

Entwicklung einer Ersatzlast zur Nachbildung des Fahrzeugs bei Emissionsmessungen an induktiven Ladesystemen

Dr.-Ing. Sebastian Jeschke, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, Deutschland, jeschke@emc-test.de

Dipl.-Ing. Marc Maarleveld, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, Deutschland, maarleveld@emc-test.de

Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Str.76, 44227 Dortmund, Deutschland, baerenfaenger@emc-test.de

Amelie Burkert, M.Sc., Lehrstuhl für Elektromobilität und Energiespeichersysteme, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland, burkert@uni-wuppertal.de

Prof. Dr.-Ing Benedikt Schmülling, Lehrstuhl für Elektromobilität und Energiespeichersysteme, Bergische Universität Wuppertal, Deutschland, schmuelling@uni-wuppertal.de

1 Einleitung

Im Zuge der vorschreitenden Einführung von Elektro- und Hybridfahrzeugen kommt es durch den Einsatz von leistungselektronisch geregelten Antriebssystemen und Ladeinfrastrukturkomponenten zu enormen Herausforderungen im Bereich der EMV. Neben den aktuell bereits standardmäßig eingesetzten AC und DC Ladestationen im privaten und öffentlichen Bereich sind auch kontaktlose, induktive Ladesysteme in der Entwicklung. Mit diesen Ladesystemen ist es möglich über zwei gekoppelte Spulen die Ladeleistung zwischen Ladesäule und Fahrzeug zu übertragen. Da bei der Energieübertragung zwischen den Spulen hohe Magnetfelder bei Frequenzen von 79 kHz bis 90 kHz generiert werden, ist eine messtechnische Überprüfung des Feldes in der Nähe des Fahrzeugs nötig. Zudem werden, da die Primärspule leistungselektronisch betrieben wird, neben den beispielsweise gewählten 85 kHz weitere breitbandige Störungen im Fahrzeug und der Umgebung generiert.

Die EMV Absicherung dieser Systeme wird in der Normenreihe IEC 61980-1/-3 [1] behandelt. Diese verweist für die gestrahlten Emissionsmessungen auf die CISPR 11 [2]. Bei längeren Zuleitungen zwischen Leistungselektronik und Bodenspule, wird in der ETSI EN 303417 [3] auch eine Messung der Gleichtaktstörströme gefordert.

Da neben den 85 kHz für die Energieübertragung auch die harmonischen auf die Fahrzeugseite übertragen werden, ist es hier von Interesse genaue Kenntnis über diese Störungen zu haben. Diese sollten auf der Fahrzeugseite im Idealfall die Hochvolt Grenzwerte nach CISPR 25 [4] einhalten.

Bei den Testaufbau für die Vermessung von induktiven Ladestationen wird in dem aktuellen Entwurf der CISPR 11 CIS/B/710/CD [5] auf der Sekundärseite statt eines Fahrzeugs ein Metallplatte an der die Sekundärspule befestigt ist sowie eine resistive Last eingesetzt um einen Leistungsfluss während der Messung zu realisieren. Diese Last wird in der Standardisierung nicht weiter spezifiziert.

Es wird allerdings deutlich, dass ein Lastwiderstand nicht die Impedanzverhältnisse innerhalb des Fahrzeugs abbildet.

Um die Überkopplung von Störungen auf das Fahrzeug sowie die Einflüsse einer realistischeren Lastsituation auf das Emissionsverhalten des Systems zu untersuchen wird in dieser Arbeit sekundärseitig eine Batterieersatzlast [5] eingesetzt, welche die Impedanz einer Antriebsbatterie nachbildet. Hierdurch kann genau untersucht werden, welche Störungen von der Ladesäule auf das Fahrzeugbordnetz überkoppeln.

2 Testaufbau für induktive Ladesysteme

Bild 1 zeigt einen typischen Aufbau für Emissionsmessungen an einem induktiven Ladesystem. Hier wird als Abschluss auf der Sekundärseite eine Last verwendet, die die Gegenstelle für den Energiefluss während der Emissionsmessung darstellt. Zudem wird die abschirmende Wirkung der Fahrzeugkarosserie über eine Metallplatte nachgebildet. Da die Peripherie keinen Beitrag zu den Emissionen liefern soll, wird Sie idealerweise als ohmsche Last realisiert. Um allerdings ein möglichst reales Emissionsverhalten des Systems zu erhalten, ist eine genauere Nachbildung des Fahrzeugs nötig.

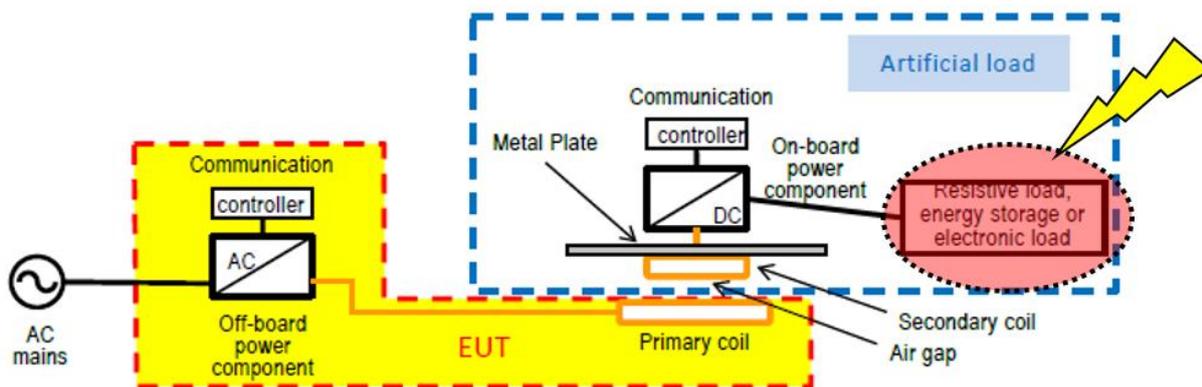


Bild 1: Testaufbau für die Vermessung von primären WPT Systemen nach CISPR 11 CIS/B/710/CD [5]

Wird das Elektrofahrzeug auf der Sekundärseite betrachtet, so sind dort neben der Sekundärspule noch die Antriebsbatterie und ggf. noch ein geregeltes Ladegerät beim Ladevorgang aktiv. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit wird das Fahrzeug auf die Sekundärspule und die Antriebsbatterie reduziert. Der Energiefluss wird somit über die primäre Leistungselektronik geregelt. Um die Sekundärseite frei von eigenen Emissionsbeiträgen zu halten, wird zudem auf die Gleichrichtung verzichtet. Somit ist es möglich alleine die Störungen der Primärseite auf der Sekundärseite messtechnisch zu erfassen.

Um die Impedanz der Antriebsbatterie nachzubilden wird eine passive Batterieersatzlast eingesetzt, welche dem Lastwiderstand vorgeschaltet wird. Diese bildet die Gleich- und Gegentaktimpedanz einer Hybridbatterie nach und kann bei hohen Ladeleistungen eingesetzt werden.

Das in der Arbeit eingesetzte induktive Ladesystem (siehe Bild 2) besteht aus einem Controller Board, über das ein Rechtecksignal bei 85 kHz erzeugt wird. Dieses Signal wird

dann eingesetzt um eine H-Brückenschaltung anzusteuern, an deren Lastseite die Primärspule angeschlossen ist. Zur Blindleistungskompensation wird bei dem eingesetzten Ladesystem eine serielle Kapazität zu Kompensation eingesetzt.

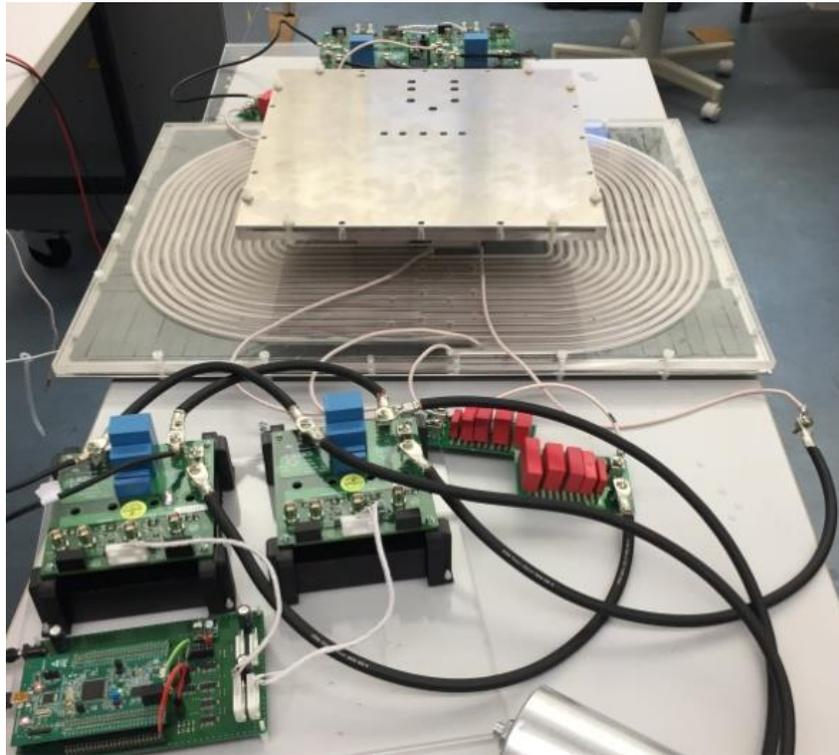


Bild 2 Setup des induktiven Ladesystems [7]

Durch den Betrieb des Ladesystems mit einer Rechteckspannung entstehen bezüglich der Störemission sowohl Gegen- als auch Gleichtaktstörungen, die auch auf die Sekundärseite übertragen werden (Siehe Bild 3). Hierbei werden die Gegentaktstörungen, wie auch der Nutzstrom über die induktive Kopplung zwischen Primär und Sekundärspule übertragen. Bild 3 zeigt hier rechts sowohl die Impedanz des Systems von der Primärseite aus als auch den Verlauf der Emissionen der Leistungselektronik. Aus dem Impedanzverlauf ist klar die Reihenresonanz durch die Kompensation auf der Primärseite zu erkennen. Bei der Energieübertragungsfrequenz ist die Impedanz des Systems minimal. Im weiteren Verlauf steigt die Impedanz weiter an, fällt aber hin zu 5 MHz wieder ab, so dass die Filterwirkung des Bandpasses begrenzt ist.

Die Gleichtaktstörungen werden durch die Schalthandlungen in der H-Brücke und die dadurch bedingten Potentialsprünge an der Primärspule verursacht und breiten sich kapazitiv gegen Erdpotential aber auch in Richtung der Sekundärspule aus. Die Koppelkapazität zwischen den beiden Spulen kann über die Formel eines Plattenkondensators abgeschätzt werden. Da im verwendeten System die Primärspule deutlich größer als die Sekundärspule ist, wird der Einfluss des Spulensversatzes für die Energieübertragung reduziert. Die Koppelkapazität in Bild 3 wird durch den Abstand der Primärspule zum Massepotential bestimmt und zeigt bis zum Resonanzpunkt bei etwa 4 MHz ein rein kapazitives Verhalten. Diese Reihenresonanz zwischen der Kapazität der Primärspule und der Induktivität der Zuleitung führt zu einem Störstrom von etwa 1 A im Resonanzpunkt.

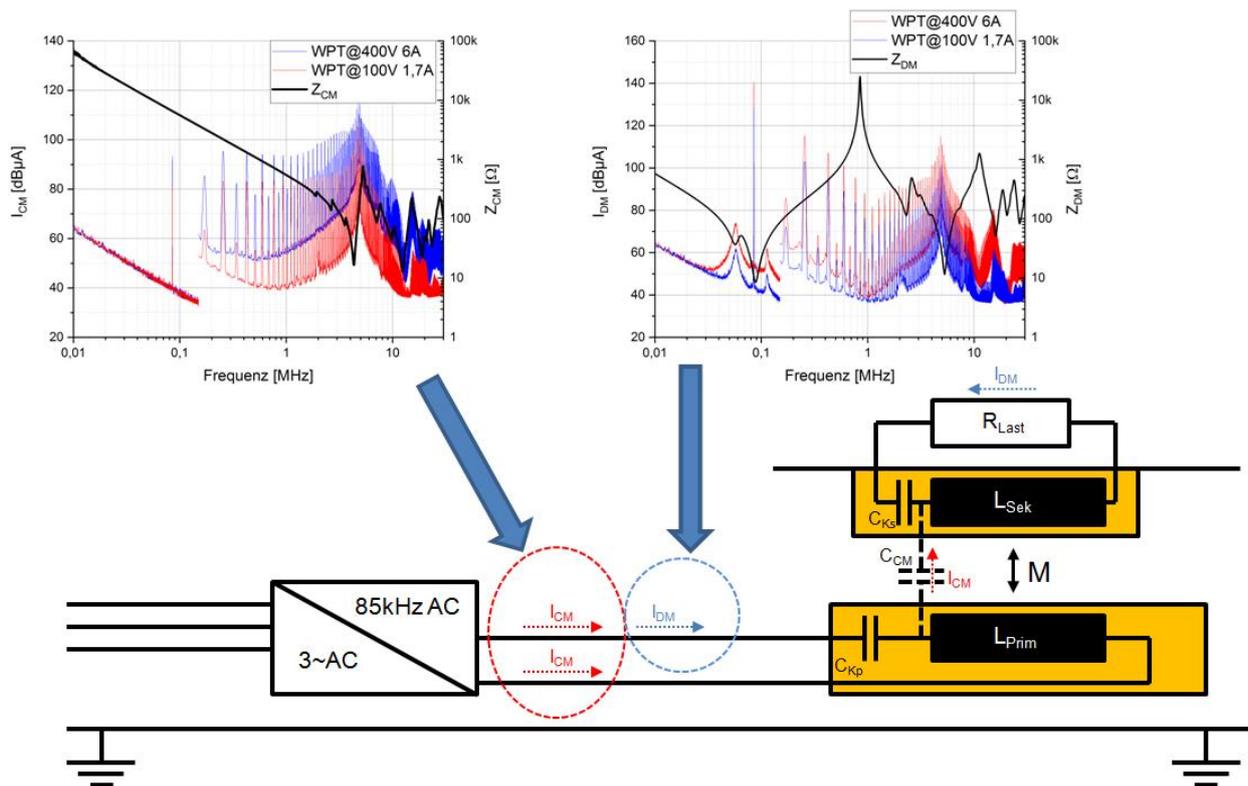


Bild 3 Koppelpfade und Störemissionen des induktiven Ladesystems

Wird nur der Strompfad für die Gleichtaktimpedanz der Primärseite betrachtet, so ergibt sich das folgende vereinfachte Ersatzschaltbild (Siehe Bild 4). Mit den Werten für die Zuleitungsinduktivität und der Kopplungskapazität zwischen der Primärspule und Erdpotential kann die Resonanzfrequenz des Systems bestimmt werden zu

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2L_{ZU}C_K}} \quad (1).$$

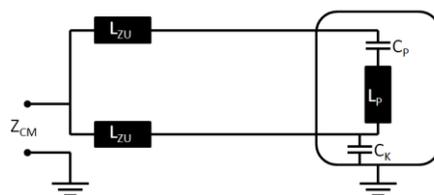


Bild 4 Gleichtaktersatzschaltbild der Primärseite

Gerade mit Bezug auf öffentliche induktive Ladesysteme, die ähnlich den HPC Charging Stationen [8] als Satellitenstation mit langen Zuleitungen ausgeführt werden können, sollte aufgrund der erhöhten Emissionen im Resonanzpunkt auf eine ausreichende Filterung geachtet werden. Anhand von Gleichung (1) wird deutlich, dass eine Verlängerung der Zuleitung zu einer Verschiebung der Resonanzfrequenz hinzu höheren Frequenzen führt.

3 Nachbildung der Batterieimpedanz auf der Sekundärseite

Um bei der Emissionsmessung von induktiven Ladestationen das Fahrzeug möglichst genau nachzubilden, wird ein Aufbau ähnlich dem in Bild 1. Hierbei wird auf der Sekundärseite eine Metallplatte verwendet, an deren Unterseite die Sekundärspule befestigt wird. Diese Metallplatte dient der Nachbildung der Fahrzeugkarosserie, die gerade bei gestrahlten Emissionsmessung eine abschirmende Wirkung hat. Bild 5 zeigt den Aufbau einer Magnetfeldemissionsmessung nach dem Entwurf der CISPR 11 mit dem induktiven Ladesystem. Hierbei wird eine einfache ohmsche Last auf der Sekundärseite verwendet.

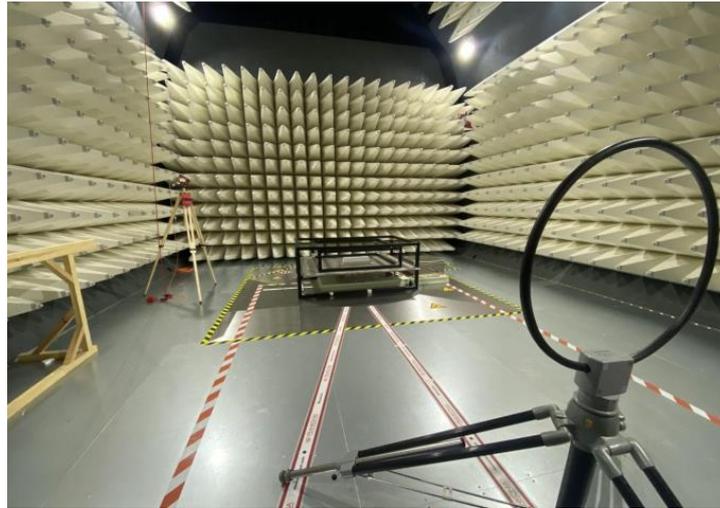


Bild 5 Testaufbau für Magnetfeldemissionsmessung an induktiver Ladestation

Neben der abgestrahlten Emission ist es aber gerade auf der Fahrzeugseite für die innere EMV Absicherung wichtig, den Anteil der Emissionen zu erfassen, die von der Ladestation ins Fahrzeug überkoppeln. Hierzu ist eine realistische Nachbildung der Fahrzeugimpedanz auf der Sekundärseite nötig. Da während des Ladevorgangs im Wesentlichen die Fahrzeugbatterie an der Sekundärseite angeschlossen ist, wird diese für die folgenden Untersuchungen durch eine passive Ersatzlast, die in [5] vorgestellt wurde nachgebildet. Die Batterieersatzlast bildet die Gleich- und Gegentaktimpedanz einer Hybridbatterie nach [9] und ist aus rein passiven Bauelementen aufgebaut. Hierdurch werden auf der Sekundärseite keine Eigenstörungen erzeugt und es können nur die Emissionen der Sekundärseite bewertet werden.

Um mit der Ersatzlast auch Wirkleitung auf der Sekundärseite umzusetzen, wird diese um eine möglichst ohmsche Last erweitert. Hierdurch ergibt sich das in Bild 6 gezeigte Ersatzschaltbild der Last. Die daran angeschlossene Last hat einen Widerstand von 2 Ohm und einen induktiven Anteil, wie die Messungen der Gegentaktimpedanz in Bild 7 zeigen. Hierdurch verschiebt sich die Resonanzfrequenz in Punkt 1 und muss angepasst werden. Da die Resonanz durch die Induktivitäten L_{ZK} und L_{Last} und die Kapazität C_{ZK} bestimmt wird und der Resonanzpunkt auch mit der Last wieder bei etwa 800 kHz liegen soll berechnet sich die neue Kapazität C_{ZK} zu

$$C_{ZK} = \frac{1}{2\pi f_{res1}^2 (2L_{ZK} + L_{Last})} \quad (2).$$

Mit Anpassung der Kapazität ergibt sich der Verlauf der Gegentaktimpedanz für die Kombination auf ohmscher Last und Batterieersatzlast in Bild 7 rechts. Insgesamt ist die Gegentaktimpedanz mit der Ersatzlast schon deutlich näher an der Impedanz der Originalbatterie. Allerdings ist die Impedanz dieser gerade im niederfrequenten Bereich noch einmal deutlich niederohmiger als die 2 Ohm des Lastwiderstands, wodurch sich die gesamte Kurve etwas nach oben verschiebt, da das Ladesystem aber nicht auf einen Kurzschluss arbeiten kann, ist eine gewisse Abweichung im Gegentakt nicht zu vermeiden.

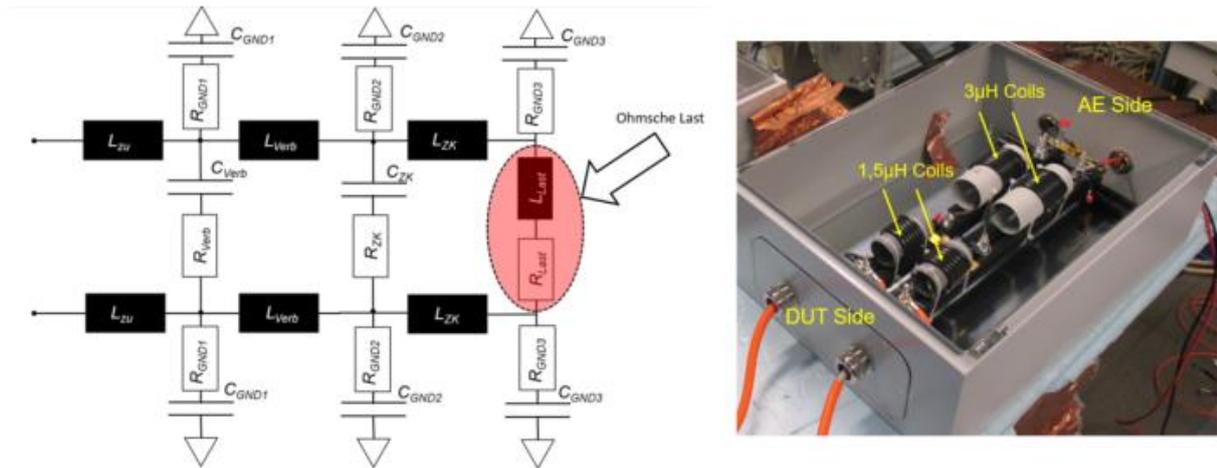


Bild 6 Batterieersatzlast; links: Ersatzschaltbild; rechts: realisierte Ersatzlast

Bei der Gleichtaktimpedanz ist keine Anpassung der Ersatzlast erforderlich. Die Streukapazität der ohmschen Last berechnet sich mit den Werten aus Punkt 2 in Bild 7 nach

$$C_{Streu,Last} = \frac{1}{2\pi Z_2} \quad (3)$$

zu 280 pF und ist somit sehr gering im Vergleich mit den vorhandenen Erdkapazitäten in der Ersatzlast. Allerdings wird beim Vergleich der Gleichtaktimpedanzen deutlich, dass das zuschalten der Ersatzlast die Impedanz schon deutlich reduziert und somit deutlich höhere Emissionen als beim Einsatz der reinen ohmschen Last zu erwarten sind.

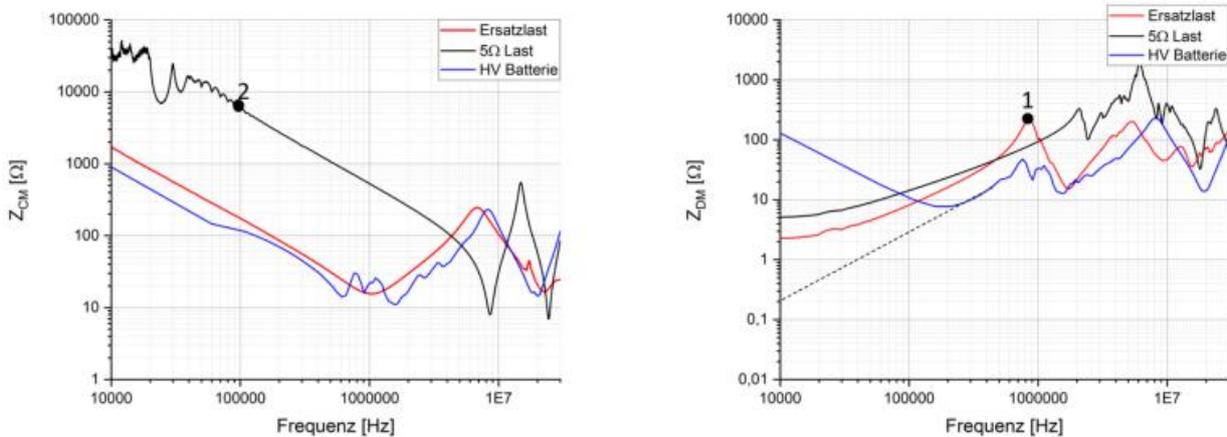


Bild 7 Vergleich der Lastimpedanzen; Links: Gleichtakt; rechts: Gegentakt

4 Untersuchungen zur Störeinkopplung auf der Sekundärseite

Da gerade die leitungsgeführten Emissionen, die von der Ladestation ins Fahrzeug koppeln interessant für die fahrzeuginterne EMV sind, wurden mit dem System die Sekundärseitigen Störströme bei unterschiedlichen Lastsituationen gemessen. Um einen Einfluss durch sekundärseitige Störungen zu vermeiden, wird die Fahrzeugseite allein durch die Batterieimpedanz nachgebildet. Es wird also kein Laderegler oder Gleichrichter eingesetzt. Somit werden alle erfassten Störströme in der primärseitigen Ladestation generiert. Die Ergebnisse in Bild 8 zeigen auf der linken Seite deutliche Unterschiede in Abhängigkeit von der angeschlossenen Last beim Gleichtaktstrom. Zeigte sich in Bild 7 auch schon ein deutlicher Unterschied in der Impedanz so ergeben sich bei der Störstrommessung wesentlich höhere Störströme bei der Ersatzlast als bei der reinen ohmschen Last. Ein ähnlicher Einfluss der Impedanz zeigt sich auch bei der Messung des Gegentaktstroms auf der Sekundärseite. Hier liegt die Impedanz der Ersatzlast meist unter der der rein ohmschen Last, was auch hier zu erhöhten Emissionen führt. Generell zeigen die Messungen, dass die Last gerade bei den leitungsgeführten Emissionen auf der Sekundärseite einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Störströme hat. Durch den Einsatz der ohmschen Last in Kombination mit der Batterieersatzlast werden deutlich höhere fahrzeuginterne Emissionen gemessen, die eher den Störströmen an der Fahrzeugbatterie entsprechen.

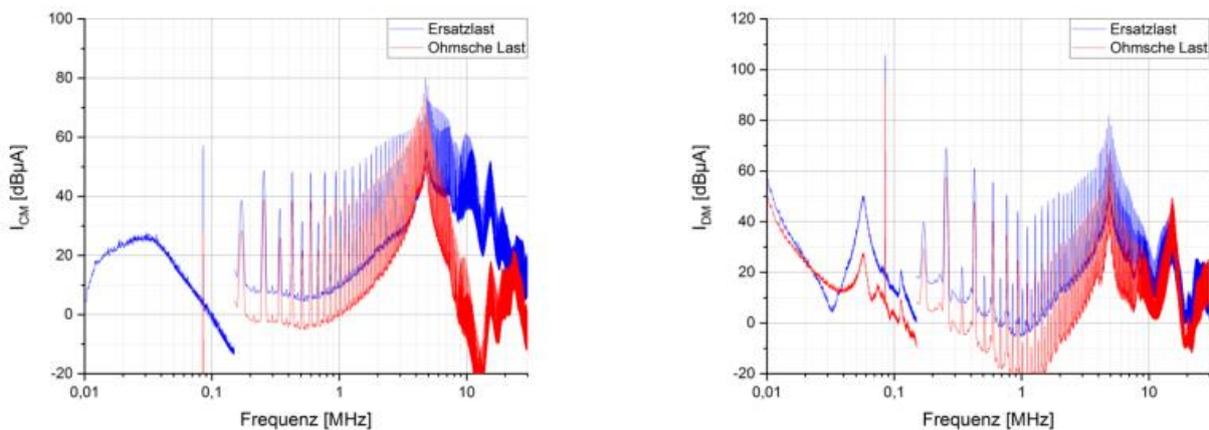


Bild 8 Vergleich der Störströme aus der Sekundärseite bei verschiedenen Lasten: links: Gleichtakt; rechts: Gegentakt

5 Zusammenfassung

Alternativ zu konduktiven Ladesysteme sind induktive Ladesysteme eine komfortable alternative zum Laden von Elektrofahrzeugen. Aktuelle Ladesysteme arbeiten bei einer Frequenz zwischen 79 kHz und 90 kHz für die Energieübertragung über das Magnetische Feld zwischen Primär- und Sekundärspule. Hierbei wird der Ladestrom auf der Primärseite über eine H-Brücken Schaltung generiert, welche aufgrund der steilen Spannungsfanken breitbandige Störaussendungen verursacht. Diese Emissionen werden auf der Primärseite sowohl gestrahlt als auch leitungsgebunden gemessen. Neben diesen primärseitigen Emissionen ist aber auch der Anteil der Störungen, die auf die Sekundärseite und somit ins Fahrzeug koppeln gerade für die fahrzeuginterne EMV von großem Interesse.

Hierzu wurde im Rahmen dieser Arbeit untersucht, welchen Einfluss die sekundärseitige Last auf die Impedanz und somit die Störemissionen hat. Um die Fahrzeugimpedanz nachzubilden wurde eine Batterieersatzlast eingesetzt, die nach entsprechender Anpassung auch in Kombination mit einer rein ohmschen Last, die Impedanz der Fahrzeugseite nachbildet. Der Einsatz einer rein ohmschen Last zeigt deutliche Abweichungen zu Impedanz einer HV Batterie.

Die abschließenden Störstrommessungen haben gezeigt, dass gerade der Gleichtaktstörstrom beim Einsatz der Ersatzlast deutlich erhöht ist. Dies kann mit der höheren Streukapazität aller Batteriezellen gegen das Batteriegehäuse im Vergleich zur relativ kleinen Fläche des Lastwiderstands begründet werden. Auch beim Gegentaktstrom zeigen sich Unterschiede bei Sekundärstrom, da die Impedanz der Batterieersatzlast meist unter der rein ohmschen Last liegt. Generell zeigt sich, dass der Einsatz der Last einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Fahrzeugseitigen Störströme hat und es somit sinnvoll ist auch auf der Sekundärseite die Impedanzverhältnisse im Fahrzeug nachzubilden.

Literaturangaben

- [1] IEC 61980-3, *Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 3: Specific requirements for the magnetic field wireless power transfer systems*, Genf: IEC International Electrotechnical Commission, 2015
- [2] EN 55011:2009, *Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte – Funkstörungen – Grenzwerte und Messverfahren*, DKE, 05/2010
- [3] Final draft ETSI EN 303 417 V1.1.1, *Wireless power transmission systems, using technologies other than radio frequency beam, in the 19-21 kHz, 59-61 kHz, 79-90 kHz, 100-300 kHz, 6765-6795 kHz ranges*, ETSI, 06/2017
- [4] CISPR 25:2016-10 ed.4 *Vehicles, Boats and Internal Combustion Engines-Radio Disturbance Characteristics-Limit and Method of Measurement for the Protection of On-Board Receivers –Standard*, 10/2016
- [5] S.Jeschke, M.Maarleveld, J.Bärenfänger, H.Hirsch, S.Tsiapenko, C.Waldera, M.Obholz, *Development of a Passive Impedance Network for Modeling Electric Vehicle Traction Batteries for EMI Measurements*, EMC Europe 2017, 09/2017
- [6] CISPR 11 CIS/B/710/CD, Amendment 3 Fragment 1 to CISPR 11 Ed. 6: *Industrial, scientific and medical equipment – Radiofrequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement - Requirements for airgap wireless power transfer (WPT)*, DKE 08/2018
- [7] S.Jeschke, M.Maarleveld, J.Bärenfänger, *EMV von Elektrofahrzeugen im Ladevorgang: Herausforderungen beim induktiven und konduktiven Laden*, Wissenschaftsforum 2019, 06/2019
- [8] https://ionity.eu/_Resources/Persistent/43fb4cba73e05158353d82665f4b1ecd4653da3a/20190527_IONITY-100-DE-Final.pdf
- [9] USER'S MANUAL for Azure Balance HEV Battery System, M.Evans, Bedienungsanleitung HEV Batterie, Okt 2009