

EMV- und Systemuntersuchungen eines bidirektionalen drahtlosen induktiven Energieübertragungssystems für Elektrofahrzeuge

PD Dr.-Ing. habil. René Marklein, Dipl.-Ing. Jörg Kirchhof, Miao Wang, M.Sc., Mohammad Zaisan Rahen, M.Sc., Fraunhofer-Institut für Energiewirtschaft und Energiesysteme IEE, Bereich Anlagentechnik und Verteilungsnetze, Königstor 59, 34119 Kassel

1 Einleitung

Die bidirektionale drahtlose induktive Energieübertragung für Elektrofahrzeuge stellt eine komfortable Alternative zur kabelgebundenen Variante dar (siehe Bild 1). Die für das Aufladen der Fahrzeugbatterie benötigte elektrische Energie wird dabei über einen Luftspalt von bis zu ca. 20 cm von einem primären Spulensystem an ein sekundäres Spulensystem übertragen (siehe Bild 2). Durch die elektromagnetische Energieübertragung über diesen Luftspalt kommt es zur Ausbildung eines elektromagnetischen Streufeldes, welches die gültigen EMV- und EMVU-Grenzwerte nicht überschreiten darf. Ebenso beeinflussen die Fahrzeugkarosserie und die Bodenbeschaffenheit das elektromagnetische Streufeld und die Systemeigenschaften des drahtlosen induktiven Energieübertragungssystems.

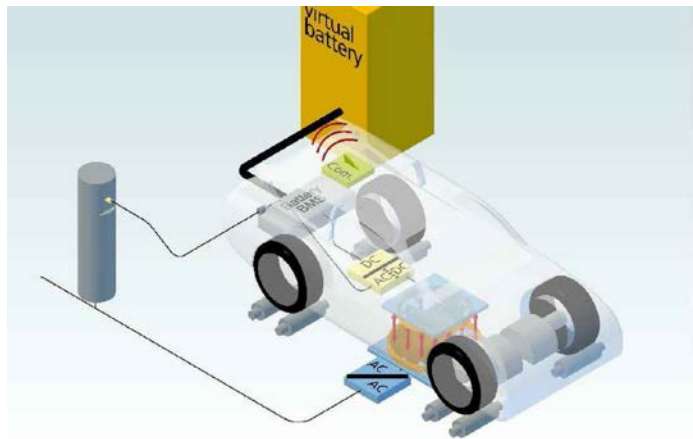


Bild 1: Kabelgebundene und bidirektionale drahtlose induktive Energieübertragung für Elektrofahrzeuge

Dieser Beitrag knüpft an die Arbeiten in [1] an und betrachtet die folgenden EMV- und Systemuntersuchungen anhand von Messungen und numerischen Modellierungen:

- Einflüsse unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten (Betonboden bzw. Betonboden mit Aluminium- oder Stahlplatten) auf die System- und EMV-Eigenschaften des drahtlosen, resonant induktiven Energieübertragungssystems (Kopplfaktor, Maximalfeldstärken, räumliche Feldverteilungen und Wirkungsgrad)

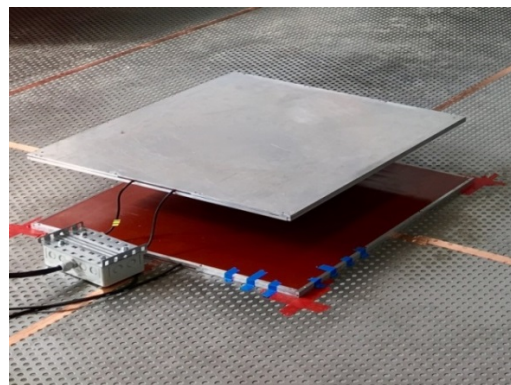


Bild 2: Kabellose induktive Energieübertragungseinheit bestehend aus einem primären Spulensystem und einem sekundären Spulensystem. Zwischen dem unteren und oberen Doppel-D-Spulensystem befindet sich ein Luftspalt von bis zu 20 cm.

- Beeinflussung der System- und EMV-Eigenschaften des drahtlosen Energieübertragungssystems durch die Fahrzeugkarosserie
- Auswirkungen einer Fehlpositionierung des Spulenpaares, d.h. eines horizontalen Versatzes zwischen dem primären Spulensystem und dem sekundären Spulensystem in x- oder y- oder in x- und y-Richtung [2], also diagonal.

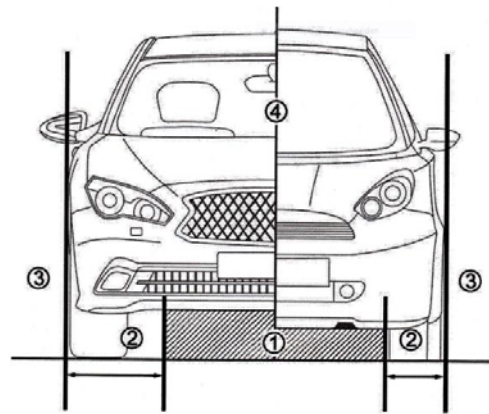


Bild 3: Schutzbereiche gemäß der IEC 61980-1 [2]. Schutzbereich 1: Betriebsbereich (Umriss des WPT-Systems aus Primär- und Sekundärspulensystem); Schutzbereich 2: Übergangsbereich (1 zu 3); Schutzbereich 3: Öffentlicher Bereich; Schutzbereich 4: Fahrzeuginnenraum

Bild 3 zeigt die unterschiedlichen räumlichen Schutzbereiche bei der drahtlosen Energieübertragung – Wireless Power Transfer (WPT) – gemäß der IEC 61980-1 [2]. In Tabelle 1 sind Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder (ungestörte Effektivwerte) aufgeführt (siehe auch [3]).

ICNIRP 1998 [4], EU 1999 [5]				ICNIRP 2010 [6], 26. BImSchV [7]			
Frequenzbereich	E in V/m	H in A/m	B in μT	Frequenzbereich	E in V/m	H in A/m	B in μT
800 Hz - 150 kHz	87	5	6,25	3 kHz - 10 MHz	83	21	27

Tabelle 1: Referenzwerte für elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder, ungestörte Effektivwerte.

2 Messungen und numerische Modellierungen

Es wurden Messungen und numerische Modellierungen zu den EMV- und Systemeigenschaften eines bidirektionalen drahtlosen induktiven Energieübertragungssystems der Leistungsklasse 3,6 kW [8] durchgeführt. Das System ist für einen Frequenzbereich von 130 bis 140 kHz ausgelegt. Dabei wurden die folgenden Fragestellungen betrachtet:

- Einflüsse unterschiedlicher Bodenbeschaffenheiten
 - Aluminiumplattenboden
 - Stahlplattenboden
 - Betonboden

auf die EMV- und Systemeigenschaften des drahtlosen induktiven Energieübertragungssystems

- Koppelfaktor und Wirkungsgrad
- räumliche Verteilung des elektrischen und magnetischen Feldes
- Maximalfeldstärken und maximale magnetische Flussdichte
- Einflüsse der Fahrzeugkarosserie, am Beispiel des Testfahrzeugs Mercedes-Benz Vito der Baureihe W 638 (siehe Bild 4, links), der am Fraunhofer IEE als Demonstrator für die bidirektionale drahtlose induktive Energieübertragung eingesetzt wird [8].

- Einflüsse einer horizontalen Fehlpositionierung des sekundären Spulensystems relativ zum primären Spulensystem (siehe z.B. Bild 7)

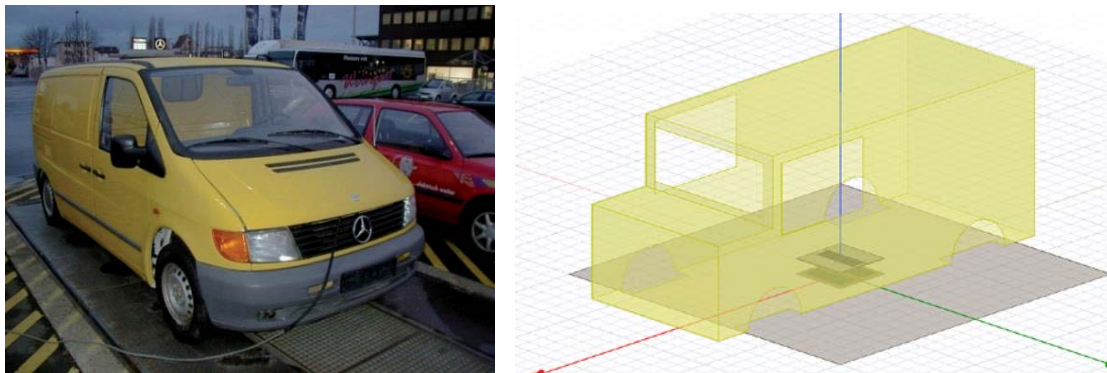


Bild 4: Links, Testfahrzeug Mercedes-Benz Vito, Rechts, 3D-Geometriemodell der Karosserie des Mercedes-Benz Vito mit drahtlosem induktivem Energieübertragungssystem (in der Mitte) und der Betonbodenbereich (grauer Bereich) der wahlweise mit Aluminium- oder Stahlplatten bedeckt wird.

Zur automatisierten Vermessung der elektromagnetischen Felder wurde der Funktionsumfang des Messplatzes und der Messsoftware, der bereits in [1] vorgestellt wurde, erweitert [9]. Das elektrische und magnetische Feld kann damit mit Hilfe einer Feldsonde, z.B. Narda EHP-200A [10], in einer Ebene parallel zur Fahrzeugkarosserie normgerecht im Abstand von 20 cm entlang eines vordefinierten Scanpfades vermessen werden (siehe Bild 5).



Bild 5: Links, Messanordnung gemäß der IEC 61980-1 [2]; Feldscanner mit Feldsonde und Boden mit Stahlplatten ausgelegt: Mitte, mit Testfahrzeug und rechts, ohne Testfahrzeug

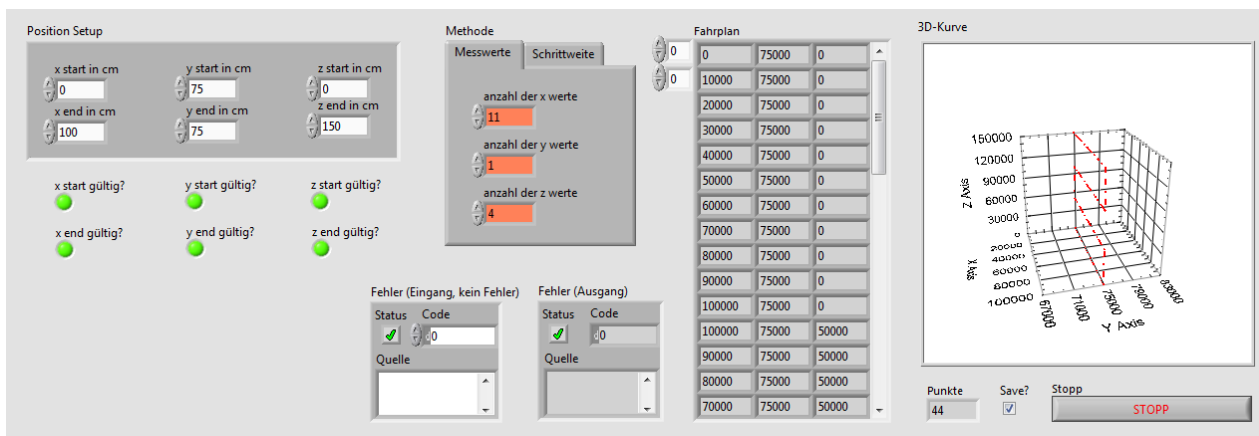


Bild 6: Messsoftware zur Eingabe des dreidimensionalen Scanpfades

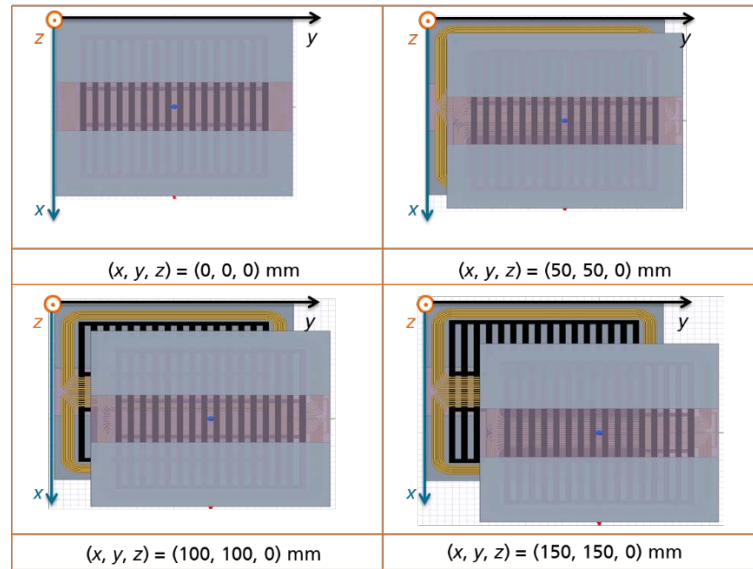
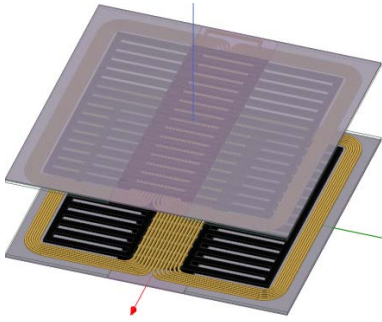


Bild 7: Oben, 3D-Ansicht des Doppel-D-Spulenpaares für die 3D-Modellierung. Rechts, diagonale horizontale Verschiebung des sekundären Spulensystems in der xy -Ebene relativ zum primären Spulensystem bei einem konstanten Abstand beider Spulensysteme in z -Richtung.

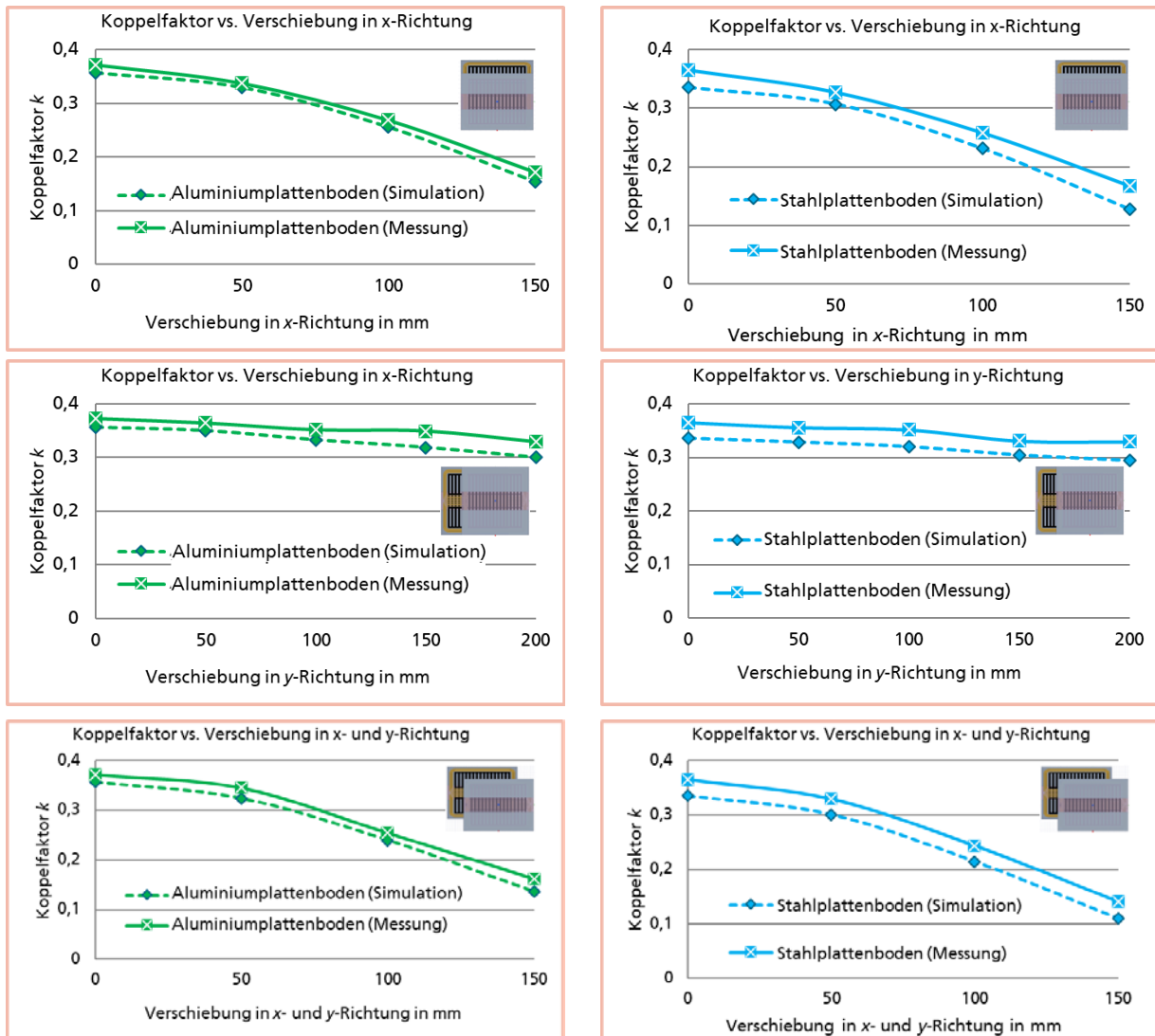


Bild 8: Vergleich zwischen dem messtechnisch ermittelten und numerisch berechneten Koppelfaktor k : in der linken Spalte für einen Aluminiumplattenboden und in der rechten Spalte für einen Stahlplattenboden. Von oben nach unten: für eine horizontale Verschiebung (Fehlpositionierung) in x -Richtung, für eine horizontale Verschiebung (Fehlpositionierung) in y -Richtung und für eine horizontale diagonale Verschiebung

(Fehlpositionierung) in xy-Richtung.

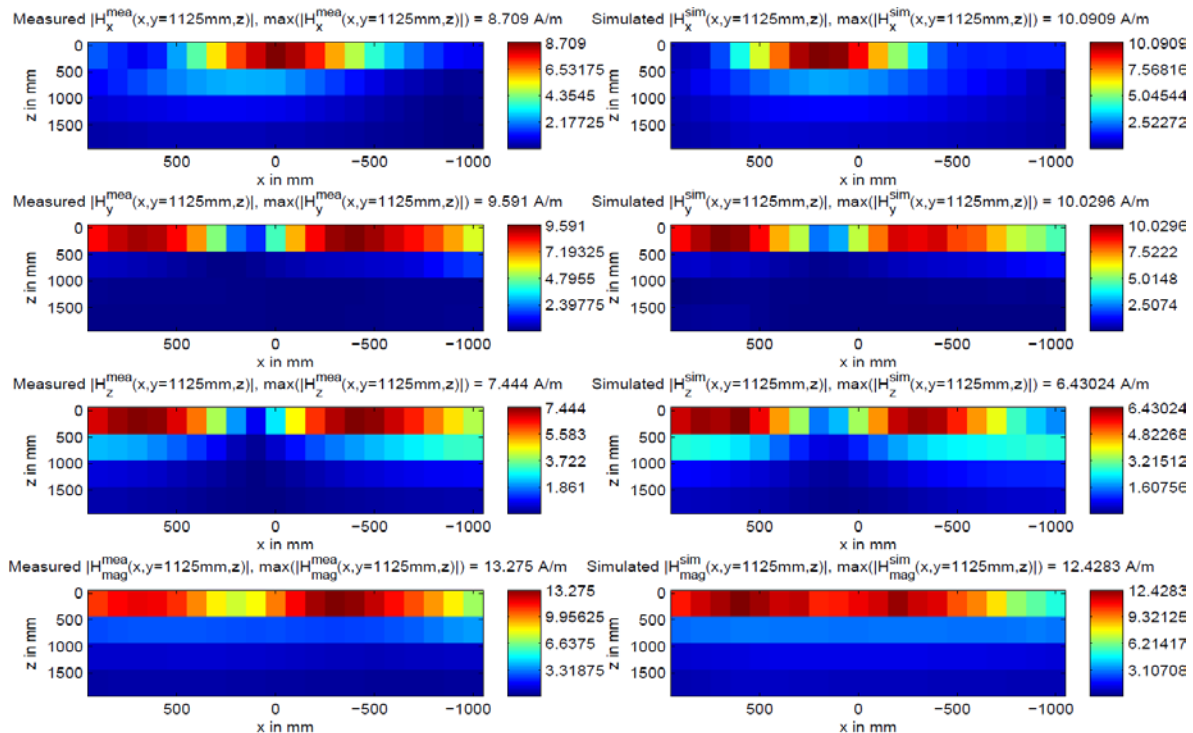


Bild 9: Vergleich zwischen der gemessenen (linke Spalte) und numerisch simulierten zweidimensionalen magnetischen Feldstärkeverteilung (rechte Spalte) für das Testfahrzeug Mercedes-Benz Vito mit einem drahtlosen induktiven Energieübertragungssystem und einem Bodenbelag aus Aluminiumplatten sowie für eine diagonale horizontale Verschiebung (Fehlpositionierung) zwischen der primären und sekundären Spuleneinheit $(x,y,z) = (150,150,0)$ mm.

Exemplarisch für die messtechnische und numerische Bestimmung von Systemparametern für drahtlose induktive Energieübertragungssysteme zeigt Bild 8 einen Vergleich für den messtechnisch ermittelten und numerisch berechneten Koppelfaktor k . In der linken Spalte sind die Ergebnisse für einen Aluminiumplattenboden und in der rechten Spalte sind die Resultate für einen Stahlplattenboden dargestellt. Man erkennt eine gute Übereinstimmung der Kurvenverläufe für die drei betrachteten Fälle: oben für eine horizontale Verschiebung (Fehlpositionierung) in x-Richtung, in der Mitte für eine horizontale Verschiebung (Fehlpositionierung) in y-Richtung und unten für eine horizontale diagonale Verschiebung (Fehlpositionierung) in xy-Richtung. Ebenso zeigen die Kurvenverläufe des Koppelfaktors, dass das Doppel-D-Spulensystem gegen eine Fehlpositionierung in y-Richtung unempfindlicher ist als gegen eine Fehlpositionierung in x-Richtung. Weiterhin erkennt man eine gute Übereinstimmung zwischen Messungen und numerischen Modellierungen. Bild 9 zeigt beispielhaft einen Vergleich zwischen der gemessenen magnetischen Feldstärkeverteilung (linke Spalte) und der numerisch simulierten zweidimensionalen magnetischen Feldstärkeverteilung (rechte Spalte). Hier für das Testfahrzeug Mercedes-Benz Vito mit einem drahtlosen induktiven Energieübertragungssystem und einem Bodenbelag aus Aluminiumplatten. Weiterhin liegt hier eine diagonale horizontale Verschiebung (Fehlpositionierung) zwischen der primären und sekundären Spuleneinheit von $(x,y,z) = (150,150,0)$ mm vor. Man erkennt eine gute Übereinstimmung der Feldverläufe in den einzelnen kartesischen Komponenten als auch im Betragsverlauf der magnetischen Feldstärke. Ebenso stimmen die Maximalamplituden bis auf geringe Abweichungen gut überein.

Details zu den Messungen und numerischen Modellierungen sowie weitere Ergebnisse findet man in [9] und [11].

3 Numerische Modellierungen mit menschlichem Körpermodell

Bild 10 zeigt die 3D-Geometrie für die numerischen Modellierungen mit menschlichem Körpermodell. Die dielektrischen Parameter der unterschiedlichen Gewebearten und Körperflüssigkeiten, die für die numerischen Modellierungen verwendet wurden, sind in Tabelle 2 für eine Frequenz von 140 kHz zusammengestellt. Numerische Modellierungsergebnisse für einen mit Aluminiumplatten belegten Boden sind in Bild 11 und für einen mit Stahlplatten belegten Boden in Bild 12 gezeigt. Und zwar jeweils für zwei Fälle: links für den Fall ideal positionierter Spulenanordnungen und rechts für den Fall einer diagonalen horizontalen Verschiebung zwischen dem primären und sekundären Spulensystem um $(x,y,z) = (150,150,0)$ mm. Für das modellierte 3,6-kW-System und den Stahlplattenboden als auch Aluminiumplattenboden wird bei einer diagonalen horizontalen Verschiebung (Fehlpositionierung) beider Spulensysteme um jeweils 150 mm in x- und y-Richtung der Referenzwert nach der ICNIRP 1998 [4] (siehe Tabelle 1) überschritten, jedoch wird der aktuelle Referenzwert nach der ICNIRP 2010 [6] (siehe Tabelle 1) in allen Fällen eingehalten. Die numerischen Modellierungen in 3D wurden mit der ANSYS Electromagnetics Suite durchgeführt [12].

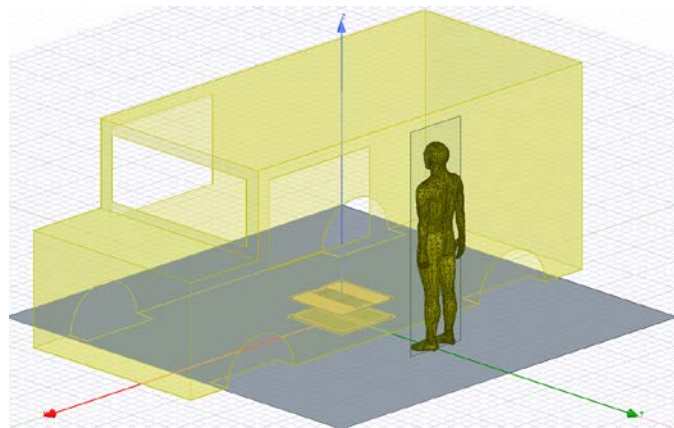


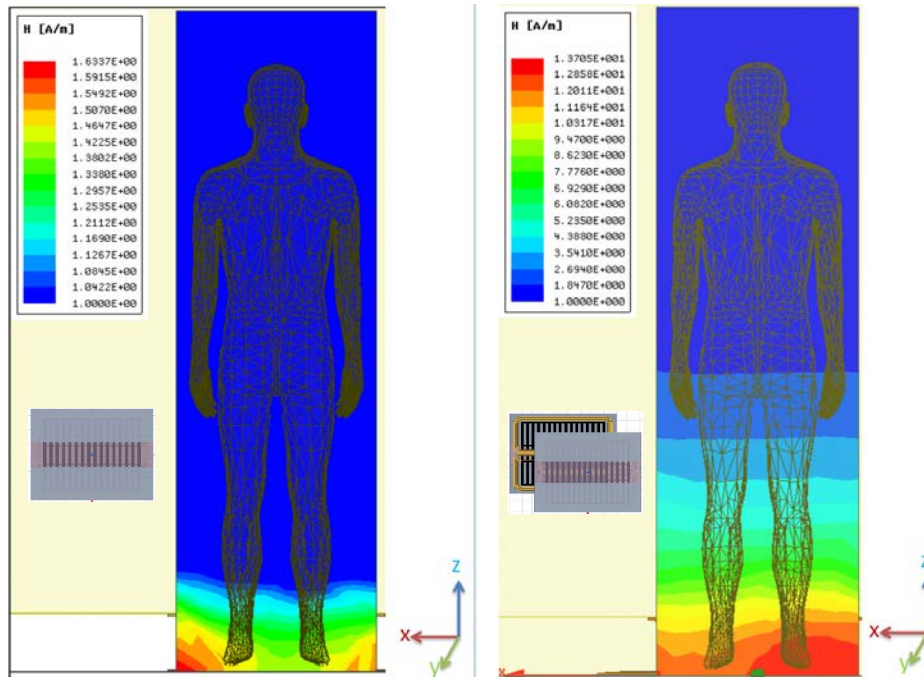
Bild 10: 3D-Geometrie für die numerischen Modellierungen mit menschlichem Körpermodell

Tabelle 2: Relative Permittivität und elektrische Leitfähigkeit für verschiedenen Gewebearten und Körperflüssigkeiten bei einer Frequenz von 140 kHz [13]

Gewebe oder Körperflüssigkeiten	relative Permittivität ϵ_r	elektrische Leitfähigkeit σ_e in S/m
Muskel	7280	0,37
Blut	5050	0,705
Nerven	3850	0,0863
Herzmuskel	7700	0,226
Haut	1110	0,000656

Zusammenfassung

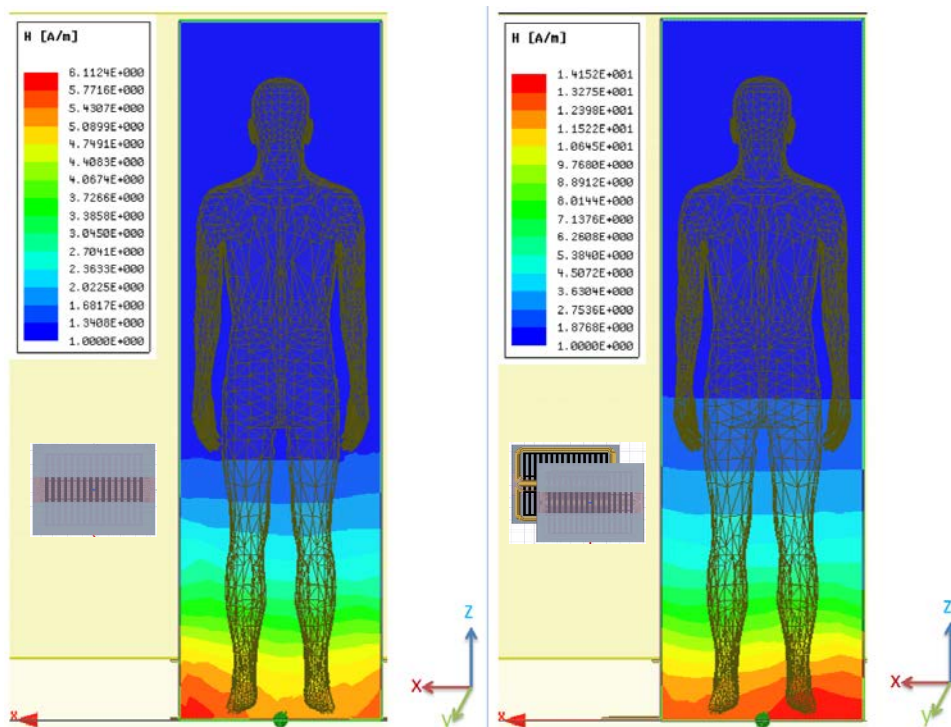
In diesem Beitrag werden EMV- und Systemuntersuchungen für ein bidirektionales drahtloses induktives Energieübertragungssystem für Elektrofahrzeuge sowie exemplarische Ergebnisse aus Messungen und numerischen Modellierungen präsentiert. Unter anderem werden die Einflüsse verschiedener Bodenbeschaffenheiten unter Einbezug der Fahrzeugkarosserie auf das elektromagnetische Streufeld und die Systemeigenschaften des Energieübertragungssystems untersucht. Es werden gute Übereinstimmungen zwischen den durchgeführten Messungen und numerischen Modellierungen erzielt. Mit dem weiterentwickelten Messplatz inkl. Messsoftware und den numerischen Modellierungstools stehen leistungsfähige Werkzeuge sowie das notwendige Know-how zur Charakterisierung von drahtlosen induktiven Energieübertragungssystemen zur Verfügung.



\vec{H} -Feldverteilung für ideal ausgerichtete Spulen mit $(x,y,z) = (0,0,0)$ mm. $|\vec{H}|_{\max} = 1,63$ A/m, $|\vec{H}|_{\text{Fuß}} = 1,54$ A/m

\vec{H} -Feldverteilung für einen diagonalen Offset mit $(x,y,z) = (150,150,0)$ mm. $|\vec{H}|_{\max} = |\vec{H}|_{\text{Fuß}} = 13,7$ A/m

Bild 11: Feldverteilung der magnetischen Feldstärke für einen mit Aluminiumplatten belegten Boden. Links, bei optimaler Positionierung und rechts, bei einer Fehlpositionierung mit $(x,y,z) = (150,150,0)$ mm



\vec{H} -Feldverteilung für ideal ausgerichtete Spulen mit $(x,y,z) = (0,0,0)$ mm. $|\vec{H}|_{\max} = 6,11$ A/m, $|\vec{H}|_{\text{Fuß}} = 5,43$ A/m

\vec{H} -Feldverteilung für einen diagonalen Offset mit $(x,y,z) = (150,150,0)$ mm. $|\vec{H}|_{\max} = |\vec{H}|_{\text{Fuß}} = 14,15$ A/m

Bild 12: Feldverteilung der magnetischen Feldstärke für einen mit Stahlplatten belegten Boden. Links, bei optimaler Positionierung und rechts, bei einer Fehlpositionierung mit $(x,y,z) = (150,150,0)$ mm

Literaturangaben

- [1] J. Kirchhof, O. Strecker, R. Marklein, M. Jung, L. Georgios, M. Wang und M. Z. Rahen, „Automatisierte Messung von räumlichen Streufeldern beim induktiven Laden,“ in *EMV 2016 Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, H. Garbe, Hrsg., Aachen, Apprimus Verlag, 2016, pp. 429-436.
- [2] *IEC 61980-1, Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements*, Genf: IEC International Electrotechnical Commission, 2015.
- [3] EMF-Portal, „Referenzwerte,“ RWTH Aachen, [Online]. Available: <https://www.emf-portal.org/de/cms/page/limits-reference-levels>. [Zugriff am 3 November 2017].
- [4] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)," *Health Physics*, vol. 74, no. 4, p. 494-522, 1998.
- [5] 1999/519/EG, „Empfehlung des Rates vom 12. Juli 1999 zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz — 300 GHz),“ Bd. L 199, pp. 59-70, 1999.
- [6] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, "Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz)," *Health Physics*, vol. 99, no. 6, pp. 818-836, 2010.
- [7] „26. Verordnung zur Durchführung des Bundesimmissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV),“ *BGBI. I* S. 3266, pp. 3266-3272, 14. August 2013.
- [8] M. Jung, A. Seibel, J. Steffens, G. Lempidis, R. Gaber and R. Marklein, "Multimode Charging of Electric Vehicles," in *PCIM Europe 2016, 10–12 May 2016; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, Nuremberg, Germany, 2016.
- [9] M. Wang, *Investigation of the Electromagnetic Compatibility Properties of Inductive Charging System for Electric Vehicles*, Kassel: University of Kassel, Department of Electrical Engineering and Computer Science and Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES, Master Thesis, 2017, p. 95.
- [10] NARDA Safety Test Solutions S.r.l. Socio Unico, "User's Manual: EHP-200, EHP-200A - ELECTRIC AND MAGNETIC FIELD PROBE ANALYZER - From 9 kHz up to 30 MHz," 2009. [Online]. Available: <http://www.gruppompb.com/public>. [Accessed 5. Dezember 2017].
- [11] M. Z. Rahen, *Evaluation of Electromagnetic Exposure on Human Body for a Bidirectional Wireless Electric*, Kassel: University of Kassel, Department of Electrical Engineering and Computer Science and Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES, Master Thesis, 2017, p. 77.
- [12] ANSYS Inc., *ANSYS Electromagnetics Suite 18.0*, Southpointe, 2600 ANSYS Drive, Canonsburg, PA 15317, USA, 2017.
- [13] IT'IS Foundation, „Tissue Properties: Dielectric Properties,“ [Online]. Available: <https://www.itis.ethz.ch/virtual-population/tissue-properties/database/dielectric-properties/>. [Zugriff am 2 August 2017].