

Simulationsbasierte Untersuchung der Einflussfaktoren auf die magnetischen Streufelder bei induktiven Ladesystemen von Elektrofahrzeugen

B. Willmann (M.Sc.), Dipl.-Ing. O. Sassi, VOLKSWAGEN AG, EEIZ (EMV-Zentrum), Wolfsburg, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. R. Vick, Otto-von-Guericke-Universität, Lehrstuhl für EMV, Magdeburg, Deutschland

1 Einleitung

Alternative, elektrische Antriebskonzepte mit Batteriespeicher sind in Form von Hybrid- und reinen Elektrofahrzeugen Gegenstand von zukunftsorientierten Mobilitätskonzepten. Bisherige Markteintrittsbarrieren für Elektrofahrzeuge sind neben vergleichsweise hohen Anschaffungskosten und der Reichweitenproblematik auch zeitaufwendige und umständliche Ladeverfahren. Eine Möglichkeit, um das Laden von Elektrofahrzeugen anwenderfreundlicher zu machen sind induktive Ladeverfahren (engl. WPT – Wireless Power Transfer). Diese Systeme lassen sich einfach in bestehende Infrastrukturen integrieren und fügen sich unauffällig in das Stadtbild ein. Induktive Ladeverfahren werden seit einiger Zeit beispielsweise in der Medizintechnik oder in der Unterhaltungselektronik (Laden von Mobiltelefonen) eingesetzt [1].

Für das induktive Laden von Elektrofahrzeugen sind aktuell Leistungsklassen von 3,3 kW bis 7,7 kW und Übertragungsfrequenzen im Bereich mehrerer kHz angedacht. Der Wirkungsgrad dieser Systeme liegt im Bereich von 90% [2]. Bevor diese Systeme im öffentlichen Raum eingesetzt werden können, ist die Beeinflussung anderer Systeme und deren Einfluss auf den menschlichen Körper zu klären (Elektromagnetische Verträglichkeit [EMV] bzw. – Umweltverträglichkeit [EMVU]). Die ICNIRP 2010-Richtlinie definiert einen Referenzgrenzwert für Frequenzen ab 3 kHz von umgerechnet 24 dB μ T. Dieser Wert sollte an keiner von Personen zugänglichen Stelle am Fahrzeug und in dessen Umgebung überschritten werden.

Ziel dieser Studie ist es, mit Hilfe der EMV-Simulation Einflussfaktoren auf die magnetischen Streufelder eines modellierten induktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge zu identifizieren. Nachdem in Abschnitt 3 das Ladesystem und EMV-Maßnahmen betrachtet wurde, wird in Abschnitt 4 das Gesamtsystem aus Fahrzeugkarosserie und Ladesystem simuliert. Dabei werden unterschiedliche Karosseriematerialien betrachtet und die magnetische Flussdichte innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs ermittelt.

2 Funktionsweise

Die Funktionsweise eines induktiven Ladeverfahrens ist stark mit der eines Transformators verwandt [3]. Eine Sendespule (Primärspule) erzeugt einen magnetischen Fluss, der in einer Empfangsspule (Sekundärspule) eine Spannung induziert. Diese Spulen sind miteinander induktiv gekoppelt. Der Kopplungsfaktor k ist wie folgt definiert,

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (2.1)$$

wobei L_1 , L_2 die Selbstinduktivität der Primär- bzw. Sekundärspule und M die Gegeninduktivität beschreibt. Bei einer losen Kopplung (wie beim induktiven Laden) ist k kleiner 0,5. Abbildung 1 zeigt ein Ersatzschaltbild eines Ladesystems mit serieller Kompensation. Kompensationsverfahren werden eingesetzt um die erforderliche Stromaufnahme durch eine Kompensation des Blindanteils der komplexen Eingangswiderstände zu verringern.

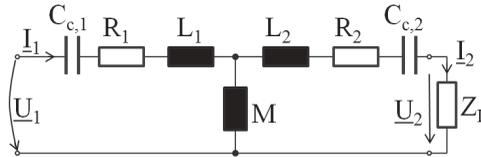


Abbildung 1: Elektrisches Ersatzschaltbild eines induktiven Ladesystems mit serieller Kompensation

Diese resonanten Schaltungen werden für einen Arbeitspunkt, wie zum Beispiel für eine Frequenz von 80 kHz, ausgelegt. Bei dieser Auswahl und Auslegung des Kompensationsverfahrens ist auf eine hohe Güte des Primär- und Sekundärkreises zu achten, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Umfangreiche Untersuchungen zu Kompensationsverfahren finden sich beispielsweise in [4], [5], [6] und [7]. In dieser Arbeit wird eine serielle Kompensation mittels Kondensatoren ($C_{c,1}$ und $C_{c,2}$) angewendet, deren Auslegung sich aus der Thomsonschen Schwingungsgleichung ergibt. L_x ist die Selbstinduktivität des Kreises und ω_0 die Kreisfrequenz im Arbeitspunkt:

$$C_{c,x} = \frac{1}{(\omega_0)^2 \cdot L_x} \quad (2.2)$$

Der maximale Wirkungsgrad des induktiven Ladesystems ist, neben dem Kopplungsfaktor k , auch von der Güte Q , die sich aus Kompensationskapazität und Selbstinduktivität der Leiterschleife bestimmt, abhängig. Nach [8] lässt sich der Wirkungsgrad wie folgt ermitteln:

$$\eta_{max} = \frac{(kQ)^2}{(1 + \sqrt{1 + (kQ)^2})^2} \quad (2.3)$$

3 Simulationsbasierte Parameteruntersuchungen des Ladespulensystems

Bevor das Gesamtsystem eines Fahrzeugs mit induktiven Ladespulen betrachtet werden kann, ist es zunächst sinnvoll, die Einflussfaktoren auf die magnetischen Streufelder auf Komponentenebene (Ladespulenpaar) zu untersuchen. Die hier beschriebenen Untersuchungen beschränken sich auf die Parameter Luftspaltgröße, horizontaler Versatz der Spulen zueinander (3.2) und den Einfluss von Ferritmaterialien (3.3).

Weitere Untersuchungen des Streufeldes für unterschiedliche Spulengeometrie sind beispielsweise in [2] zu finden. Einige funktionale Betrachtungen mit Berücksichtigung von Windungszahl, Versatz, Aluminiumplatten als Schirmung und Kompensationschaltungen wurden u.a. in [5], [7], [9], [10], [11] und [12] durchgeführt.

3.1 Modellierung des Ladespulensystems

Für die Simulation der magnetischen Felder im Raum wurde der LFMF-Solver (engl. low frequency magnetic field solver) des Feldberechnungsprogramms EMCStudio der Firma EMCoS ausgewählt. Dieser basiert auf der Momentenmethode und ermöglicht somit eine Berechnung der Feldgrößen für große Geometrien unter Anwesenheit von magnetischen Materialien [13], [14].

Das Spulensystem besteht aus identischen, gegenläufig gewickelten Spulen. Die Geometrie (siehe Abbildung 2) entspricht einer sogenannten Zirkularspule. Dabei wird die Wicklung n -mal (hier: 22) um eine Geometrie geführt; Anfang und Endpunkt werden mit der Quelle (Primärseite, untere Spule) bzw. Last (Sekundärseite, obere Spule) verbunden. Die sekundärseitig nutzbare Leistung wird auf 3,3 kW durch Variation des Stroms in der Primärspule eingestellt. Das Ladespulensystem wird bei einer Frequenz von 80 kHz betrieben.

Um den Einfluss der genannten Parameter auf das magnetische Streufeld zu bewerten, wird die magnetische Flussdichte B 20 cm oberhalb der Sekundärspule und 20 cm vom Spulenrand entfernt ermittelt. Weiterhin wird anhand einer Schnittebene der Feldverlauf grafisch dargestellt.

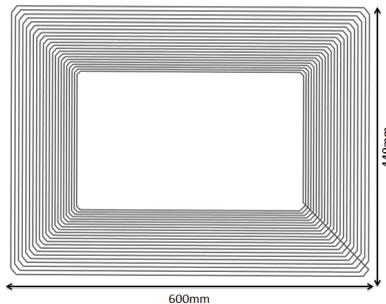


Abbildung 2: Einzelspule mit 22 Windungen

3.2 Variation des Luftspalts und Versatz von Primär- und Sekundärspule

Der Luftspalt der Ladespulen beschreibt den Abstand zwischen den Primär- und Sekundärwicklungen d . Je nach Fahrzeugtyp oder Konzept des Ladesystems gibt es eine Variation in der Größe des Luftspalts. Die Auswirkungen auf den Kopplungsfaktor k , den Wirkungsgrad η und die magnetischen Streufelder werden im Folgenden dargestellt.

Der Kopplungsfaktor lässt sich nach Gleichung (2.1) bestimmen. Aus der Simulation lässt sich eine Abnahme des Kopplungsfaktors mit zunehmendem Luftspalt ermitteln.

Auf Messungen basierende Untersuchungen zu dieser Thematik finden sich beispielsweise in [12].

Aus Gleichung 2.3 und Tabelle 1 ist abzuleiten, dass zwischen der Luftspaltgröße und dem Wirkungsgrad kein linearer Zusammenhang besteht. Eine hohe Güte von Primär- und Sekundärspule ermöglicht einen hohen Wirkungsgrad, auch wenn sich der Kopplungsfaktor quadratisch mit der Größe des Luftspalts verringert. Typische Werte für die Güte der Ladespulen liegen im Bereich 400-500 [15]. Somit können optimale Wirkungsgrade in Abhängigkeit des Abstands ermittelt werden (Tabelle 1). Mit abnehmendem Kopplungsfaktor muss der Strom in der Primärspule I_p erhöht werden, um die Leistung von 3,3 kW an der Last zu erreichen.

In den Abbildungen 3a bis 3c sind Simulationsergebnisse für die Luftspalte 5 cm und 30 cm dargestellt, sowie für den Fall einer nicht angepassten Sekundärspule. Die obere Spule ist dabei die für den Einsatz im Fahrzeug dimensionierte Sekundärspule und die untere die Primärspule. Für eine optimale Energieübertragung ist eine hohe Güte des Spulensystems notwendig. Diese wird maßgeblich durch das Design und die Auswahl des Kompensationsverfahrens bestimmt [5], [10]. Der Abstand zwischen Primär- und Sekundärspule hat einen Einfluss auf die Selbstinduktivität der Leiterschleifen, somit müssten die Kompensationskapazitäten je nach Arbeitspunkt angepasst werden. Sollte die hier verwendete und abgestimmte serielle Kapazität nicht geändert werden, so ist ein sehr hoher Primärstrom nötig, um weiterhin die erforderliche Ladeleistung zu erreichen. In diesem Fall kommt es zu hohen Streufeldern, wobei größere Luftspalte an den simulierten Punkten eine leicht höhere magnetische Flussdichte aufwiesen (Abbildung 3c, Tabelle 2). In Abbildung 3d ist ein Versatz von Primär und Sekundärspule um 50% dargestellt. Auch hier gilt analog dem Fall eines größeren Luftspalts, dass mit entsprechender Güte der resonanten Schaltung ein hoher Wirkungsgrad und somit auch geringe Streufelder erreicht werden können.

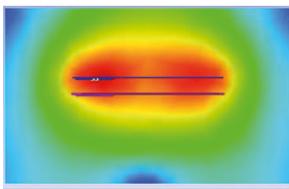


Abbildung 3a: 5 cm Luftspalt

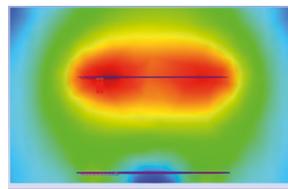


Abbildung 3b: 30 cm Luftspalt (angepasst)

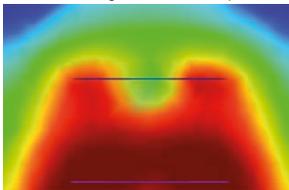


Abbildung 3c: 30 cm Luftspalt (unangepasst)

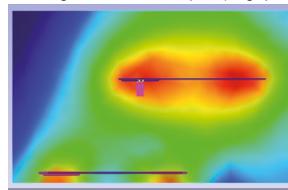
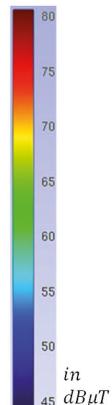


Abbildung 3d: 30 cm Luftspalt, 50% Versatz



3.3 Ferritmaterial zur Verringerung von Streufeldern

Der magnetische Fluss ist bestrebt den Weg des geringsten magnetischen Widerstandes zu nehmen. Durch das Einbringen von Ferritmaterialien ist es möglich die

Richtung des magnetischen Flusses zu beeinflussen, da deren relative Permeabilität um mehrere Größenordnungen größer ist als die von Luft (hier: $\mu_r = 10000$).

Tabelle 1

Luftspaltgröße / Versatz	Kopplungsfaktor k	Güte Q	Wirkungsgrad η	Primärstrom I_p in A
5cm / 0%	0.45	450	0.98	2
15cm / 0%	0.17	450	0.97	4.5
30cm / 0%	0.06	450	0.92	10
30cm / 50%	0.03	450	0.82	27
30cm / 0% (verstimmt, $2x C_s$)	0.06	400	0.84	500

Daraus resultiert eine Erhöhung des Kopplungsfaktors, was eine Verringerung der magnetischen Streufelder zur Folge hat. In diesen Untersuchungen wurden 1 cm dicke Ferritplatten oberhalb der Sekundärspule bzw. unterhalb der Primärspule eingebracht. Die magnetische Flussdichte für Ladespulensysteme mit Ferrit ist 30 cm oberhalb der Sekundärspule um etwa 10 dB geringer, verglichen mit Spulen ohne Ferrit (Abbildungen 3b und 4b). Somit haben Ferritmaterialien einen positiven Einfluss sowohl auf den Wirkungsgrad, als auch auf die EMV des Ladespulensystems.

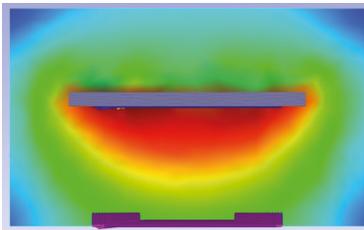


Abbildung 4a: 1 cm dicke Ferritplatte auf Sekundärseite

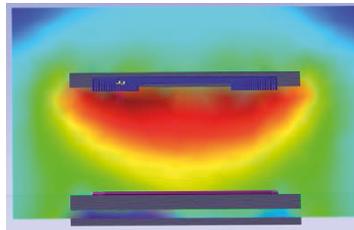


Abbildung 4b: 1 cm dicke Ferritplatte 1 cm auf Primär- und Sekundärseite

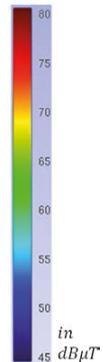


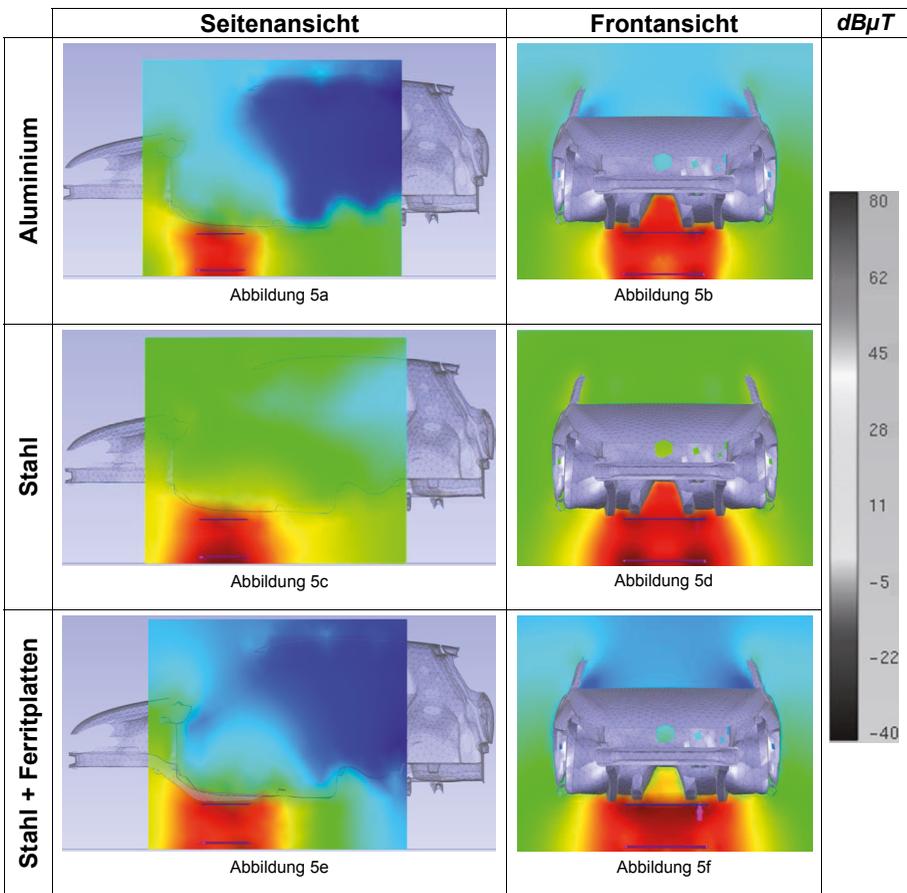
Tabelle 2: Magnetische Flussdichten des Ladespulensystems

Variante	magn. Flussdichte B in $dB\mu T$	
	20 cm oberhalb Sekundärspule	20 cm neben den Spulen
5cm Luftspalt	62.7	49.4
30cm Luftspalt	63.2	50.
30cm Luftspalt, verstimmt	55.3	59.45
30cm Luftspalt, 50% Versatz	62.8	46.85
Ferrit sekundärseitig	53.7	50.25
Ferrit beidseitig	52.7	52.9

Auf diesen Modellen aufbauend können im nächsten Schritt Einflussfaktoren auf die EMV des Gesamtsystems eines Elektrofahrzeugs mit induktivem Ladesystem untersucht werden.

4 EMV-Systemsimulation eines Elektrofahrzeugs mit induktivem Ladesystem

Das Simulationsmodell für die Gesamtsysteme besteht aus den in Abschnitt 3 modellierten Ladespulen und einer für die Momentenmethode entsprechend diskretisierten Fahrzeugkarosserie. Die Größe des Luftspalts beträgt 30 cm, um einen worst-case für die magnetischen Streufelder nachzubilden. Weiterhin beschäftigt sich die Untersuchung mit dem Einfluss von Karosseriematerialien, indem Aluminium (paramagnetisch) und Stahl (Annahme: $\mu_r \sim 100$) gegenübergestellt werden. Als EMV-Maßnahme sind Ferritplatten (analog Abschnitt 3.3) eingebracht wurden. Die magnetische Flussdichte wurde sowohl im Fahrzeuginnenraum an drei Messpunkten (Fußraum, Sitzbereich und Kopfhöhe), als auch in 20 cm Entfernung von den Fahrzeugkanten aufgenommen. Die Simulationsergebnisse sind in den Abbildungen 5a bis 5f und Tabelle 3 zusammengefasst.



Das Karosseriematerial hat einen großen Einfluss auf die Ausbreitung der magnetischen Felder. Die magnetische Flussdichte im Innenraum und an den Außenkanten des Fahrzeugs ist für die Stahlkarosserie mit Ladespulen ohne Ferritplatten am größten. Für jede Konfiguration ist die Kompensationskapazität des Sekundärkreises anzupassen. Wie in Abschnitt 3 ist auch hier die Sekundärleistung auf 3,3 kW eingestellt wurden, was für den Fall der Stahlkarosserie einen Primärstrom von 160 A notwendig macht. Die Ursache dafür liegt in der abnehmenden Kopplung zwischen Primär- und Sekundärspule, da eine Stahlkarosserie zu einer größeren Streuung des Magnetfeldes der Primärspule führt. Eine reine Aluminiumkarosserie hingegen wirkt durch ihre elektrische Leitfähigkeit als Schirmung gegen zeitlich veränderliche Magnetfelder mit einer Frequenz von 80 kHz und trägt aufgrund ihrer geringen relativen Permeabilität nicht zur zusätzlichen Streuung des Feldes bei. Somit wurden im Innenraum des Fahrzeugs nur geringe magnetische Flussdichten ermittelt.

Eine wirksame EMV Maßnahme ist die bereits in Abschnitt 3 untersuchte Bündelung des magnetischen Flusses durch den Einsatz von Ferritplatten. Die Simulationsergebnisse zeigen eine deutliche Verringerung der magnetischen Flussdichten im Fahrzeuginnenraum sowohl an den Fahrzeugkanten (vgl. Abbildung 5c und 5e mit 5d und 5f, sowie Tabelle 3). Diese Bündelung erhöht die Kopplung der Spulen miteinander und trägt somit ebenfalls zur Erhöhung des Wirkungsgrades bei.

Tabelle 3: Magnetische Flussdichten des Gesamtsystems aus Ladespulen und Fahrzeugkarosserie

Karosserievariante	magn. Flussdichte B in $dB\mu T$				
	20 cm Fahrzeugkante	Fußraum	Sitzbereich	Kopfbereich	Primärstrom I_p in A
Aluminium	20.0	11.2	3.7	-10.3	34
Stahl	21.4	32.2	28.2	17.3	160
Stahl + Ferritplatten	16.5	8.8	1.8	-12.5	8

5 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden Einflussfaktoren auf die magnetischen Streufelder von induktiven Ladeverfahren untersucht. Dabei stellte sich eine gute Abstimmung von Primär- und Sekundärspule (hohe Güte) als essentieller Bestandteil sowohl zur Erhöhung des Wirkungsgrades, als auch zur Verringerung der magnetischen Streufelder heraus. Der Abstand und die Ausrichtung der Spulen zueinander haben nur einen relativ geringen Einfluss auf die magnetischen Streufelder, wenn eine hohe Güte von Primär- und Sekundärsystem erreicht wird. Mithilfe von Ferritplatten kann der magnetische Fluss gebündelt und somit ein Beitrag zur Erhöhung des Wirkungsgrades und zur Minimierung der Streufelder geleistet werden. Weiterhin wurden typische Karosseriematerialien (Stahl und Aluminium) untersucht. Daraus ergab sich die Notwendigkeit das Ladespulensystem im Kontext seines späteren Einsatzortes (mit Fahrzeug) ausgelegt werden sollten, da sowohl die magnetische Kopplung als auch die Streufelder sehr stark durch die Karosserie beeinflusst werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Guidelines for Automotive Aftermarket Qi Chargers, The Wireless Power Consortium, 2012.
- [2] Conductix-Wampfler AG und Daimler AG, Abschlussbericht zum Verbundvorhaben Kabelloses Laden von Elektrofahrzeugen, Weil am Rhein: Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 2011.
- [3] W. Weißgerber, Elektrotechnik für Ingenieure 1+2, Wiesbaden: vieweg, 2007.
- [4] M. Feliziani, T. Campi, S. Cruciani und L. Schirone, Robust LCC Compensation in Wireless Power Transfer with Variable Coupling Factor Due to Coil Misalignment, Rome: IEEE 15th International Conference on Environmental and Electrical Engineering, 2015.
- [5] S. Cheon, Y. Kim, S. Kang, M. L. Lee, J. M. Lee und T. Zyung, Circuit-Model-Based Analysis of a Wireless Energy-Transfer System via Coupled Magnetic Resonances, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 58, NO. 7, 2011.
- [6] L. Siqui, L. Weihan, J. Deng, T. D. Nguyen und C. C. Mi, A Double-Sided LCC Compensation Network and Its Tuning Method for Wireless Power Transfer, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2013.
- [7] C. Wang, O. H. Stielau und G. A. Covic, Design Considerations for a Contactless Electric Vehicle Battery Charger, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 52, NO. 5, 2005.
- [8] K. Van Schuylenbergh und R. Puers, Wireless energy transfer for stand-alone systems: A comparison between low and high power applicability, Sensors A, vol. 92, no. 1-3, pp. 305–311, 2000.
- [9] T. Campi, S. Cruciani und M. Feliziani, Magnetic Shielding of Wireless Power Transfer Systems, EMC Tokyo, 2014.
- [10] S. Cruciani, T. Campi, M. Feliziani und F. Maradei, Optimum Coil Configuration of Wireless Power Transfer System in Presence of Shields, Dresden: Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility and EMC Europe, 2015.
- [11] M. Feliziani und S. Cruciani, Mitigation of the Magnetic Field Generated by a Wireless Power Transfer (WPT) System without Reducing the WPT Efficiency, Proc. of the 2013 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2013), 2013.
- [12] R. Bosshard, J. Mühlethaler, J. W. Kolar und I. Stevanovic, Optimized Magnetic Design for Inductive Power Transfer Coils, Proceedings of the 28th Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC 2013), 2013.
- [13] R. Jobava, A. Gheonjian, J. Hippeli, G. Chiqovani, D. Karkashadze, F. Bogdanov, B. Khvittia und A. Bzhalava, Simulation of Low Frequency Magnetic Fields in Automotive EMC Problems, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 2014.
- [14] R. Jobava, A. Gheonjian, D. Karkashadze und J. Hippeli, Interaction of Low Frequency Magnetic Field with Thin 3D Sheets of combined Resistive and Magnetic Properties., Paris: European Microwave Week, 2010.
- [15] S. Davis, DesignFeature: Wireless Power, www.powerelectronics.com, 2011.
- [16] ICNIRP GUIDELINES: For Limiting Exposure To Time-Varying Electric And Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz), HEALTH PHYSICS 99(6):818-836; 2010, 2010.
- [17] Verordnung (EG) Nr. 443/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates Amtsblatt der Europäischen Union, Brüssel, 2009.