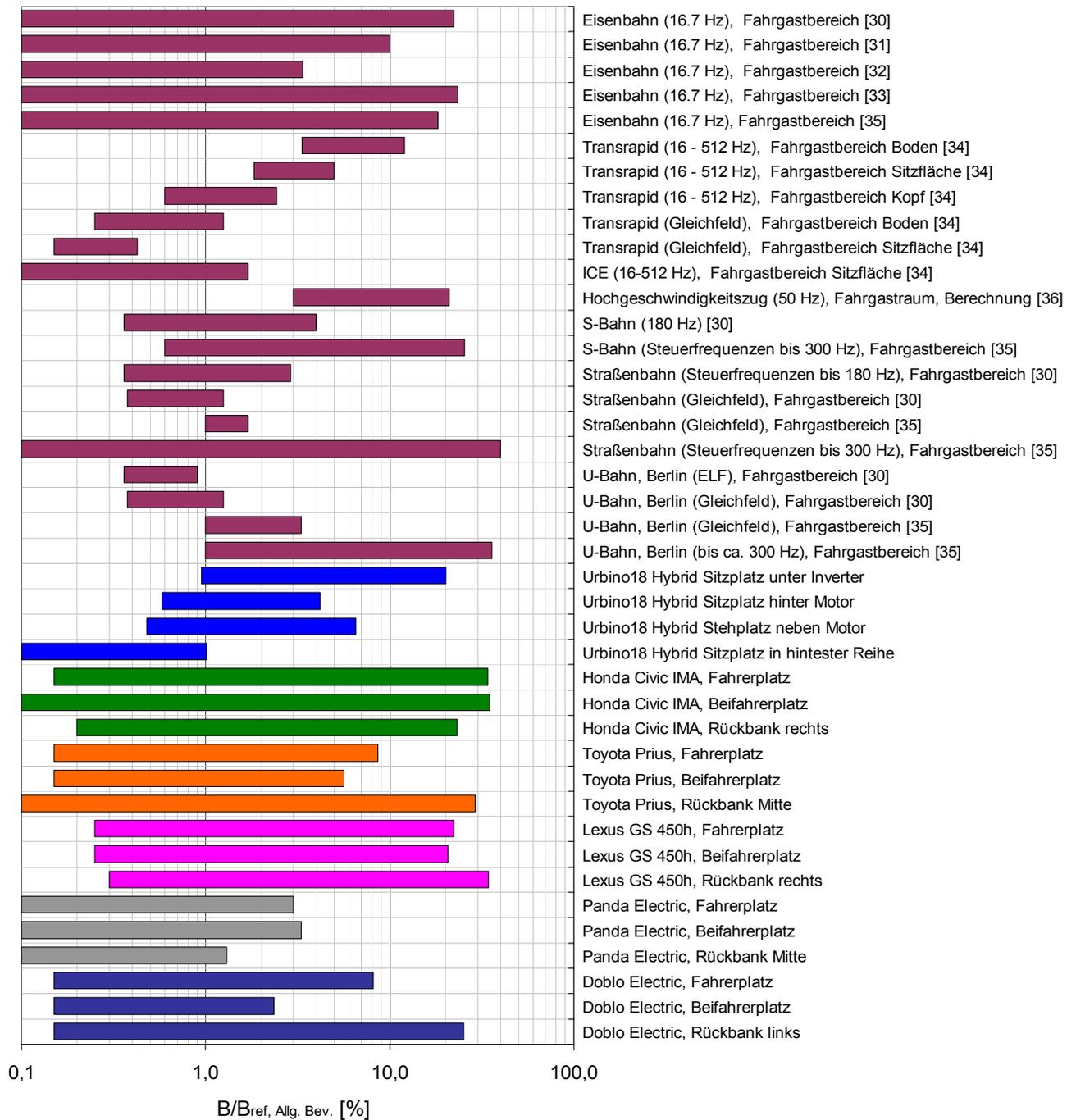


Abbildung 8.4: Vergleich von Magnetfeldimmissionen (bezüglich der Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung) im Fahrgastraum elektrischer Schienenfahrzeuge mit den in Hybrid- und Elektro-PKW's erhobenen Werten

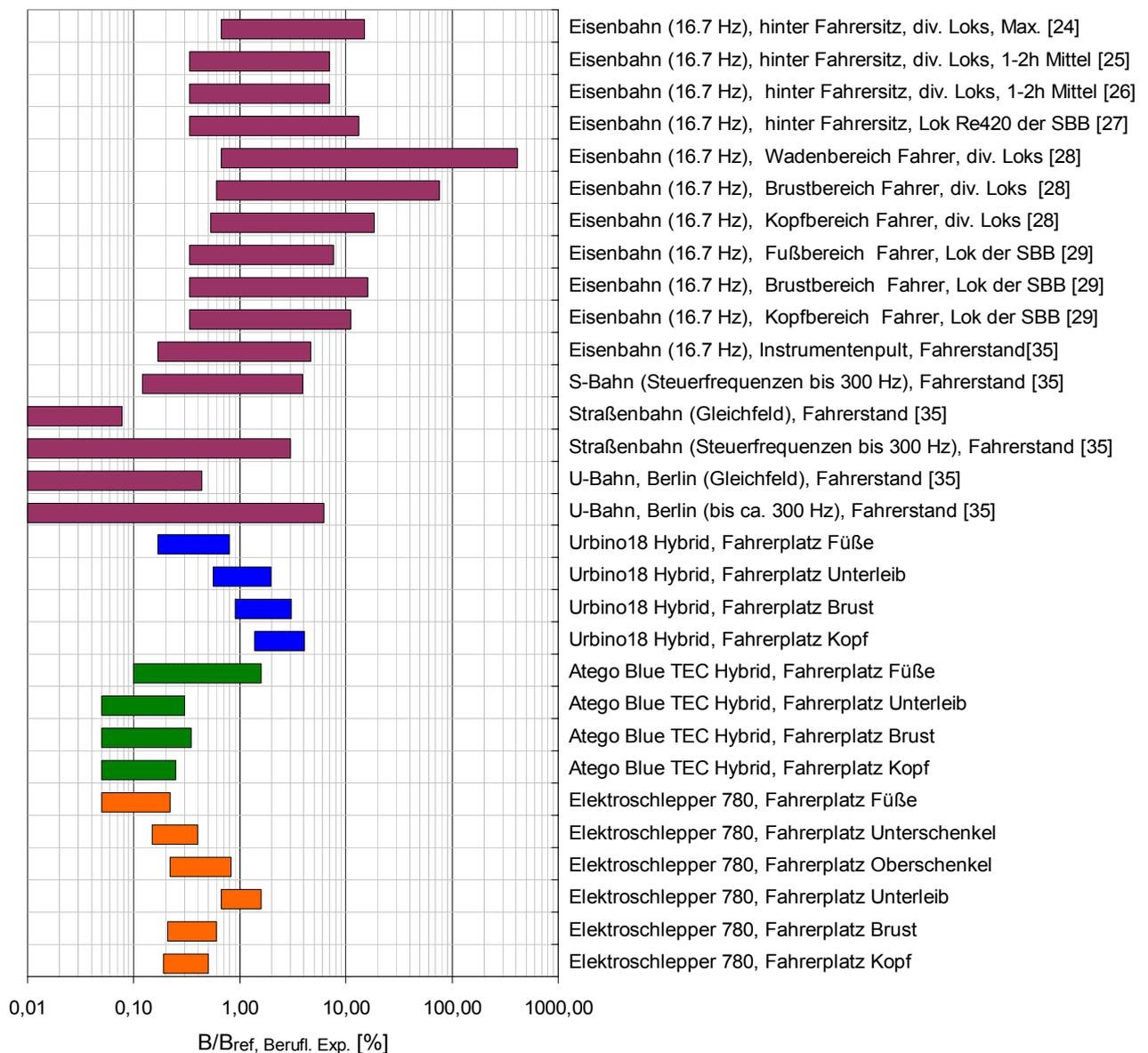


Abbildung 8.5: Vergleich von Magnetfeldimmissionen am Fahrerplatz in elektrischen Schienenfahrzeuge mit jenen in Hybrid- und Elektrofahrzeugen erhobenen Werten

8.2 Vergleich der Magnetfeldimmissionen in den untersuchten Hybrid-PKWs mit verfügbarer Literatur

Wie in Kapitel 3.2 angeführt, liegen derzeit nur sehr wenige Daten bezüglich der Magnetfeldexposition in modernen Hybridfahrzeugen vor. Soweit vergleichbar, liegen die in [9] für ein Toyota Prius Modell berichteten Effektivwerte der magnetischen Flussdichte in der gleichen Größenordnung, wie sie auch in diesem Vorhaben im Toyota Prius beobachtet wurden. Die in [10] für nicht näher spezifizierte Hybridfahrzeugtypen publizierten Flussdichtewerte liegen, sofern aufgrund der in [10] nicht vollständig offen gelegten untersuchten Fahrzeugtypen überhaupt vergleichbar, etwas oberhalb der im Honda Civic IMA beobachteten Effektivwerte der magnetischen Flussdichte. Allerdings gilt für alle oben genannten bisher publizierten Messdaten gleichermaßen, dass sie, aufgrund der fehlenden frequenzselektiven

Bewertung und der im interessierenden Frequenzbereich stark frequenzabhängigen Referenzwerte, aus strahlenschutztechnischer Sicht nur stark eingeschränkt verwertbar, bzw. aussagekräftig sind.

8.3 Vergleich mit konventionellen PKWs

8.3.1 Vorliegende Daten aus der Literatur

Wie in Kapitel 3.1 bereits erwähnt, existieren zur Frage der Magnetfeldexposition der Insassen von Kraftfahrzeugen bereits einige wissenschaftliche Untersuchungen [4]-[7]. Ein Teil dieser Arbeiten [5], [6] befasst sich mit Magnetfeldimmissionen im Fahrzeuginneren zufolge einer möglichen Magnetisierung des Stahlgürtels der Reifen. Für typische Fahrgeschwindigkeiten und Reifengrößen können diese Immissionsanteile lokal begrenzt durchaus im einstelligen Prozentbereich in Bezug auf die Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung liegen.

Die auf die elektrische Anlage zurückführbaren Magnetfeldimmissionen in unterschiedlichen Fahrzeugen im Frequenzbereich 5-2000 Hz werden in [4] im Ausmaß zwischen 0,03 μT und 4,0 μT angegeben (jeweils über den Körper gemittelter Wert). In [7] wurde, ohne nähere technische Details bezüglich des Messverfahrens anzugeben, von Magnetfeldimmissionen im Inneren von Fahrzeugen, stark abhängig vom Fahrzeugtyp, zwischen 0,5 μT und 18 μT berichtet.

Wie auch schon in voranstehenden Kapiteln erwähnt, sind die Angaben von Breitbandmesswerten, ohne detaillierte Information über die spektrale Zusammensetzung der Immissionen im hier interessierenden Frequenzbereich (z.B. 5 Hz – 2000 Hz) leider nur sehr eingeschränkt für eine strahlenschutztechnisch sinnvolle Bewertung der Exposition brauchbar, da die Referenzwerte im angegebenen Frequenzbereich einen Wertebereich von mehr als zwei Zehnerpotenzen überstreichen.

8.3.2 Zusätzliche eigene Messungen im Rahmen des Projekts

Zusätzlich zur Erhebung von Messdaten aus der Literatur wurden im Rahmen dieses Vorhabens auch eigene Immissionsmessungen in zwei unterschiedlichen konventionellen PKWs der Mittelklasse während ca. einstündiger Fahrten auf der Autobahn und im Stadtgebiet durchgeführt. Die Messungen und die Datenauswertung erfolgten dabei exakt gleich, wie bei den Messfahrten mit den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs (siehe Kapitel 6). D.h., der Messfrequenzbereich lag zwischen 0 Hz und 100 kHz und die Immissionsgröße liegt in Form der phasenrichtigen Summe der auf die jeweiligen Referenzwerte bezogenen Einzelspektralanteile vor. Als Messpositionen wurden unterschiedliche Punkte im Fußraum des Beifahrers betrachtet.

Abbildung 8.6 fasst zunächst die in einem Audi A4 Kombi erhobenen Messdaten an der Position des rechten Fußes des Beifahrerplatzes in Form der relativen Häufigkeiten der Magnetfeldimmission zusammen. Die Auswahl der Messposition war dabei nicht zufällig, sondern es wurde bewusst an einer Stelle gemessen, die sich im Rahmen von Voruntersuchungen als relativ hoch exponiert herausstellte. Die in der untersuchten Position gefundenen Immissionswerte sind überraschend groß und liegen, zumindest während der Autobahnfahrt deutlich über den Maximalwerten, die in den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs gemessen wurden. Die in Abbildung 8.6 dargestellten Daten enthalten jedoch noch die Immissionsanteile zufolge der Reifenmagnetisierung. Eine geschwindigkeitskorrelierte Analyse der

Immissionsspektren zeigte jedoch, dass dieser Anteil während der Autobahnfahrt maximal im Bereich von 3-4%pkt und während der Fahrt im Stadtgebiet maximal im Bereich von 1-2%pkt lag. Angemerkt muss werden, dass es sich bei der untersuchten Messposition um ein lokales Maximum im Fußraum des Beifahrers handelt. Ein grober räumlicher Scan im gesamten Beifahrer-Fußbereich (Sonden immer am Fahrzeugboden liegend) während einer Autobahnfahrt ergab zeitliche Immissionsmittelwerte im Bereich zwischen ca. 1% und 30% des ICNIRP-Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung.

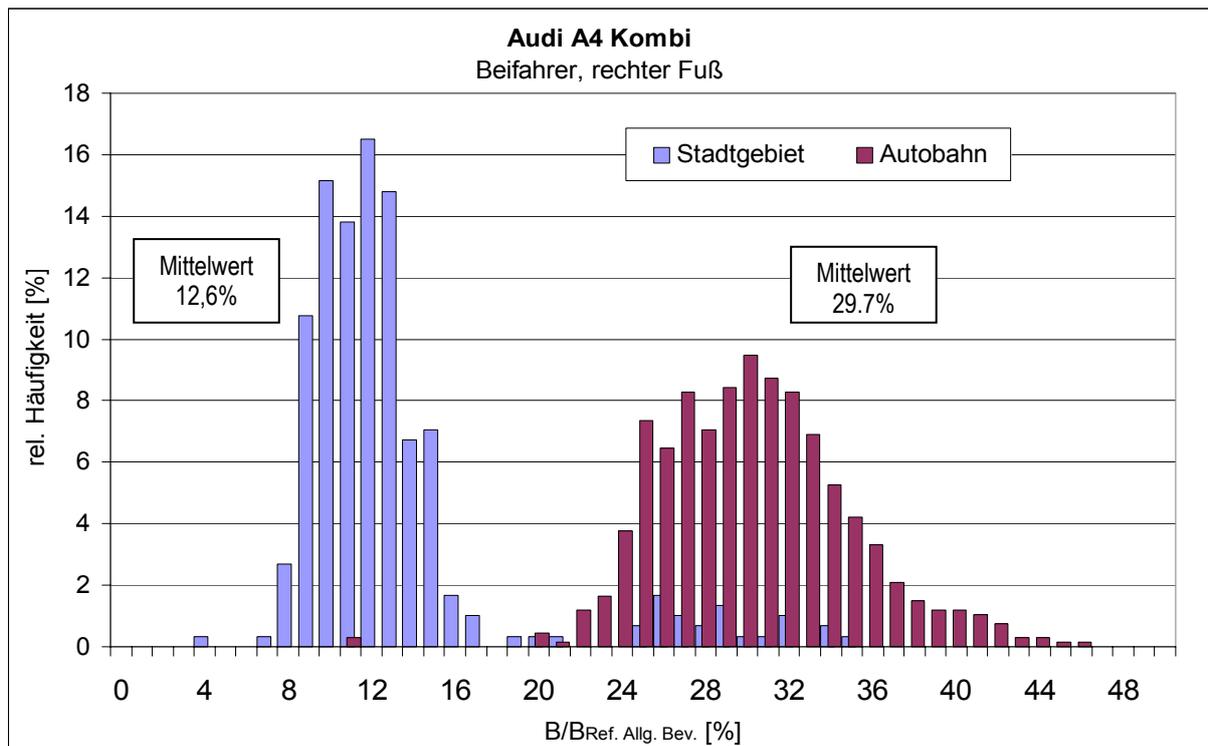


Abbildung 8.6: Häufigkeitsverteilung der Magnetfeldimmissionen im Bereich des rechten Fußes des Beifahrers in einem Audi A4 Kombi während Fahrten auf der Autobahn und im Stadtgebiet (jeweils ca. 30 Minuten)

Als zweites Fahrzeug wurde ein VW Passat Kombi, ebenfalls während einer Autobahnfahrt und einer Fahrt im Stadtgebiet betrachtet. Die Messungen und die Datenauswertung erfolgten dabei wieder exakt gleich, wie bei den Messfahrten mit den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs (siehe Kapitel 6).

Nach Messungen ca. in der Mitte des Beifahrerfußraumes (Sonden am Boden liegend) während der Autobahnfahrt wurde das Immissionsmaximum im Fußraum des Beifahrers gesucht und für alle weiteren Messungen die Mess-Sonden dort platziert (in Richtung vorne rechts im Beifahrerfußraum mit ca. 12 cm Sondenkopfdurchmesser gerade noch zugänglicher Bereich).

Die Ergebnisse der Messungen sind wieder in Form der relativen Häufigkeiten der Magnetfeldimmission in Abbildung 8.7 dargestellt. Es zeigten sich dabei lokal Spitzenimmissionswerte, die sogar oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte für die Allgemeinbevölkerung lagen. Eine Geschwindigkeits korrelierte Analyse der Immissionsspektren zeigte, dass der Immissionsanteil zufolge der Reifenmagnetisierung in der untersuchten Position (lokales Maximum) während der Autobahnfahrt maximal im Bereich von 4-6%pkt und während der Fahrt im

Stadtgebiet maximal im Bereich von 2-3%pkt liegt. Demzufolge führten elektrische Komponenten des Fahrzeugs zu den hohen Immissionswerten.

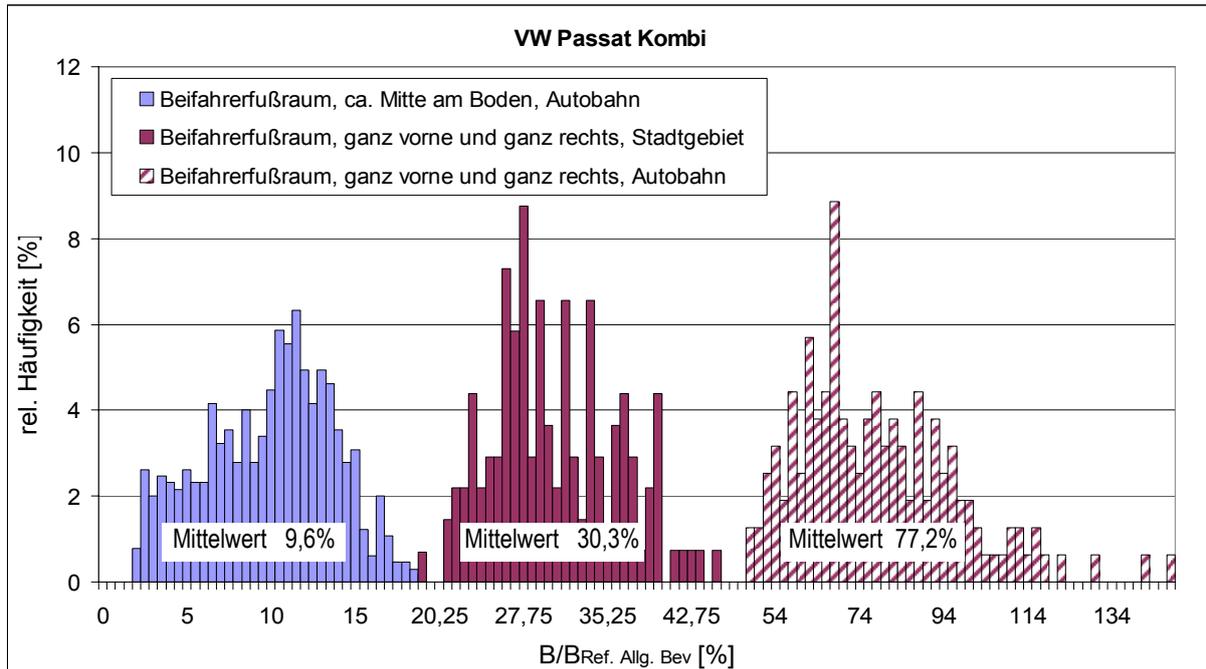


Abbildung 8.7: Häufigkeitsverteilung der Magnetfeldimmissionen im Fußraum des Beifahrers in einem VW Passat Kombi während Fahrten auf der Autobahn und im Stadtgebiet

Um den, bzw. die Verursacher, für die relativ hohen Immissionswerte zu identifizieren, wurden zusätzliche Messungen im Stillstand des Fahrzeugs durchgeführt. Dabei stellten sich im Fußbereich des Beifahrers der Gebläsemotor bzw. seine Verkabelung als die relevanteste Quelle heraus. Bei laufendem Motor konnten im betrachteten lokalen Immissionsmaximum, proportional zur eingestellten Gebläsestufe, die folgenden Immissionswerte (angegeben in Prozent des Referenzwertes für die Allgemeinbevölkerung) gemessen werden (alle anderen elektrischen Verbraucher abgeschaltet):

Gebläse AUS:	21%
Gebläse auf minimaler Stufe:	122%
Gebläse auf mittlerer Stufe:	169%
Gebläse auf maximaler Stufe:	236%

Abbildung 8.8 zeigt den Zeitverlauf und das Spektrum dieser, vom Gebläse verursachten Immissionen.

Schließlich wurden im VW Passat Kombi auch noch die Magnetfeldimmissionen am Fahrersitz (auf der Sitzfläche, d.h. im Unterleibsbereich), verursacht durch die Sitzheizung, gemessen. Abbildung 8.9 zeigt Zeitverlauf und Spektrum dieser Immissionen. Die Gesamtimmission, d.h., die phasenrichtige Summe der auf den jeweiligen Referenzwert bezogenen Einzelspektralanteile, betrug dabei bis zu ca. 38% des ICNIRP-Referenzwertes.

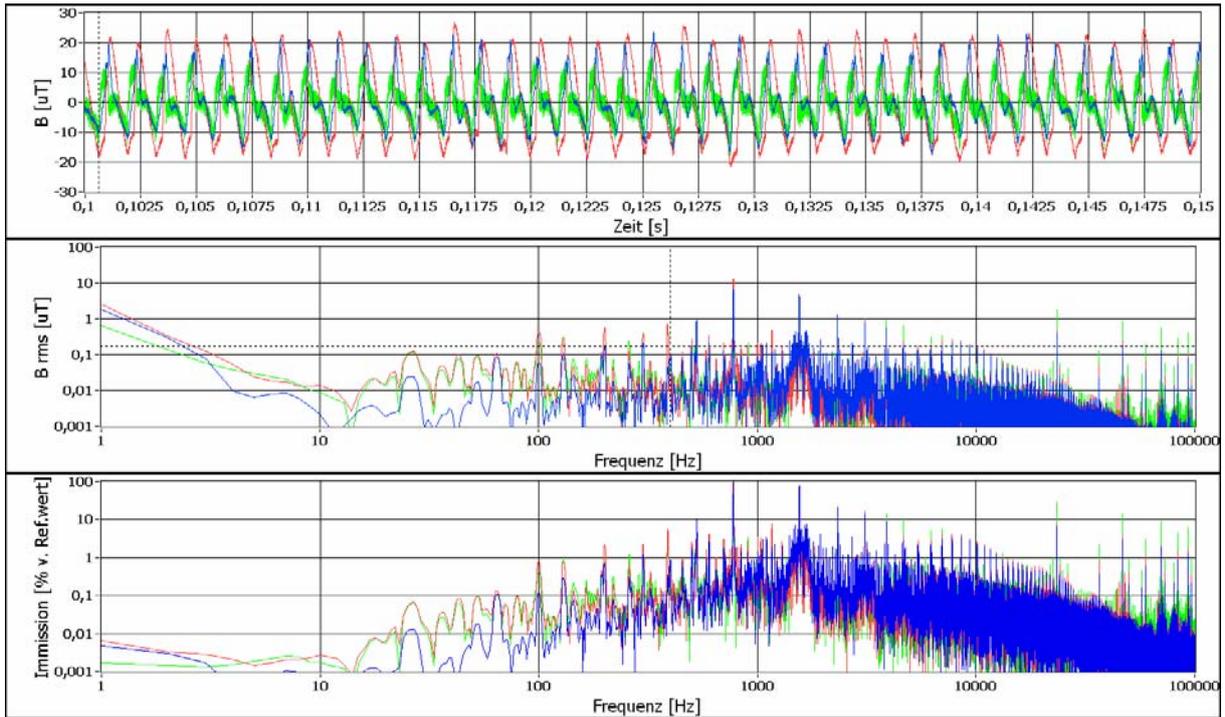


Abbildung 8.8: Lokale Magnetfeldimmissionen im Fußbereich des Beifahrers zufolge des Gebläses im VW Passat Kombi
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

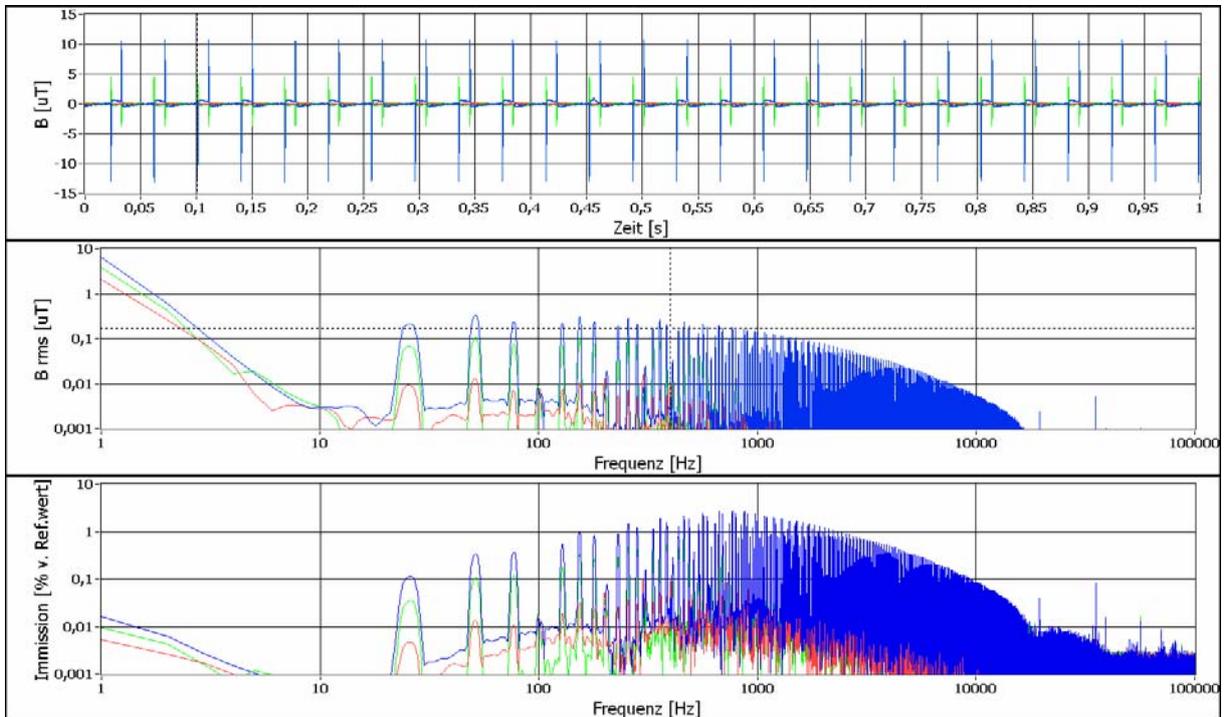


Abbildung 8.9: Lokale Magnetfeldimmissionen auf der Sitzfläche des Fahrers zufolge der Sitzheizung im VW Passat Kombi
 Oben: Zeitsignal (10Hz bis 100 kHz), Mitte: Spektrum (1 Hz-100 kHz), unten: mit Referenzwert für die Allgemeinbevölkerung gewichtete spektrale Verteilung der Immissionen

8.3.3 Vergleich der Immissionsdaten

Ein pauschaler Vergleich der Magnetfeldimmissionen in konventionellen Fahrzeugen und Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen ist, wie die einzelnen Messergebnisse und die in der Literatur verfügbaren Daten zeigen, seriös nicht möglich. Es zeigt sich jedoch eindeutig, dass auch in konventionellen Fahrzeugen lokal Magnetfeldimmissionen auftreten können, die sogar deutlich oberhalb jener Werte liegen, die bisher in Fahrzeugen mit alternativen Antriebssystemen gemessen wurden. Die Höhe der maximal auftretenden Immissionen zeigt sowohl in den Fahrzeugen mit alternativen Antriebskonzepten, als auch in konventionellen Fahrzeugen eine große Streubreite über unterschiedliche Fahrzeugmodelle und ist weniger eine Funktion des Fahrzeugkonzepts (konventionelles/alternatives Antriebssystem, Ausstattung, verbaute elektrische Leistung, usw.) sondern vielmehr abhängig von der Anordnung und der spezifischen Bauart der elektrischen Komponenten (Position der elektrischen Komponenten, Art und Verlauf der Verkabelung), sowie der Signalform der auftretenden Ströme.

Für eine generelle Aussage, ob alternative Antriebssysteme in Zukunft zu einer höheren Magnetfeldexposition der Bevölkerung führen werden, als es derzeit durch die konventionellen Fahrzeuge der Fall ist, fehlen derzeit jedenfalls systematisch erhobene und repräsentative Messdaten aus den konventionellen Fahrzeugen.

Tatsache ist jedoch, dass in den (wenigen) im Rahmen dieses Vorhabens untersuchten Hybrid- und Elektrofahrzeugen auch lokal keine Immissionswerte oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte gefunden wurden, was zumindest bei einem der stichprobenartig untersuchten (nur zwei) konventionellen Fahrzeugen nicht behauptet werden kann.

Die vorliegenden Messdaten deuten jedenfalls darauf hin, dass es in vielen Fahrzeugen, unabhängig davon, ob konventionell oder mit alternativem Antriebssystem ausgestattet, noch Potenzial zur Verminderung der Immissionen gibt.

8.4 Vergleich mit 50 Hz- Magnetfeldimmissionen durch das Energieversorgungsnetz

Durch die auf Basis von [38] 2002 erfolgte Einstufung niederfrequenter (50 Hz) magnetischer Felder ($> 0,4 \mu\text{T}$) als mögliches Kanzerogen durch die IARC [39] erscheint auch die Frage nach dem Anteil der Exposition in den untersuchten Fahrzeugen in diesem Frequenzbereich interessant. Aus den in Kapitel 7 dargestellten Messergebnissen ergeben sich in den Hybrid- und Elektro-PKW's unter stationären Fahrverhältnissen lokale Maximalwerte der magnetischen Flussdichte im Frequenzbereich 40-60 Hz im Bereich von $0,13\text{-}1,75 \mu\text{T}$. Zugehörige zeitlich und über den Körper gemittelte Flussdichtewerte können aus den Ergebnisdarstellungen in Kapitel 7 als entsprechend geringer abgeschätzt werden (um einen Faktor zwischen ca. 1,5 und 4, stark abhängig von der Sitzposition und vom Fahrzeugtyp). An den meisten, jedoch nicht an allen (z.B. Rückbank im Honda Civic IMA und im Lexus GS 450h) untersuchten Sitzpositionen in den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKW's, können die während typischer Fahrten zeitlich und über Körperdimensionen gemittelten Flussdichtewerte im Frequenzbereich 40-60 Hz daher unterhalb von $0,4 \mu\text{T}$ erwartet werden.

9 BEURTEILUNG DER IMMISSIONSDATEN BEZÜGLICH DES SCHUTZES VON PERSONEN MIT HERZSCHRITTMACHERN

Bezüglich einer strahlenschutztechnischen Bewertung von Expositionssituationen im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Personen mit implantiertem Herzschrittmacher stellt der Entwurf DIN VDE 0848 Teil 3-1 [40] derzeit eines der umfangreichsten und fundamentiertesten Dokumente dar. Im Folgenden werden daher die in den untersuchten Hybrid- und Elektrofahrzeugen erhobenen Magnetfeldimmissionen nach diesem Normenentwurf beurteilt, wobei zunächst kurz die Grundlagen des Schutzkonzeptes des genannten Normenentwurfs erläutert werden sollen.

9.1 Schutz- und Bewertungskonzept von DIN VDE 0848 Teil 3-1

DIN VDE 0848 Teil 3-1 unterscheidet zunächst drei Kategorien von Herzschrittmachern, nämlich *angemessen störteste* (Kategorie 0), *eingeschränkt störteste* (Kategorie 1) und *störempfindliche* (Kategorie 2) Herzschrittmacher. Als *angemessen störteste* Herzschrittmacher werden solche Implantate eingestuft, bei denen es auch bei Expositionen mit den in der EU-Ratsempfehlung EG/519/1999 [19] angeführten Referenzwerten und Spitzenfeldstärken zu keiner Störbeeinflussung kommen kann, wenn gleichzeitig auch einige weitere Bedingungen hinsichtlich der Spitzenwerte der elektrischen und magnetischen Feldstärke erfüllt sind (Details dazu, siehe [40])¹³. Als *eingeschränkt störteste* Herzschrittmacher werden jene Implantate bezeichnet, bei denen es bei Einhaltung der in [40] im Detail angeführten Bedingungen (Störspannungsschwellwerte bzw. maximal zulässige Spitzenwerte der äußeren elektrischen und magnetischen Feldstärke) zu keiner Störbeeinflussung kommt. Unter *störempfindlichen* Herzschrittmachern werden schließlich alle Herzschrittmacher verstanden, die weder der Kategorie 0 noch der Kategorie 1 zugeordnet werden können und für die eine Bewertung des elektromagnetischen Störungsrisikos daher nur auf Basis einer Einzelfallanalyse durchführbar ist. Gemäß [41] fielen nur ca. 5% der zwischen 1995 und 1999 implantierten Geräte in diese letztgenannte Kategorie der störempfindlichen Herzschrittmacher. Unterstellt man dem Technologiefortschritt bei Herzschrittmachern auch einen Fortschritt bei der Störungsempfindlichkeit der Implantate, so ist dieser Prozentsatz gegenwärtig wahrscheinlich noch geringer.

Vor diesem Hintergrund erfolgt im Folgenden eine Bewertung der im Rahmen dieses Projekts erhobenen Messergebnisse in den Hybrid- und Elektrofahrzeugen im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung von Patienten mit Herzschrittmachern der Kategorie 1.

Für Herzschrittmacher der Kategorie 1 stellt [40] einerseits von der Signalform und der Frequenz abhängige Spitze-Spitze Werte $U_{ss,schwell}$ der maximal zulässigen Störspannung am Herzschrittmachereingang und andererseits frequenzabhängige Umrechnungsverfahren der äußeren elektrischen und magnetischen Feldstärken auf die maximal am Schrittmachereingang induzierte Spitze-Spitze Spannung $U_{ss,ind,max}$

¹³ Diese zusätzlichen Bedingungen werden von den im Rahmen dieses Vorhabens in den untersuchten Hybrid- und Elektrofahrzeugen gemessenen Magnetfeldern erfüllt

bereit. Sinngemäß besteht keine Gefährdung für Herzschrittmacherpatienten mit Geräten der Kategorie 1, solange $U_{ss,ind,max} \leq U_{ss,schwell}$ gilt.

Für die Beurteilung von Expositionssituationen bei Überlagerung von Feldern mit unterschiedlicher Frequenz sind für jede Einzelfrequenz zunächst die Verhältniszahlen $V_{ss}(f)$ gemäß

$$V_{ss}(f) = \frac{U_{ss,ind,max}(f)}{U_{ss,schwell}(f)} \quad (9.1)$$

zu bilden und anschließend zu summieren, wobei [40] unterschiedliche Summierungsvorschriften für den Fall „identischer Modulation“ (Gleichung 9.2) und „nicht identischer Modulation“ (Gleichung 9.3) definiert.

$$S_{ID} = \sqrt{\sum_f V_{ss}^2(f)} \quad (9.2)$$

$$S_{NID} = V_{ss}(f_0) + \sqrt{\sum_{f \neq f_0} V_{eff}^2(f)} \quad (9.3)$$

In der Summiervorschrift für nicht identische Modulation bedeuten $V_{ss}(f_0)$ die größte aller sich gemäß Gleichung (9.1) ergebenden Verhältniszahlen und $V_{eff}(f)$ die aus den Effektivwerten der induzierten Störspannungen und den Spitze-Spitze Werten der Störschwellenspannung gewonnenen Verhältniszahlen gemäß (Gleichung 9.4).

$$V_{eff}(f) = \frac{U_{eff}(f)}{U_{ss,schwell}(f)} \quad (9.4)$$

Sinngemäß kann eine Gefährdung ausgeschlossen werden, wenn die Summen S_{ID} bzw. S_{NID} kleiner oder gleich eins bleiben.

9.1.1 Bewertungsmethode

Auf Basis des oben zusammengefassten Bewertungsalgorithmus wurden die in den Hybrid- und Elektrofahrzeugen erhobenen Immissionsdaten im Frequenzbereich analysiert, wobei jeweils beide Summenterme (S_{ID} und S_{NID}) ermittelt wurden und, im Sinne einer konservativen Beurteilung, als Bewertungsgröße der jeweils größere Term angeführt wurde. Als Umrechnungsverfahren von den äußeren magnetischen Feldstärken auf die am Schrittmachereingang induzierten Spannungen wurden die Verhältnisse für rein magnetischen Feldcharakter angenommen (vgl. Anhang C in [40]) In die Analyse einbezogen wurden alle Messpositionen im Bauch und Brustbereich der in Kapitel 6.1 beschriebenen Körperrückbildung, sodass auch für Kinder, bzw. sehr kleine Personen, entsprechende Aussagen getroffen werden können. Im Fall des Stehplatzes neben dem Motorgehäuse im Hybrid-Nahverkehrsbus wurde zusätzlich auch der Unterleibs- und Kniebereich analysiert, um auch hier der Situation eines Kindes, bzw. einer sehr kleinen erwachsenen Person, Rechnung zu tragen.

Etwaige Hintergrundimmissionen wurden entsprechend dem in Kapitel 6.4 beschriebenen Verfahren eliminiert.

9.1.2 Bewertungsunsicherheit zufolge der Sonden-Integrationsfläche

Das DIN VDE 0848 Teil 3-1 zugrunde liegende Konzept unterscheidet grundsätzlich zwei unterschiedliche Arten möglicher elektromagnetischer Störeinkopplungen in Herzschrittmacher, nämlich die unmittelbare Einkopplung in das Herzschrittmachergerät (durch das Schrittmachergehäuse hindurch) und die mittelbare Einkopplung der äußeren Felder über die Elektroden des Herzschrittmachers. Das oben zusammengefasste Beurteilungsverfahren ist zwar so ausgelegt, dass beide Einkopplungsmethoden abgedeckt sind, hinsichtlich der Einkopplungsfläche besteht allerdings naturgemäß ein Unterschied. Während der Schutz vor mittelbarer Einkopplung über die Herzschrittmacherelektroden für eine Einkopplungsfläche (Integrationsfläche für die externen Störfelder) von 315cm^2 ausgelegt ist, beträgt diese Fläche im Hinblick auf die unmittelbare Einkopplung in das Gerät nur 20cm^2 . D.h., bei Immissionsmessungen mit einer standardisierten Messwertaufnehmerfläche von 100cm^2 ergibt sich im Hinblick auf die mittelbare Einkopplung eine konservative Bewertung, bezüglich der unmittelbaren Einkopplungen kann es aber, je nach Größe des Feldgradienten, zu Unterschätzungen bei der Bewertung kommen.

Da alle Messungen (im Frequenzbereich $> 10\text{Hz}$) in den Hybrid- und Elektrofahrzeugen mit einer Magnetfeldsonde mit 100cm^2 Aufnehmerfläche durchgeführt wurden, musste zunächst die damit zusammenhängende Unsicherheit in Richtung einer Unterbewertung abgeschätzt werden.

Eine Analyse aller erhobenen Messwerte zeigte, dass die Maximalwerte der im Brust- und Bauchbereich auftretenden Feldgradienten bei weniger als ca. $7,5\ \mu\text{T/m}$ liegen. Unter der im Vergleich mit der Realität sehr konservativen Annahme eines Feldmaximums im Zentrum des Messwertaufnehmers und eines rundum exponentiellen Abfalls des Feldes mit einem mittleren Feldgradienten entsprechend $7,5\ \mu\text{T/m}$, liegt die maximale Unterschätzung des Feldmittelwertes durch den 100cm^2 Sensor im Vergleich zum 20cm^2 Sensor bei weniger als 25%.

9.2 Bewertung der Immissionen in den Fahrzeugen

Tabelle 9.1 fasst die Ergebnisse der Auswertungen für die untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs zusammen. Angegeben wird jeweils der Maximalwert der Summenterme S_{ID} und S_{NID} aller in den angegebenen Messpositionen erhobenen Immissionsdaten (Messungen unter stationären Bedingungen auf dem Leistungsprüfstand, sowie Brems- und Beschleunigungsmanöver).

Fahrzeugtyp	Max (S_{ID}, S_{NID})					
	Fahrerplatz		Beifahrerplatz		Rückbank	
	Brust	Bauch	Brust	Bauch	Brust	Bauch
Honda Civic IMA	0,015	0,020	0,013	0,019	0,108	0,204
Toyota Prius	0,003	0,006	0,003	0,005	0,010	0,041
Lexus GS 450h	0,029	0,053	0,044	0,075	0,037	0,088
Fiat Panda Electric	0,004	0,01	0,003	0,005	0,002	0,005
Fiat Doblo Electric	0,002	0,003	0,003	0,006	0,05	0,175

Tabelle 9.1: Ergebnisse der Immissionsbewertung in den untersuchten Hybrid- und Elektro-PKWs hinsichtlich einer möglichen Gefährdung von Herzschrittmacherträgern nach DIN VDE 0848 Teil 3-1

Es zeigt sich dabei klar, dass die Bewertungsgröße deutlich unterhalb des kritischen Wertes von 1 liegt und dass auch noch ein ausreichender Sicherheitsfaktor vorliegt,

um die in Kapitel 9.1.2 beschriebene Unsicherheit bezüglich der unmittelbaren Einkopplung abzudecken.

Ein ähnliches Bild ergibt sich auch für die untersuchten Fahrgastplätze und den Fahrerplatz im Hybrid-Nahverkehrsbus (Tabelle 9.2). Selbst am Sitzplatz direkt unterhalb des Inverters bleibt die Bewertungsgröße kleiner als 0,3.

Fahrzeugtyp	Max (S_{ID}, S_{NID})								
	Fahrerplatz		Sitzplatz (A) unter Inverter		Sitzplatz (B) hinter Motor		Stehplatz (C) neben Motor		
	Brust	Bauch	Brust	Bauch	Brust	Bauch	Brust	Bauch	Knie
Urbino 18 Hybrid	0,148	0,058	0,293	0,217	0,024	0,042	0,019	0,030	0,059

Tabelle 9.2: Ergebnisse der Immissionsbewertung im untersuchten Hybrid-Nahverkehrsbus hinsichtlich einer möglichen Gefährdung von Herzschrittmacherträgern nach DIN VDE 0848 Teil 3-1

Tabelle 9.3 fasst schließlich die Bewertung für die untersuchten Nutzfahrzeuge zusammen. Auch in diesen Fällen ergeben sich nur unkritische Immissionen.

Fahrzeugtyp	Max (S_{ID}, S_{NID}) am Fahrerplatz	
	Brust	Unterleib
Daimler Atego Blue TEC	0,008	0,009
PEFRA Schlepper 780	0,010	0,013

Tabelle 9.3: Ergebnisse der Immissionsbewertung in den untersuchten Hybrid- und Elektro-Nutzfahrzeugen hinsichtlich einer möglichen Gefährdung von Herzschrittmacherträgern nach DIN VDE 0848 Teil 3-1

Zusammenfassend kann daher gesagt werden, dass die durchgeführten Magnetfeldmessungen in den untersuchten Hybrid- und Elektrofahrzeugen keinerlei Hinweise auf ein Gefährdungspotenzial für Herzschrittmacherträger durch die von den Fahrzeugen an den Fahrer- und Fahrgastplätzen erzeugten magnetischen Felder ergaben.

10 LITERATUR

- [1] ICNIRP. 1998. Guidelines for limiting exposure to time varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Physics, Vol. 74:494-522
- [2] <http://www.hybrid-autos.info>
- [3] <http://www.vkw.at/inhalt/at/vlotte.htm>
- [4] Vedholm K, Hamnerius Y. 1997. Personal exposure from low frequency electromagnetic fields in automobiles. Abstract No. F-9, presented at World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, June 1997, Bologna, Italy
- [5] Milham S, Hatfield JB, Tell R. 1999. Magnetic fields from steel-belted radial tires: Implications for epidemiological studies, Bioelectromagnetics Vol. 20(7), pp. 440-445
- [6] Stankowski S, Kessi A, Becheiraz O, Meier-Engel K, Meier M. 2006. Low frequency magnetic fields induced by car tire magnetization. Health Physics, Vol. 90 (2):148-153
- [7] <http://www.auto-motor-und-sport.de/news/e-smog-volvo-ueberstrahlt-alle-661601.html>
- [8] The New York Times. 27. April 2008. Fear, but few facts on hybrid risks http://www.nytimes.com/2008/04/27/automobiles/27EMF.html?_r=2&pagewanted=2
- [9] http://electromagnetichealth.org/wp-content/uploads/2008/11/emf_test_of_2007_toyota_prius_hybrid-3.pdf
- [10] Schweizer Bundesamt für Gesundheit. 2009. EMF Faktenblatt Auto, Hybridauto <http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00053/00673/02377/index.html?lang=de>
- [11] Allgemeine Unfallversicherungsanstalt (AUVA), Österreich. 2008. Band 46: Belastung von Schweißern durch elektromagnetische Felder am Arbeitsplatz. http://www.auva.at/portal/index.html?ctrl:cmd=render&ctrl>window=auvportal.channel.content.cmsWindow&p_menuid=3068&p_tabid=5&p_pubid=633990
- [12] ICNIRP. 2003. Guidance in determining compliance of exposure to pulsed and complex non-sinusoidal waveforms below 100 kHz with ICNIRP guidelines. Health Physics, Vol. 84(3):383-387
- [13] Gandhi O P, DeFord J F and Kanai H 1984 Impedance method for calculation of power deposition patterns in magnetically-induced hyperthermia IEEE Trans. Biomed. Eng. Vol. 31: 644–51
- [14] SEMCAD X 13.4 User Manual, Seite 3-17 – 3-20.
- [15] CST-EM Studio, <http://www.cst.com/Content/Products/EMS/Solvers.aspx>

- [16] Yee KS. 1966. Numerical solution of initial boundary value problems involving Maxwell's equations of isotropic media, IEEE Transaction on Antennas and Propagation 14:302-307
- [17] Clemens M, Wittig T, Weiland T. 2002. Numerische Feldsimulation mit der Methode der Finiten Integration-Möglichkeiten und Grenzen, Technische Messen Vol. 69 (2):90-101
- [18] Gandhi OP, Chen JY. 1992, Numerical Dosimetry at Power-Line Frequencies Using Anatomically Based Models, Bioelectromagnetics Supplement 1:43-60
- [19] Rat der Europäischen Kommission. 1999. Empfehlung 1999/519/EG zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz -300 GHz)
- [20] Gabriel, S., Lau, R. W. and Gabriel, C. The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues. Phys. Med. Biol. 41, 2271–2293 (1996)
- [21] <http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/>
- [22] Richtlinie 70/220/EWG zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen. 20.März 1970
- [23] PEFRA-Elektroschlepper Modell 780 Datenblatt: http://www.cms-bitforbit.com/newsimages/Preisblatt_2008_Modell%20780.pdf
- [24] Lörtscher M, Lörtscher E, Voegeli H, Rösli M. 2006. Measurements and Simulations of Electro-Magnetic Field Emissions of the Swiss Federal Railway Rolling Stock. Epidemiology:Volume 17(6) SupplNovember 2006pp S154-S155
- [25] Rösli M, Lörtscher M, Pfluger D, Schreier N. 2005. ELF (16.7Hz) magnetic field exposure assessment in swiss railway engineers. Abstract Book des joint meetings von EBEA und BEMS, Dublin, Irland, 2005, pp. 41-42.
- [26] Loits GmbH, Wettswill, Schweiz. 2008. Niederfrequente Elektro-Magnetische Felder in Führerständen von Triebfahrzeugen der SBB. Online:<http://www.loits.com/loits/index.htm>.
- [27] Rösli M, Egger M, Pfluger D, Minder C. 2008. Cardiovascular mortality and exposure to extremely low frequency magnetic fields: a cohort study of Swiss railway workers, Environmental Health, 2008; 7:35. <http://www.pubmedcentral.nih.gov/articlerender.fcgi?artid=2483270>
- [28] Minder CE, Pfluger DH. 1993. Extremely low frequency electromagnetic field measurements (ELF-EMF) in Swiss railway engines. Radiation Protection Dosimetry 48(4), pp.351-354
- [29] Minder CE, Pfluger DH. 2001. Leukemia, Brain Tumors, and Exposure to Extremely Low Frequency Electromagnetic Fields in Swiss Railway Employees, Am. Journal of Epidemiology, Vol. 153(9), pp. 825-835
- [30] Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik HTWK Leipzig. Online, ohne Datum. Elektrische und Magnetische Wechselfelder an elektrifizierten Bahnstrecken. http://fbeit.htwk-leipzig.de/fb/fq_eet/diplom/emvu/nef/html/verkehr.htm

- [31] Griessmann A. 1996. Messung bahnfrequenter Wechselfelder. Diplomarbeit an der technischen Universität Graz.
- [32] Matthes R, Brix J, Scheel O, Wettemann H. 1997. Erfassung der niederfrequenten magnetischen Exposition der Bürger in Bayern. Materialien des bayerischen Staatsministeriums für Landesentwicklung und Umweltfragen, Nr.134
- [33] Wernli Stratmann M. 1999. Netzfrequente magnetische Felder: Exposition der Bevölkerung in der Schweiz, NIR 1999, 31. Jahrestag des Fachverbandes für Strahlenschutz. Proceedings, Band I, pp 617-624
- [34] Ruppe I, Hentschel K, Eggert S. 1995. Schienegebundene Transportsysteme, Teil 1: Exposition durch statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder an der Magnetaschwebbahn Transrapid 07, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Forschung Fb 11.001, Berlin 1995
- [35] Hentschel K, Goltz S, Ruppe I, Eggert S, Neuschulz H, Angerer M. 1998. Schienegebundene Transportsysteme, Teil 2: Exposition durch statische und niederfrequente elektrische und magnetische Felder an Fernbahn, S-, U-Bahn und Straßenbahn, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsmedizin, Forschung Fb 800, Dortmund/Berlin 1998
- [36] Concettina B, Felizani M. 2003. Three dimensional magnetic field computation inside a high speed train with a.c. electrification. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Volume 1, Issue , 11-16 May 2003, pp. 617 – 620
- [37] Chadwick P, Lowes F. Magnetic fields on british trains, Ann. Occup. Hyg. Vol. 42(5), pp 331-335
- [38] ICNIRP. 2001. Review of the epidemiologic literature on EMF and Health, Environ Health Perspect. 109 Suppl 6:911-33
- [39] International agency for research on cancer (IARC). 2002. Non-Ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-Frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields. IARC Press Lyon, 2002
- [40] DIN-VDE 0848 Teil 3-1, Mai 2002. Sicherheit in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern, Teil 3-1: Schutz von Personen mit aktiven Körperhilfsmitteln im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz.
- [41] Goltz S, Eggert S, Gustrau F, Bahr A. 2003. Störbeeinflussung von Herzschrittmachern - Stand der Normung und der numerischen Simulationsverfahren, EMC Kompendium 2003, pp. 51-53

| Verantwortung für Mensch und Umwelt |

Kontakt:

Bundesamt für Strahlenschutz

Postfach 10 01 49

38201 Salzgitter

Telefon: + 49 30 18333 - 0

Telefax: + 49 30 18333 - 1885

Internet: www.bfs.de

E-Mail: ePost@bfs.de

Gedruckt auf Recyclingpapier aus 100 % Altpapier.



Bundesamt für Strahlenschutz