

# Exposition von Personen durch Magnetfelder der Elektromobilität

G. Schmid<sup>1</sup>, R. Hirtl<sup>1</sup>, P. Schneeweiß<sup>1</sup>, M. Kubocz<sup>2</sup>, J. Kainz<sup>1,2</sup>, S. Drießen<sup>2</sup>, M. Vogt<sup>3</sup>, L. Kalb<sup>3</sup>, D. Silvestro<sup>3</sup>

<sup>1</sup> EMC & Optics, Seibersdorf Labor GmbH

<sup>2</sup> Forschungszentrum für Elektro-Magnetische Umweltverträglichkeit (*femu*), Uniklinik RWTH Aachen

<sup>3</sup> ADAC Technik Zentrum Landsberg/Lech

**UNIKLINIK**  
**RWTHAACHEN**

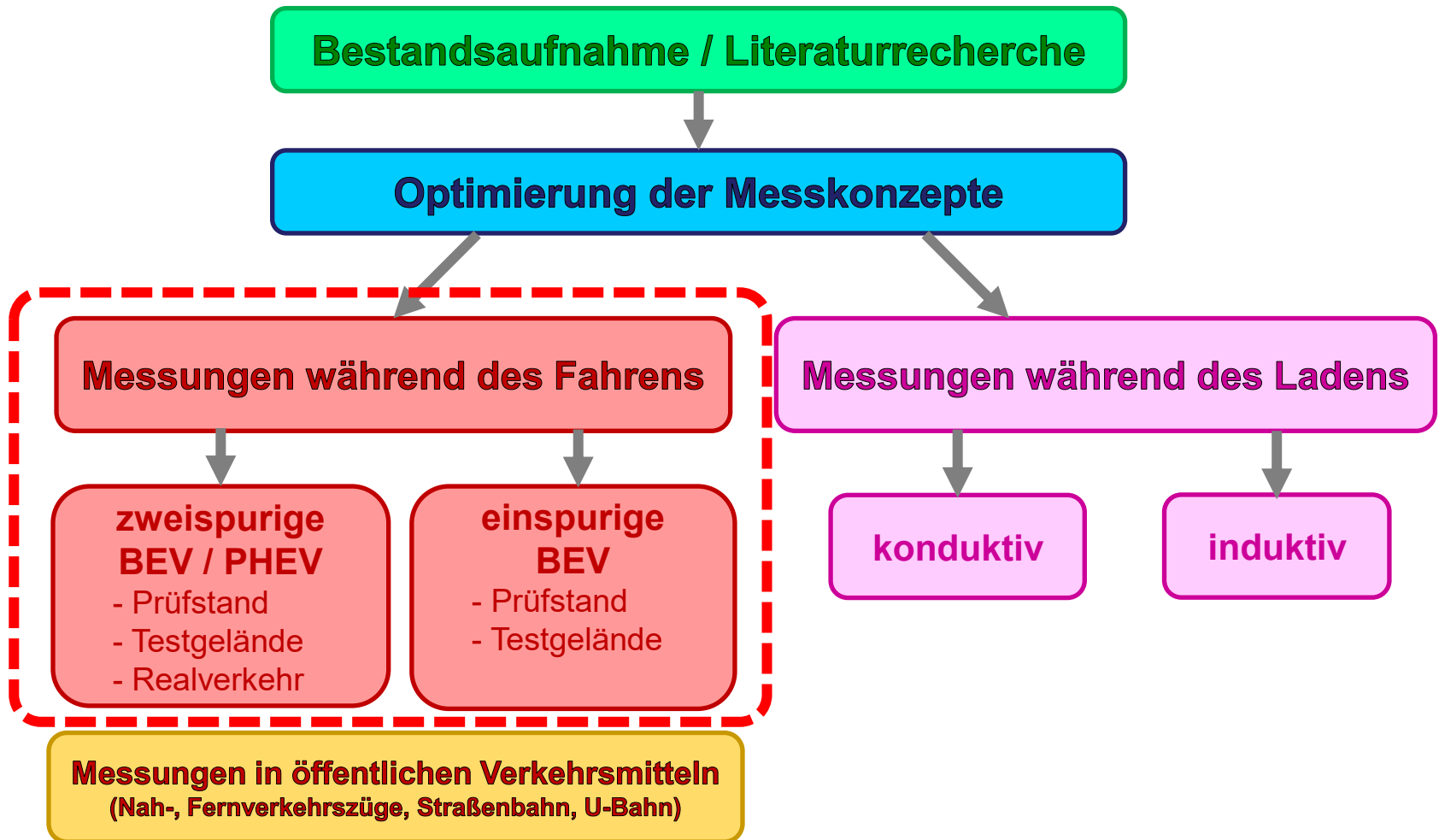
**femu**  
Forschungszentrum für Elektro-  
Magnetische Umweltverträglichkeit



# Hintergrund

- Zunehmende Verbreitung von Fahrzeugen mit Elektroantrieb für den Individualverkehr
- Antriebsleistungen bis zu mehreren 100 kW
  - hohe Stromstärken → hohe magnetische Feldstärken nahe der stromführenden Komponenten (Batterie, Verkabelung, Inverter, Motoren)
- In der Praxis: Annäherung bis auf wenige Zentimeter möglich
- Zusätzliche Aspekte: Magnetfeldexposition beim Laden
  - konduktiv, mittels Kabel (gegenwärtiger Standard)
  - Induktiv, mittels Induktionsspulen
- Projektausschreibung des Bundesamtes für Strahlenschutz (BfS)

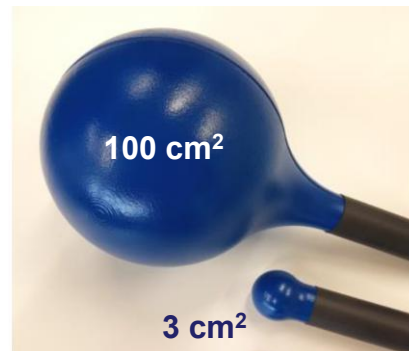
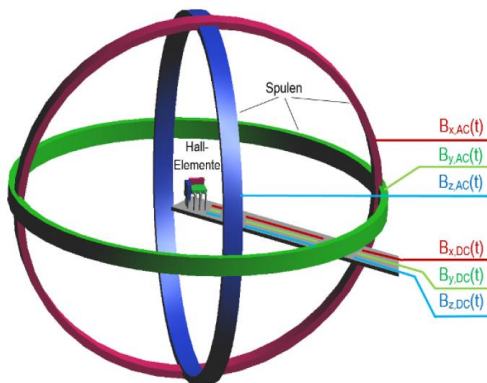
# Projekthinhalte – Überblick



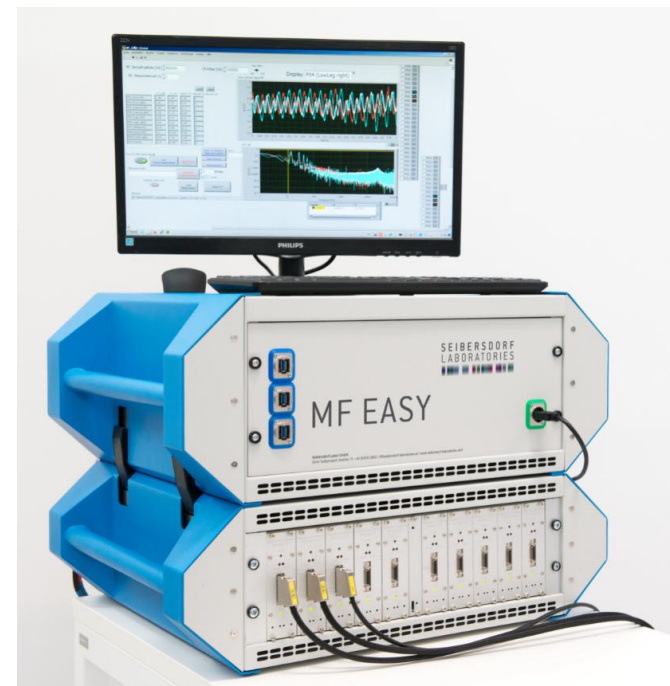
# Verwendete Messtechnik <sup>(1)</sup>

## ➤ Multikanal-Magnetfeldmesssystem (MF-EASY)

- 10 simultane, isotrope Messkanäle (DC - 400 kHz)
- 100 cm<sup>2</sup> Spulensensoren + isozentrisch angeordnete Hall-Sensoren
- 3 cm<sup>2</sup> Spulensensoren + isozentrisch angeordnete Hall-Sensoren
- Aufzeichnung des Zeitsignals
- 12 V DC Versorgung



**M**agnetic **F**ield  
**E**xposure **A**ssessment **S**ystem



# Verwendete Messtechnik (2)

## ➤ Multikanal-Magnetfeldmesssystem (MF-EASY)

- 10 simultane, isotrope Messkanäle (DC - 400 kHz)
- 100 cm<sup>2</sup> Spulensensoren + isozentrisch angeordnete Hall-Sensoren
- Aufzeichnung des Zeitsignals
- 12 V DC Versorgung

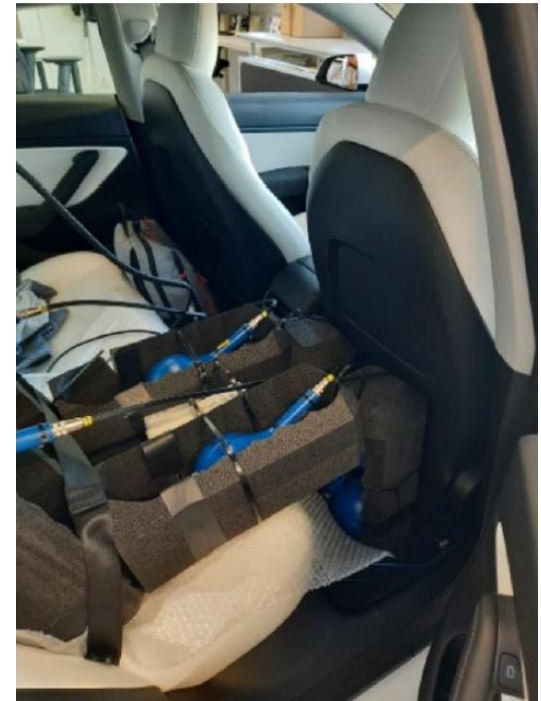


# Verwendete Messtechnik <sup>(3)</sup>

## ➤ Multikanal-Magnetfeldmesssystem (MF-EASY)

- 10 simultane, isotrope Messkanäle (DC - 400 kHz)
- 100 cm<sup>2</sup> Spulensensoren + isozentrisch angeordnete Hall-Sensoren
- Aufzeichnung des Zeitsignals
- 12 V DC Versorgung

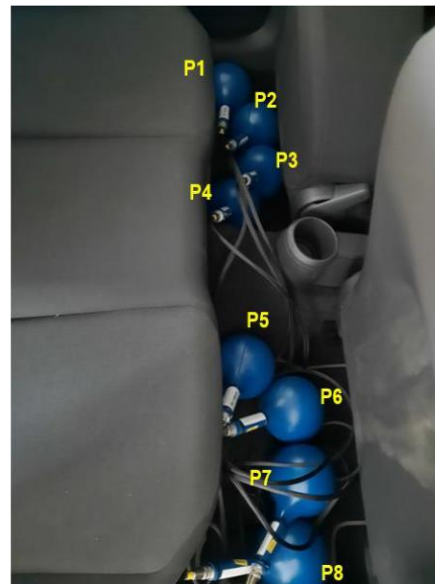
- P01: Fuß links
- P02: Fuß rechts
- P03: Unterschenkel links
- P04: Unterschenkel rechts
- P05: Oberschenkel links
- P06: Oberschenkel rechts
- P07: Unterleib
- P08: Brust links
- P09: Brust rechts
- P10: Kopf



# Messmethode <sup>(1)</sup>

## ➤ Fahren am **Prüfstand** mit **zweispurigen** Fahrzeugen

- zunächst: Maximumsuche
- $v = \text{const.}$  (30, 100 km/h), unterschiedliche Steigungen (0 %, 10 %)
- Beschleunigung (0-100 km/h), Bremsen (100-0 km/h), (0 %, 10 %)



# Messmethode (2)

## ➤ Fahren am **Prüfstand** mit **zweispurigen** Fahrzeugen

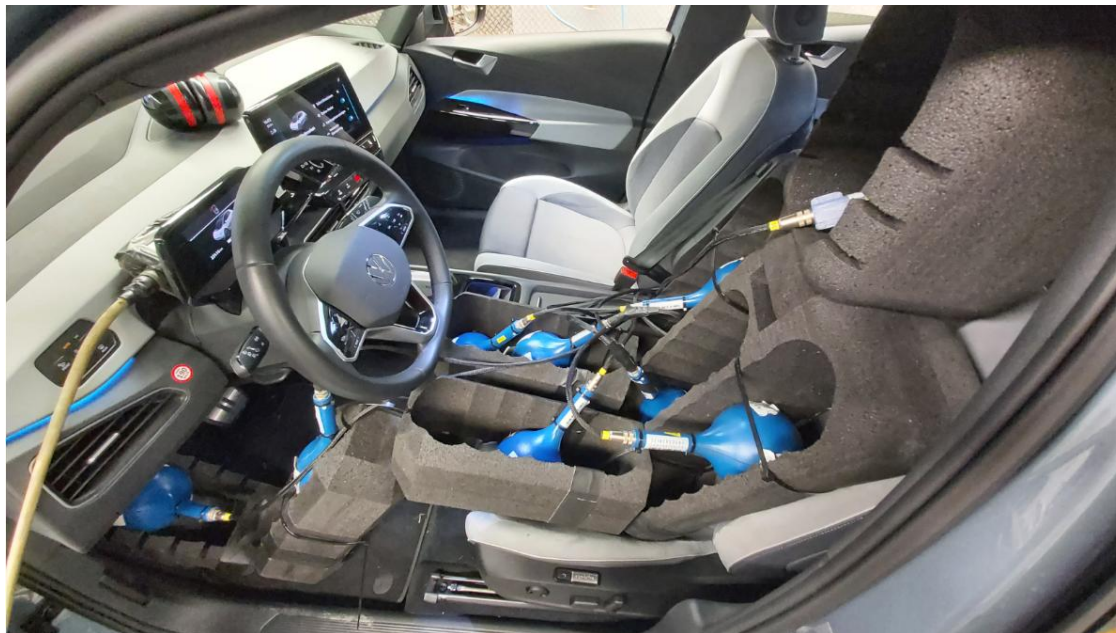
- Systematische Messungen an drei Sitzplätzen (Fahrerplatz + zwei weitere)
- $v = \text{const.}$  (30, 50, 80, 120 km/h), unterschiedliche Steigungen (0 %, 5 %, 10 %)
- Beschleunigung (0-120 km/h), Bremsen (120-0 km/h), (0 %, 10 %)
- **W**orldwide Harmonized **L**ight Vehicles **T**est **C**ycle (WLTC)



# Messmethode <sup>(3)</sup>

## ➤ Fahren am **Prüfstand** mit **zweispurigen** Fahrzeugen

- Systematische Messungen an drei Sitzplätzen (Fahrerplatz + zwei weitere)
- $v = \text{const.}$  (30, 50, 80, 120 km/h), unterschiedliche Steigungen (0 %, 5 %, 10 %)
- Beschleunigung (0-120 km/h), Bremsen (120-0 km/h), (0 %, 10 %)
- **W**orldwide **H**armonized **L**ight **V**ehicles **T**est **C**ycle (WLTC)



# Messmethode (4)

## ➤ Fahren am **Testgelände** mit **zweispurigen** Fahrzeugen

- Systematische Messungen an drei Sitzplätzen (Fahrerplatz + zwei weitere)
- $v = \text{const.}$  (30, 50, 80, 120 km/h)
- Beschleunigung (0-120 km/h), Bremsen (120-0 km/h) auf ebener Straße (0 %)



# Messmethode (5)

## ➤ Fahren am **Testgelände** mit **zweispurigen** Fahrzeugen

- Systematische Messungen an drei Sitzplätzen (Fahrerplatz + zwei weitere)
- $v = \text{const.}$  (30, 50, 80, 120 km/h)
- Beschleunigung (0-120 km/h), Bremsen (120-0 km/h) auf ebener Straße (0 %)



# Messmethode <sup>(6)</sup>

## ➤ Fahren im **Realverkehr** mit **zweispurigen** Fahrzeugen

- ca. 90-minütige Fahrt im Raum Landsberg;  
Mix aus innerorts, Landstraße, Autobahn
- ein Passagierplatz  
(mit höchsten Immissionen am Prüfstand)



# Messmethode (11)

## ➤ Bewertungsgrößen

- **B<sub>PEAK</sub>**: (Zeit-)Spitzenwerte der magnetischen Flussdichte
- **Explnd<sub>1998</sub>**: Expositionsindizes bzgl. Referenzwerte für Allg. Bev. gem. ICNIRP 1998<sup>\*</sup>
- **Explnd<sub>2010</sub>**: Expositionsindizes bzgl. Referenzwerte für Allg. Bev. gem. ICNIRP 2010
- **B<sub>RMS</sub>**: (Zeit-)Effektivwerte der magnetischen Flussdichte

### „Expositionsindex“:

Verhältnis der gemessenen magnetischen Flussdichte zum Referenzwert („Ausschöpfungsgrad des Referenzwertes“), für nicht-sinusförmige Zeitverläufe ermittelt mit der „Weighted Peak Methode im Zeitbereich“ (WPM-TD); Angabe als dimensionsloser Wert (Verhältniswert), d.h. Explnd = 1 bedeutet 100 % Ausschöpfung der Referenzwertes.

<sup>\*</sup> EU-Ratsempfehlung 1999/519/EG basiert nach wie vor auf ICNIRP 1998 Empfehlungen und wird in harmonisierten Produktnormen als heranzuziehendes Dokument bezüglich anzuwendender Referenz- und Basisgrenzwerte zum Schutz der Allgemeinbevölkerung angeführt.

# Messergebnisse Zweispurige (1)

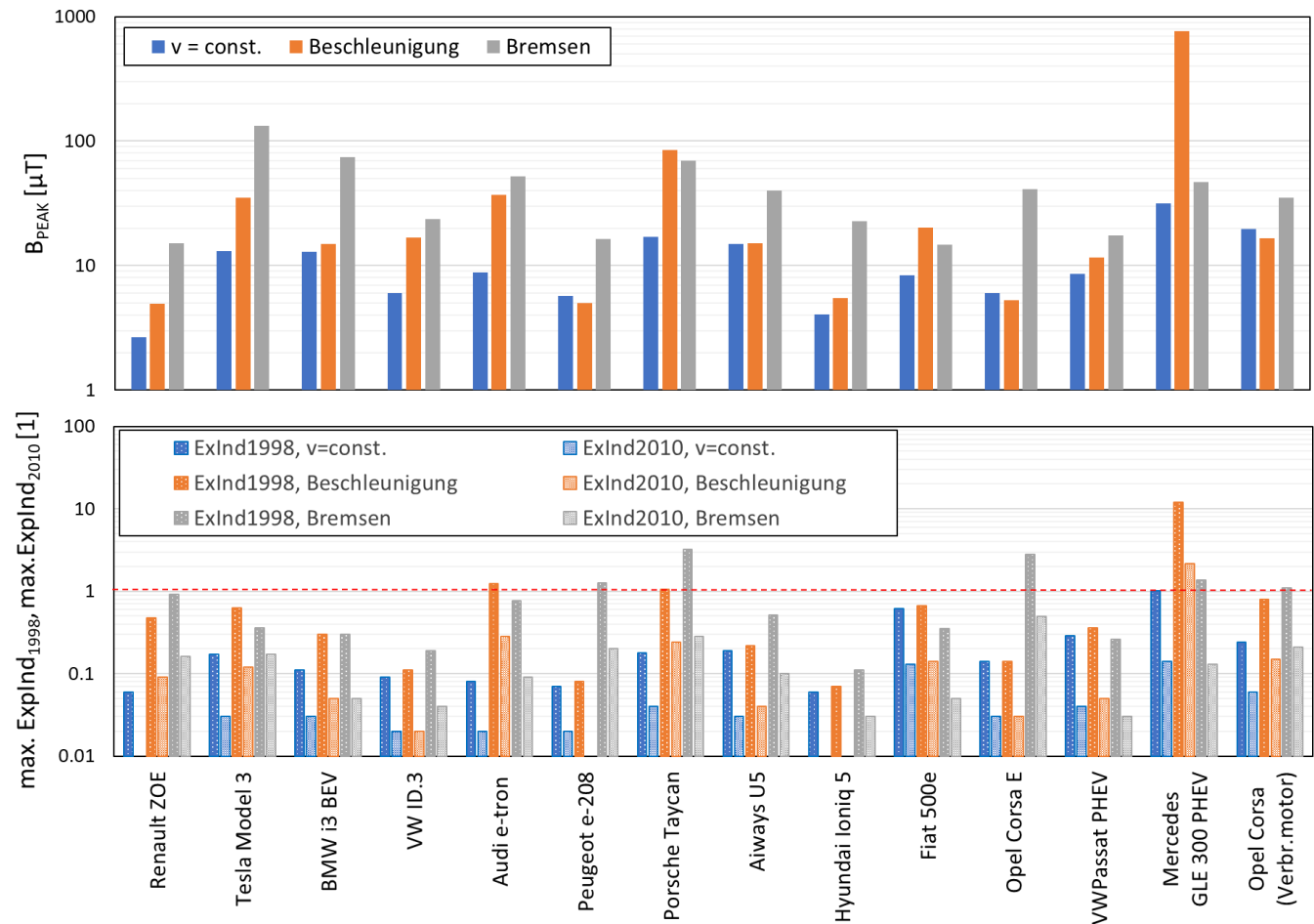
- **Renault Zoe** (100 kW)
- **Tesla Model 3** (377 kW)
- **BMW i3 BEV** (135 kW)
- **VW ID.3** (150 kW)
- **Audi e-tron Quattro** (300 kW)
- **Peugeot e-208** (100 kW)
- **Porsche Taycan** (300 kW)
- **Aiways U5** (150 kW)
- **Hyundai Ioniq 5** (225 kW)
- **Fiat 500e** (87 kW)
- **Opel Corsa Electric** (100 kW)
- **VW Passat PHEV** (85 kW el.)
- **Mercedes GLC 300 PHEV** (100 kW el.)
- **Opel Corsa** (74 kW, Verbrennungsmotor)

insgesamt  
**> 975.000**  
Einzelmessungen

# Messergebnisse Zweispurige (2)

## ➤ Systematische Messungen Prüfstand und Testgelände

Kurzzeitig  
auftretende  
Expositions-  
Spitzenwerte,  
lokale Maxima



# Messergebnisse Zweispurige (3)

- Systematische Messungen Prüfstand und Testgelände
- Lokal kurzzeitig auftretende (reproduzierbare) Expositions-Spitzenwerte (Transiente)

## Maximal gefundene Expositionsindizes

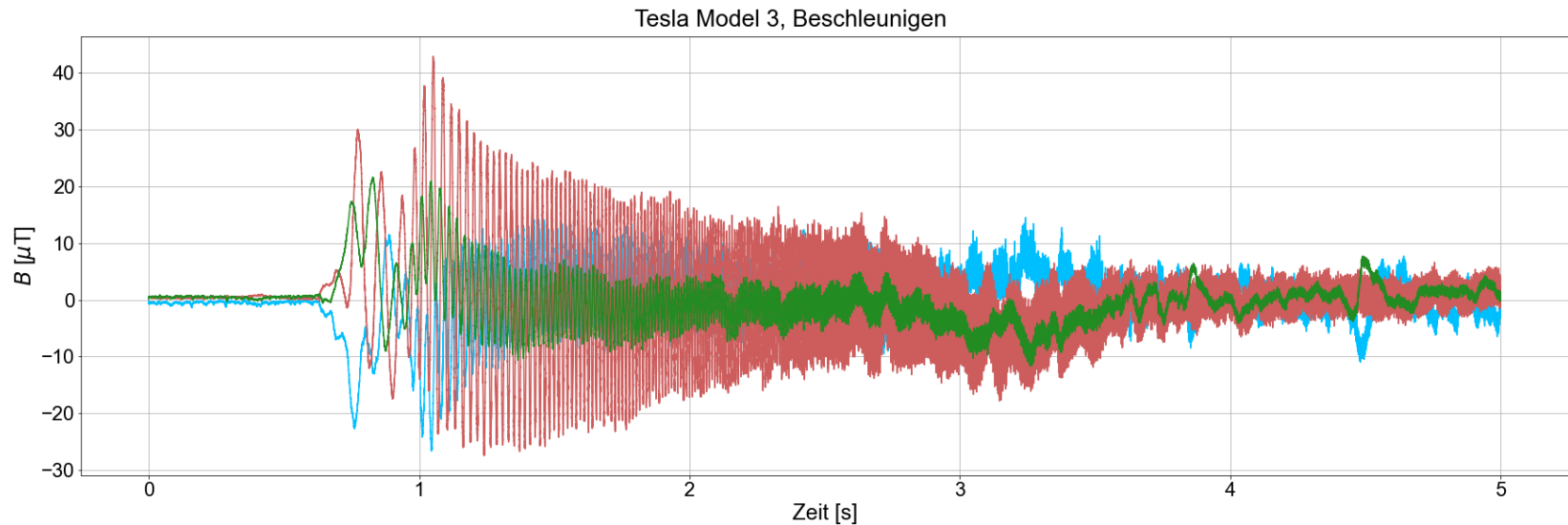
|                       |                             | Renault ZOE    | Tesla Model 3  | BMW i3 BEV     | VW ID.3        | Audi e-tron quattro | Peugeot e-208  | Porsche Taycan | Alfa Romeo U5  | Hyundai Ioniq 5 | Fiat 500e      | Opel Corsa Electric | Volkswagen Passat PHEV | Mercedes GLE 300 de PHEV | Opel Corsa (Verbr.motor) |
|-----------------------|-----------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|---------------------|------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                       |                             | Brems          | Beschl         | Brems          | Brems          | Beschl              | Brems          | Brems          | Brems          | Brems           | Beschl         | Brems               | Beschl                 | Beschl                   | Brems                    |
| B <sub>PEAK</sub>     | max. B <sub>PEAK</sub> [μT] | 15.2           | 35.0           | 74.6           | 23.7           | 36.8                | 16.4           | 69.3           | 40.3           | 22.6            | 20.3           | 40.9                | 11.6                   | 768                      | 35.0                     |
|                       | Sitzplatz                   | R <sub>L</sub> | R <sub>R</sub> | B              | R <sub>M</sub> | R <sub>M</sub>      | R <sub>R</sub> | B              | R <sub>L</sub> | B               | F              | F                   | F                      | F                        | F                        |
|                       | Position                    | F <sub>R</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub>      | U <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub>  | U <sub>L</sub> | F <sub>L</sub>      | F <sub>L</sub>         | F <sub>R</sub>           | F <sub>L</sub>           |
| ExInd <sub>1998</sub> | max. ExInd <sub>1998</sub>  | 0.91           | 0.63           | 0.30           | 0.19           | 1.23                | 1.27           | 3.20           | 0.51           | 0.11            | 0.66           | 2.82                | 0.36                   | 12.0                     | 1.09                     |
|                       | Sitzplatz                   | B              | B              | B              | F              | B                   | F              | B              | F              | F               | F              | F                   | F                      | F                        | F                        |
|                       | Position                    | F <sub>R</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>R</sub> | F <sub>R</sub> | U <sub>L</sub>      | F <sub>R</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub>  | F <sub>R</sub> | F <sub>L</sub>      | F <sub>L</sub>         | F <sub>L</sub>           | F <sub>L</sub>           |
| ExInd <sub>2010</sub> | max. ExInd <sub>2010</sub>  | 0.16           | 0.12           | 0.05           | 0.04           | 0.28                | 0.20           | 0.28           | 0.10           | 0.03            | 0.14           | 0.49                | 0.05                   | 2.18                     | 0.21                     |
|                       | Sitzplatz                   | B              | B              | R <sub>R</sub> | F              | B                   | F              | B              | F              | B               | F              | F                   | B                      | F                        | F                        |
|                       | Position                    | F <sub>R</sub> | F <sub>L</sub> | U <sub>L</sub> | F <sub>R</sub> | U <sub>L</sub>      | F <sub>R</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub> | F <sub>L</sub>  | F <sub>R</sub> | F <sub>L</sub>      | F <sub>L</sub>         | F <sub>L</sub>           | F <sub>L</sub>           |

Sitzplätze: F...Fahrerplatz, B...Beifahrerplatz, R<sub>L</sub>...Rückbank links, R<sub>M</sub>...Rückbank Mitte, R<sub>R</sub>...Rückbank rechts  
Position: F<sub>L</sub>...Fuß links, F<sub>R</sub>...Fuß rechts, U<sub>L</sub>...Unterschenkel links, U<sub>R</sub>...Unterschenkel rechts, O<sub>L</sub>...Oberschenkel links, O<sub>R</sub>...Oberschenkel rechts, UL...Unterleib, BR...Brust rechts

# Messergebnisse Zweispurige (4)

➤ **Beispiel:** Tesla Model 3, Beschleunigung, Beifahrersitz, linker Fuß

→  $\text{ExplInd}_{1998} = \mathbf{0.63}$ ,  $\text{ExplInd}_{2010} = \mathbf{0.12}$

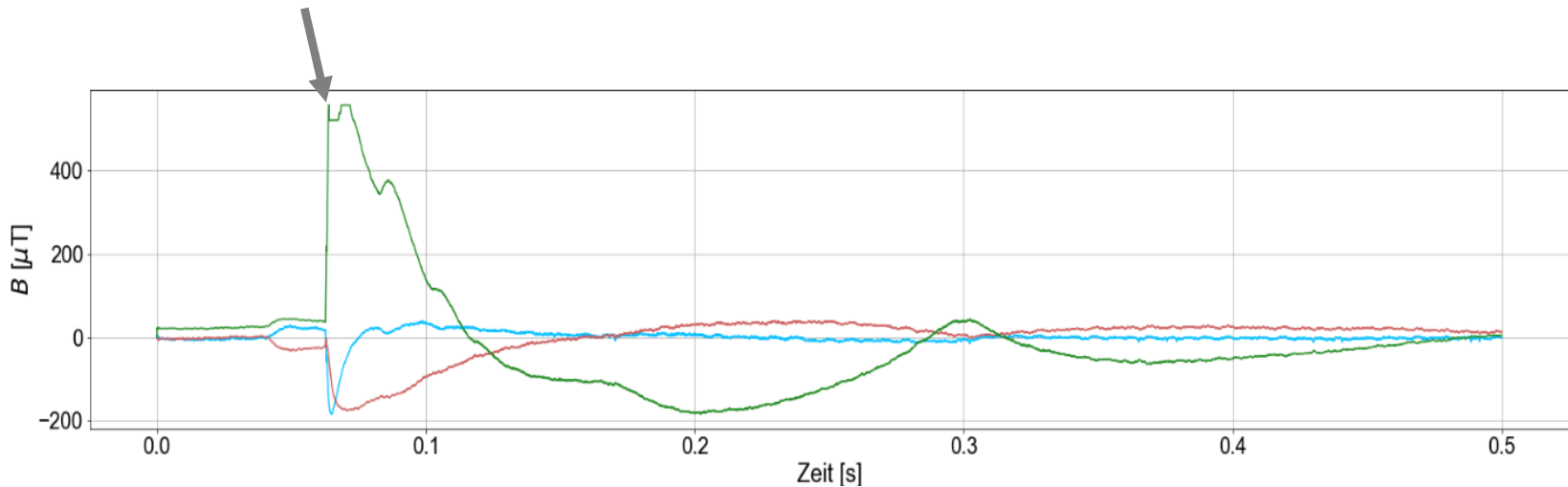


# Messergebnisse Zweispurige (5)

➤ **Beispiel:** Mercedes GLE 300 de PHEV, Beschleunigung, Fahrersitz, rechter Fuß

→  $\text{ExplInd}_{1998} = \mathbf{12.0}$ ,  $\text{ExplInd}_{2010} = \mathbf{2.18}$

Zuschalten des Verbrennungsmotors

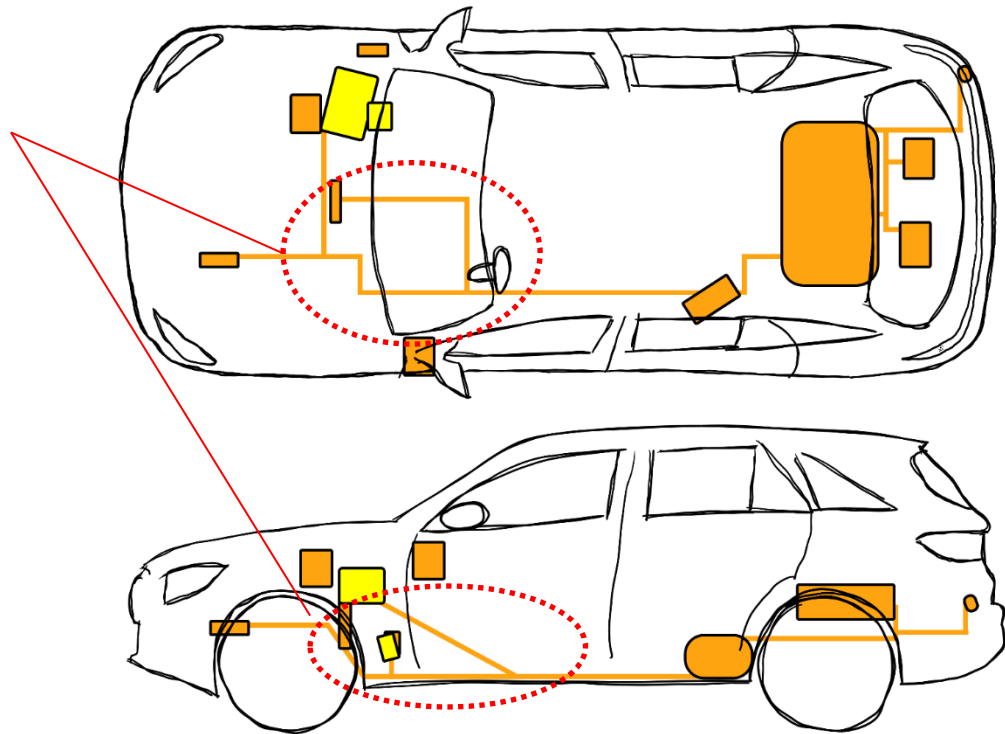


# Messergebnisse Zweispurige (6)

➤ **Beispiel:** Mercedes GLE 300 de PHEV, Beschleunigung, Fahrersitz, rechter Fuß

→  $\text{Explnd}_{1998} = 12.0$ ,  $\text{Explnd}_{2010} = 2.18$

→ **Möglicherweise  
ungünstiger Kabelverlauf**

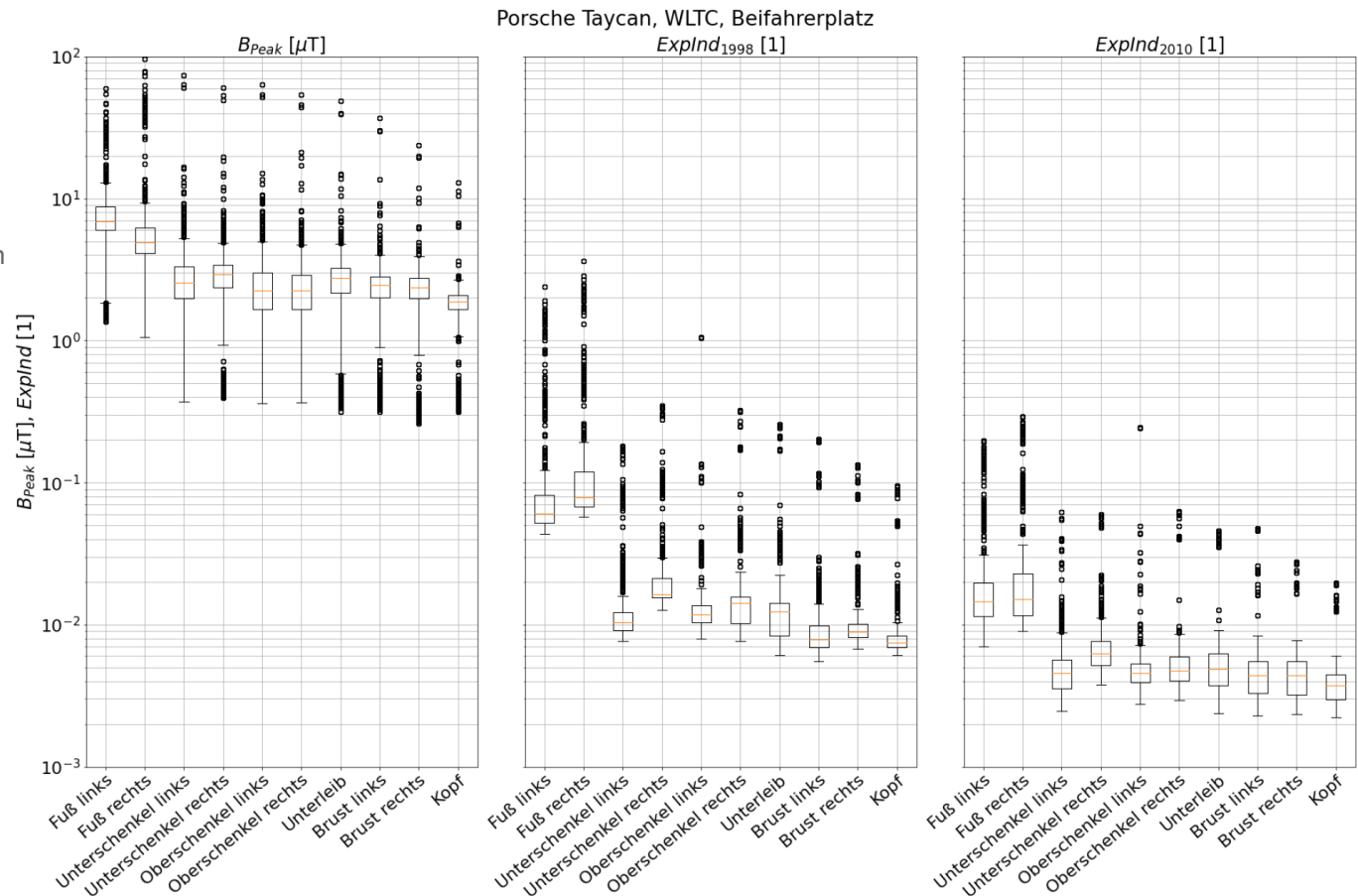


# Messergebnisse Zweispurige (7)

## ➤ Verteilung entlang des Körpers

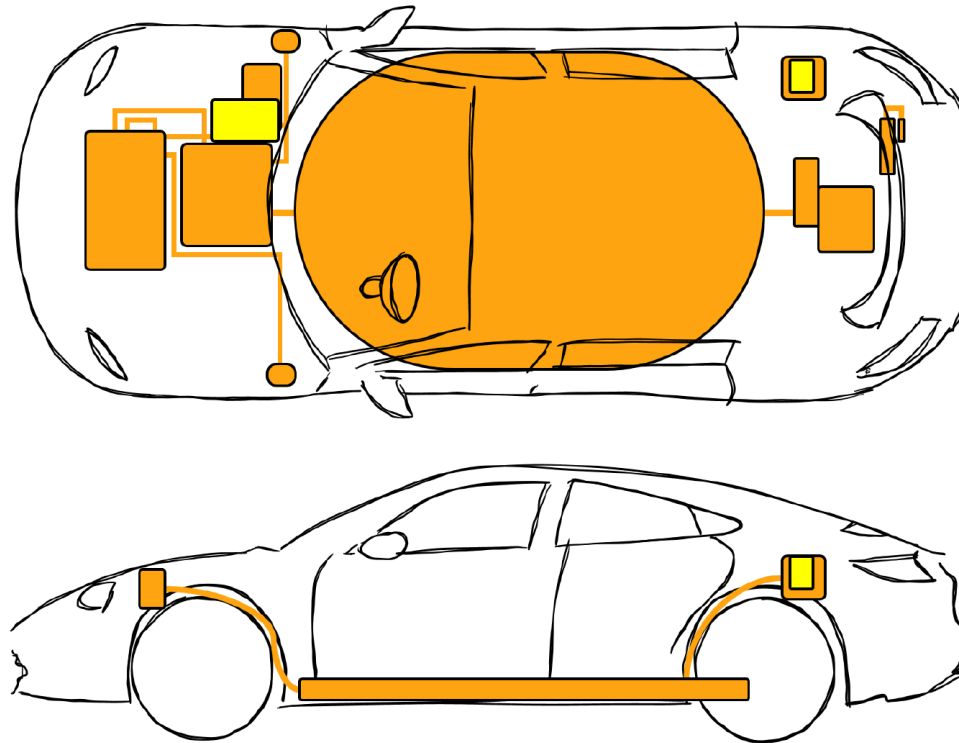
### Beispiel:

**Porsche Taycan,**  
Beifahrerplatz,  
während WLTC,  
ca. 30 min,  
ca. 1600 Einzelmessungen



# Messergebnisse Zweispurige (8)

## ➤ Näherungsweise Anordnung der elektrischen Komponenten im Porsche Taycan

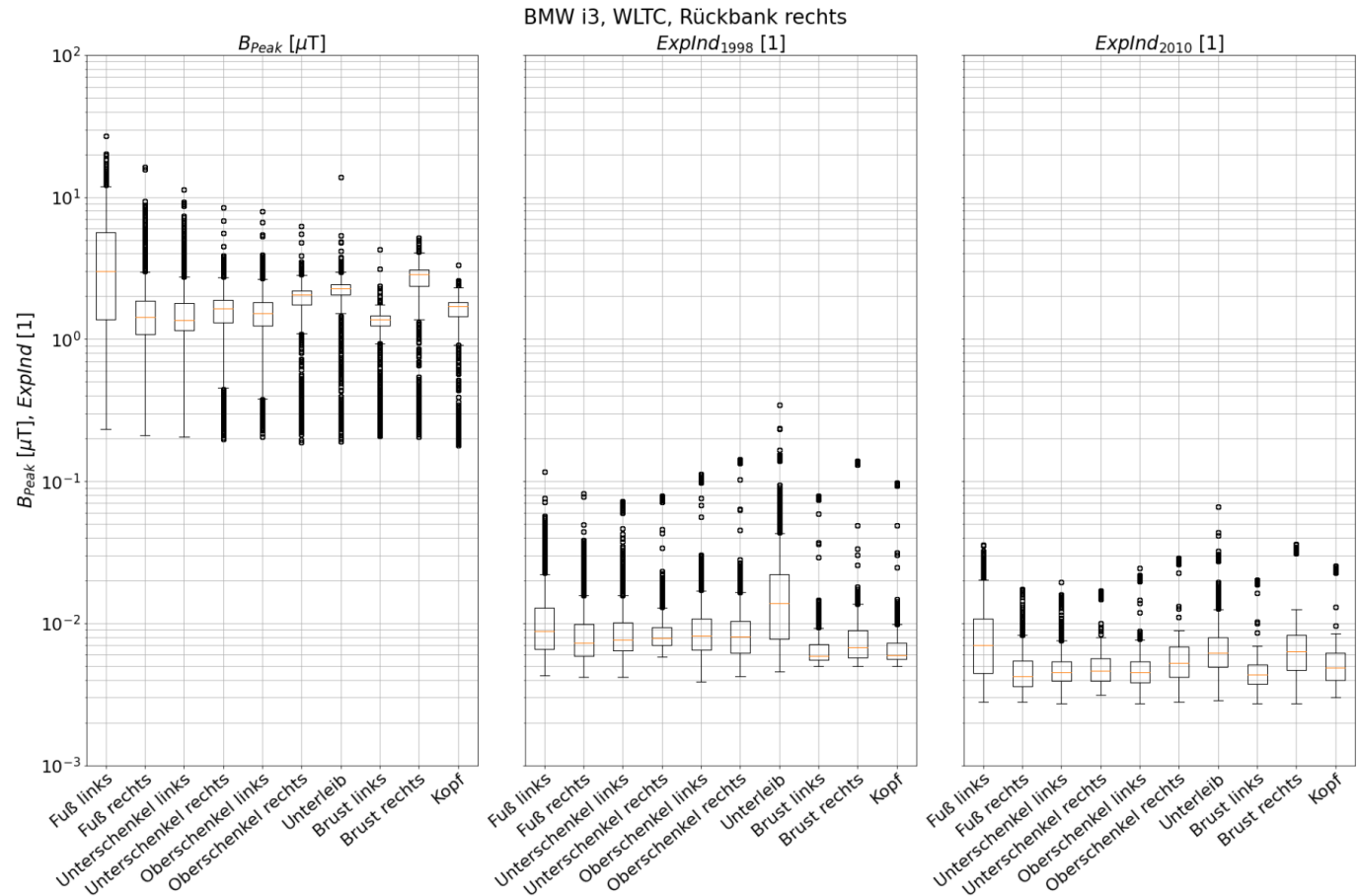


# Messergebnisse Zweispurige <sup>(9)</sup>

## ➤ Verteilung entlang des Körpers

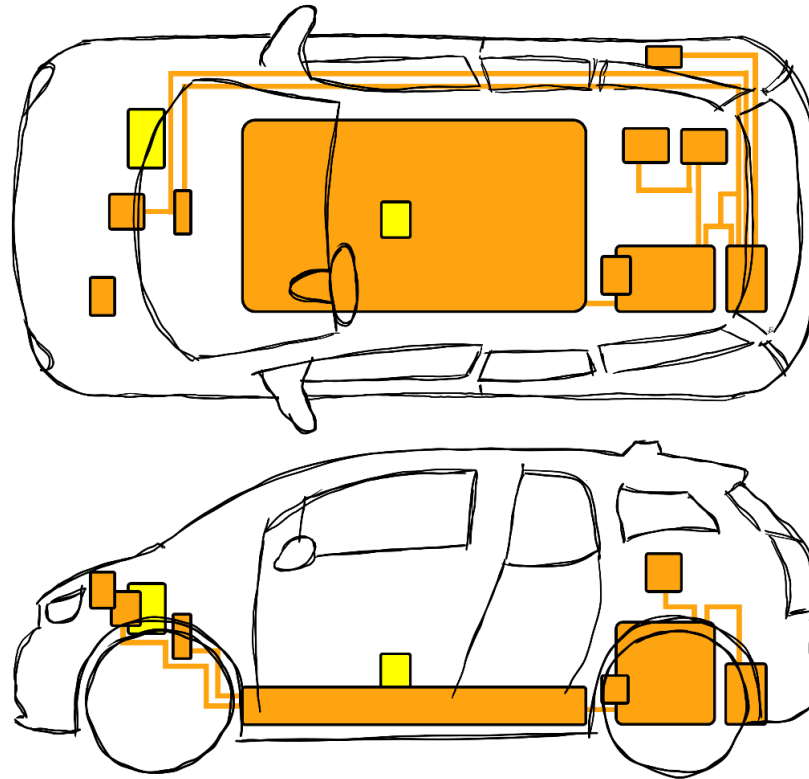
### Beispiel:

**BMW i3,**  
Rückbank links,  
während WLTC,  
ca. 30 min,  
ca. 1600 Einzelmessungen



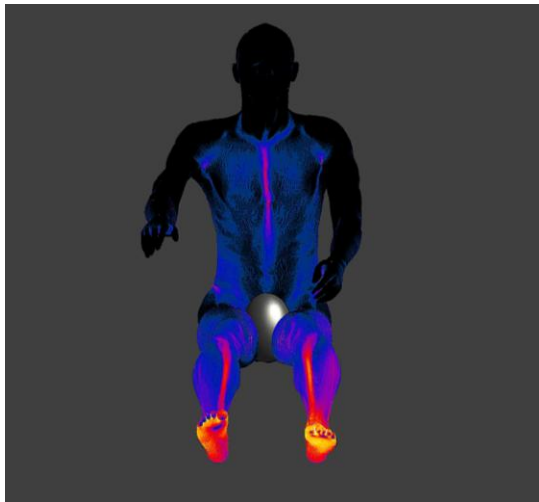
# Messergebnisse Zweispurige (10)

## ➤ Näherungsweise Anordnung der elektrischen Komponenten im BMW i3



# Messergebnisse Zweispurige (11)

- **Referenzwerte** für die magnetische Flussdichte werden lokal teilweise durch **transiente** Vorgänge **deutlich überschritten!**
- Bewertung im Hinblick auf die Basisgrenzwerte (im Körper induzierte elektrische Feldstärke  $E_i$  bzw. Stromdichte  $J$ ) erforderlich
- Numerische Berechnungen mit anatomischen Körpermodellen
  - **Porsche Taycan** (Beifahrer, linker Fuß:  $\text{Explnd}_{1998}$  **3.2** bezüglich Referenzwerte für B)
  - **Mercedes GLE 300 PHEV** (Fahrer, linker Fuß:  $\text{Explnd}_{1998}$  **12.0** bezüglich Referenzwerte für B)



## Porsche Taycan

|      | Expositionsindizes für $E_{i, \text{ICNIRP 2010, GP}}$ |                             |                            |                            |
|------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|      | $E_{i, \text{avg, max}}$                               | $E_{i, \text{avg, p99.99}}$ | $E_{i, \text{avg, p99.9}}$ | $E_{i, \text{avg, p99.0}}$ |
| Duke | 0.038 - 0.045                                          | 0.029 - 0.031               | 0.020 - 0.024              | 0.008 - 0.016              |
| Ella | 0.030 - 0.046                                          | 0.024 - 0.032               | 0.017 - 0.023              | 0.008 - 0.015              |



## Mercedes GLE 300 PHEV

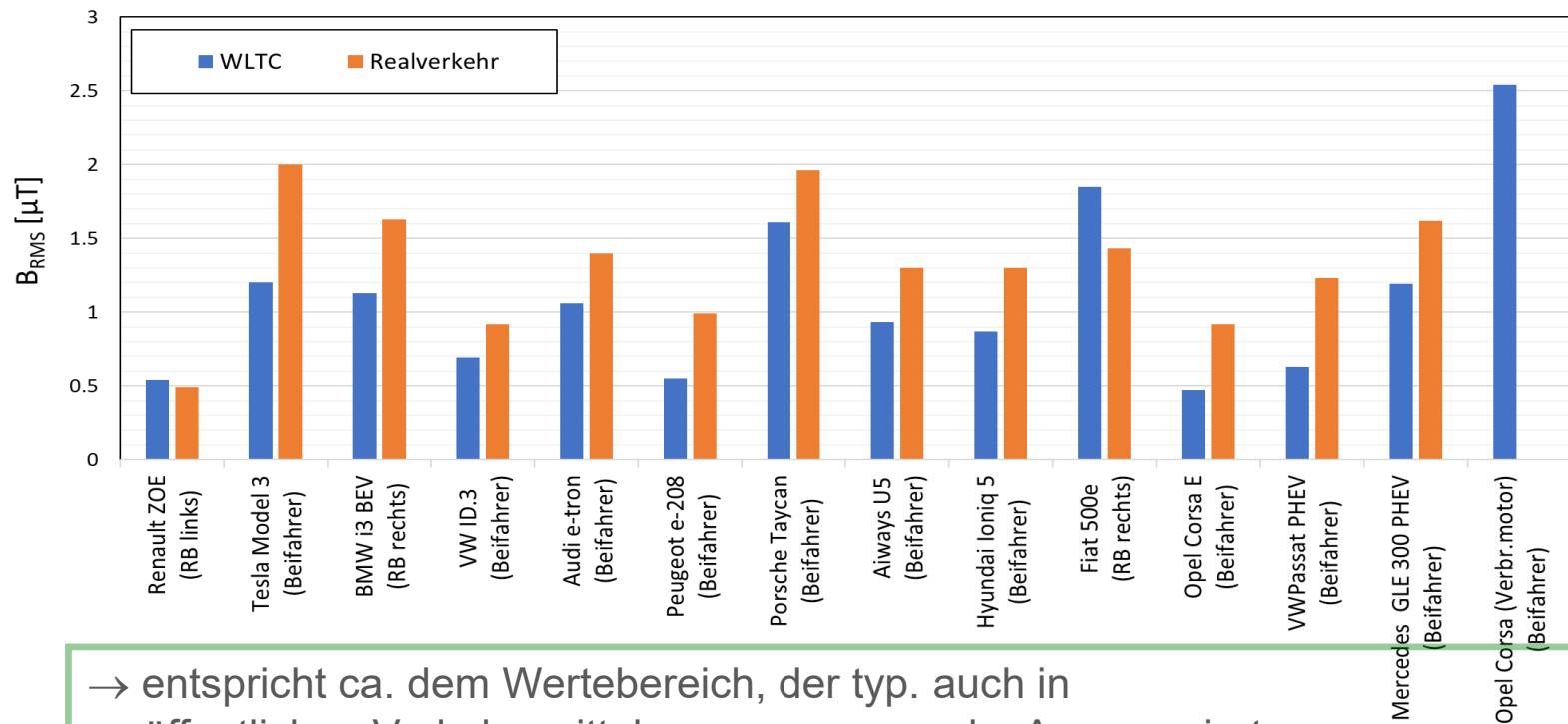
|      | Expositionsindizes für $E_{i, \text{ICNIRP 2010, GP}}$ |                             |                            |                            |
|------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|      | $E_{i, \text{avg, max}}$                               | $E_{i, \text{avg, p99.99}}$ | $E_{i, \text{avg, p99.9}}$ | $E_{i, \text{avg, p99.0}}$ |
| Duke | 0.416                                                  | 0.308                       | 0.222                      | 0.150                      |
| Ella | 0.369                                                  | 0.276                       | 0.197                      | 0.131                      |



→  **$\text{Explnd}$  bezüglich  $E_i < 1$ , d.h. Basisgrenzwerte eingehalten!**

# Messergebnisse Zweispurige (12)

- **Langzeit-Effektivwerte ( $B_{RMS}$ ), gemittelt über den gesamten Körper während WLTC und Fahrt im Realverkehr**



→ entspricht ca. dem Wertebereich, der typ. auch in öffentlichen Verkehrsmitteln gemessen wurde. An exponierten Plätzen teilweise sogar höher (z.B. Stehplatz oben im Doppelstockwaggon)

# Zusammenfassung (1)

- **Lokal und kurzzeitig** lagen die gemessenen Magnetfelder teilweise deutlich oberhalb der ICNIRP-Referenzwerte.
- Jedoch **keine Überschreitungen** der **Basisgrenzwerte** feststellbar
- Große Streubreiten über untersuchte Fahrzeuge, sowohl hinsichtlich lokalem Expositionsmaximum und räumlicher Verteilung der Magnetfeldimmissionen
- Die verbaute elektrische Antriebsleistung ist kein zuverlässiger Prädiktor für die resultierenden maximalen Expositionsindizes. Vielmehr spielen der konkrete Fahrzeugaufbau (Lage der stromführenden Komponenten) und die auftretenden Strom-Signalformen eine entscheidende Rolle.
- Nicht-antriebsassoziierte Magnetfeldquellen können ebenfalls kurzzeitig (z.B. beim Einschalten des Fahrzeugs) zu hohen lokalen Expositionsindizes führen, die sogar größer als jene durch Antriebskomponenten verursachte sein können (gilt auch für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor).

# Zusammenfassung (2)

- Dauerhaft vergleichsweise hohe Expositionsindizes im Unterleibs- und Rückenbereich können durch ungünstige Sitzheizungssysteme (mit steifflankigen Schaltreglern) auftreten (gilt auch für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor).
- Langzeit- und über Körperdimensionen gemittelte Magnetfeldimmissionen in den Fahrzeugen liegen in der gleichen Größenordnung, wie sie auch in öffentlichen Verkehrsmitteln mit elektrischen Antriebssystemen (Bahn, Tram, U-Bahn) anzutreffen sind.
- Magnetfeldexposition während des Ladens (in dieser Präsentation nicht im Detail diskutiert) typ. weniger relevant als während des Fahrens.
- Keine Hinweise auf Gefährdung von Personen mit Implantaten.

## Auftraggeber

Bundesamt für Strahlenschutz (BfS)



Bundesamt  
für Strahlenschutz

## Publikation der Projektberichte

- Ergebnisbericht Teil 1 (Fahren): <https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2025031250843>
- Ergebnisbericht Teil 2 (Laden): <https://doris.bfs.de/jspui/handle/urn:nbn:de:0221-2025112157059>

## ADAC Video-Blogs

- Teil 1 (Fahren): [https://www.youtube.com/watch?v=FH\\_Fdcpj2yM](https://www.youtube.com/watch?v=FH_Fdcpj2yM)
- Teil 2 (Laden): <https://www.youtube.com/watch?v=rRfzSNpyvx4>

# Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

**Kontakt:**

DI. Gernot Schmid, PhD

Fachbereich Elektromagnetische Verträglichkeit

**Seibersdorf Laboratories**

[gernot.schmid@seibersdorf-laboratories.at](mailto:gernot.schmid@seibersdorf-laboratories.at)