

Ursache von Gleichtaktstörströmen in induktiven Ladesystemen (WPT-Systeme) und Vergleich zwischen gemessenen Störströmen mit der Feldstärkemessung

Dr.-Ing. Christof Ziegler, TDK Electronics AG, EMV-Labor
 Dr.-Ing. Stefan Weber, TDK Electronics AG
 Dipl.-Ing. Georg Heiland, Finepower GmbH

1 Einleitung

Induktive Ladesysteme oder WPT-Systeme (WPT= Wireless Power Transfer) für Elektrofahrzeuge, wie in Abbildung 1 dargestellt, werden seit einigen Jahren in unterschiedlichen Normungsgremien diskutiert. Die funktionale Beschreibung, z.B. Interoperabilität zwischen verschiedenen Systemen, strebt langsam einer Konsenslösung entgegen. Schließlich sollen die Normen der IEC 61980-Serie [2][3][5], der SAE J 2954 [8] und der ISO 19363 [6] noch im Jahr 2020 veröffentlicht bzw. aktualisiert werden. Die Anforderungen an die Störaussendung von WPT-Systemen werden jedoch noch intensiv in den Normungsgremien diskutiert.

Aufgrund ihrer Eigenschaft, die Energie mittels eines hochfrequenten Signals zu übertragen, werden WPT-Systeme in der CISPR 11 als ISM-Geräte der Gruppe 2 eingeordnet. Entsprechend beschäftigt sich die Normenarbeitsgruppe CISPR/B mit einer Erweiterung der Norm um die Beschreibung der Messanforderungen für WPT-Systeme und der Vorgabe von Grenzwerten [4].

Induktive Ladesysteme übertragen die Energie mittels eines magnetischen Wechselfeldes zwischen zwei gekoppelten Resonanzkreisen, wie es Bild 1 zeigt. Für das Laden von PKWs mit einer Leistung zwischen 3...22 kW wird eine Frequenz im Bereich zwischen 79...90 kHz verwendet, auf welche die Resonanzkreise abgestimmt sind. Nahe am Resonanzpunkt kompensieren sich die imaginären Anteile der Impedanz und es wird im Wesentlichen Wirkleistung übertragen. Aufgrund der offenen Koppelstruktur existieren Streufelder, welche als Störaussendung bei der Feldstärkemessung zu bewerten sind.

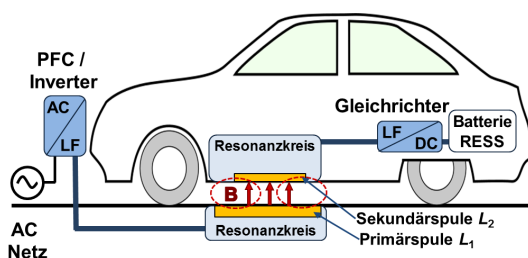


Bild 1: Wesentliche Komponenten für den Energietransfer eines WPT-Systems

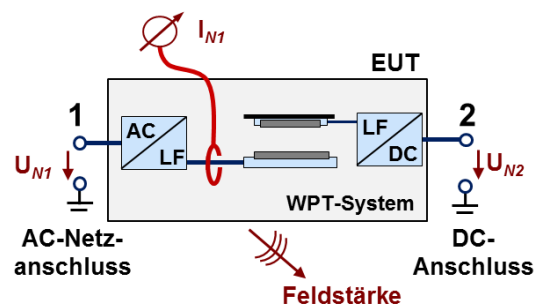


Bild 2: Abstrakte Schnittstellenbeschreibung eines WPT-Systems als AC/DC-Wandler

Abstrahiert man die Beschreibung eines WPT-Systems, so lässt sich dieses als AC/DC-Wandler mit einem internen, lose gekoppelten Übertrager darstellen. Das Blockschaltbild in Bild 2 zeigt die üblicherweise in einem solchen Fall bei der EMV-Untersuchung betrachteten Schnittstellen. Die Bewertung der Störaussendungen findet mittels leitungsgebundener Messungen am AC-Netzanschluss und DC-Ausgang statt. Des Weiteren erfolgt die

Messung der feldgebundenen Störaussendungen am Gesamtsystem.

Aufgrund der physikalischen Natur und der beschriebenen Ausbildung von Streufeldern bei WPT-Systemen ist es notwendig, auch die Störaussendungen des magnetischen Feldes im Frequenzbereich unterhalb von 30 MHz zu bewerten. Die Grenzwerte für das Magnetfeld in 10 m Messabstand befinden sich aktuell noch in Diskussion.

Als neue Technologie, welche ein deutlich erkennbares Störspektrum im Magnetfeld im Bereich unterhalb von 30 MHz erzeugt und zudem als Klasse B Einrichtung im Wohnbereich mit potentiell hoher Systemdichte prognostiziert wird, erregen WPT-Systeme ein erhebliches Aufsehen bei den in diesem Frequenzbereich existierenden Funkdiensten, z.B. LW-/MW-Rundfunk oder Amateurfunk. Die Besorgnis einer bislang unberücksichtigten Störaussendung neben dem Magnetfeld zeigt sich in der Forderung nach weiteren Messungen an den Systemen. Die Messung des Gleichtaktstörstromes auf der Zuleitung zur Primärspule ist eine davon. In dieser Arbeit werden die Quellen für das Auftreten von Gleichtaktströmen in WPT-Systemen per Simulation und Messung untersucht. Die Ergebnisse werden im Anschluss mit den gemessenen Magnetfeldspektren verglichen und diskutiert. Als weiteres Messverfahren wurde die Messung mit der Stabantenne (Monopol) in den Normungsgremien vorgeschlagen. Die Messungen mit einer Stabantenne werden ebenfalls in den Vergleich einbezogen.

2 Untersuchung des Auftretens von Gleichtaktströmen in WPT-Systemen

Ergänzt man das Blockschaltbild in Bild 2 um die parasitären Kapazitäten zwischen den Komponenten und dem Boden, so ergeben sich die in Bild 3 gezeigten Strompfade [9]. Ausgehend vom Inverter als Quelle wird die Primärspule über den Gegentaktstrom I_{DM} angeregt, welcher auch die übertragene Energie führt. Daneben ergeben sich über die parasitären Kapazitäten C_{Pm} ($m= 1 \dots 4$) Strompfade, auf denen sich die Gleichtaktströme I_{CMn} ($n= 1 \dots 5$) ausbreiten können. Besonders bei der EMV-Messung mit einer Metallfläche als Bezugsmasse und einer Netznachbildung am Netzanschluss ergibt sich ein Pfad mit hoher Leitfähigkeit für den Strom I_{CM5} .

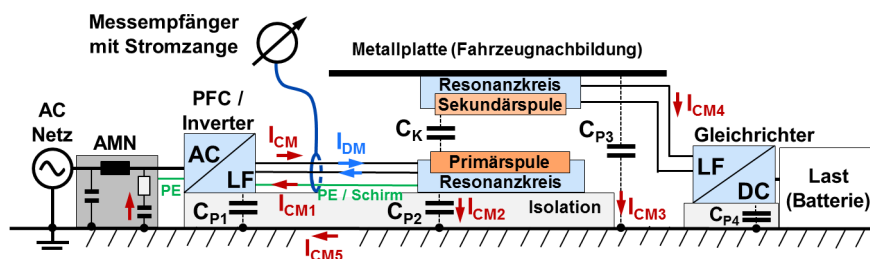


Bild 3: Parasitäre Kapazitäten mit den wesentlichen Strompfaden in einem WPT-System über einem leitfähigen Boden.

Ein Teil des vom Inverter angeregten Gleichaktstromes I_{CM} fließt über den Schirm bzw. den PE-Leiter zurück. Bei einer Messung mit der Stromzange über beide Leiter und dem Schirm bzw. dem PE-Leiter würde sich der in Bild 3 eingezeichnete Strom I_{CM5} ergeben, welcher über den Boden zur Quelle zurückfließt.

Die Werte der parasitären Kapazitäten lassen sich mit Hilfe der Berechnung eines Plattenkondensators abschätzen. Für die Berechnung wurden typische Abmessungen der Komponenten angenommen. So ergibt sich für die Bodenspule mit den Abmessungen $80 \times 80 \text{ cm}^2$ und einer Dicke der Isolation zum Boden von 15 cm eine Kapazität C_{P2} von

ca. 38 pF. Die übrigen Kapazitätswerte wurden in ähnlicher Weise abgeschätzt und ergaben sich zu $C_{P1} \approx 18$ pF, $C_{P3} \approx 58$ pF (bei einer Höhe der Metallplatte von 34 cm über dem Boden) und $C_{P4} \approx 3,5$ pF. Die Koppelkapazität C_K zwischen den Spulen wurde mit 14 pF angenommen. Weitere Details zur Berechnung der Kapazitätswerte finden sich in [9].

2.1 Ergebnisse der SPICE-Simulation eines WPT-Systems

Ein WPT-System lässt sich grundsätzlich mit dem Modell eines lose gekoppelten Transformators beschreiben [7], [10]. Zusammen mit den oben ermittelten Werten der parasitären Kapazitäten wurde ein Simulationsmodell in SPICE erstellt. Das auf dem Ersatzschaltbild des Systems basierende Modell ist im Bild 4 dargestellt.

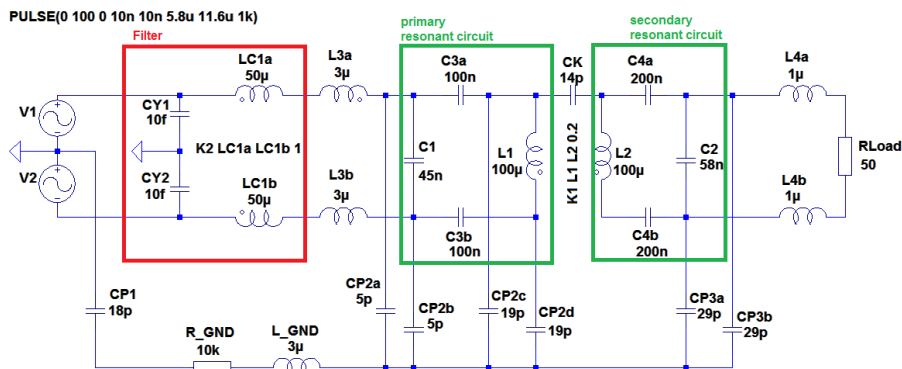


Bild 4: SPICE-Simulationmodell eines WPT-Systems mit lose gekoppeltem Transformator und parasitären Kapazitäten zur Berechnung der Gleichtaktströme.

Das Modell enthält die beiden Resonanzkreise (grüne Markierung), sowie eine Filterstufe (rote Markierung). In der Simulation wurde die Filterstufe zunächst entfernt. Das differentielle Ausgangssignal des Inverters wurde mittels zweier Spannungsquellen, wie in Bild 5 dargestellt, als trapezförmiges Rechtecksignal modelliert.

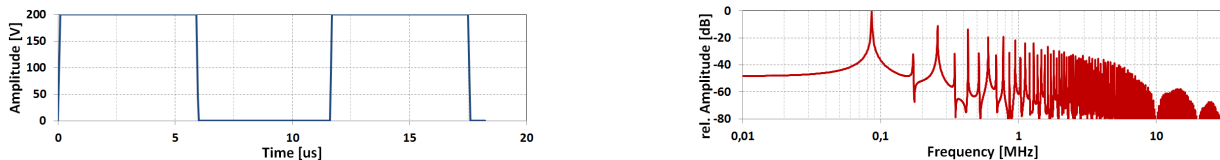


Bild 5: Für die Simulation verwendetes Signal am Inverterausgang im Zeitbereich und per FFT berechnetes Frequenzspektrum

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse wurden zwei Ströme berücksichtigt. Der eine ist der Strom I_{L1} durch die Primärspule. Er regt das Magnetfeld in der Spule an und ist damit auch für die Aussendungen der Streufelder verantwortlich.

Der zweite betrachtete Strom I_{R_GND} ist der Rückstrom über den leitfähigen Boden. Mittels des Widerstandes R_{GND} und der Induktivität L_{GND} ließ sich der Einfluss unterschiedlicher Leitfähigkeiten des Bodens berechnen. Deren Einfluss lässt bei dem Vergleich von Bild 6 und Bild 7 erkennen. In beiden Diagrammen sind die FFT-Spektren der berechneten Ströme dargestellt. Für eine bessere Vergleichbarkeit wurden die Spektren jeweils auf den Maximalwert bei der WPT-Grundfrequenz von 86 kHz normiert.

Erwartungsgemäß hat die Leitfähigkeit des Bodens kaum Einfluss auf den Strom I_{L1} durch die Spule. Der Strom I_{R_GND} verringert sich bei steigendem Widerstand R_{GND} und auch der

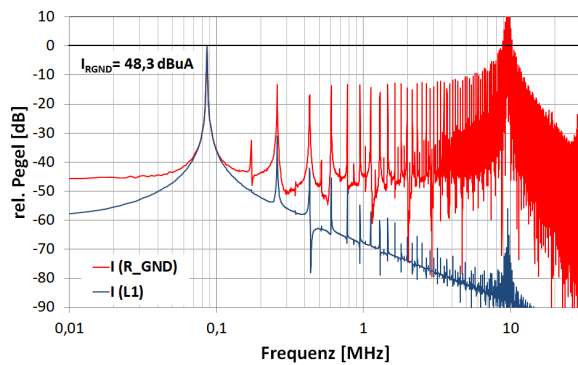


Bild 6: Berechnete und normierte Ströme I_{L1} und I_{R_GND} bei Metallboden ($R_{GND} = 0$)

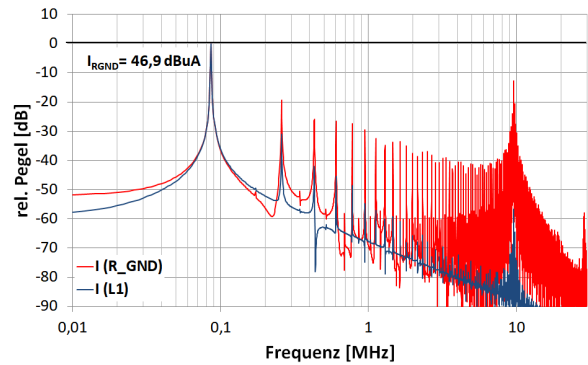


Bild 7: Berechnete und normierte Ströme I_{L1} und I_{R_GND} bei einem Boden mit geringer Leitfähigkeit ($R_{GND} = 100 \text{ k}\Omega$, $L_{GND} = 3 \mu\text{H}$)

Abfall über der Frequenz durch die steigende Impedanz der Spule L_{GND} ist zu erkennen. Allerdings ist der Unterschied zwischen den absoluten Werten für I_{R_GND} sehr klein. Bei der Grundfrequenz wurde mit $R_{GND} = 0$ ein Strom von ca. $48,3 \text{ dB}\mu\text{A}$ berechnet. Mit der geringen Leitfähigkeit des Bodens waren es ca. $46,9 \text{ dB}\mu\text{A}$. Der geringe Unterschied von nur 1,4 dB lässt sich aus der Reihenschaltung von R_{GND} und L_{GND} zu den kleinen parasitären Kapazitäten C_{Pm} erklären, d.h. es wird die Impedanz des Bodens zu der ohnehin hohen Impedanz der Kapazitäten in Serie geschaltet.

Betrachtet man den Spektralverlauf über der Frequenz, so zeigt die Simulation mit Metallboden noch hohe Pegel bei den Harmonischen, welche gegenüber der Grundwelle nur weniger als 20 dB unterdrückt sind und bis 10 MHz nicht über der Frequenz abfallen. In der Struktur ergibt sich zudem eine Resonanz bei ca. 10 MHz, bei der der Strom noch deutlich über den Pegel bei der Grundfrequenz ansteigt. Im nächsten Schritt wurden die Gleichtaktströme an einem realen WPT-System untersucht.

2.2 Messung der Gleichtaktströme an einem WPT-System

Im Rahmen des Projektes "UnIndCha" wurde ein WPT-System mit einer Leistung von 3,7 kW aufgebaut und untersucht. Das System enthielt keine weitere Filterung am Inverterausgang, so dass die Ergebnisse keine generelle Aussage über die Höhe der Störaussendungen von WPT-Systemen erlauben. Ebenso wenig ist eine Aussage über die notwendigen bzw. realisierbaren Filtermaßnahmen möglich. Allerdings ließen sich an dem nur grundentstörten System die Eigenschaften der Gleichtaktströme auf der Zuleitung zur Primärspule sehr gut untersuchen.

Die Bilder 8 und 9 zeigen die Anordnung der WPT-Systemkomponenten in der EMV-Halle. Die Komponenten wurden innerhalb eines Kreises mit 3 m Durchmesser (Umkreis des Prüfvolumens) platziert. Auf dem Bild 8 ist auch die Stahlplatte mit den Abmessungen $150 \times 150 \text{ cm}^2$ zu erkennen, welche als Fahrzeugnachbildung in den Normentwürfen der CISPR 11 [4] und der SAE [8] beschrieben ist.

Die Messung des Gleichtaktstromes bei WPT-Systemen auf der Zuleitung zwischen Inverter und Bodenspule ist in den Entwürfen der CISPR 11 [4] und der ETSI 303417 [1] enthalten. Allerdings werden in der Arbeitsgruppe der CISPR noch die Grenzwerte für den Störstrom bei WPT-Systemen diskutiert.

Die gemessenen Störströme sind in den Bildern 10 und 11 dargestellt. Während der Messungen wurde Energie über einen Luftspalt von ca. 100 mm übertragen.

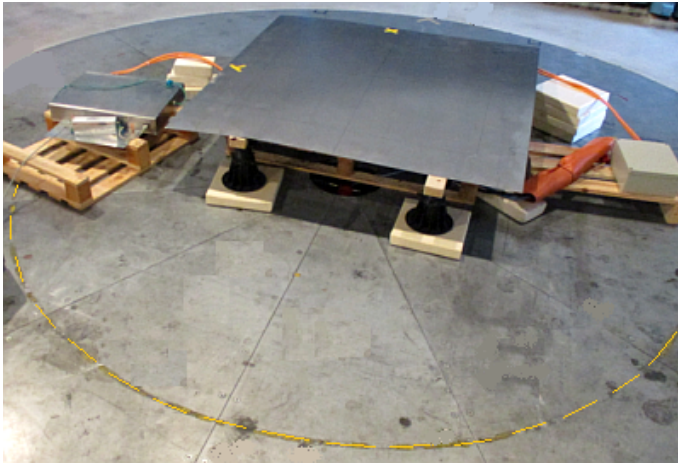


Bild 8: Anordnung der Systemkomponenten des WPT-Systems in der EMV-Halle innerhalb eines Kreises mit 3 m Durchmesser.

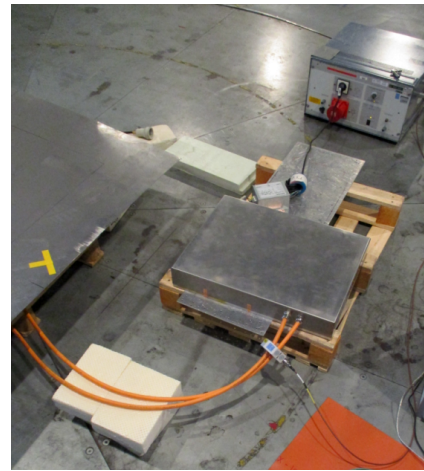


Bild 9: Messung des Störstromes mit der Stromzange auf den geschirmten Leitungen zwischen Inverter und Bodenspule.

Das Diagramm in Bild 10 zeigt den Vergleich der Messung mit der Stromzange über der geschirmten Leitung und der Messung, bei welcher der Kabelschirm außerhalb der Zange geführt wurde. Die Pegel mit Kabelschirm sind deutlich niedriger, da der auf dem Schirm zurückfließende Strom I_{CM1} in Bild 3 einen Teil des Gesamtstromes I_{CM} kompensiert. Betrachtet man das gemessene Störpektrum (rote Kurve), so lässt sich ein ähnlicher Verlauf wie bei der Simulation in Bild 6 erkennen. Die Störpegel bei den Harmonischen der Grundfrequenz fallen nicht über der Frequenz ab, sondern steigen sogar noch leicht an. Des Weiteren zeigen sich auch in der Messung Resonanzpunkte mit deutlichen Stromüberhöhungen bei ca. 6 MHz und ca. 10 MHz. Erst darüber kommt es wie bei der Simulation zu einem Abfall der Störpegel.

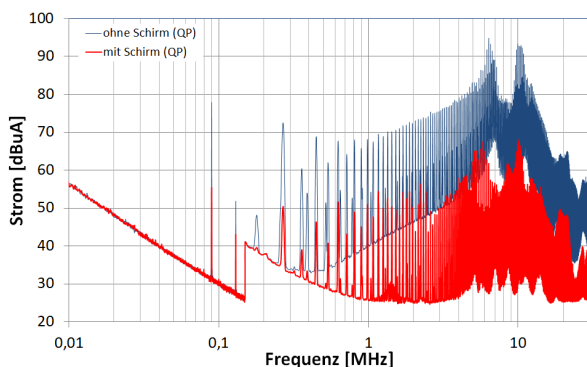


Bild 10: Vergleich der Messungen mit und ohne Kabelschirm in der Stromzange

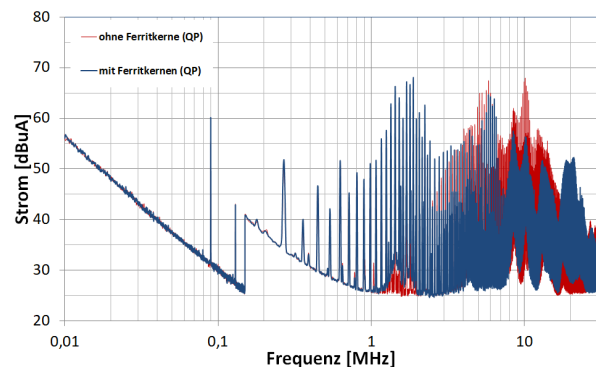


Bild 11: Vergleich der Messung mit und ohne Ferritkernen über den Leitungen

Als potentielle Filtermaßnahme wurden sechs Ferritkerne über die Leitung geschoben, um deren Gleichtaktinduktivität zu erhöhen. Durch die höhere Impedanz sollten sich auch die Strompegel absenken. Der Vergleich der Messungen mit und ohne Ferritkerne ist in Bild 11 dargestellt. Die Ferritkerne zeigen kaum Auswirkungen auf den gemessenen Gleichtaktstrom. Nur in dem Frequenzintervall zwischen 8 MHz und 16 MHz sind deutlichere Unterschiede zu verzeichnen. Die Messungen bestätigen die bereits in der Simulation untersuchten Einflüsse einer Impedanzhöhung im Strompfad in Bild 7. Die zusätz-

liche Serieninduktivität durch die Ferritkerne wirkt in Serie zu der Impedanz der kleinen Koppelkondensatoren C_{Pm} . Somit war nur ein geringer Effekt zu erwarten. Andererseits bedeutet dies, dass für eine effektive Reduzierung der Gleichtaktströme aufwändigere Maßnahmen, wie z.B. ein Übertrager am Inverterausgang, notwendig sind. Sollten die Messungen des Gleichtaktstromes mit Grenzwerten in die Normen aufgenommen werden, so sind entsprechende Maßnahmen unbedingt während der Schaltungsentwicklung zu berücksichtigen.

3 Vergleich mit den feldgebundenen Störaussendungen des magnetischen und elektrischen Feldes

Ausgehend von der Messung der magnetischen Feldstärke, welche ja bereits fester Bestandteil der CISPR 11 ist, handelt es sich bei der Messung des Störstromes um eine ergänzende Messung. Diese soll zusätzlich erfolgen, um weitere potentielle Störeeigenschaften von WPT-Systemen zu bewerten. In den aktuellen Diskussionen der WPT-Arbeitsgruppe der CISPR B wird noch ein drittes Messverfahren genannt, nämlich die Messung des elektrischen Feldes mit der Monopol-Antenne in 10 m Abstand. Da die physikalische Natur der Störaussendungen eines WPT-Systems im niedrigen Frequenzbereich durch die magnetischen Streufelder bestimmt wird, erhebt sich die Frage, welche weiteren Effekte durch die zusätzlichen Messungen bewertet werden sollen.

Um dieser Frage nachzugehen, wurden an dem in Bild 8 gezeigten System sowohl Messungen des Magnetfeldes mit der Rahmenantenne, als auch des elektrischen Feldes mit der Monopol-Antenne (siehe Bild 12) in der EMV-Halle in 10 m Abstand durchgeführt.



Bild 12: Messung der feldgebundenen Störaussendung mit der Rahmenantenne und dem Monopol

Ein Problem bei der Bewertung der gemessenen Störspektren ergibt sich aus den Übertragungseigenschaften der EMV-Halle. Die Anforderungen an die Messplatzdämpfung für die Magnetfeldmessung werden seit Jahren in der Arbeitsgruppe CISPR A diskutiert. Besonders im höheren Frequenzbereich beeinflussen die Halleneigenschaften die Messergebnisse signifikant. Für die Messung mit dem elektrischen Monopol fehlt eine entsprechende Betrachtung noch komplett.

Die gemessenen Störspektren sind in dem Diagramm in Bild 13 dargestellt, wobei die Messwerte für eine bessere Vergleichbarkeit wie zuvor auf den Maximalwert bei der WPT-Grundfrequenz ($f = 90 \text{ kHz}$) normiert wurden.

Die Kurven zeigen gänzlich unterschiedliche Verläufe, weisen jedoch auch einige Gemeinsamkeiten auf. Während die Pegel bei den Harmonischen der Grundfrequenz beim elektrische Feld bis ca. 5 MHz nahezu konstant bleiben, fallen sie beim Magnetfeld ab und steigen beim Gleichtaktstrom nach einem leichten Abfall wieder an. Bei höheren Frequenzen oberhalb von 5 MHz dominieren Resonanzeffekte, welche bei allen drei Messungen einen deutlichen Anstieg der Störpegel verursachen. Allerdings weisen auch hier alle drei Kurven einen ähnlichen Verlauf auf. Es war leider nicht möglich festzustellen, ob der Verlauf der gemessenen Störspektren durch den Prüfling selbst, der Anordnung im Messaufbau oder den Übertragungseigenschaften der Halle besonders beeinflusst wurde. Wie bereits zuvor mittels Simulation dargestellt, folgt der Verlauf des Gleichtaktstromes weitgehend der theoretischen Vorhersage.

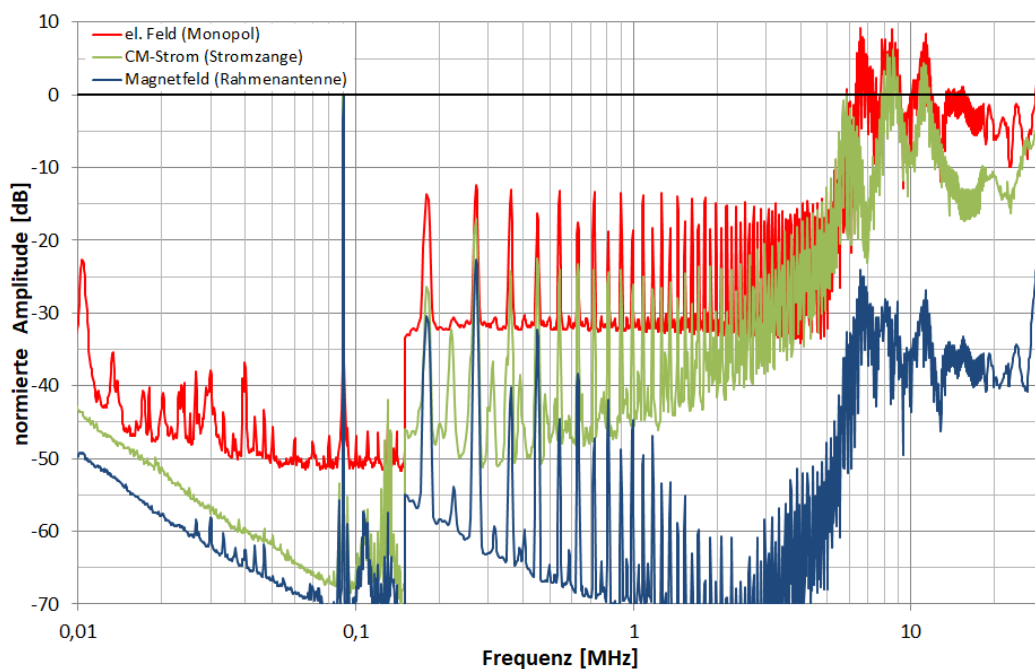


Bild 13: Gemessene Störspektren des Magnetfeldes (Rahmenantenne), des elektrischen Feldes (Monopol) und des Störstromes. Die Pegel wurden auf den Maximalwert bei der WPT-Grundfrequenz normiert.

Bei der Festlegung von Grenzwerten für das Magnetfeld sind vor allem die hohen Pegel oberhalb von 5 MHz sehr entscheidend, da hier in den Diskussionen eher eine deutliche Absenkung der zulässigen Störaussendung gefordert wird. Weiterhin ist anzumerken, dass der Kurvenverlauf der elektrischen Feldstärke deutlich von dem der magnetischen Feldstärke abweicht. Auch wenn man die Nahfeld-Fernfeld-Konversion über den Frequenzbereich berücksichtigt, so ergibt sich dennoch kein einfacher Zusammenhang für die anzunehmende Feldimpedanz. Eine simple Umrechnung der eventuell vorhandener Magnetfeldgrenzwerte über die angenommene Freiraumimpedanz von 377Ω ist aus den gemessenen Kurven nicht zu entnehmen.

4 Zusammenfassung

WPT-Systeme stellen eine interessante, neue Technologie dar, welche auch bezüglich der Bewertung der Störaussendungen eine neue Betrachtung erfordert. Neben den Grenzwerten für das Magnetfeld werden daher auch zusätzlich anzuwendende Messverfahren diskutiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Ursachen für das Auftreten von Gleichtakt-Störströmen theoretisch untersucht und an einem realen System gemessen. Die Messungen zeigten ähnliche Effekte wie die Simulation.

Der Vergleich mit den Magnetfeldmessungen und der Messung des elektrischen Feldes mit dem Monopol zeigte jedoch unterschiedliche Kurvenverläufe. Im oberen Frequenzbereich dominieren Resonanzeffekte und verursachen deutlich erhöhte Störpegel bei allen drei Messungen. Gerade bei diesen Frequenzen werden jedoch Absenkungen der Grenzwerte in den Normungsgremien diskutiert. Weitere Untersuchungen und die Entwicklung geeigneter Maßnahmen zur Verringerung der Störpegel in diesem Frequenzbereich sind daher notwendig.

Die unterschiedlichen Kurvenverläufe der gemessenen elektrischen und magnetischen Feldstärke deuten auf einen stark nichtlinearen Zusammenhang hin. Es reicht daher nicht, einen konstanten Umrechnungsfaktor für die Freiraumimpedanz zur Berechnung der E-Feld-Grenzwerte aus den Magnetfeldgrenzwerten heranzuziehen.

Abschließend verbleibt die Frage, ob aus den Messungen des Gleichtaktstörstromes oder des elektrischen Feldes neue Erkenntnisse zur Bewertung des Störpotentials von WPT-Systemen gewonnen werden können.

Danksagung

Die Messergebnisse in dieser Arbeit entstanden im Rahmen des Forschungsprojektes "Universal Inductive Charging (UnIndCha)", welches durch das Forschungsprogramm "BayEMA" der bayerischen Staatsregierung unter der Leitung der bayerischen Forschungs- und Innovationsagentur ITZB gefördert wurde (Förderkennzeichen EMA-1511-0003).

Literatur

- [1] ETSI: *EN 303417, 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, 6 765 - 6 795 kHz ranges; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU*. Final Draft ETSI-Standard, June 2017
- [2] IEC INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *IEC 61980-1: Electric vehicle wireless power transfer systems (WPT) - Part 1: General requirements*. IEC Standard, 2015
- [3] IEC INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *IEC 61980-2: Electric vehicle wireless power transfer systems (WPT) - Part 2: Specific requirements for communication between electric road vehicle (EV) and infrastructure with respect to wireless power transfer (WPT) systems*. IEC-document version 69/382A/CD, 2016
- [4] IEC INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *CISPR 11 Amd. 2 f1 Ed. 6.0: Amendment 2 (f1) to CISPR 11: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement*

- *Requirements for air-gap wireless power transfer (WPT)*. IEC-document version 69/710/CD, August 2018

- [5] IEC INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: *IEC 61980-3: Electric vehicle wireless power transfer systems (WPT) - Part 3: Specific requirements for the magnetic field wireless power transfer systems*. IEC-document version 69/554/DTS, Januar 2018
- [6] ISO INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION: *ISO/PAS 19363: Electrically Propelled road vehicles - Magnetic field wireless power transfer - Safety and interoperability requirements*. ISO Standard, Januar 2017
- [7] KOMMA, T. ; POEBL, M.: Determination and Comparison of Equivalent Circuit Parameters in Large-Air-Gap Transformers by Different Methods. In: *PCIM Europe 2015* (19-21 May 2015)
- [8] SAE INTERNATIONAL: *SAE J2954: Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-In/Electric Vehicles and Automated Charging and Alignment Methodology*. SAE Recommended Practice version 2, April 2019
- [9] ZIEGLER, Ch. ; WEBER, S. ; HEILAND, G.: Propagation Paths and Filter Methods for Common Mode (CM) Currents in WPT systems for Electrical Vehicles (EV). In: *PCIM 2019: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality* (2019)
- [10] ZIEGLER, Ch. ; WEBER, S. ; HEILAND, G. ; KRAUS, D.: Influences of WPT-Coil Losses and Coupling Coefficient on the Resonance Circuits of Wireless Power Transfer Systems. In: *PCIM 2017: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality* (2017)