

Grundlegende Betrachtungen der Kopplungsmechanismen möglicher Störgrößen für induktive KFZ-Ladesysteme

Referent: M.Sc. Manuel Haug, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik – Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart
Co-Referent: Dipl.-Ing. Michael Beltle, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik – Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, michael.beltle@ieh.uni-stuttgart.de
Co-Autor: Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik – Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 47, 70569 Stuttgart, stefan.tenbohlen@ieh.uni-stuttgart.de

1 Einleitung

Das kabellose, induktive Laden von Automobilen wird in Zukunft ein wesentlicher Bestandteil der Elektromobilität werden, insbesondere aufgrund des enormen Komfortgewinns für den Anwender. Die Standardisierung geeigneter WPT (Wireless Power Transfer) Ladesysteme befindet sich aktuell hinsichtlich einheitlicher, normierter Abmessungen und Geometrien der verwendeten Spulen noch in der Festlegungsphase. Begleitend zu diesem Prozess sollen möglichst frühzeitig potentielle Koppelmechanismen und Störeinflüsse auf die Fahrzeugspule sowohl während der Fahrt als auch beim Laden identifiziert werden. Damit soll eine Abschätzung der Störgrößen auf das Gesamtfahrzeug schon im Entwicklungsprozess ermöglicht werden.

Zwei wesentliche Störmechanismen sind dabei Differentialmode (DM) Einkopplungen, die während der Fahrt oder während des Ladevorgangs in der Fahrzeugspule induziert werden, sowie Commonmode (CM) Störungen, die während des Ladevorgangs über die Streukapazität zwischen Bodenspule und Fahrzeugspule auf die Fahrzeugseite koppeln. Für eine erste grundlegende Untersuchung möglicher CM- und DM- Störeinkopplungen auf das Fahrzeug bedarf es zunächst eines Modells. Dieser Beitrag betrachtet ein generisches, repräsentatives Spulendesign, welches als Prototyp aufgebaut und durch sein Impedanzverhalten über der Frequenz charakterisiert wird. Gleichzeitig wird ein detailliertes 3D Modell dieses Aufbaus entwickelt, welches durch die Messungen am Laboraufbau validiert wird. Mit dem 3D Modell können verschiedene Störeinkopplungen sowie das Systemverhalten in diversen Szenarien entwicklungsbegleitend abgeschätzt werden.

2 Übersicht des aktuellen Normungsstands für induktive Ladesysteme

Für die Festlegung der EMV Grenzwerte ist die internationale IEC-Normung federführend, an die sich voraussichtlich auch die amerikanischen SAE-Normen und die chinesischen GBT-Normen anschließen werden. Die Emissions- und Störfestigkeitsanforderungen an WPT Systeme werden dabei in der übergeordneten Norm IEC 61980-1 definiert [1]. Die Störfestigkeitsprüfungen werden nach dem aktuellen gültigen Normentwurf (CD:2016) für externe WPT Systeme nach den Grundnormen der IEC 61000 durchgeführt, für Prüfungen unter Verwendung eines Fahrzeuges entsprechend den Anforderungen der ISO 11451. IEC 61980-3 enthält die spezifischen Anforderungen für induktive Ladesysteme.

Hierin enthalten sind unter anderem Entwurfsbeispiele, welche den konkreten physikalischen Aufbau des Ladesystems charakterisieren. Weiter werden Systeme für unterschiedliche Leistungsklassen sowie deren Interoperabilität definiert. [2]

Wesentliche Systemparameter und Betriebsbedingungen sowie konkrete Vorschläge zum Aufbau von WPT Ladesystemen finden sich auch im Normvorschlag der SAE J2954 [3]. Diese beinhaltet zur IEC 61980-3 abweichende Spulendesigns und Betriebsparameter. Während im Normvorschlag der IEC ausschließlich Bodenspulen mit Doppelhelix Design vertreten sind, beschreibt die SAE zusätzlich den Aufbau der Ladestation mit zirkularen Spulen. Ergänzend sei die ISO/PAS 19363 erwähnt, die als Referenz der SAE J2954 aufgeführt ist. Sie definiert ebenfalls sowohl zirkulare als auch Doppelhelix Spulendesigns, abhängig von der angestrebten Ladeleistung sowie der Bodenfreiheit des Fahrzeugs.

Der eigens für die kontaktlose Energieübertragung bei Elektrofahrzeugen gegründete Arbeitskreis „CISPR/CIS/B/AHG 4 WPT“ des CISPR B Komitees hat 2017 einen Vorschlag zur Grenzwertemission magnetischer Felder von WPT Systemen vorgestellt [4]. Darin werden die Grenzwerte in Abhängigkeit der WPT-Leistungsklasse für fünf verschiedene Übertragungsfrequenzen definiert. Der Vorschlag zur Grenzwertemission der SAE geht hingegen nur auf die von ihr priorisierten Übertragungsfrequenz im Bereich von 81,38 bis 90 kHz ein. Weiter sind die Grenzwerte der CISPR 11 deutlich schärfer. Bei der Übertragungsfrequenz von 85 kHz ergibt sich hier eine Differenz von mindestens 17 dB zur SAE, unterhalb 150 kHz sogar bis zu 40 dB.

3 Aufbau der interoperablen Komponenten für eine WPT Ladestation

Für den Aufbau eines generischen Spulendesigns wird eine möglichst repräsentative Geometrie gewählt. Betrachtet werden für die Bodenspule (GA, Ground Assembly) sowie die Fahrzeugspule (VA, Vehicle Assembly) zirkular gewickelte Spulen nach SAE J2954. Die jeweiligen Spulendesigns unterscheiden sich hinsichtlich der angestrebten Übertragungsleistung (Leistungsklasse WPT1, WPT2 & WPT3) und der Bodenfreiheit d des Fahrzeugs, an dem die Fahrzeugspule montiert wird (Z1, Z2 & Z3), siehe Tabelle 1.

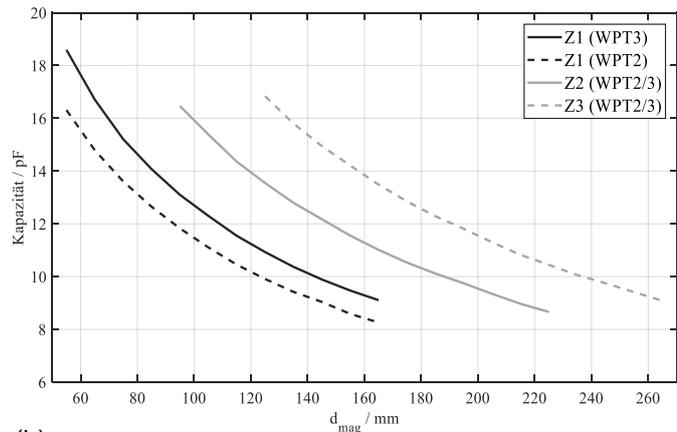
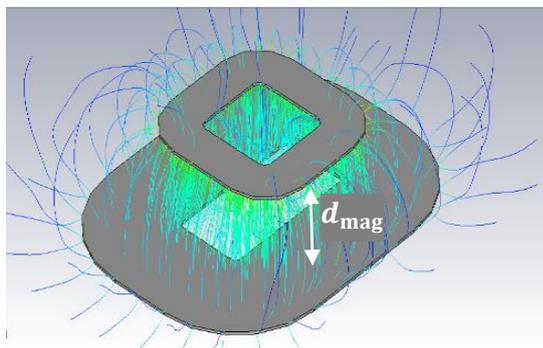
Tabelle 1: Parameter der Leistungsklassen WPT1 bis WPT3, sowie der Z-Klassen nach SAE J2954

WPT Leistungsklassen				Z-Klassen			
	WPT1	WPT2	WPT3		Z1	Z2	Z3
$P_{in,max}$ [kVA]	< 3,7	< 7,7	< 11,1	d [mm]	100 – 150	140 – 210	170 – 250
				d_{mag} [mm]	55 – 160+x	95 – 220+x	125 – 260+x

Der Abstand d_{mag} zwischen den magnetisch leitfähigen Strukturen des GA und VA Pads hängt neben der Bodenfreiheit des Fahrzeugs auch davon ab, wie das GA Pad montiert wird – überirdisch, ebenerdig oder versenkt. Für die betrachteten Komponentendesigns nach SAE J2945 beschreibt d_{mag} den Abstand zwischen den Wicklungen von Boden- und Fahrzeugspule. x ist dabei die Tiefe, in der das GA Pad vergraben wird.

Für einen Laboraufbau werden die Spulen unter Berücksichtigung praktischer Grenzwerte so ausgelegt, dass die CM Einkopplungen in die VA Spule möglichst groß werden (Worst-Case Betrachtung). Hierzu kann die Streukapazität C_s zwischen GA und VA Spule abgeschätzt werden, indem die jeweilige geometrische Form der Spule als Platte mit Loch in der Mitte modelliert wird, siehe Bild 1 (a). Durch eine elektrostatische Betrachtung in CST

Microwave Studio ergibt sich C_s in Abhängigkeit der Plattenabstände d_{mag} wie in Bild 1 (b) zu sehen. Die WPT1 Klasse wird aufgrund ihrer geringen Übertragungsleistung nicht weiter berücksichtigt.



(a) In CST Microwave modellierte Platten für die entsprechenden Spulenabmessungen
 (b) Kapazitätsverlauf der modellierten Platten in Abhängigkeit des Abstands d_{mag}

Aus dieser Worst-Case Betrachtung ergibt sich eine maximale Streukapazität von 18,6 pF für das WPT3/Z1 Spulensystem bei minimalem Abstand. Diese Spulen werden im Folgenden durch einen Laboraufbau nachgebildet und charakterisiert. Bild 2 zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau der realisierten Zirkularspulen.

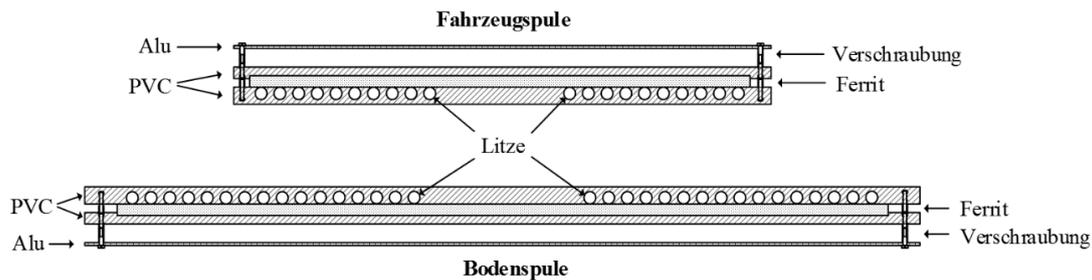


Bild 2: Querschnitt der realisierten Zirkularspulen

Als Spulenkörper werden PVC Platten mit gefrästen Führungsrillen für die Wicklung benutzt („Litz Tray“). Für die magnetische Flussführung kommen Ferritplatten mit einer Anfangspermeabilität von $\mu_r = 3000$ zum Einsatz. Die Ferrite werden mit einer weiteren PVC Platte („Ferrite Tray“) über den Spulenwindungen fixiert und mit der darunterliegenden Platte verschraubt. Die Litzenanschlüsse werden durch die Ferritplatten nach außen geführt und dort fixiert. Die Anschlüsse der Wicklungsenden sind mit N-Buchsen realisiert, Bild 3 zeigt die aufgebauten Spulenpads. Die Wicklung der GA Spule ist im Unterschied zur VA Spule mit zwei parallel geführten Litzen ausgeführt.

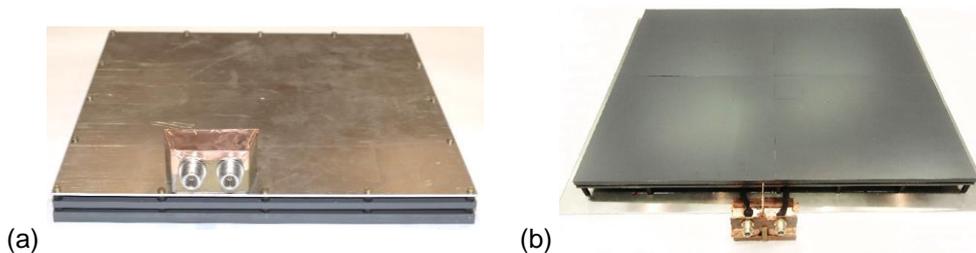


Bild 3: Laboraufbau der Spulenpads: (a) VA-WPT3/Z1 (b) GA-WPT3

Um das Spulensystem in seinem Resonanzpunkt zu betreiben, wird eine Schaltung zur Blindleistungskompensation jeweils für Boden- und Fahrzeugspule aufgebaut. Für den Ladebetrieb muss die übertragene Leistung im Fahrzeug durch eine entsprechende Elektronik gleichgerichtet und geglättet werden. Bild 4 zeigt das vereinfachte ESB bestehend aus (v.l.n.r.) Leistungsfaktorkorrekturfilter (PFC), Inverterblock, Bodenspule mit Kompensationsschaltung, Fahrzeugspule mit Kompensationsschaltung, Gleichrichter (GR) und einer zu ladenden Batterie.

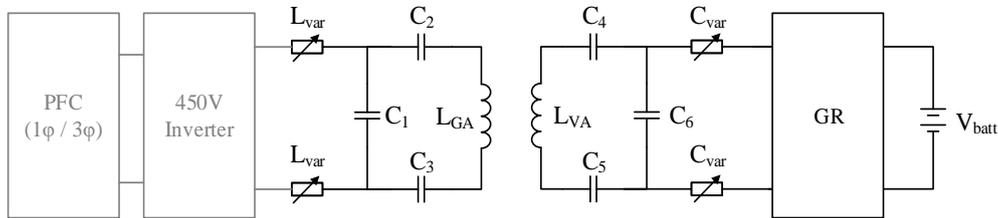


Bild 4: Elektrische Beschaltung der (links) Boden- und (rechts) Fahrzeugspule

Da sich die Resonanzfrequenz des Übertragungssystems durch einen Offset der Spulen zueinander verschiebt, kann diese mithilfe abstimmbarer Induktivitäten L_{var} bzw. Kapazitäten C_{var} nachgeführt werden. Die aktive Verstärkerelektronik sowie eine Impedanznachbildung der Last (Batterie) sind im Aufbau nicht enthalten. Die fertigen Platinen werden mittels eines Netzwerkanalysators an deren Ein- und Ausgängen vermessen und im Weiteren durch ihre Streuparameter beschrieben.

4 Charakterisierung der Spulen mittels Streuparametern

Das frequenzabhängige Verhalten der aufgebauten GA und VA Spule wird mittels ihres Impedanzverlaufs charakterisiert. Dafür werden die Streuparameter der jeweiligen Spule gemessen und daraus die komplexen Impedanz- und Admittanzmatrizen berechnet.

Für Messungen an den Klemmen der Spulen (N-Buchsen) können die Elemente von T- bzw. Pi-Ersatzschaltbild des Vierpols vereinfacht wie in Bild 5 angenommen werden. Die Querelemente $Z_1 + Z_2$ bzw. Y_3 entsprechen dabei der jeweiligen Spuleninduktivität L mit ohmschen Kupferverlusten R_{Cu} und parasitärer Kapazität C_p zwischen den Windungen. Die Ersatzelemente nach Masse Y_3 bzw. Y_1 und Y_2 stellen die Kapazität C_{PE} zwischen der Spulenwicklung und Masse dar, mit parasitärer Induktivität L_{PE} sowie dielektrischen Umpolungsverlusten R_{PE} .

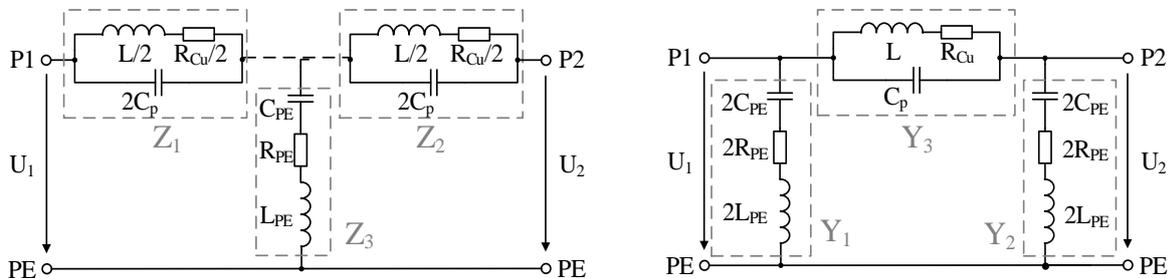


Bild 5: T- und Pi-Ersatzschaltbild der vorliegenden Spulengeometrien

Der Messaufbau für die Charakterisierung der Fahrzeugspule ist in Bild 6 zu sehen. Die Fahrzeugspule wird dafür in einer Höhe von $h = 15 \text{ cm}$ über einem geerdeten Metalltisch vermessen. Die Schirmung der VNA-Ports ist niederimpedant mit dem Tisch verbunden.

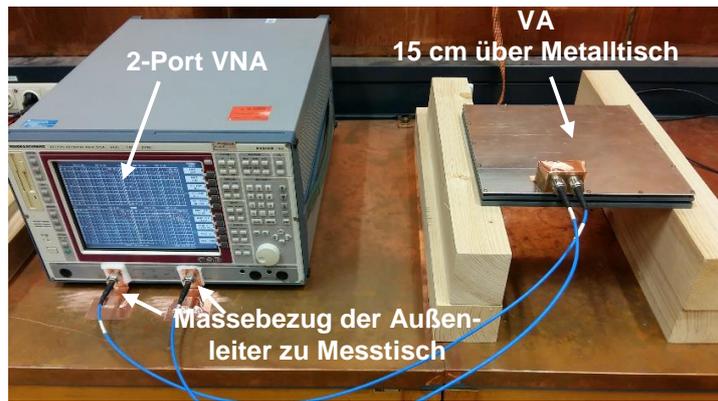


Bild 6: Messaufbau zur Bestimmung der Streuparameter an der Fahrzeugspule

Bild 7 (a) zeigt am Beispiel der Fahrzeugspule den Einfluss der Ferrite und des Aluminiumschirms auf den Frequenzgang der Klemmenimpedanz der Spule von 10 kHz bis 110 MHz. Die Klemmenimpedanz entspricht dem Querelement Y_3 des Pi-Ersatzschaltbildes, bzw. $Z_1 + Z_2$ des T-Ersatzschaltbildes aus Bild 5.

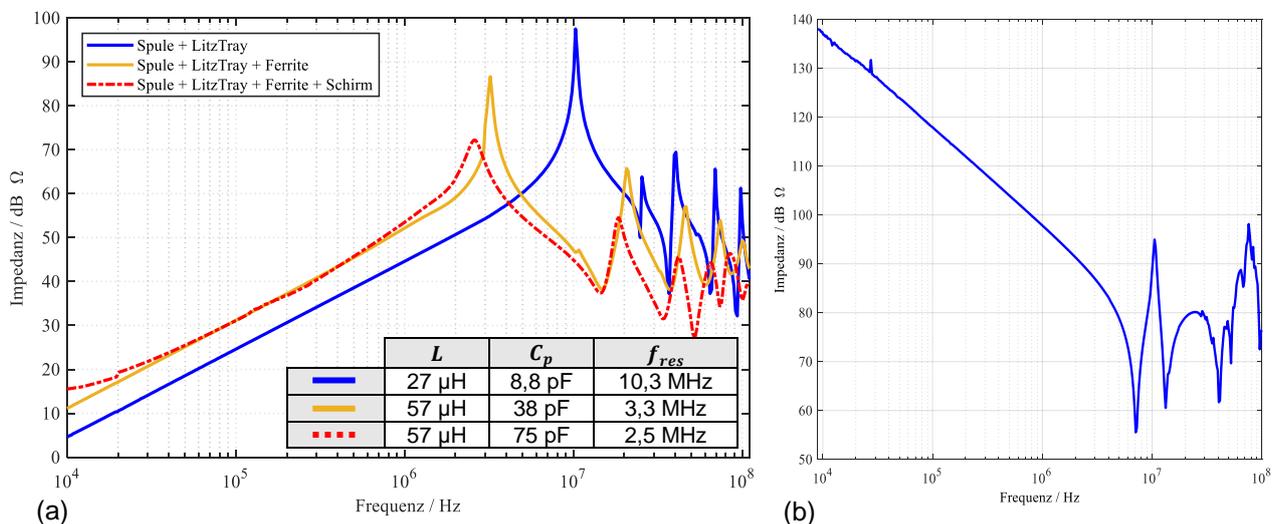


Bild 7: (a) Impedanzverläufe des Ersatzelements Y_3 der Fahrzeugspule in verschiedenen Aufbau-Zuständen **(b)** Impedanz zwischen Fahrzeugspule und geerdetem Schirmblech

Die dunkle Kurve in Bild 7 (a) zeigt die reine Spulenwicklung mit PVC Platte, ohne Ferrite und Schirmblech. Die Ferrite erhöhen die Induktivität der Spule auf ca. 57 μH ; auch die parasitäre Kapazität der Spule steigt aufgrund der zusätzlichen Permittivität der Ferrite, wodurch sich die Resonanzfrequenz auf 3,3 MHz reduziert (helle Kurve). Das über die Außenleiter der Messkabel geerdete Schirmblech zeigt erwartungsgemäß keine Beeinflussung der Induktivität, jedoch bewirkt es eine Erhöhung der parasitären Kapazität C_p sowie eine Dämpfung der Resonanzstelle um ca. 15 dB (gestrichelte Kurve).

Bild 7 (b) zeigt den Impedanzverlauf zwischen Fahrzeugspule und geerdetem Schirmblech. Dabei werden die Klemmen der Spule kurzgeschlossen und mittels einer 1-Port Messung die Durchgangsimpedanz zum geerdeten Schirmblech bestimmt. Es ergibt sich ein kapazitives Verhalten bis ca. 7 MHz, mit $C = 2,1$ pF. Wird das Schirmblech isoliert von den Außenleitern der Messkabel angebracht, so ist die zusätzliche Kapazität der Spulenwicklung nach Masse nicht wirksam. Die Klemmenimpedanz der Fahrzeugspule verhält sich dann wie ohne Schirmblech (helle Kurve in Bild 7 (a)). Für den Einsatz der Spule im Fahrzeug steht das Massekonzept des Schirmblechs noch zur Diskussion. Sollte es

galvanisch mit der Autokarosserie verbunden werden, so ist die Konfiguration des geerdeten Schirms eher zutreffend als ein floatender Schirm, da die Karosserie das Bezugspotential im Fahrzeug darstellt. Damit würde sich ein möglicher kapazitiver Kopplungspfad für Störströme innerhalb der Spule auf die Fahrzeugkarosserie ergeben.

5 Entwicklung von 3D Simulationsmodellen

Mithilfe der 3D Simulationssoftware CST Microwave Studio wird ein detailliertes Modell der betrachteten Spulengeometrien von Boden- und Fahrzeugspule erstellt, welches auch die Zuleitungen bzw. die Anschlusstechnik (N-Buchsen) nachbildet. Dabei werden die frequenzabhängigen Materialeigenschaften wie Permittivität, Permeabilität und Konduktivität der Ferrite und PVC Platten soweit wie möglich aus den Datenblättern berücksichtigt, oder durch Messungen ermittelt.

5.1 Simulationsmodelle der VA und GA Spule

Bild 8 (a) zeigt das 3D Modell der Fahrzeugspule. An den nachgebildeten N-Buchsen werden diskrete Ports zur Berechnung der S-Parameter angebracht. Daraus können äquivalent zu den Messungen die Elemente der Pi- bzw. T-Ersatzschaltung berechnet werden. Bild 8 (b) zeigt den Vergleich des Spulen-Impedanzverlaufs von Simulation und Messung. Die Simulation der VA Spule erfolgt dabei vergleichbar mit der Messung 15 cm über PEC (Perfect Electric Conductor). Alle weiteren Randbedingungen werden zu OPEN gesetzt, zur Lösung wird der HF Solver verwendet.

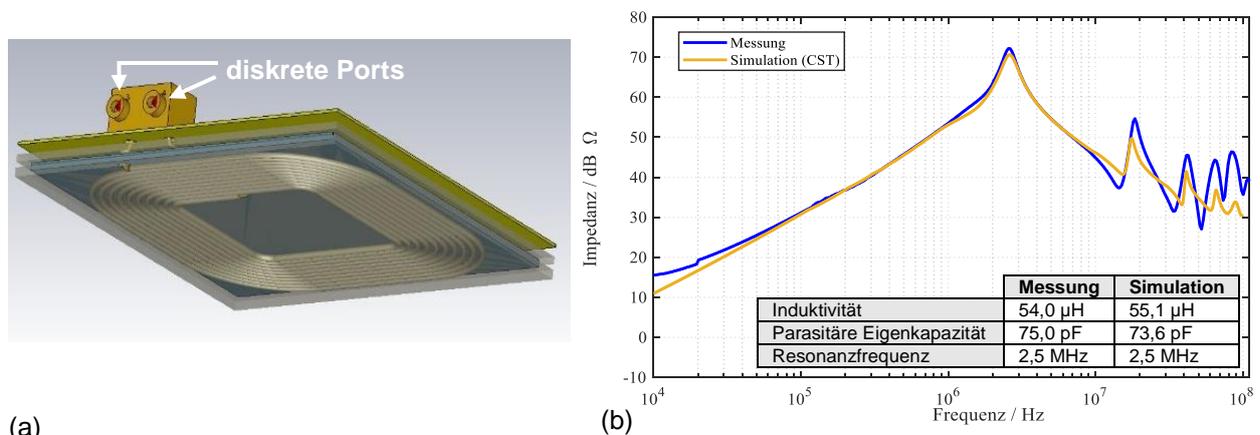


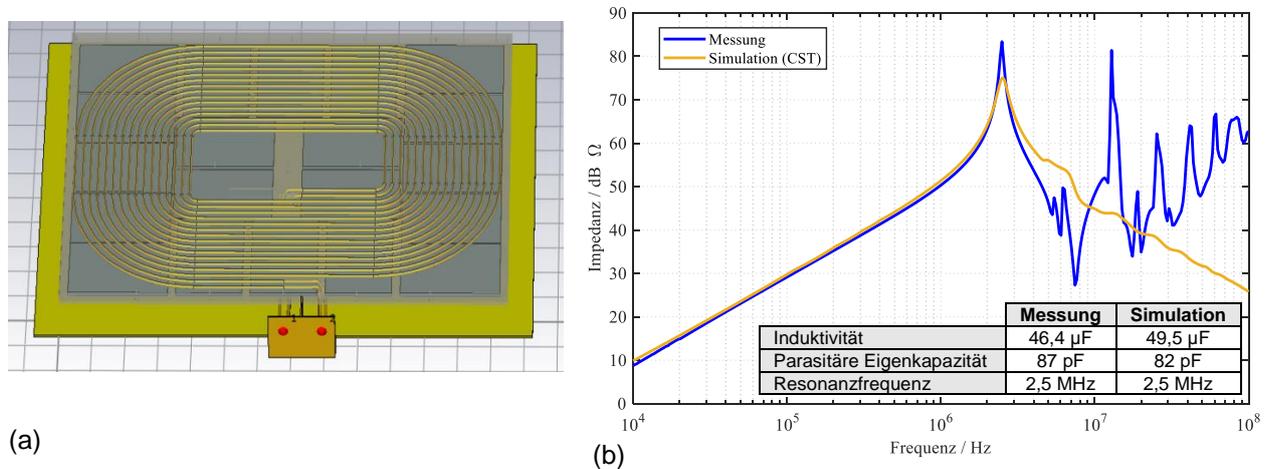
Bild 8: (a) 3D Modell der Fahrzeugspule VA-WPT3/Z1

(b) Vergleich von simuliertem und gemessenem Impedanzverlauf der VA Spule

Die Simulation stimmt bis ca. 10 MHz sehr gut mit der Messung des Laboraufbaus überein. Die Induktivitätswerte von Messung und Simulation zeigen praktisch keine Abweichung, auch die Resonanzstelle wird mit einer Differenz kleiner 0,1 MHz gut getroffen. Die hochfrequenten Resonanzeffekte werden in der Simulation nicht korrekt abgebildet, deren Ausprägung hängt u.A. von der Dimensionierung der PEC Fläche unter dem Modell ab. Daher muss im weiteren Verlauf der Arbeit die gesamte Messumgebung inkl. Messstisch im 3D Modell berücksichtigt werden.

Die Bodenspule wird ebenfalls als 3D Modell in CST Microwave implementiert und über S-Parameter an deren Klemmen charakterisiert, siehe Bild 9 (a). Wie beim Messaufbau liegt die Abschirmplatte direkt auf der PEC Ebene, alle anderen Randbedingungen werden zu OPEN gesetzt. Bild 9 (b) zeigt den gemessenen und simulierten Impedanzverlauf

an den Klemmen der GA Spule. Auch hier wird die Impedanz der Spule bis zur erste Resonanzstelle durch die Simulation gut abgebildet, darüber ergibt sich ein signifikant anderer Impedanzverlauf. Hier muss in weiteren Untersuchungen der Grund für die starke Abweichung von Messung und Simulation ermittelt werden. Im Folgenden ist dieses Modell für Betrachtungen bis 3 MHz jedoch schon anwendbar.



**Bild 9: (a) 3D Modell der Bodenspule GA-WPT3
(b) Vergleich von simuliertem und gemessenen Impedanzverlauf der GA Spule**

5.2 Simulationsmodell des Gesamtsystems

Da nun beide Spulen einzeln charakterisiert wurden und die Simulationsergebnisse durch Messungen validiert sind, können im Folgenden beide Spulen gemeinsam simuliert werden. Durch die Einbindung der gemessenen S-Parameter der Kompensationselektronik für GA und VA Spule kann das gesamte Systemverhalten der Ladestation abgeschätzt werden. Postprocessing Tools bieten die Möglichkeit zur Ermittlung von CM und DM Strömen mittels Modenkonverter. Hierzu werden Transimpedanzverstärker mit Übersetzungsverhältnis 1:1 eingesetzt, siehe Bild 10. Es ist zu beachten, dass die Messports für DM Ströme (Port 3 & 5) in einem 50 Ω System eine Impedanz von 100 Ω aufweisen müssen, die Messports für CM Ströme (Port 4 & 6) dagegen 25 Ω . Port 1 & 2 stellt eine ideale differentielle Spannungsquelle, mit 450 V Amplitude und 50 Ω Innenwiderstand dar.

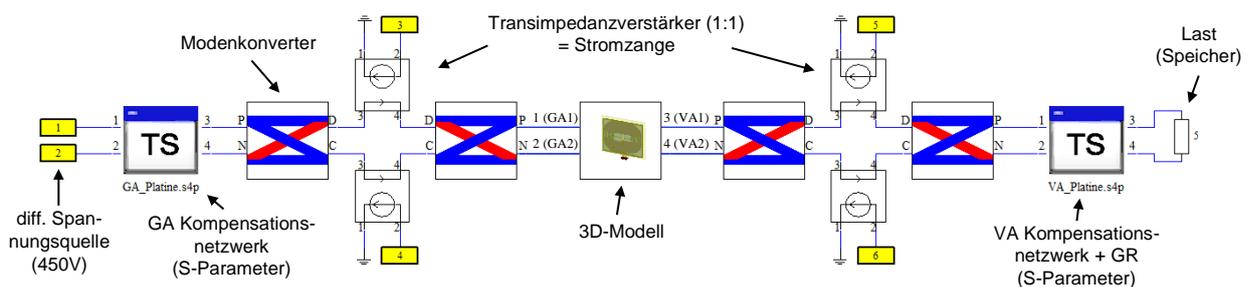


Bild 10: Aufbau des WPT Systems zur Ermittlung von CM und DM Strömen mittels Modenkonverter

Bild 11 zeigt die so ermittelten DM und CM Stromverläufe an den Klemmen der GA und VA Spule bis 3 MHz. Die Spulen sind dabei zentriert zueinander ausgerichtet, der magnetische Abstand beträgt in diesem Beispiel 6 cm. Im Weiteren werden die Simulationsergebnisse anhand von Messreihen der Common Mode Kopplung verifiziert. Dabei werden im Laboraufbau - analog zur Simulation - die CM und DM Ströme mit Stromzangen

an den Spulenklemmen gemessen und dabei der Einfluss unterschiedlicher Spulenausrichtungen und -Abstände untersucht.

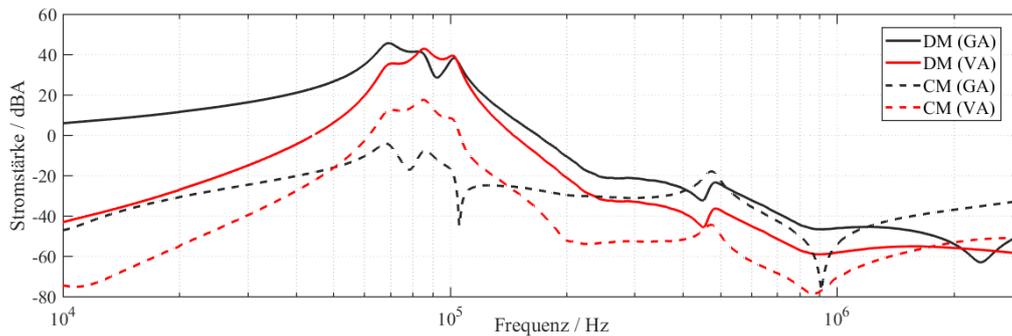


Bild 11: Differential Mode (DM) und Common Mode (CM) Ströme an den Klemmen von GA und VA Spule

6 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Bewertung der Kopplungsmechanismen induktiver Ladesysteme werden zunächst ein repräsentatives Spulendesign für Boden- und Fahrzeugspule als Labormodell aufgebaut und als 3D Simulationsmodell entwickelt. Mittels S-Parametermessungen wird das elektrische Verhalten der Spulen ermittelt und durch Z- bzw. Y-Transformation deren Impedanzverlauf bestimmt. Der Vergleich mit den Simulationsmodellen zeigt bis zur ersten Resonanz eine sehr gute Übereinstimmung, was die Simulationsmodelle für weitere Untersuchungen prinzipiell qualifiziert. Damit ist es bereits möglich Auswirkungen durch Variationen im Aufbau (z.B. Materialeigenschaften oder Spulengeometrien) auf das Systemverhalten simulativ abzuschätzen.

Im Weiteren wird der Messaufbau inkl. Messumgebung simulativ berücksichtigt, um auch die hochfrequenten Resonanzen in den Impedanzverläufen abbilden zu können. In weiteren Mess- und Simulationsreihen werden die Common-Mode sowie Differential-Mode Kopplungen zwischen Boden- und Fahrzeugspule genauer untersucht.

Auch ist ein vergleichbares Vorgehen zur Modellerstellung und –Verifizierung für andere Spulengeometrien mit Doppelhelix Design denkbar. Hierbei wird ein Fokus auf die Interoperabilität zwischen Zirkularen und Doppelhelix Spulen gelegt, da zum jetzigen Zeitpunkt nicht abzusehen ist, ob sich herstellerunabhängig eines der Spulendesigns durchsetzen wird, oder beide Varianten parallel auf dem Markt angeboten werden.

7 Literaturangaben

- [1] DIN EN 61980-1, IEC 69/236/CD:2012 (VDE 0122-10-1), „Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge - Teil1: Allgemeine Anforderungen: Entwurf“, 2013
- [2] DIN EN IEC/TS 61980-3:2015-09 (VDE V 0122-10-3), „Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge - Teil 3: Spezifische Anforderungen für die kontaktlosen Energieübertragungssysteme mit Magnetfeld: Entwurf“, 2015
- [3] SAE J2954, „Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/ Electric Vehicles and Automated Charging and Alignment Methodology: Proposed Draft“, 2016
- [4] J. Bärenfänger, „EMV-Normung von Wireless Power Transfer (WPT) Systemen“, GMM-Fachbericht 88: EMV in der Kfz-Technik, Wolfsburg, 2017