

Untersuchung von Gleichtaktströmen in induktiven Kfz-Ladesystemen und deren Auswirkungen auf Magnetfeldemissionen

M.Sc. Emir Sulejmani, Universität Stuttgart, Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik (IEH), Deutschland

Dr.-Ing. Michael Beltle, Universität Stuttgart, IEH, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Stefan Tenbohlen, Universität Stuttgart, IEH, Deutschland

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat die Elektromobilität aufgrund der stetigen Fortschritte in der Entwicklung von Elektrofahrzeugen (EVs) zunehmend an Bedeutung gewonnen. Eine effiziente und komfortable Ladeinfrastruktur ist ein entscheidender Aspekt bei der Förderung der Verbreitung von Elektromobilität. In diesem Zusammenhang gewinnt das induktive Laden von EVs als vielversprechende Technologie an Bedeutung. Das kabellose Laden macht mechanische Verbindungen überflüssig und erhöht die Benutzerfreundlichkeit sowie den Komfort. Elektrofahrzeugbesitzer können ihr Fahrzeug einfach über einer induktiven Ladeplatte parken, ohne manuell eingreifen zu müssen. Diese Ladetechnologie könnte einen wichtigen Beitrag zur alltagstauglichen Integration von EVs leisten.

Um eine reibungslose Integration von WPT-Systemen (Wireless Power Transfer) in die bestehende Infrastruktur zu gewährleisten, spielt die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) eine entscheidende Rolle. Neben dem Magnetfeld im dafür vorgesehenen Frequenzband entstehen aufgrund der geringen Kopplung über die Luft und des parkbedingten Spulenoffsets Streuflüsse. Normen und Standards für die EMV von induktiven Ladesystemen sind von essentieller Bedeutung, um eine harmonische Koexistenz mit anderen elektronischen Systemen und Geräten sicherzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Spulenpaar untersucht, das nach der SAE J2954 [1] aufgebaut ist. Es kann eine maximale Eingangsleistung von 3,6 kW bereitstellen und ermöglicht dabei einen vertikalen Abstand von 10 cm bis 15 cm (Bodenfreiheit des Fahrzeugs). Das vorgesehene Betriebsspektrum liegt zwischen 79 kHz und 90 kHz. In diesem Beitrag werden messtechnische und simulative Untersuchungen zur Bewertung des leitungs- und feldgebundenen Störpotentials von induktiven Kfz-Ladesystemen durchgeführt. Es werden verschiedene Spulenoffsets verglichen, um den geometrischen Einfluss auf das EMV-Verhalten zu untersuchen. Die Gleichtaktströme (CM-Ströme), die insbesondere durch die hohe Schaltfrequenz und das asynchrone Schalten des Wechselrichters erzeugt werden, spielen eine wichtige Rolle bei der Magnetfeldemission. Aus diesem Grund wird der normkonforme Prüfaufbau analysiert und der Einfluss des Gleichtaktstroms auf das Magnetfeld untersucht. Derzeit existieren keine international harmonisierten Grenzwerte für das abgestrahlte H -Feld von WPT-Systemen im Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 30 MHz.

2 Prüfaufbau für Emissionmessungen eines induktiven Kfz-Ladesystems

Die Abbildung 1 zeigt den gesamten Prüfaufbau für die Emissionsmessungen nach SAE J2954. Die EMV-Messungen werden in einer Halbabsorberkammer durchgeführt. Aufgrund der großen Massefläche und der parasitären Elemente treten größere Gleichtaktströme auf, weshalb in dieser Untersuchung von einem Worst-Case-Szenario ausgegangen wird. Gemäß der Norm wird von der Mitte der Bodenspule (Ground Assembly, GA) ein imaginärer Kreis mit einem Radius von 1,9 m gezogen. Mit der Antenne wird in einem Abstand von 3 m von diesem Kreis gemessen. Die Fahrzeugspule (Vehicle Assembly, VA) wird mit einer quadratischen Stahlplatte mit einer Kantenlänge von 1,5 m verbunden, die den Unterboden des Fahrzeugs nachbildet. Im Rahmen dieser Arbeit wird das WPT-System von einer Gleichspannungsquelle versorgt, die sich außerhalb der Schirmkammer befindet, abweichend von der Norm. Die Leitungslänge von der DC-Quelle zum Wechselrichter

beträgt mehr als 10 m. Außerdem befindet sich der Prüfaufbau nicht, wie in der Norm gefordert, auf einem Drehtisch. In [2] wird das gesamte WPT-System prinzipiell vorgestellt, einschließlich der eingesetzten Leistungselektronik sowie der Resonanzbeschaltung. Für die nachfolgenden Untersuchungen wird jedoch ein neuer Wechselrichter aufgebaut.

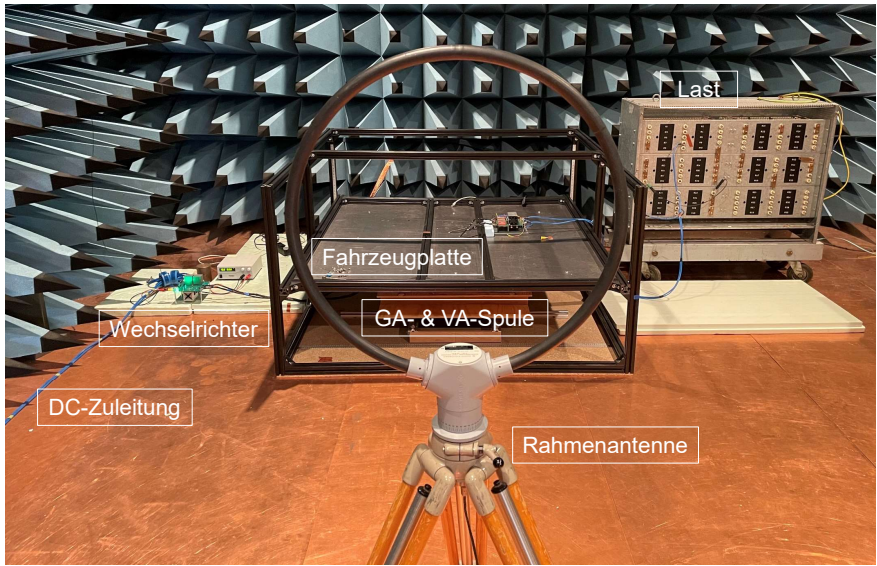


Abbildung 1: Empfohlener Prüfaufbau für gestrahlte Emissionen nach SAE J2954 (hier: H_Y -Feld)

Für die Untersuchung der Gleichtaktströme werden insgesamt drei Messpunkte (MP) festgelegt. MP 1 befindet sich auf der GA-Zuleitung vom Wechselrichter zur Bodenspule (Leitungslänge 1 m), MP 2 auf der Zuleitung nach dem Gleichrichter zur Batterie und MP 3 auf der ungeschirmten DC-Zuleitung am Eingang des Wechselrichters. Die Ströme werden mithilfe eines Hochfrequenz-Stromwandlers gemessen. Das ESB des verwendeten Prüfaufbaus und die zugehörigen MP sind in Abbildung 2 dargestellt. Das ESB wird hierbei um die parasitären Kapazitäten ergänzt.

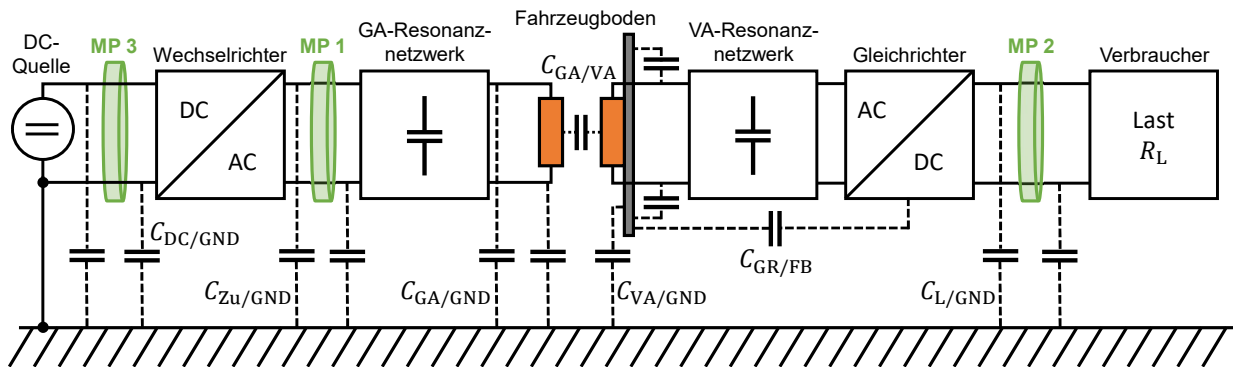


Abbildung 2: ESB des Prüfaufbaus unter Berücksichtigung der parasitären Koppelkapazitäten

Im Gegensatz zu [2] werden in dieser Arbeit die auftretenden CM-Ströme und das abgestrahlte Magnetfeld mit einer Offsetmessung zur optimalen Spulenausrichtung verglichen. Dadurch soll der geometrische Einfluss auf den CM-Strom und somit auch auf das H -Feld untersucht werden. Durch den Versatz der Spulen entstehen größere Streuflüsse, die das Störspektrum beeinflussen, da der Koppelfaktor kleiner wird. Dabei werden die in der Norm angegebenen max. Versatzpositionen berücksichtigt. Die beiden zu untersuchenden Spulenpositionen sind in Tabelle 1 aufgeführt. Der Best Case ergibt sich erwartungsgemäß bei min. Spulenabstand (ΔZ) und max. Versatz in Y-Richtung (in Richtung der Antenne). Die Werte für den Kopplungsfaktor k betragen im Best Case 0,2675 und im Worst Case 0,1374.

Offset-Richtung	Best Case / mm	Worst Case / mm
ΔX	0	70
ΔY	100	100
ΔZ	100	150

Tabelle 1: Versatzpositionen für die beiden Spulenausrichtungen (GA & VA)

Durch eine Spulenverschiebung ändert sich die Resonanzfrequenz f_r aufgrund der veränderten Eigeninduktivitäten. Beim untersuchten WPT-System erfolgt keine automatische Resonanzanpassung, so dass die Betriebsfrequenz manuell nachjustiert werden muss. Zur Bestimmung der Resonanzfrequenz werden die Impedanz- und Phasenverläufe der beiden Spulenausrichtungen mit Hilfe einer vereinfachten Schaltungssimulation in LTspice untersucht. Für die Simulation werden zunächst ideale Komponenten angenommen. Die Eigeninduktivitäten der Spulen, die sich im Prozess ändern, werden messtechnisch ermittelt. Im Best Case beträgt die Resonanzfrequenz 80,45 kHz, während sie im Worst Case erwartungsgemäß ansteigt, auf 83,95 kHz. In der Praxis ist es oft sinnvoll, MOSFETs unter der Schaltbedingung des Zero Voltage Switching (ZVS) zu betreiben. Das spannungslose Schalten der Power-MOSFETs reduziert die Schaltungsverluste und erhöht damit den Gesamtwirkungsgrad des induktiven Ladesystems [2]. Um einen MOSFET mit ZVS zu realisieren, muss die Body-Diode vor dem MOSFET leitend sein. In einem Vollbrücken-Wechselrichter sorgt eine induktive Eingangsimpedanz dafür, dass der MOSFET bei negativem Strom eingeschaltet wird. Die Simulation zeigt, dass die Betriebsfrequenz hierfür in beiden Fällen oberhalb der Resonanzfrequenz liegen muss, um das ZVS zu realisieren. Für den Best Case wurde mit Hilfe verschiedener Messreihen eine Betriebsfrequenz von 81,2 kHz und für den Worst Case eine Betriebsfrequenz von 84,3 kHz ermittelt, um den max. Wirkungsgrad zu erreichen. Aufgrund der höheren Impedanz im Worst Case muss die Gleichspannungsquelle eine höhere Spannung liefern. Dadurch fließt insgesamt ein geringerer Strom, um die Eingangsleistung von 3,6 kW zu erreichen.

3 Untersuchung der Gleichtaktströme

Aus [2] geht hervor, dass die größten Störpegel für den CM-Strom auf der GA-Zuleitung (MP 1) zu erwarten sind. Dieser befindet sich direkt hinter dem Wechselrichter. Die Relevanz dieses Gleichtaktstroms wird auch in [3]–[5] thematisiert und in Bezug zum abgestrahlten Magnetfeld gesetzt. Zusätzlich gibt die ETSI EN 303 417 [6] Grenzwerte für den Gleichtaktstrom an, wenn die Leitungslänge zwischen Wechselrichter und Bodenspule mehr als 3 m beträgt und die Leitung nicht im Boden oder innerhalb metallischer Strukturen verlegt ist. Aus diesem Grund sollte dieser Störstrom zunächst simulativ abgeschätzt werden können. Hierfür wird eine Schaltungssimulation aufgebaut, welche die realen Bauteilparameter und parasitären Koppelkapazitäten sowie die Auslegung des Wechselrichters berücksichtigt. Die Koppelkapazitäten $C_{Zu/GND}$ und $C_{GA/GND}$ werden gemeinsam im Laboraufbau mit Hilfe eines Impedanzanalysators sowohl für den Best als auch für den Worst Case gemessen [2]. Die parasitäre Kapazität zwischen dem Fahrzeugboden und der Referenzmassefläche $C_{VA/GND}$ wird durch die Berechnung eines Plattenkondensators abgeschätzt [2]. Durch eine simulative Untersuchung des Spulenpaars in CST Studio Suite ergibt sich der Wert von $C_{GA/VA}$. Für die Schaltungssimulation wird angenommen, dass die parasitäre Koppelkapazität zwischen der Zuleitung zur ohmschen Last und der Massefläche $C_{L/GND} = 10$ pF beträgt. In der Simulation wird der CM-Strom zunächst im Zeitbereich ermittelt und anschließend über eine FFT in den Frequenzbereich überführt. Die Messung des Gleichtaktstroms erfolgt mit einem Zeitbereichs-Messempfänger und dem Quasi-Peak-Detektor. Die ZF-Bandbreite beträgt im Frequenzbereich zwischen 9 kHz bis 150 kHz $B_{ZF} = 200$ Hz und im Frequenzbereich zwischen 150 kHz bis 30 MHz $B_{ZF} = 9$ kHz. Die Messverweildauer beträgt 1 s. Abbildung 3 zeigt den Vergleich zwischen der Simulation und Messung des CM-Stroms im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz. Der Anstieg des Rauschpegels bei 150 kHz resultiert aus der Änderung der Bandbreite.

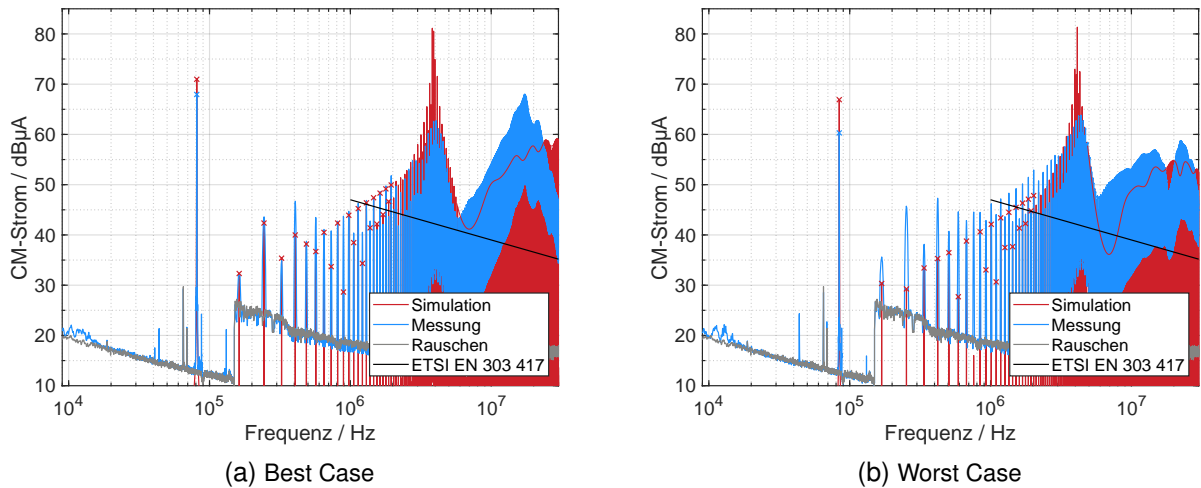


Abbildung 3: Messung und Simulation des Gleichtaktstroms am Ausgang des Wechselrichters (MP 1)

Für beide Spulenausrichtungen zeigt sich ein qualitativ ähnlicher Kurvenverlauf in Simulation und Messung. Das Spektrum zeigt sowohl die geraden als auch die ungeraden Harmonischen. Diese steigen aufgrund des kapazitiven CM-Impedanzverlaufs bis zur Resonanzfrequenz bei ca. 4 MHz mit etwa 20 dB/dec an. Diese Resonanzstelle wird durch die parasitären Kapazitäten $C_{Zu/GND}$ und $C_{GA/GND}$ und die Induktivität der GA-Zuleitung gebildet. In beiden Fällen werden die Resonanzpunkte im Bereich von 4 MHz erreicht, allerdings liegen die Pegel ca. 19 dB über den Messwerten, was Gegenstand laufender Untersuchungen ist. Bei der Betriebsfrequenz weicht der Strompegel im Best Case um ca. 3 dB und im Worst Case um ca. 7 dB von der Simulation ab. Im Frequenzbereich ab ca. 6 MHz treten aufgrund der unterschiedlichen parasitären Kapazitäten größere Unterschiede zwischen den beiden Stromverläufen auf. Darüber hinaus zeigt sich, dass die CM-Ströme den Grenzwert deutlich überschreiten würden. Bei großen Parkflächen sind Leitungslängen von mehr als 10 m nicht unüblich. Aus EMV-Sicht müssen daher die Grenzwerte und die Verlegung der Zuleitungen berücksichtigt werden. Da für die Automobilindustrie vor allem der Störstrom auf der Zuleitung vom Gleichrichter in Richtung der Batterie von Interesse ist, wird im Folgenden der MP 2 genauer untersucht. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis für den Best und Worst Case im Frequenzbereich zwischen 9 kHz bis 30 MHz.

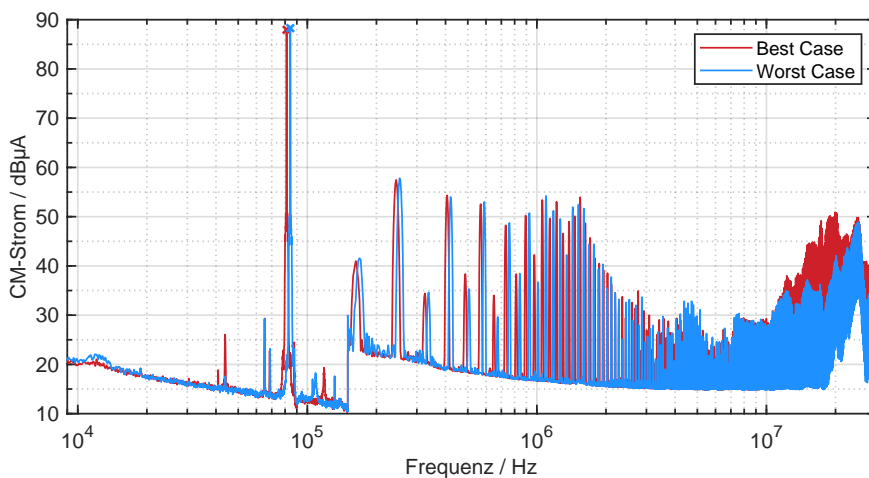


Abbildung 4: Messung des CM-Stroms am Ausgang des Gleichrichters auf der Fahrzeugseite (MP 2)

Die beiden Störspektren zeigen bis zu etwa 10 MHz einen ähnlichen Verlauf und nahezu identische Amplituden. Daraus lässt sich schließen, dass die Parkposition des Fahrzeugs kaum einen Einfluss

auf den Gleichtaktstrom in Richtung der Batterie hat. Es ist erkennbar, dass die Amplitude bei der Betriebsfrequenz aufgrund der hohen Strom- und Spannungsänderungsraten in den Dioden des Gleichrichters auf ca. 88 dB μ A angestiegen ist. Auch die Harmonischen weisen teilweise erhöhte Störpegel auf, was auf eine unzureichende Filterung durch die beiden Resonanzkreise der Spulen schließen lässt. Die Störströme des Gleichrichters schließen sich unter anderem über die parasitäre Kapazität $C_{GR/FB}$ zum Fahrzeugboden. Im Worst Case treten ab ca. 10 MHz Abweichungen auf, da die Koppelkapazitäten $C_{GA/VA}$ und $C_{VA/GND}$ geringer sind. Ein entsprechendes Filter hinter dem Gleichrichter sollte bereits bei der Entwicklung mitberücksichtigt werden.

3.1 Einfluss der Isolationshöhe am Prüfaufbau auf Gleichtaktströme

Der Einfluss der Isolationshöhe auf den Gleichtaktstrom wird an MP 1 und MP 3 untersucht, indem der Abstand zwischen der DC-Zuleitung und dem Wechselrichter inklusive der GA-Zuleitung zur Metallfläche als Bezugsmasse verändert wird. Die max. Isolationshöhe beträgt nach SAE 15 cm. Die Abstände, die im Laboraufbau untersucht werden, betragen 5 cm und 10 cm. In Abbildung 5 ist das Ergebnis für beide Spulenausrichtungen im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz zu sehen.

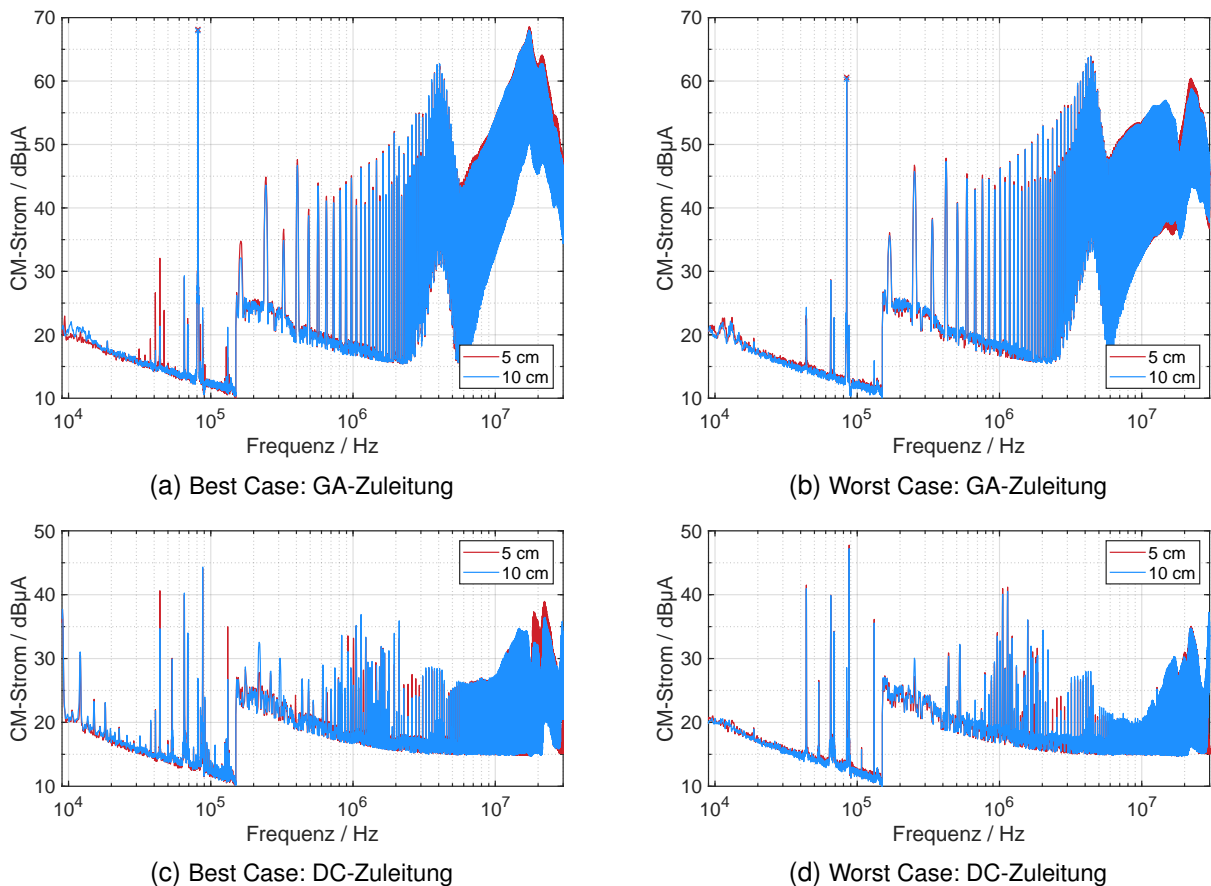


Abbildung 5: Messung des Gleichtaktstroms auf der GA-Zuleitung (MP 1) und auf der DC-Zuleitung (MP 3) für verschiedene Isolationshöhen

Es ist erkennbar, dass die Amplituden bei einem Isolationsabstand von 10 cm abnehmen. Der Effekt tritt ab einer Frequenz von ca. 20 MHz am deutlichsten auf. Einerseits liegt dies an der geringeren Koppelkapazität $C_{ZU/GND}$, wodurch ein geringerer Gleichtaktstrom entsteht. Andererseits wird durch die abnehmende Kapazität $C_{DC/GND}$ auch weniger des auf der GA-Zuleitung fließenden CM-Stroms auf die DC-Zuleitung gekoppelt, um den Stromkreis zur Störquelle zu schließen. Dadurch nimmt auch der CM-Strom auf der DC-Leitung ab. Im Worst Case wirkt sich auch die kleinere Koppelkapazität $C_{VA/GND}$ aufgrund des größeren vertikalen Abstands aus.

4 Untersuchung der Magnetfeldemissionen

Das abgestrahlte Magnetfeld des WPT-Systems entsteht durch eine Kombination von Gegen- und Gleichtaktströmen. Es wird mit Hilfe einer aktiven Rahmenantenne im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz in einem Messabstand von 3 m gemessen. Je nach Ausrichtung der Antenne zum Prüfaufbau wird zwischen dem H -Feld in X- und Y-Richtung (s. Abb. 1) unterschieden. Der Zeitbereichs-Messempfänger wird dabei äquivalent zu den CM-Strom-Messungen eingestellt.

4.1 Einfluss von Gleichtaktströmen auf Magnetfeldemissionen

Um den Einfluss des Gleichtaktstroms auf die Magnetfeldemissionen zu untersuchen, sind in Abbildung 6 neben dem H -Feld in X-Richtung auch die CM-Ströme auf der DC-Zuleitung zu sehen. Es wird der Fall verglichen, bei dem die DC-Zuleitung direkt auf dem Kupferboden der Schirmkammer aufliegt (s. Abb. 1), mit dem Fall, bei dem die DC-Zuleitung auf einer 10 cm hohen Isolierung aufliegt.

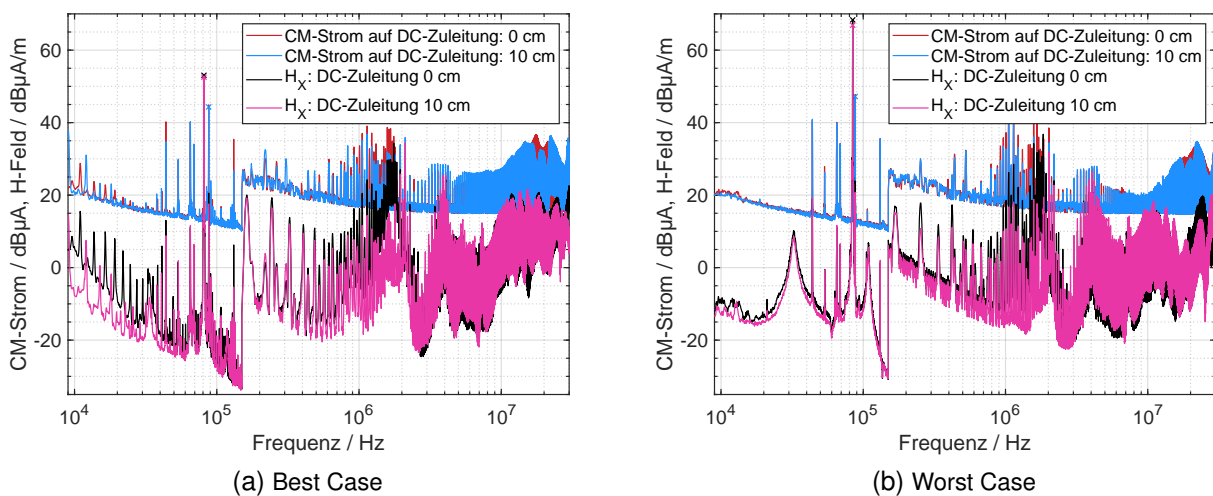


Abbildung 6: Messung und Vergleich der Magnetfeldemissionen in X-Richtung mit den Gleichtaktströmen auf der DC-Zuleitung

Die höchste Magnetfeldstärke wird erwartungsgemäß bei der Betriebsfrequenz des WPT-Systems erreicht. Das H -Feld wird hierbei durch den Lade- bzw. den Gegentaktstrom (DM-Strom) generiert. Im Best Case weist die Feldstärke mit 52,5 dBµA/m eine um ca. 14 dB geringere Amplitude auf als im Worst Case. Dies resultiert aus dem schlechteren Kopplungsfaktor zwischen den Spulen und dem damit bedingten größeren Streufluss. Bis zu einer Frequenz von etwa 1 MHz ist in beiden Fällen ein Abfallen der Harmonischen zu beobachten. Dies ist auf den DM-Strom zurückzuführen, der ebenfalls mit etwa 40 dB/dec im Frequenzspektrum abnimmt [2]. Bei der Resonanzfrequenz des CM-Stroms auf der GA-Zuleitung bei ca. 4 MHz ist auch die Resonanz im Magnetfeld zu sehen. Dies lässt vermuten, dass ab dieser Frequenz vor allem der CM-Strom für die Magnetfeldemissionen verantwortlich ist. Ähnliche Ergebnisse wurden auch in [4] erzielt.

Insbesondere im unteren Frequenzbereich bis ca. 150 kHz ist im Best Case der Einfluss der Störströme aus der DC-Quelle erkennbar. Die Resonanzpunkte stimmen im Strom- und Magnetfeldverlauf sehr gut überein. Wenn die DC-Zuleitung isoliert verlegt wird, nehmen die Störpegel vor allem zwischen 1 MHz und 2 MHz deutlich ab. In diesem Frequenzbereich ist auch im H -Feld eine deutliche Reduktion der Amplituden zu erkennen. Das liegt daran, dass die parasitäre Koppelkapazität $C_{DC/GND}$ geringer ist. Dadurch koppelt ein geringerer Anteil des CM-Stroms auf der GA-Zuleitung über die Referenzmassfläche auf die DC-Zuleitung. Beim Worst Case ist dieser Effekt ebenfalls zu erkennen. Die Gründe für die deutlichen Unterschiede bei den H -Feldemissionen im unteren

Frequenzbereich sind Gegenstand aktueller Untersuchungen. Bei ca. 33 kHz ist im Worst Case die erste DM-Resonanzstelle der GA-Kompensationsplatte im H -Feld zu erkennen.

4.2 Grenzwertvorgaben für das Magnetfeld nach SAE J2954

Um das abgestrahlte Magnetfeld bewerten zu können, wird es mit den aktuellen Grenzwertvorschlägen nach der SAE J2954 und der CISPR 11 [7] verglichen. WPT-Systeme werden in der SAE als ISM-Geräte (Industrial, Scientific and Medical) eingestuft und müssen die Grenzwerte gemäß FCC Titel 47, Abschnitt 18 (Federal Communications Commission) [8] einhalten. Da die Grenzwerte jedoch für eine Messdistanz von 300 m angegeben werden, müssen sie entsprechend auf kleinere Messdistanzen extrapoliert werden. Abbildung 7 zeigt die Extrapolationsfaktoren, die nach [9] für den Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz berechnet wurden.

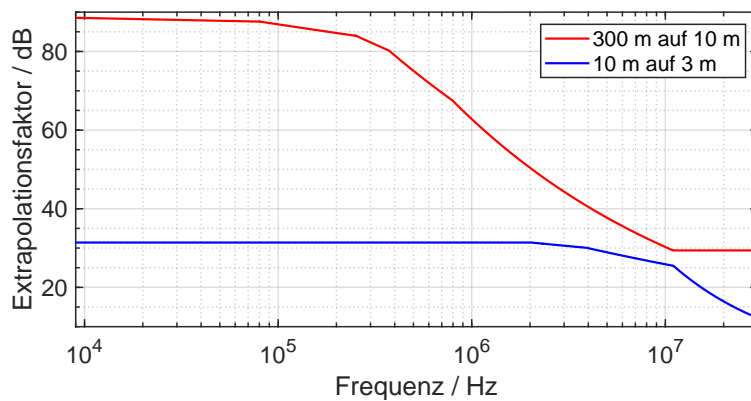


Abbildung 7: Extrapolationsfaktoren nach dem ANSI C63 Komitee

Die SAE definiert für den Betriebsbereich zwischen 79 kHz und 90 kHz von WPT-Systemen eine max. magnetische Feldstärke von 82,8 dB μ A/m bei einem Messabstand von 10 m.

4.3 Einfluss der Isolationshöhe am Prüfaufbau auf die magnetische Feldstärke

Im Folgenden wird die Beeinflussung des Magnetfelds durch die Isolationshöhe betrachtet. Abb. 8 zeigt das Ergebnis für Isolationen in Höhe von 5 cm und 10 cm. Die abgestrahlten Felder werden hierbei mit den vorgeschlagenen Grenzwerten für einen Messabstand von 3 m verglichen. Für gestrahlte Emissionen ab 150 kHz sind in der IEC 61980-1 die Grenzwerte nach CISPR 11 festgelegt.

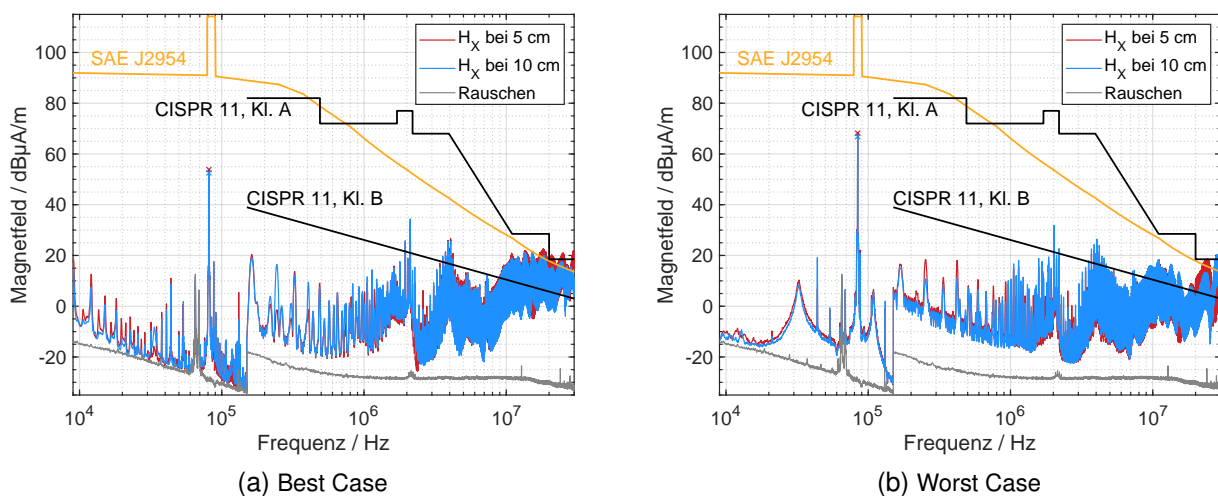


Abbildung 8: Messung der Magnetfeldemissionen in X-Richtung

Es ist erkennbar, dass für beide Spulenausrichtungen die Störpegel bei einem Isolationsabstand von 10 cm erwartungsgemäß niedriger ausfallen. Dies liegt an dem geringeren CM-Strom auf der DC- und GA-Zuleitung. Vor allem ab einer Frequenz von ca. 10 MHz ist eine deutliche Reduktion der Amplituden zu erkennen. Im Best Case können durch den größeren Abstand die Grenzwerte nach CISPR 11 für Klasse A eingehalten werden. Im Worst Case können die Grenzwerte jedoch nicht eingehalten werden. Insbesondere die wesentlich strengeren Grenzwerte nach CISPR 11, Klasse B zeigen, dass die Emissionen im hohen Frequenzbereich stark reduziert werden müssen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit werden die geometrischen Einflüsse eines nach der SAE J2954 genormten Prüfaufbaus zur Emissionsmessung an induktiven Kfz-Ladesystemen analysiert. Es werden die Auswirkungen des sich verändernden Kopplungsfaktors sowie der sich verändernden parasitären Koppelkapazitäten auf den Gleichtaktstrom und das abgestrahlte Magnetfeld bei verschiedenen Spulenoffsets untersucht. Eine SPICE-Simulation ermöglicht eine qualitative Nachbildung des Verlaufs des CM-Stroms auf der Primärseite. Es kann gezeigt werden, dass die Gleichtaktströme aus dem Gleichrichter in Richtung der Batterie bei der Betriebsfrequenz deutlich höhere Strompegel aufweisen. In diesem Beitrag wird der Zusammenhang zwischen dem Gleichtaktstrom und dem Magnetfeld, insbesondere im höheren Frequenzbereich ab etwa 4 MHz, erläutert. Es wurde festgestellt, dass auch die Störströme aus der Gleichspannungsquelle das H -Feld negativ beeinflussen können. Das aufgebaute WPT-System erfüllt nicht die aktuellen Grenzwerte für das Magnetfeld nach SAE J2954 und CISPR 11. Zukünftige Arbeiten werden geeignete Filter- und Schirmmaßnahmen für den Wechselrichter untersuchen. Es wird empfohlen, in Zukunft normative Vorgaben hinsichtlich der Isolationshöhe und der Kabellänge für die Versorgungsleitung zu machen. Außerdem sollte das E -Feld des WPT-Systems berücksichtigt werden, um neue Erkenntnisse für die Bewertung des Störpotenzials zu gewinnen.

Literatur

- [1] SAE International, *SAE J2954: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Alignment Methodology*, Warrendale, PA, USA, 2022.
- [2] E. Sulejmani, M. Beltle und S. Tenbohlen, „EMC of Inductive Automotive Charging Systems According to Standard SAE J2954,“ *Vehicles*, Jg. 5, Nr. 4, S. 1532–1552, Okt. 2023. DOI: 10.3390/vehicles5040083.
- [3] C. Ziegler, S. Weber und G. Heiland, „Ursache von Gleichtaktstörströmen in induktiven Ladesystemen (WPT-Systeme) und Vergleich zwischen gemessenen Störströmen mit der Feldstärkemessung,“ in *emv: Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit*, Köln, Deutschland, 2020, S. 37–45. DOI: 10.15488/10008.
- [4] S. Jeschke, M. Olbrich, M. Kleinen und J. Baerenfaenger, „Experimental Investigation on Magnetic Field Emissions of Wireless Power Transfer Vehicle Charging Systems,“ in *2022 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Gothenburg, Sweden, 2022, S. 461–466. DOI: 10.1109/EMCEurope51680.2022.9901115.
- [5] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei und M. Feliziani, „SAE J2954 WPT System Radiated Emission Model,“ in *2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility – EMC Europe*, Krakow, Poland, 2023, S. 1–4. DOI: 10.1109/EMCEurope57790.2023.10274413.
- [6] ETSI, *ETSI EN 303 417: 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, 6 765 - 6 795 kHz ranges; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU*, Sophia Antipolis, France, 2017.
- [7] CISPR, *CISPR 11: 2015+AMD1:2016+AMD2:2019, Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement*, Geneva, Switzerland, 2019.
- [8] Federal Communications Commission, *Title 47—Telecommunication, Part 18 - Industrial, Scientific, and Medical Equipment, Section 18.305 - Field strength limits*, Washington, DC, USA, 2010.
- [9] J. Mc Nulty, *The Measurement of Radiated Emissions on Frequencies Below 30 MHz*, Federal Communications Commission, Columbia, Maryland, USA, Jan. 1991.