

Aufbau einer aktiven Last für Emissionsmessungen an induktiven Ladestationen für Elektrofahrzeuge

Dipl.-Ing. Andreas Grünwaldt, EMC Test NRW GmbH, Deutschland
Dr.-Ing. Sebastian Jeschke, EMC Test NRW GmbH, Deutschland
Marcel Olbrich, M.Sc., EMC Test NRW GmbH, Deutschland
Michael Kleinen, M.Eng., EMC Test NRW GmbH, Deutschland
Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, EMC Test NRW GmbH, Deutschland

1 Einleitung

Neben der aktuell stark voranschreitenden Elektrifizierung des Individualverkehrs wird auch die Ladeinfrastruktur flächendeckend ausgebaut. Dabei sind neben den weit verbreiteten konduktiven Ladestationen auch induktive Ladesysteme in der Entwicklung [1]. Diese sind gerade auf dem Weg zur vollständigen Automatisierung des Verkehrs eine mögliche Lösung, da neben dem Fahren auch das Laden vollautomatisch erfolgen kann. Die Systeme sind aktuell in der Lage im PKW-Bereich Ladeleistungen von 11 kW [2] über zwei luftspaltgekoppelte Spulen bei einer Arbeitsfrequenz zwischen 79 kHz und 90 kHz zu realisieren. Da dieses Signal zur Energieübertragung in der Ladestation über eine leistungselektronische Schaltung generiert wird, kommt es zu breitbandigen Störaussendungen, die im Rahmen einer EMV-Absicherung die Grenzwerte der IEC 61980-3 [3] einhalten müssen. Besonders kritisch sind hier die Grenzwerte für die Magnetfeldemissionen im Bereich zwischen 9 kHz und 30 MHz zu sehen, die mit einer Magnetfeldantenne in 3 m bzw. 10 m Entfernung in einer Absorberhalle SAC gemessen werden [4]. Um eine solche Ladestation in einem realistischen Betriebszustand betreiben zu können, kann in der aktuellen Standardisierung entweder das passende Fahrzeug oder alternativ eine Stahlplatte mit der fahrzeuginternen Ladeelektronik sowie der Fahrzeugspule als Peripherie eingesetzt werden. Da die generierte Ladeleistung fahrzeugseitig gesenkt werden muss, kann hier entweder eine passive oder eine aktive Last zum Einsatz kommen. Hierbei hat die aktive Last den Vorteil, dass ähnlich zum Fahrzeug, auch eine Gegenspannung anliegt und die Ladeleistung besser geregelt werden kann. Allerdings wird die Impedanz des Fahrzeugs bzw. der Hochvoltbatterie bei der Realisierung solcher Lasten aktuell nicht berücksichtigt.

Um die Fahrzeugimpedanz bei Magnetfeldemissionsmessungen an induktiven Ladestationen nachzubilden, wird in dieser Arbeit eine aktive Last entwickelt. Hierzu wird mit einem induktiv entkoppelten vektorieller Netzwerkanalysator (VNA) [5] die Systemimpedanz eines Elektrofahrzeugs im aktiven DC-Ladebetrieb vermessen und mit einer passiven Last nachgebildet [6]. Die Einflüsse dieser Last auf den Magnetfeldemissionen eines induktiven Ladesystems werden abschließend präsentiert.

2 Induktive Ladesysteme im EMV-Kontext

Prinzipiell arbeiten induktive Ladesysteme mit einer Energieübertragung zwischen zwei luftgekoppelten Spulen über das magnetische Feld. Dabei wird durch die Primärspule ein sinusförmiger Strom geleitet, der ein entsprechendes Magnetfeld erzeugt. Dieses Magnetfeld durchsetzt die Sekundärspule im Fahrzeug, induziert dort eine Spannung, wodurch es zu einem Stromfluss kommt, der nach Gleichrichtung die Fahrzeugbatterie lädt. Um effizient Wirkleistung zu übertragen, wird die induktive Blindleistung auf beiden Seiten mit entsprechenden Kapazitäten bei der Energieübertragungsfrequenz kompensiert. Für eine solche Kompensation gibt es verschiedenste Konzepte, wobei in dieser Arbeit eine Serienkompensation auf beiden Seiten zum Einsatz kommt. Da die Arbeitsfrequenz über eine leistungselektronische Brückenschaltung realisiert wird, kommt es neben der Energieübertragungsfrequenz zu harmonischen, die bis in hohe Frequenzbereiche messbar sind.

Abbildung 1 zeigt schematisch den Aufbau eines solchen Systems mit den zugehörigen Störstrompfaden, die für die Magnetfeldemissionen verantwortlich sind. Bei dem gezeigten induktiven Ladesystem ergeben sich zwei Störstrompfade, die unterschiedliche Einflüsse auf die gemessenen Magnetfeld-emissionen haben. Auf der einen Seite kommt es zu Gegentaktstörströmen, die sich aus den Harmonischen des Ladestroms ergeben. Da hier Hin- und Rückleiter in einem Kabelverbund verlegt sind hier im Wesentlichen die Spulen für die Magnetfeldemissionen verantwortlich. Auf der anderen Seite kommt es durch die Schalthandlungen innerhalb der Leistungselektronik zu kapazitiven Ausgleichsströmen (Gleichtaktströmen) zwischen den aktiven Systemkomponenten und dem Massepotential. Bei einer Messung innerhalb einer SAC schließt sich dieser parasitäre Stromkreis zum größten Teil über den Metallboden, wodurch eine große Fläche aufgespannt wird und es zu signifikanten Magnetfeldemissionen kommt. Auch auf der Fahrzeugseite kommt es zu diesen beiden Strömen, die ebenfalls einen Teil der Magnetfeldemissionen in 10 m Messentfernung generieren.

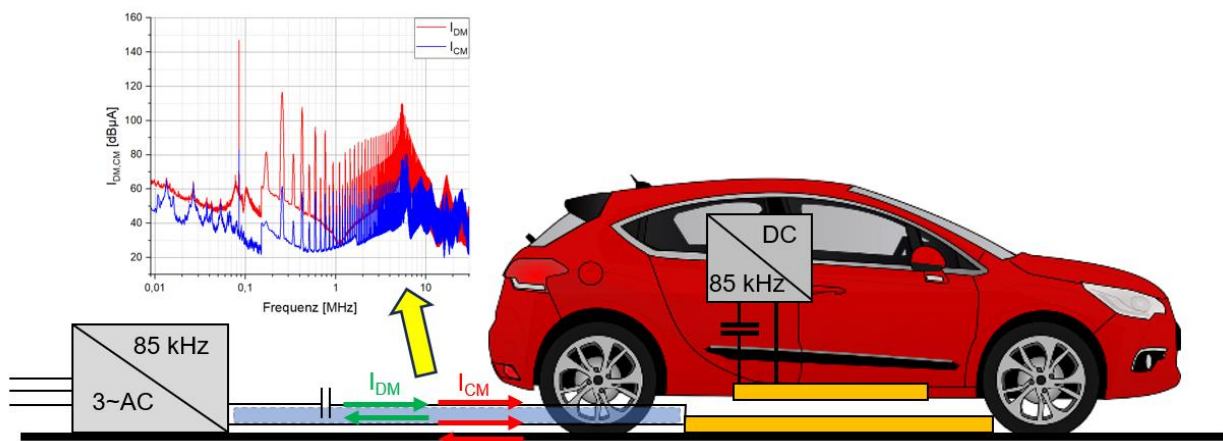


Abbildung 1 Schematischer Aufbau eines induktiven Ladesystems mit typischen Störstrompfaden

Der Zusammenhang zwischen den Störströmen und dem Magnetfeld, der in [7] untersucht wurde zeigt, dass die Magnetfelder bei niedrigen Frequenzen bis etwa zur 7ten Harmonischen durch den Gegentaktstrom durch die Spulen generiert werden. Im weiteren Verlauf werden die Magnetfeldemissionen dann durch den Gleichtaktstrom über den Hallenboden generiert. Da es auch auf der Fahrzeugseite zu Gleich- und Gegentaktströmen kommt, bestimmt auch die im Testsetup sekundärseitig angeschlossene Last den Strom und hat somit direkten Einfluss auf die Magnetfeldemissionen.

3 Bestimmung der Impedanz von Elektrofahrzeugen im aktiven Betrieb

Im Folgenden Abschnitt wird erläutert, wie die Impedanz von Elektrofahrzeugen im aktiven Betrieb bestimmt werden kann. Zur Messung wird ein VNA eingesetzt, der für eine Reflexionsmessung an einem Hochvolt-System entkoppelt werden muss. Diese Entkopplung wird hier induktiv über einen Transformator mit Ferritkern realisiert. Die Übertragungseigenschaften dieses Transformators sind in Abbildung 2 dargestellt. Im für die Magnetfeldmessung relevanten Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 30 MHz hat der Transformator einen nahezu konstanten Transmissionsfaktor. Zudem sind die eingesetzten Ferritkerne mit gewickeltem Blech realisiert, wodurch sich auch bei einer Gegentaktimpedanzmessung erst ab einem Ladestrom von 3 A erste Sättigungseffekte zeigen.

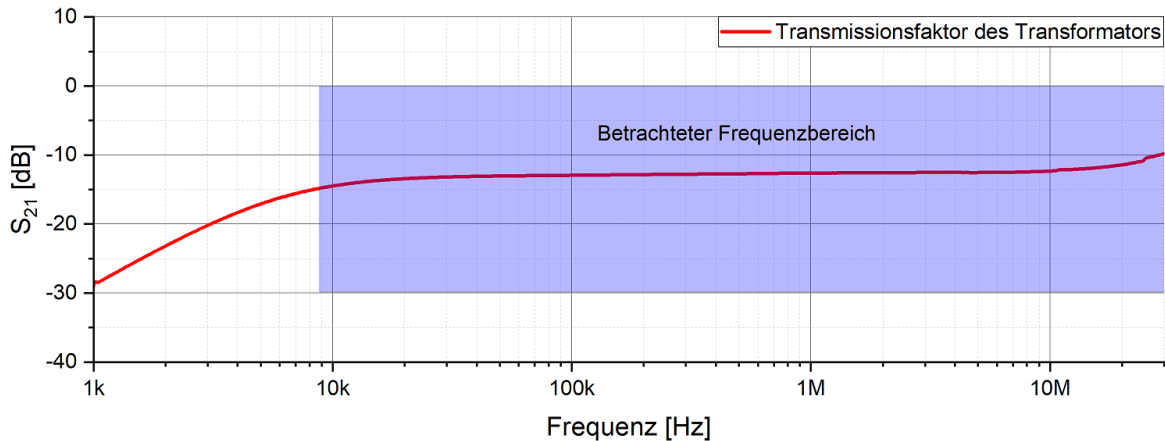


Abbildung 2 Transmissionsfaktor des verwendeten Ferritkerntransformators zwischen 1 kHz und 30 MHz

Die Messung erfolgt nun nach dem transformatorischen Prinzip, wobei die Primärwicklung an den VNA angeschlossen ist und die Sekundärwicklung das Ladekabel und die Impedanz von Ladesäule und Fahrzeug darstellt. Die Übertragungseigenschaften des Transformators werden vor der Messung mittels einer Open-Short-Match Kalibrierung erfasst, so dass direkt die sekundärseitige Impedanz des Systems gemessen werden kann. Im Detail zeigt Abbildung 3 das Messsetup sowohl für die Gegentakt- als auch für die Gleichtaktimpedanz. Da das Ladekabel eine Länge von 5 m hat, kommt es bei höheren Frequenzen zu Reflexionen, die den messbaren Frequenzbereich in diesem Setup auf etwa 8 MHz begrenzen.

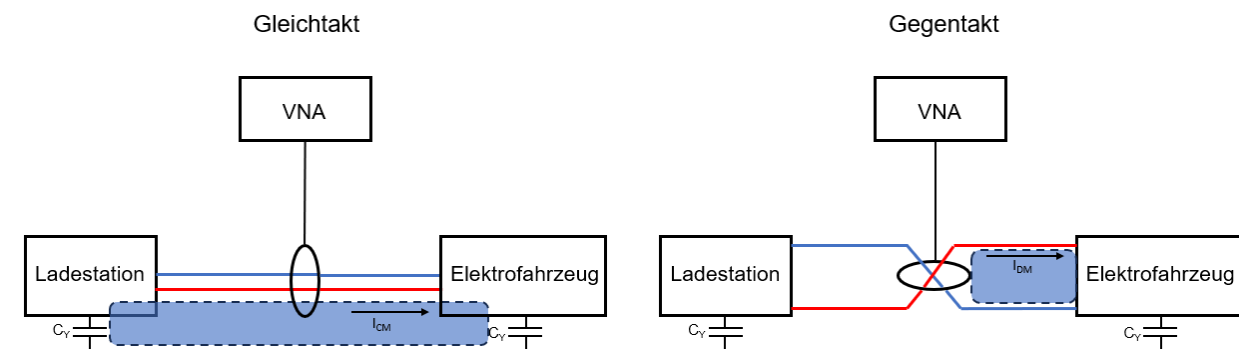


Abbildung 3 Schematischer Messaufbau zur Messung der Gleichtakt- und Gegentaktssystemimpedanz im DC-Ladebetrieb

Bei der Messung der Gleichtaktimpedanz wird die Stromschleife über HV+ parallel HV- und über PE zurück gemessen. Hierbei sind die Impedanzen von Ladesäule und Fahrzeug in Reihe geschaltet, so dass sich die Impedanz des Fahrzeugs bei bekannter Ladesäulenimpedanz mit

$$Z_{EV} = Z_{Gesamt} - Z_{Ladesäule} \quad (1)$$

berechnen lässt. Für die Messung der Gegentaktimpedanz werden HV+ und HV- gekreuzt durch den Transformator gelegt, woraus sich direkt der Gegentaktstrompfad ergibt. Anders als beim Gleichtakt sind hier zwei Wicklungen auf der Sekundärseite durch den Kern geführt, wodurch sich für die Gesamtimpedanz ein zusätzlicher Übertragungsfaktor von vier ergibt. Abschließend kann die Impedanz des Fahrzeugs für die Parallelschaltung mit folgender Formel berechnet werden

$$Z_{EV} = \frac{Z_{Gesamt} \cdot Z_{Ladesäule}}{Z_{Ladesäule} - Z_{Gesamt}} \quad (2).$$

Bei der anschließenden Vermessung der Fahrzeuge wird zur Entkopplung auf der Ladesäulenseite ein Kabinenfilter eingesetzt. Dies hat zum einen den Vorteil, dass die Emissionen der Ladesäule keinen Einfluss auf die Messung der Impedanz haben.

Zum anderen wird durch den Filter die Impedanz der Ladesäule vollständig entkoppelt, so dass die Impedanz des Filters direkt mit dem VNA gemessen werden und in (1) und (2) für die Berechnung der Fahrzeugimpedanz genutzt werden kann.

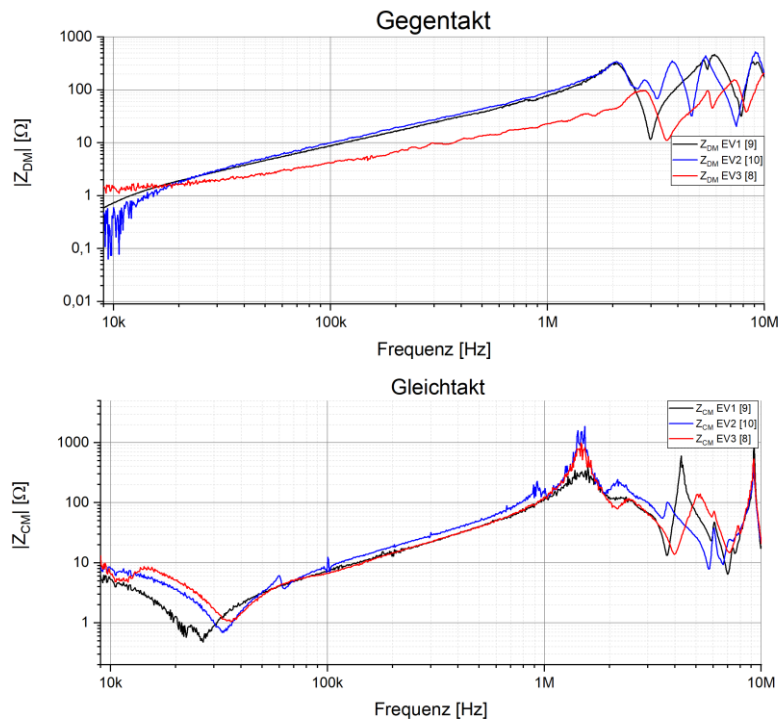


Abbildung 4 Betrag der Systemimpedanz Kabinenfilter und Elektrofahrzeug im DC-Ladebetrieb für verschiedene Fahrzeuge [8], [9], [10] (oben: Gegentakt; unten: Gleichtakt)

Die Ergebnisse der Messungen sind in Abbildung 4 für die Gleich- und die Gegentaktimpedanz dargestellt. Hierbei werden Fahrzeuge mit unterschiedlichen Batteriekapazitäten (zwischen 38 kWh und 76 kWh) vermessen und der Ladestrom im Gegentakt auf 1 A begrenzt, um Sättigungseffekte so gering wie möglich zu halten. Da bei Elektrofahrzeugen im DC-Ladebetrieb im Wesentlichen die Hochvoltbatterie und ggf. noch Nebenaggregate zur Temperaturregelung aktiv sind, zeigen die Ergebnisse für alle Fahrzeuge einen ähnlichen Impedanzverlauf. Im Gegentakt zeigt sich im unteren Frequenzbereich ein induktiver Verlauf, der zum einen durch die Zuleitungen und zum anderen durch den Induktivitätsbelag der Batteriezellen verursacht wird. Bei einer Frequenz von 9 kHz deutet sich zudem bei EV1 und EV3 ein kapazitiver Verlauf an, der durch die X-Kapazitäten in den fahrzeuginternen EMV-Filtern verursacht wird. Im Gleichtakt zeigt sich im Bereich zwischen 9 kHz und 40 kHz ein kapazitives Verhalten, welches durch die Summe der Y-Kapazitäten in den EMV-Filtern und der parasitären Streukapazität der Batteriezellen gegen das Batteriegehäuse bestimmt wird. Im Folgenden werden die Impedanzmessungen an EV1 herangezogen, um eine Ersatzlast des Fahrzeugs bzw. der im DC-Ladebetrieb aktiven Komponenten zu erstellen.

4 Aufbau einer Ersatzlast zur Nachbildung der Impedanz eines Elektrofahrzeugs

Zur Nachbildung der Impedanz, wird zwischen der Gleich- und der Gegentaktimpedanz unterschieden. Hierbei beschreibt die Gleichtaktimpedanz alle Elemente, die zwischen HV+, HV- und Bezugsmasse liegen (siehe Abbildung 5). Die Gegentaktimpedanz wird dann durch Bauelemente zwischen HV+ und HV- beschrieben. Das Ersatzschaltbild in Abbildung 5 zeigt zwischen HV+ und HV- eine X-Kapazität, die die Parallelschaltung der X-Link Kondensatoren, die im Fahrzeug aktiv sind, modelliert. Weiter auf der rechten Seite ist eine Gleichspannungsquelle zu sehen, die die Gegenspannung bereitstellt. Ihr Innenwiderstand wird an der Quelle eingestellt.

Zudem werden noch die Induktivitäten der Batteriezellen, der Zellverbinder sowie eine reinen Gegentaktinduktivität nachgebildet.

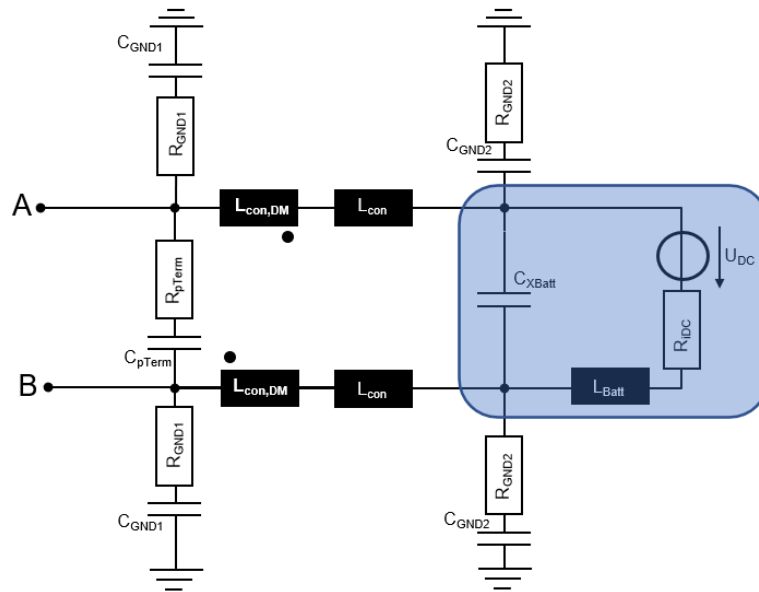


Abbildung 5 Ersatzschaltbild zur Modellierung der Impedanz eines Elektrofahrzeugs im DC-Ladebetrieb

Für den Gleichtakt ergeben sich zwei Y-Kapazitäten gegen Masse, die mit der Induktivität der Zellverbinder den Verlauf in Abbildung 6 ergeben. Eine detaillierte Berechnung der Elemente der Ersatzschaltung wird in [7] beschrieben. Zudem sind die exakten Bauteilwerte in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1 Werte der Elemente im Ersatzschaltbild in Abbildung 5

C_{GND1}	R_{GND1}	C_{GND2}	R_{GND2}	$L_{con, DM}$	L_{con}
1.75 nF	2000 Ω	1.5 μ F	2 Ω	7.35 μ H	4 μ H
C_{xBatt}	L_{Batt}	$R_{p,Term}$	$C_{p,Term}$	$R_{i,DC}$	K_1
110 μ F	6.3 μ H	300 Ω	867 pF	50 m Ω	1

4.1 Verifikationsmessung der Impedanz

Anhand der Werte aus Tabelle 1 und dem Ersatzschaltbild in Abbildung 5 wird eine Ersatzlast aufgebaut, die die Impedanz des betrachteten Elektrofahrzeugs nachbildet. Die Ergebnisse sind separat für die Gleich- und die Gegentaktimpedanz in Abbildung 6 dargestellt. Bei der Messung wird sowohl für das Fahrzeug als auch für die Ersatzlast die Systemimpedanz mit angeschlossenem Kabinenfilter betrachtet. Bei der Messung der Ersatzlast wird diese auf einem 10 cm dicken Isoliermaterial positioniert, um die isolierende Wirkung der Fahrzeugreifen zu berücksichtigen. Für die Gleichtaktimpedanz zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen der Ersatzlast und dem Fahrzeug bis etwa 3 MHz. Bei der Gegentaktimpedanz kommt es zu einer konstanten Abweichung im vorderen Frequenzbereich.

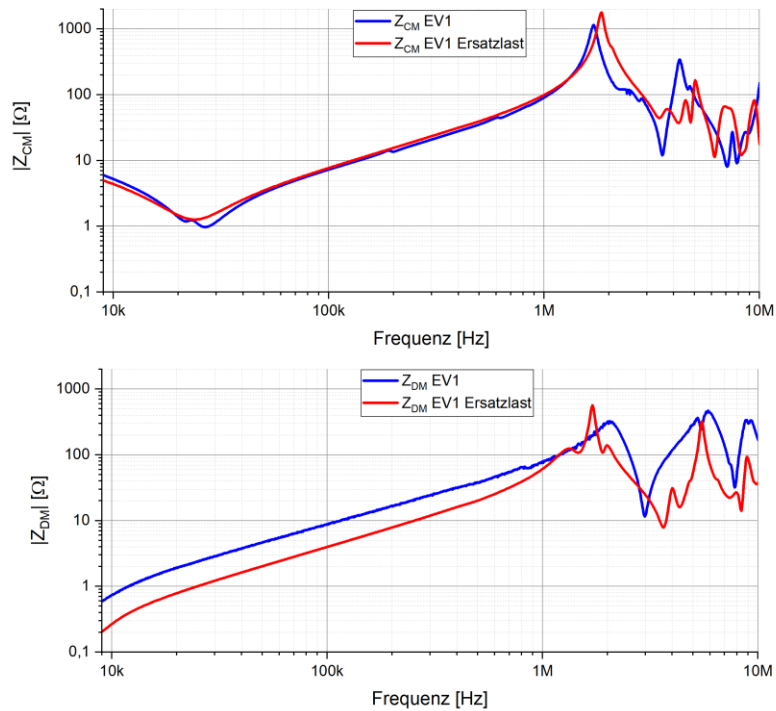


Abbildung 6 Vergleich der Gleich- und Gegentaktimpedanz zwischen Fahrzeug und Ersatzlast

Da die Gegentaktinduktivität in Abbildung 5 nur schwer ohne Sättigungseffekte für die hohen Ladeströme realisierbar ist und die hauptsächlichen Störströme Gleichtaktströme sind, wurde dieses Bauteil bei der Realisierung der Ersatzlast ausgespart, was zu der gezeigten Abweichung führt.

4.2 Verifikationsmessung anhand des Gleichtaktstörstroms beim DC-Laden

Da für die Untersuchungen kein Fahrzeug mit induktivem Ladesystem zur Verfügung steht und das Magnetfeld solcher Systeme durch Ströme generiert wird, erfolgt neben der vergleichenden Impedanzmessung eine Messung des Gleichtaktstörstroms im DC-Ladebetrieb. Somit kann gezeigt werden, dass bei der Ersatzlast sowohl die Impedanz als auch der Strom mit denen beim betrachteten Fahrzeug übereinstimmen.

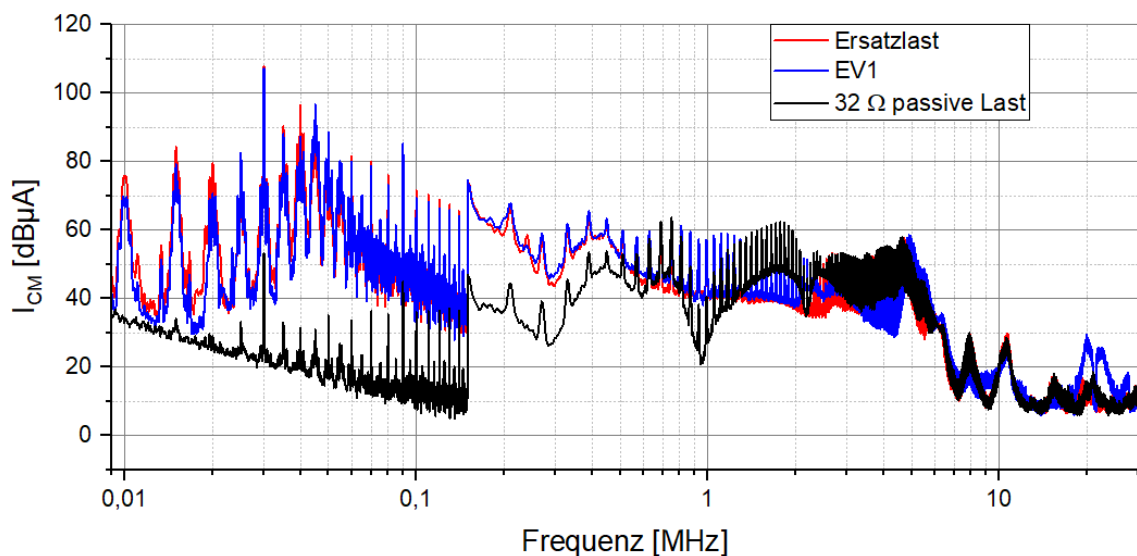


Abbildung 7 Vergleich des Gleichtaktstörstroms eine Ladesäule bei unterschiedlichen Lasten

Bei der Messung wird ein Testsetup betrachtet, welches für die Messung der Störspannung an DC-Ladestationen definiert wird. An dieser Ladestation wird nun das Fahrzeug geladen und dabei der Gleichtaktstörstrom auf HV+ und HV- gemessen. Vergleichend dazu wird die Ersatzlast mit einer DC-Quelle wie in Abbildung 5 an die Ladesäule angeschlossen und bei den gleichen Spannungs- und Stromwerten betrieben. Final wird eine passive ohmsche Last an der Ladesäule angeschlossen, um den Effekt der Last auf die Messung zu demonstrieren. Die Ergebnisse in Abbildung 7 zeigen, dass die Ströme bei der Ersatzlast und dem Fahrzeug gut übereinstimmen. Wird alternativ ein 30 kW Leistungswiderstand als Last verwendet, weichen die Gleichtaktströme deutlich von denen beim Laden des Fahrzeugs ab.

5 Einfluss der Ersatzlast auf die Magnetfeldemissionen eines induktiven Ladesystems

Nach der Verifikation von Impedanz und Gleichtaktstrom wird die Ersatzlast im Testsetup für induktive Ladestationen eingesetzt, um deren Einfluss auf die Magnetfeldemissionen zu untersuchen. Das in der IEC 61980-1 beschriebene Setup besteht fahrzeugseitig aus einer 1,5 m x 1,5 m Stahlplatte, die die Karosserie des Fahrzeugs nachbildet. Darauf angeordnet befindet sich die Ersatzlast in einer metallischen Schirmbox, welche die Kompensationskapazität, eine Gleichrichterschaltung und die Impedanznachbildung beinhaltet (siehe Abbildung 8). Zur Bereitstellung einer Gegenspannung wird eine Gleichspannungsquelle in Kombination mit dem Kabinenfilter an die Ersatzlast angeschlossen. Als Anschlusskabel wird eine geschirmte Leitung gewendet, dessen Kabelschirm von der Karosserienachbildung isoliert wird.



Abbildung 8 Links: Ersatzlast mit Gleichrichter und Kompensation auf der Karosserienachbildung; Rechts: Testsetup Magnetfeldmessung WPT-System

Da auf dieser Leitung ein Strom fließt, welcher ein Magnetfeld ausbildet, ist diese so zu verlegen, dass das von der Leitung ausgehende Magnetfeld in 10 m Entfernung möglichst gering ist. Die Ergebnisse der Emissionsmessung (siehe Abbildung 9) zeigen eine gute Übereinstimmung des Magnetfeldes zwischen passiver und aktiver Last bis etwa 10 MHz. Im weiteren Verlauf sind die Abweichungen, die durch die sekundäre Kabelschleife verursacht werden, deutlich zu sehen.

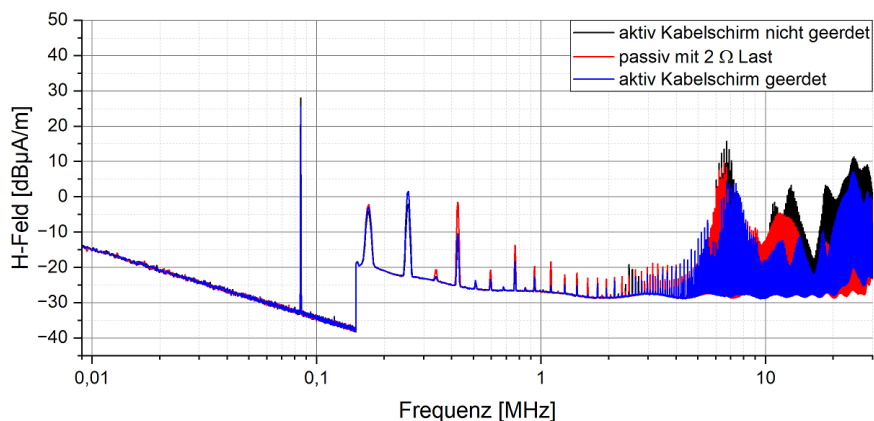


Abbildung 9 Vergleich der Magnetfeldmessung mit passiver und aktiver Last

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde eine aktive Last für die Messungen an induktiven Ladestationen für Elektrofahrzeuge entwickelt, welche die Impedanz eines realen Elektrofahrzeugs nachbildet. Hierfür wurde die Impedanz des Fahrzeugs im aktiven Ladebetrieb mit einem induktiv entkoppelten VNA gemessen und in Form eines passiven Netzwerks aufgebaut. Hierbei zeigten die Verifikation der Impedanz und des Gleichtaktstroms gute Übereinstimmungen. Beim Einsatz der Last im Setup für induktive Ladesysteme zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen passiver Last (keine sekundärseitige Leitung) und aktiver Last bis etwa 10 MHz. Da marktrelevante Systeme im Bereich zwischen 10 MHz und 30 MHz entsprechende EMV-Filtermaßnahmen beinhalten kann dieses Ergebnis als ausreichend angesehen werden. Für eine weitere Reduktion der sekundärseitigen Stromschleife kann eine zusätzliche Verdrehung der Leitung sowie eine Verlegung der Leitung unterhalb des Metallbodens untersucht werden.

Danksagung

Dieser Beitrag entstand im Rahmen des Projekts EMPOWERED und wurde durch das BMWK unter dem Förderkennzeichen 01MV21011B finanziell unterstützt.

Literatur

- [1] Weblink:<https://witricity.com/newsroom/press-releases/witricity-to-demonstrate-wireless-ev-charging-firsts-at-naias/> (19.09.2023)
- [2] A. Ahmad, M. S. Alam and R. Chabaan, "A Comprehensive Review of Wireless Charging Technologies for Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, no. 1, pp. 38-63, March 2018, doi: 10.1109/TTE.2017.2771619.
- [3] 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, 2021
- [4] 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
- [5] A.Junge: Kontaktlose Verfahren zur breitbandigen Messung an Leitungen bei Hochfrequenz, TU Braunschweig, Dissertation, 2008
- [6] S.Jeschke, M.Kleinen, M.Olbrich, J.Bärenfänger: Development of an Equivalent Impedance Network Reproducing the Impedance of Electric Vehicles During Active DC Charging, IEEE VPPC 2023 10/2023
- [7] S.Jeschke, et.al. Experimental Investigation on Magnetic Field Emissions of Wireless Power Transfer Vehicle Charging Systems, EMC Europe 2022
- [8] Weblink Hyundai Ioniq (15.01.2024): <https://www.hyundai.de/hyundai.de/files/69/69c99999-ee67-4d96-ac87-00d9c547aec1.pdf>
- [9] Weblink Mustang MachE AWD Standard Range (15.01.2024): https://www.ford.com/cmslibs/content/dam/brand_ford/en_us/brand/suvs-crossovers/mache/3-2/pdf/seo-pdfs/Mustang-Mach-E-Tech-Specs.pdf
- [10] Weblink BMW i3 2016 (15.01.2024): <https://ecomento.de/wp-content/uploads/2016/05/BMW-i3-2016-2017-technische-Daten.pdf>