

Messtechnische Bestimmung der Impedanz von Elektrofahrzeugen im konduktiven Ladebetrieb

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

1 Einleitung

Im Zuge der fortschreitenden Entwicklungen hin zu einer klimaneutralen Mobilität, verbunden mit dem geplanten Ausstieg aus der Neuzulassung von Verbrennerfahrzeugen, gewinnt die Elektromobilität zunehmend an Bedeutung [1]. Für die elektromagnetische Verträglichkeit ist das konduktive Laden von Elektrofahrzeugen ein Teilaspekt, der besonders im Hinblick auf die Emissionen während des Ladevorgangs betrachtet werden muss [2]. Hierbei ist es für eine Bewertung sehr hilfreich, die Systemimpedanzen durch Messungen bestimmen zu können, um eine Aussage über potentiell kritische Frequenzbereiche treffen zu können. Um diese Messung in-situ, also ohne Eingriff oder Modifizierung der Systeme durchführen zu können, sind insbesondere kontaktlose Verfahren von Vorteil. In dieser Arbeit wird ein Messsystem beschrieben, mit dem die Gleichtaktimpedanzen eines Ladesystems zwischen 9 kHz und 30 MHz während des aktiven Schnellladevorgangs gemessen werden können, um eine Abschätzung für die Emissionen zu erhalten. Der Frequenzbereich ist dabei in Abhängigkeit der Leitungslängen des Systems eingeschränkt, da sich durch elektrisch lange Systeme aufgrund der Leitungstransformation die gemessenen Impedanzen von tatsächlich vorhandenen Impedanzen der Ladesäule bzw. des Fahrzeugs unterscheiden. Eine Länge des Ladesystems von 1 m würde bei einer Frequenz von 30 MHz einer zehntel Wellenlänge im Vakuum entsprechen, ab der Leitungseffekte nicht mehr vernachlässigbar sind. Da dies für ein Ladesystem eine kurze Strecke darstellt, ist der Frequenzbereich mit bis zu 30 MHz relativ hoch angesetzt und muss bei der Bestimmung der Impedanz einzelner Systeme berücksichtigt werden. Das Messprinzip beruht auf dem Einsatz eines Ferritkerns als Transformator, bei dem das zu messende System als Sekundärseite mit einer Wicklung betrachtet wird. Da während des Ladebetriebs hohe Ströme fließen, werden potentielle Sättigungseffekte abgeschätzt und der Fokus in dieser Arbeit wegen der geringeren niederfrequenten Ströme zunächst auf die Bestimmung der Gleichtaktimpedanz gelegt. Die Kenntnis der Gleichtaktimpedanz ermöglicht dabei eine erste Abschätzung leitungsgeführter und gestrahlter Störemissionen des Gesamtsystems.

2 Beschreibung des Messprinzips

Das Prinzip dieser Messung beruht auf gut bekannten Verfahren [3], [4], [5] induktiv entkoppelter Messtechnik und wird in dieser Arbeit speziell mit dem Fokus auf die hohe Ladeleistung, sowie den verwendeten Ferrit fokussiert und in einem anwendungsnahen Testsetup auf seine Umsetzbarkeit überprüft. Hierzu soll die Gleichtaktimpedanz (CM-Impedanz) eines Systemverbunds aus Elektrofahrzeug und Ladesäule im aktiven DC-Schnellladebetrieb bestimmt werden. Bild 1 zeigt den schematischen Aufbau zur induktiv entkoppelten Messung der CM-Impedanz im aktiven Betrieb mit einem Vektor Netzwerkanalysator (VNA) auf der linken Seite, sowie einen ersten Versuchsaufbau unter Verwendung eines Ringkerntransformators auf der rechten Seite. Zur Messung der CM-Impedanz werden die HV+ und HV- Leitungen des Ladekabels durch einen Ferritkern geführt (Sekundärseite). Die Eingangsleitungen des Netzwerkanalysators werden dabei auf den Ferritkern aufgebracht (Primärseite). Die Windungszahl auf Primärseite ist dabei gering zu halten, um die Einkopplung der leitungsgeführten Störemissionen auf die Messleitung im aktiven Ladebetrieb zu begrenzen. Dies

führt allerdings durch das schlechtere Transformationsverhältnis zu einer Einschränkung der verfügbaren Messdynamik. Im betrachteten Messaufbau wurden primärseitig drei Wicklungen auf den Ferritkern aufgebracht. Der Aufbau stellt somit einen Transformator dar, dessen sekundärseitige Impedanz entsprechend der Übertragungseigenschaften des Ferrits auf die Primärseite (VNA-Messport) transformiert wird.

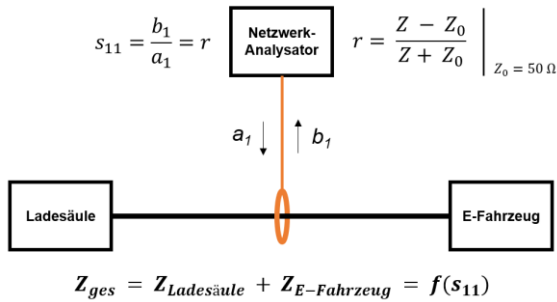


Bild 1: Schematischer Aufbau zur induktiv entkoppelten Messung der CM-Impedanz am aktiven System (links) und Realisierung des Messaufbaus unter Verwendung eines Ringkerntransformators (rechts)

Bei der Auswahl des Kernmaterials für den Ringkerntransformator muss sichergestellt werden, dass dieses bei den relevanten Ladeleistungen nicht in Sättigung geht. Hierzu wird ein Kernmaterial mit geeigneten Übertragungseigenschaften ausgewählt und der Transformator so ausgelegt, dass seine Übertragungseigenschaften für den relevanten Frequenzbereich (9 kHz bis 30 MHz) eine aussagekräftige Impedanzmessung erlauben und zudem die Rückwirkung der Störemissionen des Systems auf das Messgerät reduzieren.

Unter Berücksichtigung der Übertragungseigenschaften des Ringkern-Transformators erfolgt anschließend eine Messung des Eingangsreflexionsparameters S_{11} mit dem VNA im betrachteten Frequenzbereich. Dieser ergibt sich als Verhältnis von hinlaufender und reflektierter Wellengröße am Messport des VNA (vgl. Bild 1). Da der Wellenwiderstand des Messsystems bekannt ist ($Z_0 = 50 \Omega$), kann die frequenzabhängige Messung des Eingangsreflexionsparameters S_{11} direkt in die Impedanz des angeschlossenen Gesamtsystems (Z_{ges}) umgerechnet werden. Unter Berücksichtigung der Übertragungseigenschaften des Ringkern-Transformators ist somit ein Rückschluss auf die Impedanz des aktiven Ladesystems möglich. Die Bewertung der Genauigkeit und die Ableitung valider Messbereiche der Systemimpedanzmessung werden mit durch Messung der Impedanz von bekannten, passiven Netzwerken im nächsten Kapitel untersucht. Eine einseitig bekannte Impedanz im Gesamtsystem (hier: Ladesäule und Elektrofahrzeug) erlaubt zudem die Berechnung der CM-Impedanz des unbekannten Systems aus der Serienschaltung der Teilsystem-Impedanzen ($Z_{ges} = Z_{Ladesäule} + Z_{Elektrofahrzeug}$). Eine schematische Darstellung der Impedanzbestimmung in drei Schritten zeigt Bild 2. In einem ersten Schritt wird die Gleichtaktimpedanz eines bekannten, passiven Systems mittels direkter Messung bestimmt. Hierzu wird eine resistive Last mit einer definierten Y-Kapazität beschaltet ($Z_{CM,Last} \sim 2 \cdot C_{Y2}$). Im zweiten Schritt wird das passive System mit bekannter Gleichtaktimpedanz in das Messsetup eingebracht und über das Ladekabel mit der unbekannten Impedanz der Ladesäule verbunden. Die unbekannte Impedanz der Ladestation inkl. Ladekabel ($Z_{DC-Ladestation} \sim 2 \cdot C_{Y1}$) lässt sich anschließend aus der Reihenschaltung beider Impedanzen bestimmen. Danach ist diese Impedanz für Fahrzeugmessungen bekannt. In dieser Form ist über einen dritten Schritt nicht nur die Messung der Systemimpedanz im aktiven Betrieb möglich, sondern über die bekannte

Impedanz der DC-Ladestation auch die Berechnung der Gleichtaktimpedanz einzelner Komponenten, in diesem Fall des Elektrofahrzeugs ($Z_{E-KFZ} \sim 2 \cdot C_{Y3}$).

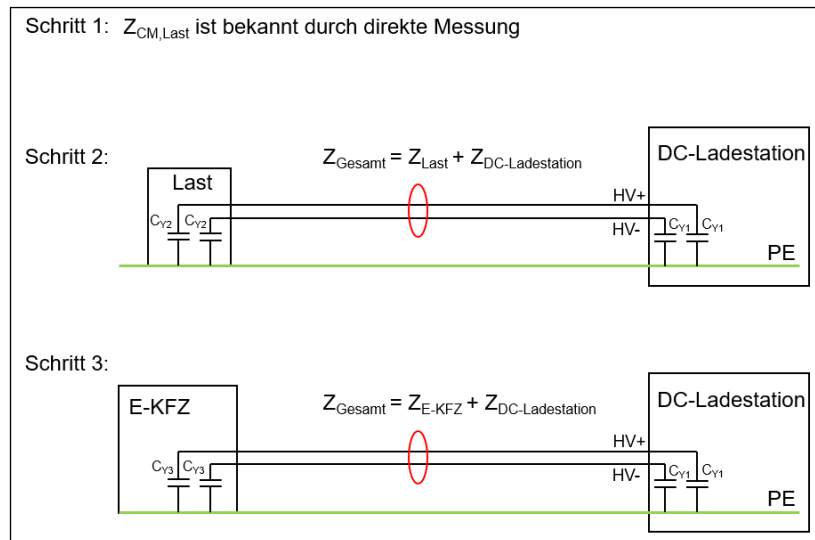


Bild 2: Schematische Darstellung des Messprinzips zur Bestimmung der CM-Impedanz beim aktiven DC Schnellladen

3 Charakterisierung der Dynamik und Verifikation des Messaufbaus

Um eine Bewertung der Messergebnisse zu ermöglichen, muss eine Verifikation des Messaufbaus unter Berücksichtigung der verwendeten Übertragungseigenschaften des Ferritkerns, insbesondere mit Blick auf den Frequenzgang, erfolgen. Zur Charakterisierung der Messdynamik erfolgt in einem ersten Schritt die Messung der Übertragungseigenschaften des Ferritkerns in Abhängigkeit der Frequenz. Hierzu wird der Innenleiter eines Messkanals des VNAs durch den Ferritkern geführt und anschließend mit dem Innenwiderstand des VNAs (50Ω) reflexionsfrei terminiert. Der zweite Port des VNAs wird mit der Primärwicklung des Ferritkerns verbunden. Das Ergebnis und den Aufbau der Transmissionsmessung zeigt Bild 3. Beim verwendeten Ferrit in dieser Arbeit handelt es sich um den Klappferrit MRFC-H40 [6], der aufgrund seines Klappmechanismus eine „in-situ“ Einbringung in den Messaufbau ohne aufwendiges Auftrennen und Konfektionieren von Ladeleitungen ermöglicht. Dennoch ist zu erwähnen, dass die Nutzung von Klappferriten durch eine potentiell ungleiche Kontaktierung der Ferritkernhälften zwischen verschiedenen Messungen die Gefahr von Messfehlern durch den entstehenden Luftspalt beinhaltet und geschlossene Ringkerne daher bevorzugt zu verwenden sind.

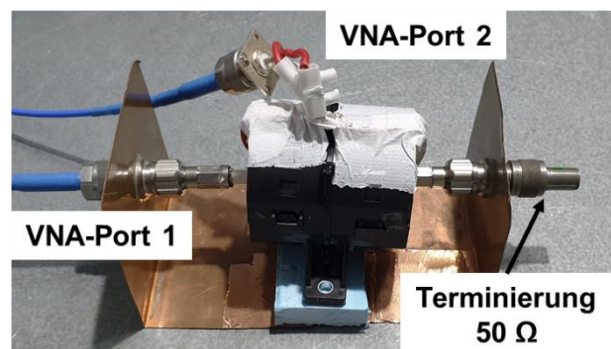
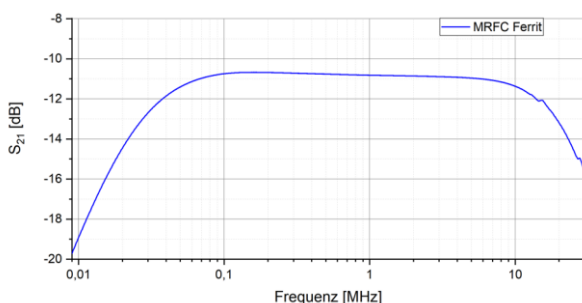


Bild 3: Übertragungsverhalten der Ferritkerne (links) und Messaufbau zur Bestimmung des Übertragungsverhaltens im Frequenzbereich 9 kHz bis 30 MHz (rechts)

Die Transmissionsmessung zeigt, dass der verwendete Klappferrit im Frequenzbereich von etwa 50 kHz bis 10 MHz die beste Dynamik mit einer nahezu konstanten Dämpfung von ca. 11 dB aufweist. Im darunter liegenden Frequenzbereich (9-50 kHz) steigt die Dämpfung um weitere 10 dB. Im Frequenzbereich oberhalb von 10 MHz treten Resonanzeffekte bedingt durch die Leitungslänge im Messsetup auf, welche für die Bewertung der gemessenen Impedanzen in höheren Frequenzbereichen zu berücksichtigen sind.

Die Gleichtaktimpedanz aktiver Ladesysteme wird im unteren Frequenzbereich im Wesentlichen durch die Dimensionierung von Ableitkondensatoren in Eingangsfiltren (C_y), sowie parasitäre kapazitive Kopplung zur Referenzmasse (PE) bestimmt. In einem zweiten Schritt erfolgt daher die Abschätzung valider Messbereiche für diese Kapazitäten anhand der induktiv entkoppelten Messung passiver, kapazitiver Komponenten bei einer Ausgangsleistung des VNA von 10 dBm. Bild 4 zeigt die Messung eines 100 pF und eines 100 nF Kondensators, jeweils direkt und induktiv entkoppelt. Beide Messungen zeigen eine exakte Übereinstimmung der Impedanz im kapazitiven Verlauf für Impedanzen kleiner 10 k Ω . Für höhere Impedanzen zeigen sich größere Abweichungen im gemessenen Verlauf zwischen direkter und entkoppelter Messung, bedingt durch die hohe Dämpfung und damit eingeschränkte Dynamik des Ferritkerns. Beim Vergleich der Messungen am 100 nF Kondensator zeigt sich eine Veränderung der Lage und Güte der Eigenresonanzfrequenz des gemessenen Kondensators zwischen direkter und entkoppelter Messung. Diese ist hervorgerufen durch geringe Unterschiede in der Adaptierung des Bauteils zwischen der direkten und entkoppelten Messung (ca. 60 m Ω + 1 nH). Als Folge der veränderten Anschlussinduktivität zeigt sich ein ebenfalls abweichender induktiver Verlauf zwischen den Messungen. Für die Messungen am aktiven System sind diese Abweichungen aufgrund der deutlich höheren Induktivität des Ladekabels in ihrem Einfluss zu vernachlässigen.

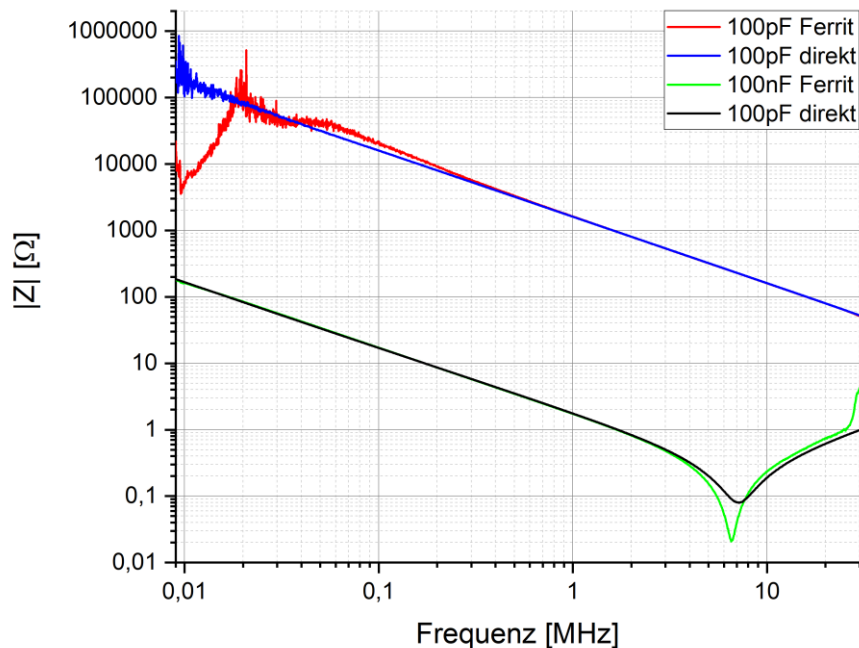


Bild 4: Direkt und induktiv entkoppelt gemessene Impedanzverläufe eines 100 pF und 100 nF Kondensators zur Bewertung valider Messbereiche des Messverfahrens

Im letzten Schritt wird auf Basis dieser Ergebnisse die Gleichtaktimpedanz eines aktiven Systems, bestehend aus aktiver DC-Quelle mit bekanntem C_y , sowie einer passiven Belastung mit bekanntem Impedanzverlauf [7] bestimmt. Den schematischen Aufbau, den CM-Impedanzverlauf der RCL-Last und das Ergebnis der Messung des aktiven Gesamtsystems zeigt Bild 5. Die DC-Ausgangsleitungen der Quelle enthalten jeweils einen Ableitkondensator gegen PE, deren Summe durch die entkoppelte Messung am aktiven System bestimmt werden soll ($C_{Y,DC-Quelle}$). An den DC-Ausgang der Quelle wird das zuvor beschriebene passive RCL-Netzwerk ($C_{Y,RCL}$) angeschlossen und mit einem Widerstand ($R_{Last} = 16 \Omega$) belastet. Der Klappferrit wird zur Messung der gesamten Gleichtaktimpedanz um beide Leitungen zwischen DC-Quelle und RCL-Netzwerk gelegt und primärseitig mit dem Messport des VNAs verbunden.

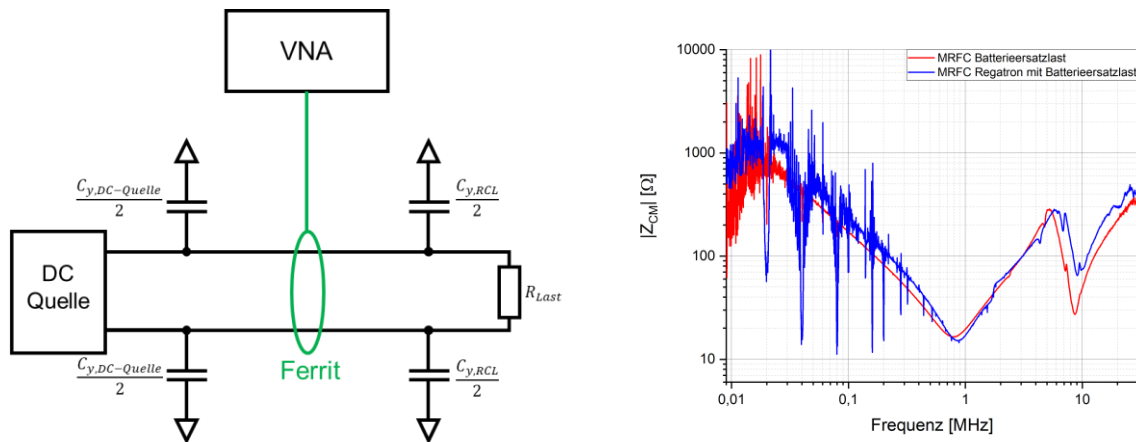


Bild 5: Schematischer Aufbau zur Messung der Impedanz im aktiven Betrieb (links), sowie gemessene Impedanzverläufe der RCL-Last und des aktiven Systems (rechts)

Das Messergebnis (Bild 5, rechts) zeigt im kapazitiven Verlauf eine Parallelverschiebung zwischen passivem RCL-Netzwerk (rot) und aktivem Gesamtsystem (blau), bedingt durch die zusätzliche Ableitkapazität der DC-Quelle. Im Gleichtakt liegen die Y-Kapazitäten der DC-Quelle und des RCL-Netzwerks in Serie, sodass sich die gemessene Gesamtkapazität entsprechend (3.1) ergibt.

$$\frac{1}{C_{ges}} = \frac{1}{C_{y,DC-Quelle}} + \frac{1}{C_{y,RCL}} \quad (3.1)$$

Die gesamte Y-Kapazität der DC-Quelle ($C_{Y,DC-Quelle}$) errechnet sich damit zu 78 nF bzw. 39 nF je Pol, was sich in diesem Fall mit einer direkten Messung der Filterkapazität der Quelle belegen lässt. Weiterführend zu beobachten ist ein qualitativ übereinstimmender Verlauf der Impedanz bis etwa 10 MHz. Geringe Unterschiede in der Adaptierung beider Messungen sind in diesem Setup aufgrund der höheren Leitungsinduktivitäten des Gesamtsystems im Impedanzverlauf zu vernachlässigen. Eine elektrisch kurze Betrachtung des Setups ist für Frequenzen oberhalb von 10 MHz aufgrund der verwendeten Leitungslängen nicht mehr möglich. Durch die steilen Flanken im Schaltmoment der DC-Quelle werden die Y-Kapazitäten kurzgeschlossen, was sich in der Messung durch niedrige Impedanzen bei der Schaltfrequenz (10 kHz) und ihren Harmonischen widerspiegelt.

4 Messung der Gleichtaktimpedanz im konduktiven DC-Schnellladebetrieb

In der Praxis ergeben sich durch große Strukturen und engen Bauraum, sowohl in der Fahrzeugbatterie, als auch im Ladesystem, neben gewollten Filterkapazitäten zusätzliche parasitäre Kapazitäten der Batteriezellen gegen das Fahrzeugchassis bzw. das Gehäuse des Ladesystems. Diese Kapazitäten erhöhen die gesamte Gleichtaktkapazität des Systems und können so unmittelbar die Störaussendung des Gesamtsystems beeinflussen. Eine direkte Messung der Gesamtkapazität ist aufgrund hoher Spannungen, insbesondere an der Fahrzeugbatterie, nicht ohne weiteres möglich. Als praxisrelevante Anwendung wird daher auf Basis des beschriebenen Messverfahrens die CM-Impedanz eines Elektrofahrzeugs (hier: Ford Mustang MachE) im aktiven DC-Schnellladebetrieb bestimmt. Eine schematische Darstellung der Anordnung und zu bestimmender Gleichtaktgrößen zeigt Bild 6. Die gesamte Gleichtaktimpedanz der Anordnung ergibt sich aus der Parallelschaltung beider Leitungszweige.

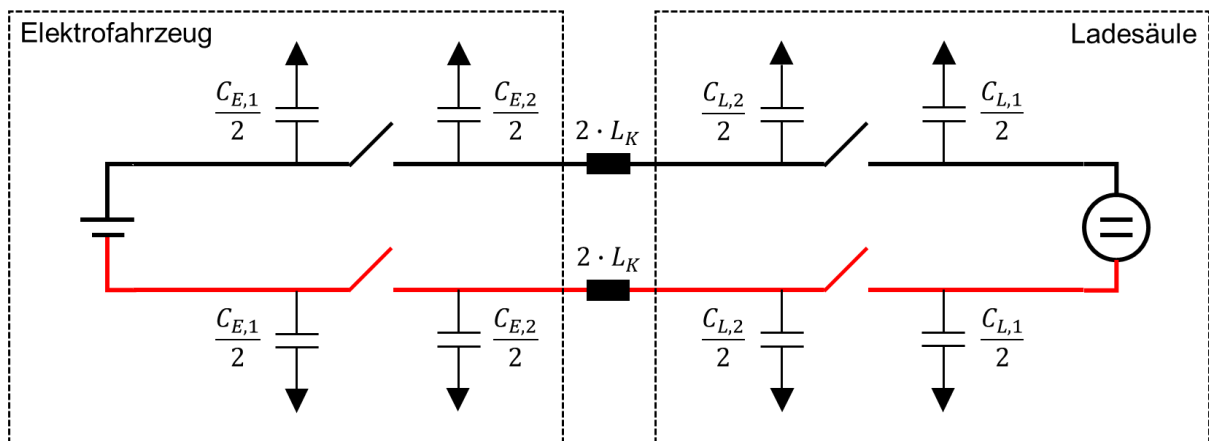


Bild 6: Schematische Darstellung des Messaufbaus und charakteristischer Bauteile im Gleichtakt

Als Ladeelektronik wird eine DC-Quelle mit Emulation der Ladekommunikation [8] verwendet. Aus Messungen mit passiver Belastung lässt sich zeigen, dass die parasitäre Gleichtaktkapazität der verwendeten DC-Quelle ($C_{L,1}$) vernachlässigbar gering gegenüber ihrer Filterkapazität ($C_{L,2}$) ist, sodass diese für die folgenden Betrachtungen vernachlässigt wird. Die CM-Impedanz des Ladesystems im aktiven Betrieb ergibt sich aus den Teilsystem-Impedanzen Elektrofahrzeug, Ladekabel und DC-Quelle. Zur Ermittlung der Gleichtaktimpedanz des Elektrofahrzeugs muss die Impedanz von DC-Quelle und verwendetem Ladekabel bekannt sein. Auf Basis von Bild 2 wird dazu zunächst die CM-Impedanz eines passiven Lastwiderstands durch direkte Messung bestimmt. Dem Lastwiderstand wird hierzu je Pol eine Y-Kapazität von 680 nF hinzugefügt. Die nun bekannte Lastimpedanz wird mittels Break-Out-Box über das DC-Schnellladekabel mit der DC-Quelle verbunden und die Impedanz des Gesamtsystems gemessen. Hieraus lässt sich die gesamte Y-Kapazität des Ladesystems inklusive Ladekabel zu 1187 nF, und somit ca. 600 nF je Pol bestimmen. Auf dieser Basis können nun die Kapazitäten $C_{E,1}$ und $C_{E,2}$ des Elektrofahrzeugs im Lade- bzw. Standby-Betrieb aus der Messung der Impedanz des Gesamtsystems bestimmt werden. Bild 7 zeigt den Messaufbau (links) und die Messergebnisse für einen Ladestrom von 150 A (rechts). In der Messgrafik abgebildet findet sich neben der CM-Impedanz der Ladeelektronik inkl. Ladekabel (schwarz) die jeweilige CM-Impedanz des Gesamtsystems (blau: aktiver Ladebetrieb, rot: Standby-Betrieb). Es ist zu erkennen, dass sich die Y-Kapazität zwischen aktivem Ladebetrieb und Standby-Betrieb deutlich unterscheidet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass nur im aktiven Ladebetrieb die HV-Traktionsbatterie des Elektrofahrzeugs über Relais auf das Lade-Inlet geschaltet ist. Erst in diesem Zustand sind die Ableitkondensatoren des HV-Filters im Elektrofahrzeug mit dem Ladesystem verbunden und messbar.

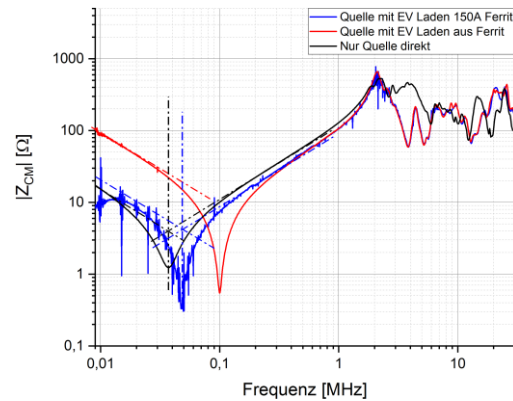
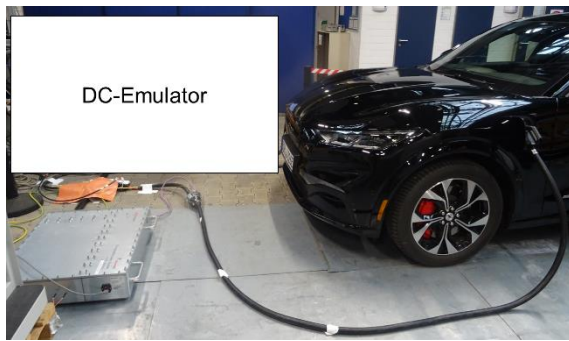


Bild 7: Induktiv entkoppelte Messung der Impedanz im DC-Schnellladebetrieb (links) und gemessene Impedanzverläufe im Lade- und Standby-Betrieb (rechts)

Die geringe Kapazität im Standby-Betrieb ergibt sich aus der Serienschaltung der Ableitkondensatoren des Ladesystems ($C_{L,2}$) mit parasitären Kapazitäten der Inlet-seitigen Ladeleitungen im Fahrzeug gegen das Chassis ($C_{E,2}$). Basierend auf Formel (3.1) lassen sich die beiden genannten Kapazitäten des Elektrofahrzeugs nach (4.1) und (4.2) bestimmen. Die beschriebenen Kapazitätswerte wurden aus den in Bild 7 (rechts) eingeblendeten Geradengleichungen bestimmt. Aufgrund des verrauschten Messsignals im Frequenzbereich unterhalb der Resonanzfrequenz wurde die Schnittstelle aus induktivem Verlauf und Resonanzstelle als Referenz für die Bestimmung der kapazitiven Geradengleichungen verwendet.

$$\text{Passiv} \quad \frac{1}{C_{\text{passiv}}} = \frac{1}{C_{E,2}} + \frac{1}{C_{L,2}} \quad (4.1)$$

$$\text{Aktiv} \quad \frac{1}{C_{\text{aktiv}}} = \frac{1}{C_{E,1} + C_{E,2}} + \frac{1}{C_{L,2}} \quad (4.2)$$

Die gesamte Y-Kapazität des Elektrofahrzeugs ergibt sich damit zu $2,55 \mu\text{F}$. Diese beinhaltet die parasitäre Kapazität ($C_{E,2} \approx 200 \text{ nF}$), sowie die Filterkapazität der Traktionsbatterie ($C_{E,1} \approx 2,35 \mu\text{F}$). Es ist zu beachten, dass der Impedanzverlauf insbesondere im Frequenzbereich unterhalb von 100 kHz durch die Schaltfrequenz der DC-Quelle stark verrauscht ist, was in einer Unsicherheit in der Bestimmung von Resonanzstelle und kapazitivem Verlauf resultiert. Davon unabhängig zeigt sich jedoch, dass eine qualitative Bestimmung des Impedanzverlaufs aktiver Systeme eine gute Möglichkeit zur Abschätzung des EMV-Verhaltens des Gesamtsystems bietet.

5 Zusammenfassung und Fazit

Das dargestellte Messprinzip bietet eine einfache und schnelle Lösung, um „in-situ“ den Gleichtakt-Impedanzverlauf konduktiver Ladesysteme zu bestimmen und so eine Abschätzung über die elektromagnetischen Emissionen zu erreichen. Des Weiteren kann auf Basis des beschriebenen Messverfahrens zudem die Impedanz von Teilsystemen des Aufbaus rechnerisch ermittelt werden. Die Messung passiver Bauteile zeigt eine gute Übereinstimmung mit direkten Messungen, bei geringen Impedanzen müssen jedoch Kontaktierungen zwischen Kalibrier- und Messaufbau in die Betrachtung mit einbezogen und entsprechend bewertet werden. Insbesondere die entkoppelte Messung im aktiven Schnellladebetrieb zeigt vielversprechende Ergebnisse zur

Ermittlung des Impedanzverlaufs für Gleichtaktsignale. Erste Untersuchungen zur induktiv entkoppelten Bestimmung der Gegentaktimpedanz des beschriebenen Ladesystems zeigen eine erwartet höhere Komplexität, bedingt durch die Sättigung des Ferritmaterials durch den hohen Ladestrom. Erste Ergebnisse zeigen dennoch, dass eine messtechnische Bestimmung der DC-Impedanz für geringe Ladeströme im Laboraufbau prinzipiell möglich ist. Hierzu sind jedoch weiterführende Untersuchungen zur Generierung belastbarer Ergebnisse nötig. Um zudem den Frequenzbereich bis 30 MHz mit ausreichender Messdynamik abdecken zu können ist eine Optimierung der Trafoeigenschaften (Ringkern) erforderlich. Es hat sich gezeigt, dass der Einsatz von standardmäßig verfügbaren Klappferriten, gerade bei häufiger Nutzung anfällig ist für Fehler, die durch nicht ideale Kontaktierung der Ferritkernhälften und den dadurch entstehenden Luftspalt entstehen. Hier ist eine langlebigere Lösung notwendig. Die Messergebnisse sind außerdem immer unter Berücksichtigung der Länge des Gesamtsystems zu betrachten. Davon abgesehen bietet das Verfahren eine sehr gute Möglichkeit einer Vorabschätzung, sowie der Impedanzbestimmung, im Allgemeinen für aktive Systeme.

Literaturangaben

- [1] Weblink: <https://www.springerprofessional.de/antriebsstrang/verkehrswende/verbrennerausstieg--die-plaene-der-politik/18893874> (Stand 27.04.2022)
- [2] IEC International Electrotechnical Commission: IEC 61851-21-2 Ed.1.0: Electric vehicle requirements for conductive connection to an AC/DC supply – EMC requirements for off-board electric vehicle charging systems
- [3] A.Junge: Kontaktlose Verfahren zur breitbandigen Messung an Leitungen bei Hochfrequenz, TU Braunschweig, Dissertation, 2008
- [4] A.Razavi, S.Frei: Characterization of DUT impedance in immunity test setups, Adv. Radio Sci., 14, 155-159, 2016
- [5] M.Harms, O.Kerfin, L.Oppermann, A.Enders: *Calibrated Contactless Impedance Measurements with DC Bias Currents*; EMC Europe 2018, 2018
- [6] Weblink: <https://www.kitagawa.de/produkte/mrfc-mrfc-h40-mrfck-serie/> (Stand 27.04.2022)
- [7] 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
- [8] Weblink: <https://www.keysight.com/de/de/assets/7018-06282/brochures/5992-3223.pdf> (Stand 27.04.2022)