

Herausforderungen bei EMV-Messungen von drahtlosen Ladesystemen (WPT-Systeme) für Elektrofahrzeuge im Bereich 9 kHz bis 30 MHz

Dr.-Ing. Christof Ziegler, EPCOS AG, EMV-Labor, Regensburg
Dr.-Ing. Kerstin Siebert, EMC Test NRW GmbH, Dortmund
Dr.-Ing. Stefan Weber, EPCOS AG, München
Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, EMC Test NRW GmbH, Dortmund

1 Einleitung

Die Technologie der drahtlosen Energieübertragung (engl.: Wireless Power Transfer, WPT) verspricht ein großes Potential, um der Elektromobilität zum Durchbruch zu verhelfen. Entsprechend hoch ist der Druck sowohl auf die Entwicklung der Systeme, als auch auf die Normung. Da die Energieübertragung über den magnetischen Fluss zwischen zwei Spulen stattfindet, sind aufgrund der Streufelder hohe Magnetfeldpegel im Umfeld solcher Systeme zu erwarten. Um die umliegenden Systeme sowohl auf der Infrastrukturseite, d.h. dem Versorgungsnetz, als auch der Fahrzeugseite zu schützen, ist somit eine Bewertung der Störaussendung nach CISPR 11 und CISPR 25 notwendig. Hier zeigt sich, wie in Bild 1 dargestellt, die Dualität von WPT-Systemen, welche eine Verknüpfung der beiden Normen erfordert [4].

Eine der Herausforderungen ist nun die Beschreibung eines geeigneten Testaufbaus, welche eine vergleichbare Bewertung der Störaussendungen der Komponenten eines WPT-Systems und der Fahrzeugapplikation ermöglicht. Hierbei sind

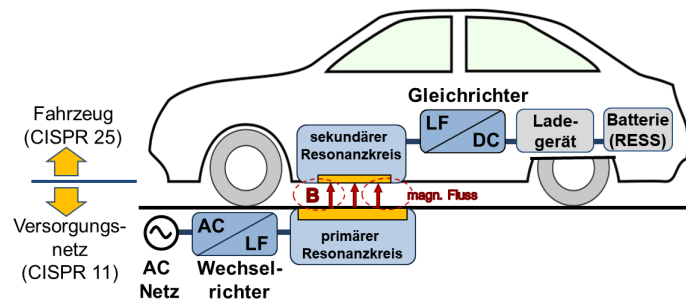


Bild 1: Komponenten eines WPT-Systems der Versorgungsseite (Primärseite) und am Fahrzeug (Sekundärseite) mit Aufteilung des Systems gemäß der zutreffenden Normen.

sowohl die feld- als auch die leitungsgebundenen Störaussendungen von Interesse. In dieser Arbeit werden die wesentlichen Herausforderungen bei der Charakterisierung des magnetischen Streufeldes bei WPT-Systemen und Lösungsansätze für die Messtechnik diskutiert, sowie leitungsgeführte Störaussendungen an einem Musteraufbau gemessen und die Möglichkeit der Filterung am Ausgang des Wechselrichters untersucht.

2 Messverfahren der Störaussendung von WPT-Systemen

Betrachtet man die abstrakte Schnittstellenbeschreibung eines WPT-Systems in Bild 2, so unterscheidet sie sich nicht von der eines üblichen Zweitorts, wie sie auch einen AC-DC-Wechselrichter beschreibt. Aufgrund der Verbindung von AC-Netz und Fahrzeug kommen für die Bewertung der Störaussendungen sowohl die Normen der CISPR 11 als auch die der CISPR 25 zur Anwendung. Die Primärseite von WPT-Systemen wird durch die Vorgaben der CISPR 11 als ISM-Gerät der Gruppe 2 behandelt. Eine entsprechende Erweiterung der CISPR 11 befindet sich derzeit im Entwurf [1]. Für die Sekundärseite gelten die Vorgaben der CISPR 25 für Hochvolt-Bordnetze. Die Messung der

leitungsgebundenen Störaussendungen erfolgt dabei im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz (CISPR 11) bzw. 150 kHz bis 108 MHz (CISPR 25).

Betrachtet man das detaillierte Blockschaltbild in Bild 3, so wird die eigentliche Herausforderung bei der Messung der Störaussendungen ersichtlich. Die beiden Spulen eines WPT-Systems bilden einen lose gekoppelten, ungeschirmten Transformator. Daher treten im Frequenzbereich, in dem die Energieübertragung stattfindet und dessen Vielfache, hohe Emissionswerte auf. Die abstrahlenden Elemente sind im unteren Frequenzbereich die WPT-Spulen, da die Dimensionen der übrigen Komponenten zu klein bezüglich der Wellenlänge sind und somit nur eine geringe Effizienz der Abstrahlung aufweisen. Bei höheren Frequenzen sind dagegen die Abstrahlungen des Gesamtsystems, z.B. die Teile der Leistungselektronik und der Verbindungsleitungen, relevant.

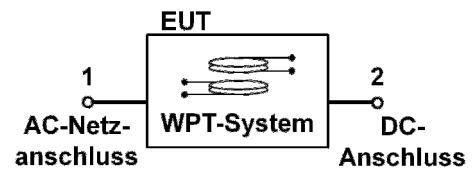


Bild 2: Abstrakte Schnittstellenbeschreibung eines WPT-Systems.

Da die Primärseite das energieübertragende magnetische Feld generiert, wird die Norm CISPR 11 gerade um die Messung und Grenzwerte des magnetischen Feldes im Bereich 9 kHz bis 30 MHz erweitert. Ein grundsätzliches Problem bei der Charakterisierung der Störaussendungen besteht darin, dass das Verhalten und der Arbeitspunkt der Primärseite mit der Leistungselektronik durch die gekoppelte Sekundärseite beeinflusst werden. Das Thema eines geeigneten Referenzsystems der Sekundärseite wird in den Standardisierungsgremien intensiv diskutiert.

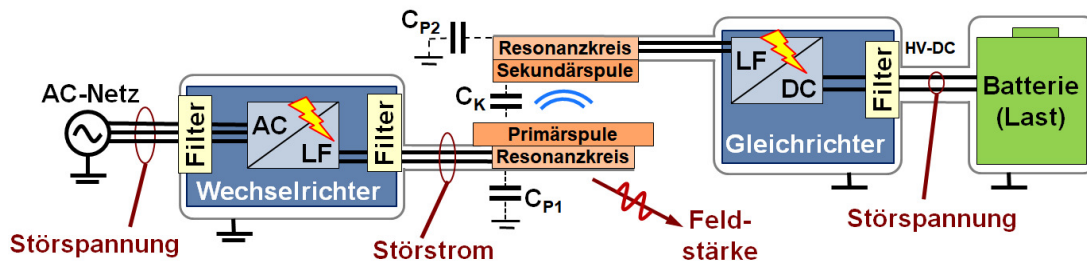


Bild 3: Blockdiagramm eines WPT-Systems zum Laden von Elektrofahrzeugen mit den zu erwartenden Störquellen. Das Spulensystem bildet einen lose gekoppelten, ungeschirmten Transformator und bildet daher die wesentliche Quelle der feldgebundenen Störaussendungen im niedrigen Frequenzbereich.

Während die allgemeinen Störaussendungen, wie in Bild 3 gezeigt, durch geeignete Schirm- und Filtermaßnahmen reduziert werden können, lassen sich die Aussendungen bei der WPT-Arbeitsfrequenz nur bedingt reduzieren, da die hier auftretenden magnetischen Streufelder mit der übertragenen Leistung zusammenhängen. Die Streufelder lassen sich durch Filterung und konstruktive Maßnahmen nur schwer verringern, woraus sich die Forderung nach angepassten Grenzwerten in den für die Energieübertragung benutzten Frequenzbereichen ergibt. Die sich daraus ergebenden Herausforderungen für die Messtechnik werden im folgenden Kapitel diskutiert.

3 Herausforderungen bei Messungen feldgebundener Störaussendungen

In dieser Arbeit werden zwei wesentliche Herausforderungen der EMV-Charakterisierung von WPT-Systemen bezüglich des magnetischen Feldes behandelt. Zunächst werden die aktuell im Entwurf der CISPR 11-Erweiterung angeführten Grenzwerte vorgestellt und die sich hieraus ergebenden Anforderungen an die

Messtechnik behandelt. Anschließend wird die Herausforderung der Vergleichbarkeit der Komponentenmessung und der Messung mit Elektrofahrzeug diskutiert.

3.1 Grenzwerte für die Störfeldstärke im Bereich 9 kHz - 30 MHz

Um eine EMV-Bewertung der Störpegel des magnetischen Feldes vornehmen zu können, wird die CISPR 11 aktuell um entsprechende Grenzwerte ergänzt [1]. Die aktuell diskutierten Grenzwerte sind in den beiden Diagrammen in Bild 4 dargestellt. Deutlich erkennbar sind die erhöhten Grenzwerte in bestimmten Frequenzintervallen, welche für den exklusiven Betrieb von WPT-Systemen diskutiert werden. Der Frequenzbereich umfasst die Frequenzen von 9 kHz bis 150 kHz. Die Höhe der Störaussendungen variiert dabei mit der vorgesehenen Anschlussleistung. Für Geräte der Klasse A ergibt sich so eine Unterteilung in die Leistungen $< 22 \text{ kW}$ und $> 22 \text{ kW}$. Bei den Geräten der Klasse B wurden dagegen drei Leistungsklassen eingeführt. Die Unterteilung nach Leistung soll den typischen Einsatzbereich und die Systemverteilungsdichte widerspiegeln. So erfolgte die Annahme, dass WPT-Systeme hoher Leistung eine geringere Dichte an Installationen aufweisen und sich in weniger exponierten Aufstellungsorten befinden werden. Systeme kleinerer Leistung werden dagegen in größerer Anhäufung erwartet, z.B. an Ladepunkten für Elektrofahrräder, was sich in den niedrigen Grenzwerten der Klasse B für Systeme $< 1 \text{ kW}$ zeigt.

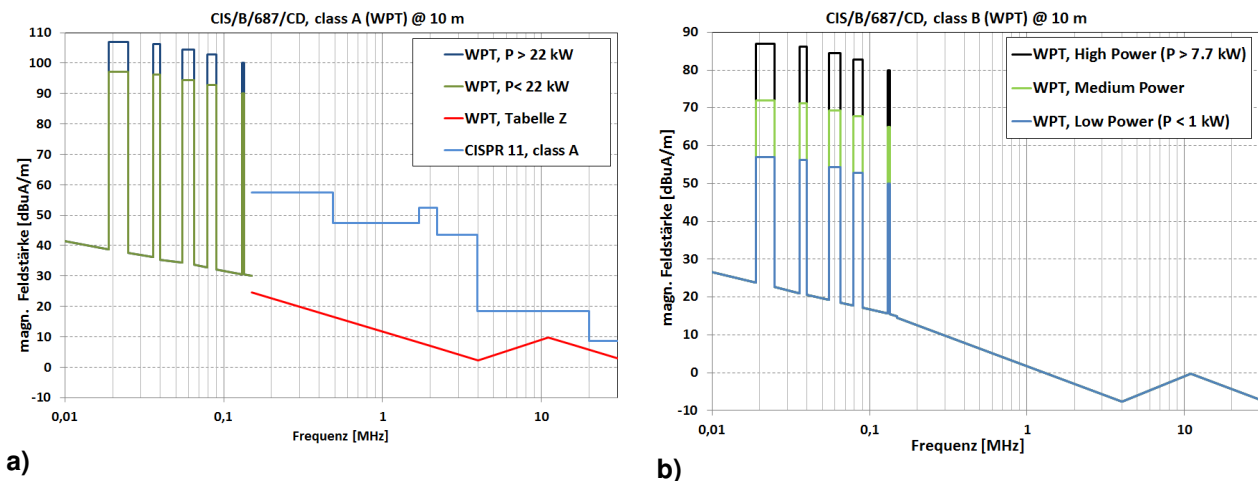


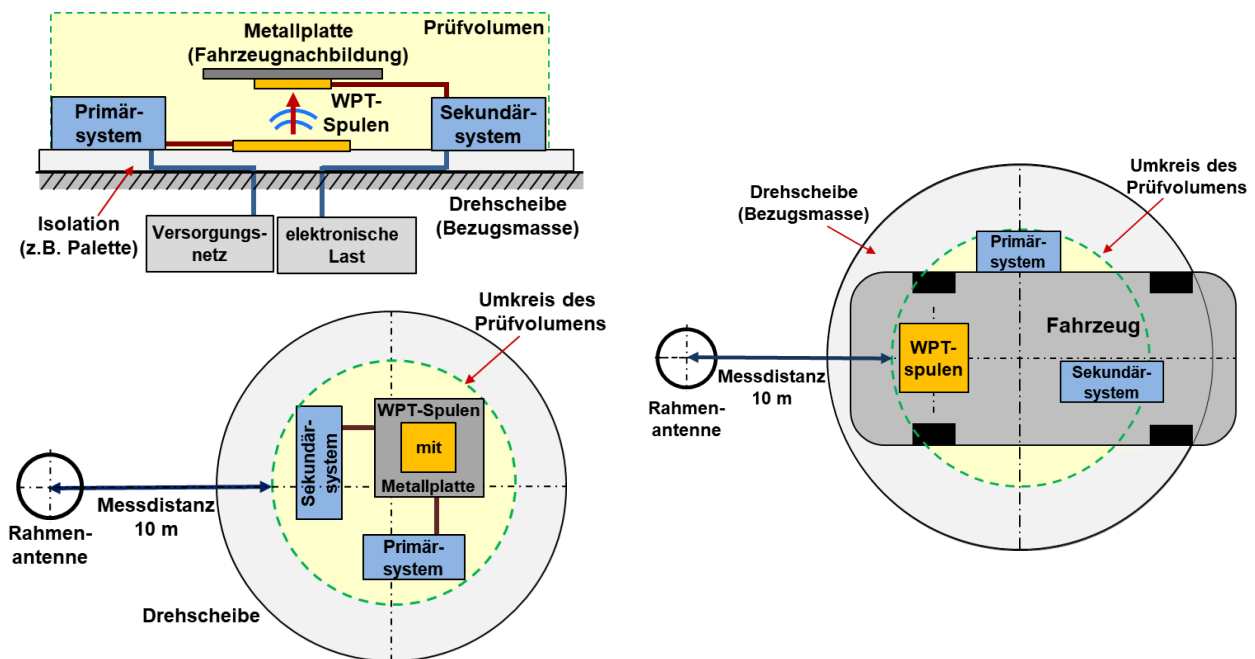
Bild 4: Aktuell in Diskussion befindliche Grenzwerte der magnetischen Feldstärke für die Störaussendung von WPT-Systemen aus der Ergänzung zur CISPR 11 [1] für Geräte der Klassen A und B.

Für den Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz gelten dagegen strenge Grenzwerte für das magnetische Feld. Für die Klasse B werden die bereits existierenden Grenzwerte für 3 m Messabstand auf 10 m skaliert, während für die WPT-Systeme der Klasse A mit der Tabelle Z [1] neue Grenzwerte diskutiert werden. Für allgemeine Geräte der Gruppe 2, Klasse A gelten die bisherigen Grenzwerte der CISPR 11, wohingegen WPT-Systeme ihre gestrahlten Störemissionen dort um teilweise über 40 dB absenken müssen. Daraus ergibt sich ein hoher Anspruch an die Filterung des WPT-Leistungssignals am Ausgang des Wechselrichters.

Aber auch für die EMV-Messtechnik stellen die Grenzwerte oberhalb von 150 kHz eine Herausforderung dar. Vergleicht man die Pegel der Störaussendung bei der WPT-Arbeitsfrequenz mit den Pegeln im Frequenzbereich über 150 kHz, so wird von dem Messsystem eine Dynamik von über 100 dB gefordert.

3.2 Messaufbau nach CISPR 11 - Thema: Positionierung der Komponenten

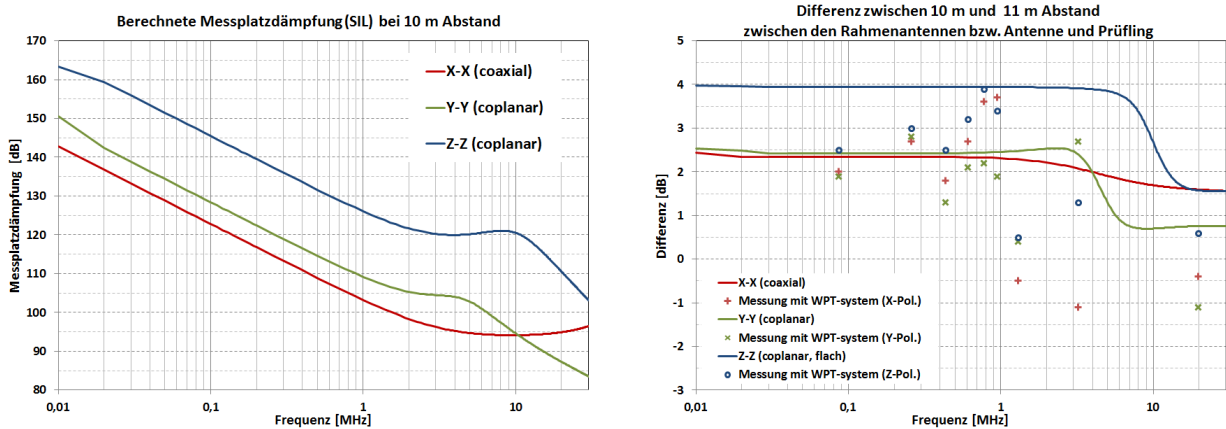
Eine weitere Herausforderung ergibt sich aus der Frage nach einem geeigneten Messaufbau für die Charakterisierung der WPT-Systemkomponenten. Bei der Komponentenmessung wird der Einfluss des Fahrzeugs näherungsweise durch eine quadratische Metallplatte mit einer Kantenlänge von 150 cm nachgebildet. Die Bilder 5a und 5b zeigen exemplarische Messaufbauten für die Komponentenmessung und die Messung mit Fahrzeug. Es besteht dabei der Anspruch auf aussagekräftige Ergebnisse mit Hilfe des Ersatzaufbaus ohne Fahrzeug. Zu große Abweichungen zwischen der Fahrzeugmessung und dem Komponententest würden zu übermäßigen Anforderungen bei der Komponentenentwicklung oder einem erhöhten Störpotenzial bei der späteren Fahrzeuganwendung führen. Dahingegen soll ein Ersatzaufbau immer eine worst case Abschätzung ermöglichen.



a) **Bild 5:** Aktuelle Vorschläge für die Messanordnung zur Charakterisierung der feldgebundenen Störaussendungen von WPT-Systemen mit und ohne Fahrzeug

Eine Herausforderung besteht hierbei in der geeigneten Anordnung der Systemkomponenten innerhalb des Prüfvolumens. Die normative Vorgabe für den Durchmesser des als Zylinder beschriebenen Prüfolumens beträgt 3 m bei einem Messabstand von 10 m. Dieser Wert ergibt sich aus der Messplatzvalidierung mittels NSA-Messung nach den entsprechenden CISPR Vorgaben. Die berechneten Werte der Messplatzdämpfung zwischen zwei 60 cm-Rahmenantennen sind in Bild 6a dargestellt und betragen in Abhängigkeit von der Antennenausrichtung zwischen 125 dB und 147 dB bei 85 kHz. Die Messplatzdämpfung wurde mit dem Programm 4NEC2 berechnet. Innerhalb des das Prüfvolumen beschreibenden Umkreises können die zum Prüfling gehörenden Systemkomponenten angeordnet werden. Betrachtet man den in Bild 5b dargestellten Messaufbau mit Fahrzeug, so zeigt sich, dass die Spulenposition mit dem Fahrzeug aufgrund der Abmessungen der Drehscheibe und des Fahrzeugs nur eine geringe Variation erlaubt. Abhängig von der Position der Spulen am Fahrzeug wird in den meisten Fällen eine zum Mittelpunkt der Drehscheibe exzentrische Positionierung der WPT-Spulen erforderlich sein.

Berücksichtigt man diese exzentrische Anordnung der Spulen bei der Komponentenmessung, so ergeben sich im Vergleich zu einer zentrischen Anordnung unterschiedliche Abstände der WPT-Spulen zur Antenne, wenn der Messabstand stets auf den Umkreis des Prüfvolumens bezogen wird. Der Einfluss der unterschiedlichen Entfernung zur Antenne wurde mit Hilfe von Berechnungen und Messungen untersucht.



a) Berechnete Messplatzdämpfung (Site Insertion Loss, SIL) zwischen zwei 60 cm-Rahmenantennen als Referenz für die NSA-Messungen

b) Berechnete Differenz der Messplatzdämpfung für 10 m und 11 m Abstand zwischen zwei Rahmenantennen und Differenz der Messungen an einem WPT-System bei unterschiedlicher Spulenposition.

Bild 6: Einfluss des Antennenabstandes auf die Messplatzdämpfung zwischen zwei 60 cm-Rahmenantennen für die drei Polarisierungsebenen und Vergleich der Messungen an einem WPT-System bei zentrischer und exzentrischer Positionierung der WPT-Spulen auf dem Drehtisch. Berechnung der Messplatzdämpfung mit dem Programm 4NEC2 unter Verwendung des Simulationsmodells aus [3].

In Bild 6b ist die Differenz der Messplatzdämpfung bei Änderung des Antennenabstands von 10 m auf 11 m dargestellt. Bei 85 kHz beträgt die zusätzliche Felddämpfung zwischen 2,5 dB (Polarisationen X, Y) und 4 dB (Polarisation Z). Die Dämpfung ist zudem stark frequenzabhängig und fällt ab 4 MHz deutlich ab. Eine zentrische Anordnung der Spulen würde gegenüber einer exzentrischen Positionierung theoretisch 2,5 dB bis 4 dB geringere Werte bei der Feldstärkemessung ergeben, da hier der Abstand zwischen der Messantenne und den WPT-Spulen als abstrahlendes Element größer ist. Die Messungen an einem WPT-System zeigten bis zu einer Frequenz von etwa 1 MHz einen Unterschied von etwa 1,3 dB bis 3,9 dB. Dabei lagen die Werte für die X- und Y-Polarisation nahe an den aus der Messplatzdämpfung berechneten Kurven. Hier agieren die WPT-Spulen als maßgebliche Strahler. Bei höheren Frequenzen ergaben sich größere Abweichungen von den berechneten Kurven, was auf eine Abstrahlung durch die umgebenden Komponenten und der Kabel hindeutet. Die einheitliche Positionierung der Systemkomponenten im Prüfvolumen wird momentan in den verschiedenen Normungsgremien diskutiert. Die Vorgabe einer zentralen Anordnung der WPT-Spulen würde die Vergleichbarkeit zumindest der Aussendung bei der Nutzfrequenz zwischen verschiedenen Laboren erhöhen. Eine exzentrische Positionierung erhöht dagegen die Flexibilität der Prüflingsanordnung und würde der Messung mit dem Fahrzeug näher kommen.

4 Leitungsführte Störaussendung

Neben den noch offenen Fragen und Herausforderungen bei Messungen feldgebundener Störaussendungen ist auch für die Messung leitungsgeführter

Störaussendungen von WPT-Systemen noch einiges im Entwicklungsstadium. Während in dem CDV der Ergänzung zur CISPR 11 [1] bereits die in Abschnitt 3.1 vorgestellten Grenzwerte für die magnetische Feldstärke angedacht sind, gibt es darin für die Gleichtaktströme von WPT-Systemen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz noch keine Grenzwerte. Vor der Festlegung auf bestimmte Grenzwerte sollen Analysen von induktiven Ladesystemen durchgeführt werden, da mit großer Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden kann, dass die Fahrzeughersteller in ihren EMV-Spezifikationen entsprechende Messverfahren vorgeben werden. Für erste Untersuchungen der Gleichtaktströme wird ein Musteraufbau eines induktiven Ladesystems verwendet, wie in Bild 7 dargestellt.

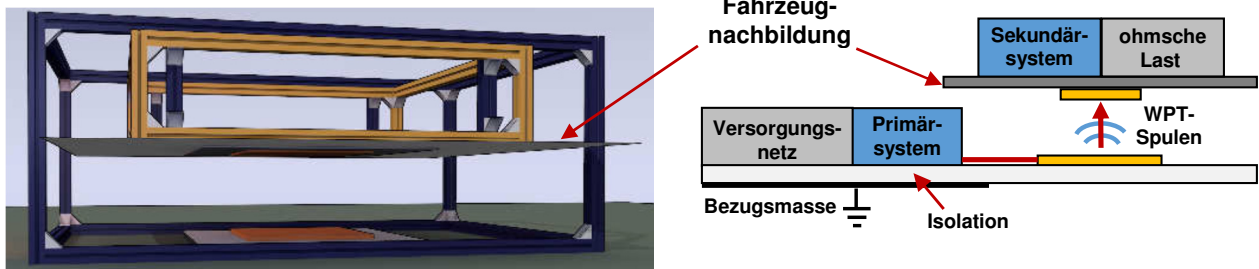


Bild 7: Musteraufbau eines induktiven Ladesystems

Dabei ist die Sekundärspule an einem quadratischen Stahlblech der Kantenlänge 150 cm befestigt, welches den Fahrzeugunterboden simuliert. Diese Fahrzeugsimulation wird von einem höhenverstellbaren Kunststoffträger gehalten, wodurch verschiedene Unterbodenabstände der Fahrzeuge nachgebildet werden können. Das Sekundär-system mit Kompensationskondensatoren, Gleichrichter, sowie HV-Netznachbildungen wird, wie in [1] präferiert, auf der Fahrzeugnachbildung platziert, ebenso wie die ohmsche Last. Die ohmsche Last wurde mit 300Ω so gewählt, dass auf der Sekundär-seite moderate Spannungen auftreten.

In Bild 8 ist ein Vergleich des an verschiedenen Stellen des WPT-Systems gemessenen Gleichtaktstroms dargestellt. Direkt am Ausgang des primärseitigen Wechselrichters ist das durch die Harmonischen der Nutzfrequenz begründete Störspektrum stark ausgeprägt. Auch auf der Sekundärseite vor dem Gleichrichter zeigt sich das Störspektrum immer noch in abschnittsweise unverminderter Amplitude, d.h. es findet nur eine unzureichende Filterung durch die beiden Resonanzkreise der Spulen statt.

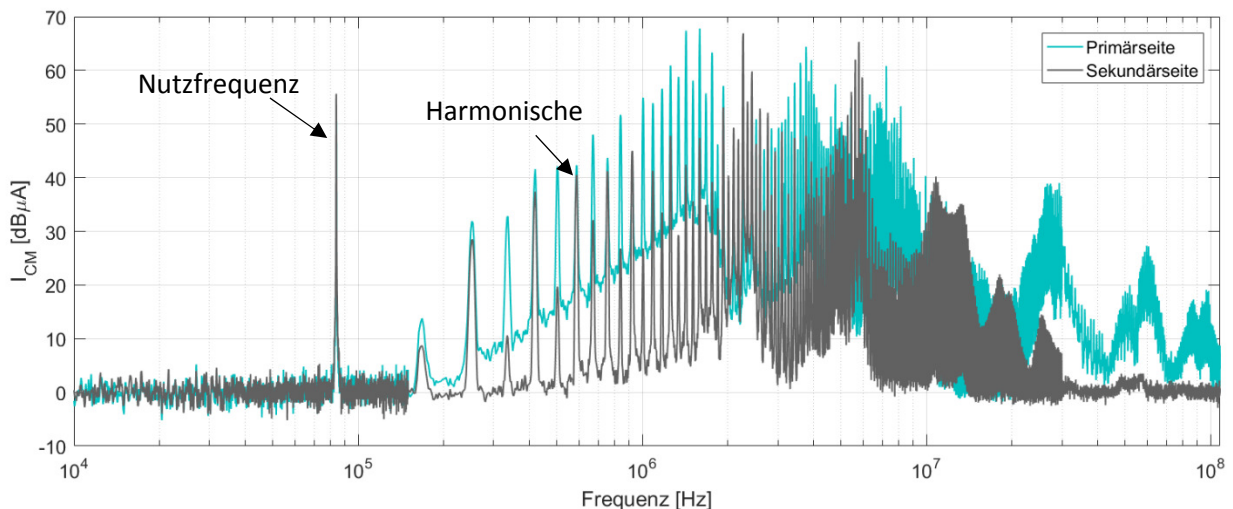


Bild 8: Messungen des Gleichtaktstroms am Ausgang des Wechselrichters auf der Primärseite und vor dem Gleichrichter auf der Sekundärseite.

Die Messungen wurden bei einer geringen Systemleistung von unter 100 W durchgeführt, so dass die Amplituden hier keinen worst case darstellen. Weiterhin ist zu untersuchen, in wie weit sich die Position des Sekundärsystems auswirkt. In Abhängigkeit von der Anordnung werden sich die parasitären Kapazitäten im Messaufbau ändern, so dass sich die Gleichtaktstörungen entweder auf das Blech der Fahrzeugnachbildung, d.h. die schwebenden Fahrzeugmasse, oder auf die Bezugsmasse des Primärsystems (vgl. Bild 5a und 7) beziehen.

Die mögliche Filterung des LF-Signals zur Unterdrückung der leitungsgeführten Störungen wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

4.1 Filterung der LF-Signals am Ausgang des Wechselrichters

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, werden bereits durch die Grenzwertvorgaben hohe Ansprüche an die Filterung des WPT-Leistungssignals am Ausgang des Wechselrichters gestellt. Bei der WPT-Arbeitsfrequenz müssen die Filterverluste so gering wie möglich sein, wohingegen die Harmonischen bereits ab der dreifachen Arbeitsfrequenz bedämpft werden müssen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Lastimpedanz am Ausgang des Wechselrichters die Filtercharakteristik beeinflusst. Da die Lastimpedanz in diesem Fall maßgeblich durch das Spulensystem, also den lose gekoppelten Transformator bestimmt wird, führt jeder Versatz und jede Abstandsänderung der Spulen zu einer Veränderung der Filtercharakteristik.

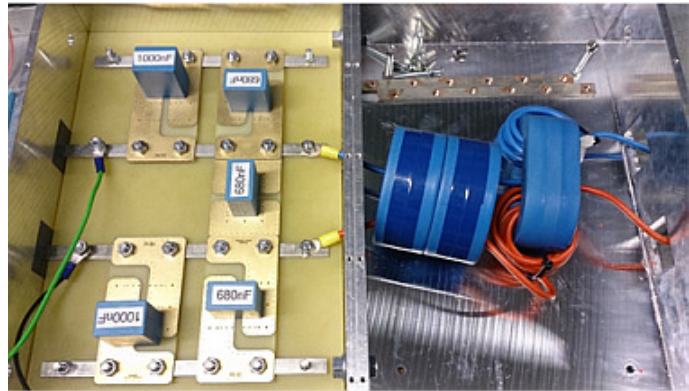


Bild 9: Filterung des Gleichtaktstroms am Ausgang des Wechselrichters durch Y-Kondensatoren C_y je 1680 nF, einem X-Kondensator C_x 680 nF und einer Gleichtaktdrossel.

Zur Unterdrückung des Gleichtaktstörstroms am Ausgang des Wechselrichters wurde die in Bild 9 dargestellte Filterschaltung entwickelt, welche aus einer Kombination von X- und Y-Kondensatoren sowie einer Drossel zur Gleichtaktunterdrückung besteht.

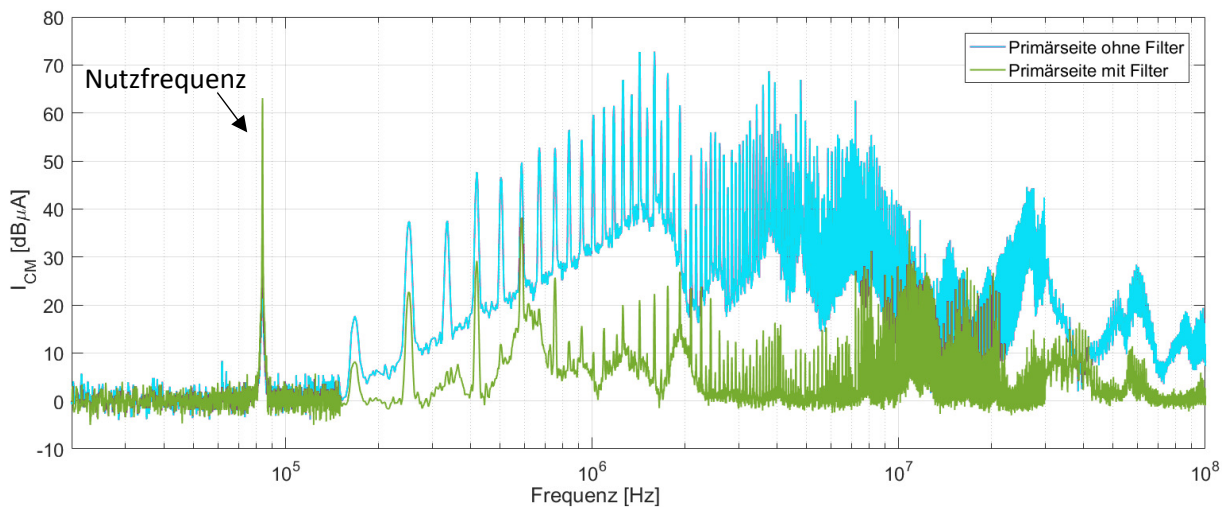


Bild 10: Messungen des Gleichtaktstroms am Ausgang des Wechselrichters mit und ohne Filter

Ein Vergleich des ungefilterten und gefilterten Gleichtaktstroms am Ausgang des Wechselrichters ist in Bild 10 dargestellt und zeigt eine deutliche Reduzierung des Störpegels bei Einsatz der Filtermaßnahmen. Dabei betrug die Spannung an der Sekundärseite bei der Messung ohne Filter 109 V und bei der Messung mit Filtermaßnahmen 160 V. Bei einer Last von 300Ω lag die Leistung auf der Sekundärseite bei 40 W bzw. 85 W, so dass Ergebnisse nur relativ zu betrachten sind und die absoluten Werte keine Aussage über den worst case erlauben.

5 Zusammenfassung

Die EMV-Charakterisierung von WPT-Systemen stellt in vielerlei Hinsicht Herausforderungen bei der Messung sowohl der leitungs- als auch der feldgebundenen Störaussendung dar. Bereits die diskutierten Grenzwerte der magnetischen Störfeldstärke im Bereich 9 kHz bis 30 MHz implizieren eine Messdynamik von über 100 dB. Der Vergleich des Komponentenaufbaus mit zentrischer Spulenpositionierung und der analog zum Fahrzeugaufbau exzentrisch positionierten Spulen zeigt eine Abweichung von 2 ... 4 dB im unteren Frequenzbereich nur aufgrund der Spulenposition. Werden auch noch andere Parameter, wie z.B. eine Variation des Messaufbaus oder verschiedene Absorberhallentechniken (mit oder ohne Ferritabsorber) berücksichtigt, können diese Abweichungen sich durchaus auf über 15 dB addieren. Die Messung des Störstromes auf der Primär- und Sekundärseite zeigt eine nur unzureichende Filterwirkung durch die Resonanzkreise der WPT-Spulen. Aufgrund der niedrigen Grenzwerte bei den Harmonischen der Nutzfrequenz ist eine Filterung des Signals am Ausgang des Wechselrichters notwendig. Die Messungen der vom Wechselrichter getriebenen Gleichtaktströme zeigen auch ein hohes leitungsgebundenes Störpotential für die Sekundärseite und hohe Anforderungen an entsprechende Filter.

Danksagung

Die Messergebnisse in dieser Arbeit entstanden im Rahmen des gemeinsamen vom BMWi geförderten Projektes der EMC Test NRW GmbH und des Arbeitsgebietes Elektromobilität der Bergischen Universität Wuppertal. An dieser Stelle soll ein herzlicher Dank ausgesprochen werden an Prof. B. Schmülling, Amelie Burkert und Myrel Alsayegh des Arbeitsgebietes Elektromobilität für die Bereitstellung eines induktiven Ladesystems zur Durchführung der Messungen.

Literaturangaben

- [1] CIS/B/687/CDV: Amendment 2 Fragment 1 to CISPR 11 Ed. 6: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement - Requirements for air-gap wireless power transfer (WPT), CISPR-Dokument, September 2017
- [2] CIS/A-1101-DC: Draft amendment to CISPR 16-1-4 for test site validation from 9 kHz to 30 MHz, Dezember 2014
- [3] CIS/A/AHG1: Changes to document CIS/A/1101/DC:2014-12, Oktober 2016
- [4] Ziegler, Beck: Entwicklung eines Messaufbaus zur Charakterisierung der WPT-Systemkomponenten nach CISPR 25 und CISPR 11, EMV 2016, Februar 2016