

# Automatisierte Messung von räumlichen Streufeldern beim induktiven Laden

Dipl.-Ing. Jörg Kirchhof, Oliver Strecker, B.Sc., PD Dr.-Ing. habil. René Marklein, Dipl.-Ing. Marco Jung, Georgios Lempidis, M.Sc., Miao Wang, B.Sc., Mohammad Zaisan Rahen, B.Sc., Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES, Bereich Anlagentechnik und Verteilungsnetze, Königstor 59, 34119 Kassel, Deutschland

## 1 Einführung

Eine Million Elektrofahrzeuge sollen 2020 auf deutschen Straßen unterwegs sein. So lautet das Ziel der Bundesregierung. Aufgrund der derzeit noch sehr hohen Preise für Elektrofahrzeuge ist es wichtig, langfristig die Attraktivität eines solchen „Stromers“ zu erhöhen. Zukünftig gilt dabei das induktive Laden (Wireless Power Transfer, WPT) als wichtiges Werkzeug hierzu. Gegenüber konduktivem Laden wird einerseits der Umgang mit einem unhandlichen Ladekabel vermieden, andererseits ist in besonderem Maße die ungewollte Emission von magnetischen Feldern zu beachten, wodurch Gesichtspunkte der EMV und des Personenschutzes berücksichtigt werden müssen. Hier setzt der dreidimensionale Feldscanner des Fraunhofer IWES an, mit dem das emittierte magnetische Streufeld frequenz- und ortsselektiv, aber auch als Funktion eines Spulenversatzes vermessen wird.

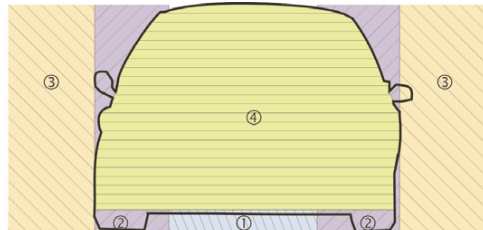


Abbildung 1: WPT Zonen am Elektrofahrzeug.  
1: WPT Bereich, 2: Übergangsbereich, 3: öffentlicher Bereich, 4: Fahrgastraum

Neben einer Beurteilung der Streufelder nach ICNIRP oder nach anderen Richtlinien können auch die Eigenschaften des WPT-Systems gemäß der Anwendungsregel VDE-AR-E2122-4-2 [1] und IEC 61980-1 [2] geprüft werden. Zur Erprobung des Feldscanners wurde ein im Fraunhofer IWES entwickeltes induktives Ladesystem herangezogen, welches sich zurzeit im Stadium eines Labormusters befindet. Die simultan möglichen Messungen zum Wirkungsgrad wurden bei dieser Untersuchung noch nicht durchgeführt.

## 2 Labormuster eines induktiven Ladesystems

Ein System zur kontaktlosen induktiven Energieversorgung eines Elektrofahrzeugs besteht aus einem örtlich separiertem Spulenpaar (Straße und Fahrzeug) und einem leistungselektronischen Resonanzwandler, der die Spulen mit einer frequenzvariab-

len Rechteckspannung anregt. Der Resonanzkreis wird aus den Streuinduktivitäten (Streufern) und den sogenannten Kompensationskondensatoren gebildet. Über ein elektromagnetisches Feld wird das Elektrofahrzeug kontaktlos induktiv mit Energie versorgt, oder der Fahrzeugbatterie die Energie wieder entnommen. Die magnetische Kopplung des Spulensystems beeinflusst stark die Effizienz des Energieübertragungssystems. Die fahrzeugseitigen sowie infrastrukturellen Komponenten sind in einem Versuchsaufbau, wie in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zu sehen, nachgebildet.

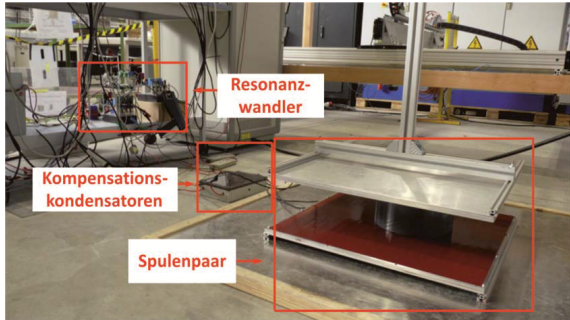


Abbildung 2: Versuchsaufbau induktives bidirektionales Energieübertragungssystem

### 3 Design und Simulation von Spulensystemen für das induktive Laden (RMA)

Es wurden unterschiedliche Spulendesigns, wie kreisrunden, rechteckigen, mehr-eckigen oder sogenannten Doppel-D-Spulen modelliert, simuliert, aufgebaut und messtechnisch untersucht. Abbildung 3 zeigt beispielsweise die Geometrie einer Doppel-D-Spule.

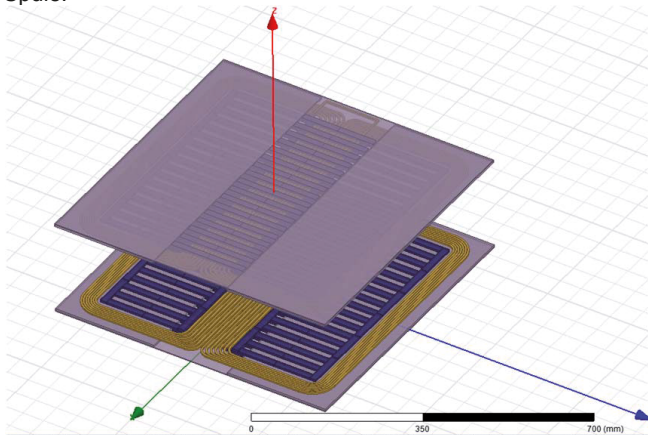


Abbildung 3: Geometrie der Doppel-D-Spule aus HF-Litze mit der Anordnung der ferritischen Elemente und der Aluminiumplatten unterhalb der Primärspule und oberhalb der Sekundärspule für die numerischen Feldsimulation mit ANSYS Maxwell 3D

Die simulierte Feldverteilung der magnetischen Flussdichte ist in Abbildung 4 links dargestellt. Hierbei wurde der gemessene primär- und sekundärseitige elektrische Strom in die Primär- und Sekundärspule eingeprägt. Man erkennt, dass das magnetische Feld im Bereich der HF-Litzen maximal ist und sich auf den Raumbereich zwischen den Spulen konzentriert sowie zum Außenraum hin schnell in der Intensität abfällt. Abbildung 4 rechts zeigt die Feldverteilung entlang von vier Flächen deren Abstände angelehnt an einen Fahrzeugumriss gewählt wurden. Hierbei ist festzustellen, dass der Grenzwert von  $6,25 \mu\text{T}$  nach der ICNIRP nicht überschritten wird.

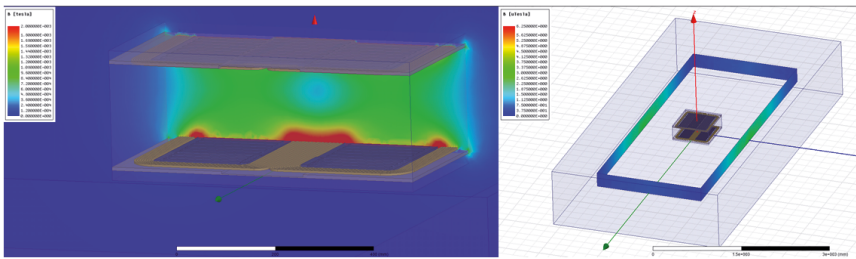


Abbildung 4: Links, Feldverteilung des Betrages der magnetischen Flussdichte bei Nennfrequenz entlang einer Querschnittsfläche senkrecht zur der Doppel-D-Spule. Rechts, Feldverteilung des Betrages der magnetischen Flussdichte bei Nennfrequenz entlang von vier Flächen deren Abstände angelehnt an ein Fahrzeugumriss gewählt wurden.

#### 4 Messplatzautomatisierung

Für Laboruntersuchungen und Industriedienstleistungen wurde ein automatisierter Prüfstand aufgebaut, um die in Abbildung 1 dargestellten Bereiche 3 und 4 mittels Feldstärkemessung zu analysieren und bei Bedarf gleichzeitig Primär- und Sekundärleitung über einen Power Analyzer zu erfassen sowie den Wirkungsgrad simultan bestimmen zu können. All dies kann in Abhängigkeit von Prüfling, Spulenabstand und Spulenversatz erfolgen.

Zur automatisierten Feldmessung und zur Positionierung der Sekundärspule dient jeweils ein dreiachsiges Positioniersystem. Das verwendete Feldstärkemessgerät ermöglicht eine frequenzselektive Messung der elektrischen- und magnetischen Feldstärke in drei orthogonalen Richtungen. Mit einem frei konfigurierbaren Fahrplan können mit dem System gezielte Punkte im Raum angefahren und vermessen werden (Mess-Raster). Als weitere Messoption kann ein Versatz (Offset)



Abbildung 5: Feldscanner des automatisierten Messplatzes

zwischen den Spulen des Ladesystems berücksichtigt werden. Der Versatz beeinflusst maßgeblich die magnetische Kopplung und die Größe des Streufeldes, sowie daraus hervorgehend, den Wirkungsgrad der Energieübertragung. Mit Hilfe eines zweiten Positioniersystems (Manipulator) kann dieser Versatz computergesteuert geändert und die dabei auftretenden Parameter „Leistung“ und „Wirkungsgrad“, sowie die Änderung des Streufeldes gemessen werden.

#### 4.1 Testprogramm in LabVIEW

Die Steuerung des kompletten Messsystems wird mit Hilfe einer in LabVIEW entwickelten Software durchgeführt. Dieses Programm dient zur Steuerung und Überwachung der einzelnen Schritte. Es integriert die Funktionen der zwei Manipulatoren und der dazugehörigen Messgeräte für Feldstärke und Leistung. Die Manipulatoren können automatisch durch einen bereits erstellten Fahrplan automatisiert verfahren oder auch manuell per Hand gesteuert werden. Zu jedem beliebigen Zeitpunkt können die verschiedenen Messwerte aufgenommen werden. Vordefinierte Konfigurationsdateien sorgen für die richtige Einstellung der Messgeräte.

Das Programm ist so aufgebaut, dass über eine Ereignisstruktur gewisse Aktionen aufgerufen und diese über eine Zustandsmaschine sequentiell abgearbeitet werden. Durch diese fortgeschrittene Programmiermethode ist sichergestellt, dass Messungen und Positionierungen mit einander synchronisiert sind.

#### 4.2 Messaufbau

Die Komponenten, die zum Messen des magnetischen Feldes notwendig sind, wurden anhand IEC 61980-1 geometrisch ausgerichtet. Die Ausrichtung der Achsen ist in Abbildung 6 zu sehen.

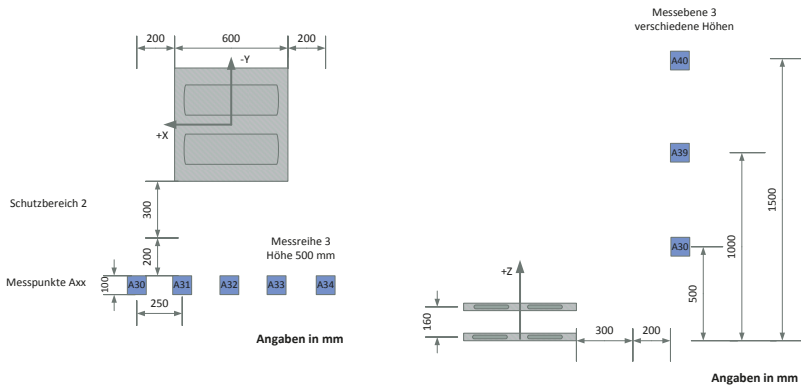


Abbildung 6: Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) des Messaufbaus. Es ist nur eine vertikale Messebene dargestellt. Jede horizontale Reihe auf einer Ebene

wird als Messreihe bezeichnet und nummeriert. Jeder Messpunkt bekommt die Bezeichnung A [Ebenennummer] [Reihennummer].

Die in der Norm beschriebenen Abstände beim Messen von magnetischer Strahlung wurden eingehalten. Insgesamt wurden in der im Folgenden dargestellten Messung 45 Punkte (blaue Markierung in Abbildung 6) in verschiedenen Höhen und Abständen zum aktiven Bereich vermessen und untersucht.

### 4.3 Messung und Auswertung

Am Labormuster der induktiven Energieübertragungseinrichtung wurde eine Eingangsleistung von  $P_1 = 3,6 \text{ kW}$  bei einer Übertragungsfrequenz von  $f = 142 \text{ kHz}$  eingestellt. Das bei der automatisierten Messung der magnetischen Feldstärke verwendete Messraster von  $3 \times 5$  Punkten auf drei vertikal ausgerichteten Messebenen lag innerhalb eines  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1,5 \text{ m}$  großen Volumens. Beispielhaft ist in Abbildung 7 für Messebene 3 / Messreihe 3 (Höhe = 50 cm) das Spektrum der magnetischen Feldstärke (Betrag der drei orthogonalen Feldkomponenten) dargestellt. Die erhaltenen Messwerte in Messreihe 3 sind von allen 45 Messwerten am größten. Die höchste Feldstärke wurde am Punkt A34 mit  $6,72 \text{ A/m}$  bei  $142 \text{ kHz}$  gemessen, was einer magnetischen Flussdichte  $B$  von  $8,45 \text{ }\mu\text{T}$  entspricht. Bezogen auf die ICNIRP Guidelines 1998 Seite 511 Table 7 überschreitet dieser Wert den Normgrenzwert. In der neuen Richtlinie ICNIRP Guidelines von 2010 Seite 827 Table 4 liegt der Grenzwert bei  $27 \text{ }\mu\text{T}$ . Der gemessene Wert hält diese neue Richtlinie ein. Der zweite Peak des Spektrums bei  $285 \text{ kHz}$  liegt für Punkt A31 bei  $0,0094 \text{ }\mu\text{T}$ . Bei  $425 \text{ kHz}$  liegt der Maximalwert wieder bei Messpunkt A34 mit  $0,34 \text{ }\mu\text{T}$ . Beide Messwerte liegen unter den Grenzwerten der ICNIRP von 1998 und 2010.

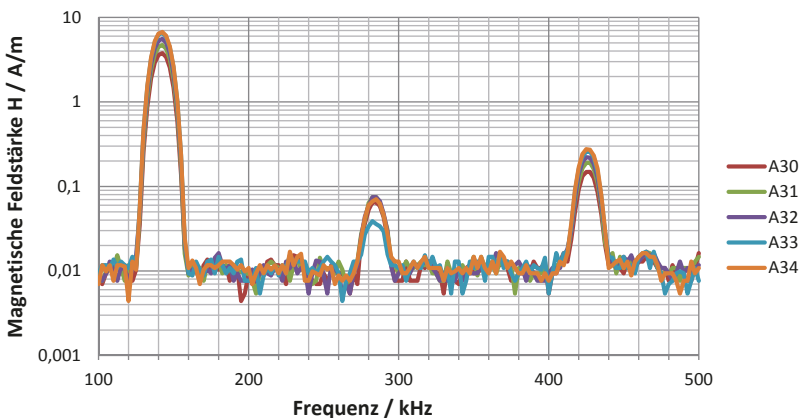


Abbildung 7: Betrag der magnetischen Feldstärke in Messebene 3

## Magnetische Feldstärke H / A/m

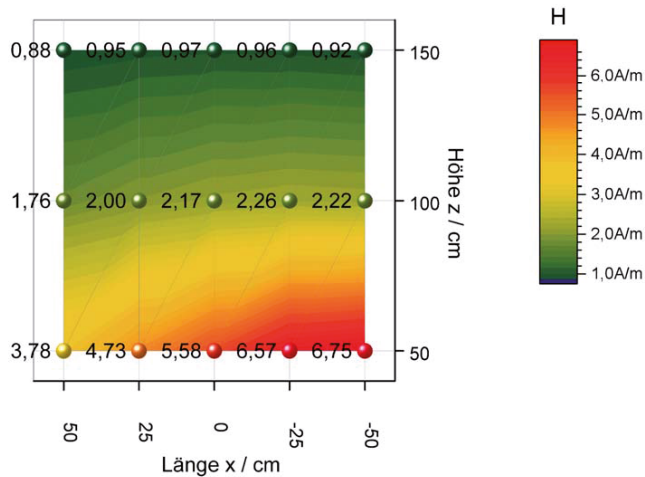


Abbildung 8: Oberflächendiagramm Messebene 3

Neben den Beträgen der Messreihe 3 wurde außerdem die Messebene 3 untersucht (siehe Abbildung 6). Grundlage hierfür ist die Messung der magnetischen Feldstärke im konstanten Abstand zum Fahrzeug in drei verschiedenen Höhen. Die drei Höhen sind Richtwerte aus dem IEC 61980-1/CDV:2013. Abbildung 8 zeigt ein Oberflächendiagramm, bei dem über Höhe und Länge die Messwerte der Feldstärke aufgetragen sind. Man erkennt deutlich, dass mit steigender Höhe die magnetische Feldstärke abnimmt. Mit zunehmendem Abstand vom Fahrzeug (Messebene 1 und 2) sinkt die Feldstärke deutlich ab. Der Farbverlauf wurde interpoliert, die Messorte sind durch Punkte und Messwerte gekennzeichnet.

## 5 Stand der Normung

### 5.1 26. BImSchV

Der Schutz der Bevölkerung vor einer Belastung mit elektromagnetischer Strahlung wird in Deutschland durch die 26. Bundesimmissionsschutzverordnung vom 16.12.1996 geregelt. In dieser Verordnung findet durch Definition von Grenzwerten im Niederfrequenzbereich eine Beschränkung von elektrischer und magnetischer Feldstärke bei 16 2/3 Hz, 50 Hz und im Frequenzbereich 10 MHz bis 300 GHz statt. Es wird der Effektivwert über 6-Minuten-Intervalle bestimmt. Für gepulste Felder wird das 32-fache des Grenzwerts auf die Spitzenwerte der Feldstärke angewendet. Der

für das induktive Laden relevante Frequenzbereich ist durch die 26. BImSchV nicht beschränkt.

## 5.2 ICNIRP

Grundlage für die feldgebunden Grenzwerte bei ICNIRP sind Basisgrenzwerte, die je nach Frequenzbereich unterschiedliche Mechanismen im menschlichen Körper berücksichtigen. Bei ICNIRP 1998 [3] erfolgt die Ableitung der externen Grenzwerte durch vom Feld im Körper hervorgerufene elektrische Stromdichten die zu direkter Nervenstimulation führen kann. Bei höheren Frequenzen wird die spezifische Absorptionsrate herangezogen, die zu einer definierten Erwärmung von Körpergewebe führt. In ICNIRP 2010 [4] werden die durch niederfrequente äußere Felder im Körper erzeugten elektrischen Feldstärken festgelegt, die beim Menschen zu einer Nervenstimulation führen. Dieser Ansatz ist bis 100 kHz ausreichend, im Bereich bis 10 MHz müssen zusätzliche hochfrequente Effekte berücksichtigt werden. Oberhalb von 10 MHz dominiert der thermische Effekt.

Die Grenzwerte für äußere elektromagnetische Felder werden in beiden Ausgaben von diesen Basisgrenzwerten abgeleitet.

## 5.3 IEC 61980-1

Die IEC 61980-1:2015 [2] enthält u. A. Hinweise zu Ausrichtung und Offset der Spulen sowie eine Zoneneinteilung gemäß Abbildung 1. Es werden Anforderungen an die EMV-Störfestigkeit und Störaussendung gestellt. Im Annex C sind EMF-Anforderungen mit Verweisen auf IEC 62311 und ICNIRP festgelegt. Es soll mit einer Feldsonde ein Scan über eine vertikale Fläche in 20 cm zur Bordwand des Fahrzeugs an allen 4 Seiten erfolgen. Die Messung ist auch bei dem vom Hersteller zugelassenen größten Spulenoffset zwischen Primär- und Sekundärspule durchzuführen. An den Punkten der größten Feldstärke soll eine Abschlussmessung mit mindestens 10s Dauer durchgeführt werden. Im Innenraum, dem Bereich 4 ist die komplette Sitzfläche und der Kopfstützenbereich mit der Feldsonde zu vermessen. Es sind die national geltenden Grenzwerte für Exposition der Bevölkerung anzuwenden. Liegen diese Grenzwerte nicht vor, so sind die Grenzwerte von ICNIRP 1998 oder 2010 anzuwenden.

## 5.4 ISO 19363 Entwurf

Die ISO 19363 [5] liegt derzeit im Entwurfsstadium vor. Die Anforderungen bezüglich der EMF-Messung sind der aktuellen IEC 61980-1 sehr ähnlich.

## 5.5 VDE Anwendungsregel 2122-4-2

Die VDE AR E 2122-4-2 [1] wurde 2010 herausgegeben, um technische Anforderungen an induktive Ladestationen zu definieren, solange keine spezifische Norm hierfür zur Verfügung steht. Die Anwendungsregel definiert Koordinatensystem und Schutz-

bereiche sowie die Berücksichtigung eines Spulen Offsets bei Wirkungsgradmessungen und EMVU Messungen.

## 6 Zusammenfassung und Perspektiven

Es wurde gezeigt, dass eine automatisierte Messung der magnetischen Feldstärke gemäß verschiedener nationaler und internationaler Standards für induktive Ladesysteme möglich ist. Neben der messtechnischen Ermittlung des Streufelds für einzelne Frequenzen oder komplette Frequenzspektren ist auch eine Analyse bezüglich der räumlichen Feldkomponenten möglich. Die simultane Untersuchung von primärer und sekundärer Leistung sowie des daraus abgeleiteten Wirkungsgrads und des Streufelds als Funktion des Spulenversatzes bietet dem Systementwickler oder dem Anwender schnellen Einblick in die Performance seines Systems. Begleitende numerische Simulationen der magnetischen Felder im Zeit- und Frequenzbereich erweitern die Analysefunktionen. Durch Vergleich von Messung und Simulation ist eine Validierung der Ergebnisse möglich. In weiteren Tests werden auch andere WPT-Systeme untersucht. Neben dem Einfluss des Bodens auf die Messung sollen auch Experimente zur Beeinflussung des Streufelds durch benachbarte Fahrzeugteile aus unterschiedlichen Werkstoffen erfolgen. Die Diskussion und Veröffentlichung der Ergebnisse in den zuständigen DKE Arbeitskreisen ist ebenfalls Teil des Vorhabens. Die Untersuchungen fanden innerhalb des europäischen Projektes COTEVOS (Concepts, Capacities and Methods for Testing EV systems and their InterOperability within the Smartgrids) gefördert im 7. Rahmenprogramm der Europäischen Kommission und des nationalen Projektes TeBALE (Technische Begleitforschung » Allianz Elektromobilität «) gefördert durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung statt.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik, *Anwendungsregel VDE-AR-E 2122-4-2, Elektrische Ausrüstung von Elektro- Straßenfahrzeugen - Induktive Ladung von Elektrofahrzeugen - Teil 4-2: Niedriger Leistungsbereich*, Berlin: VDE-Verlag GmbH, 2011.
- [2] I. I. E. Commission, *IEC 61980-1, Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 1: General requirements*, Genf: IEC, 2015.
- [3] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz),“ *HEALTH PHYSICS 74/4*, p. 494-522, 1998.
- [4] International Commission on Non Ionizing Radiation Protection, “Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1Hz - 100 kHz),” *Health Physics (99)*, pp. 818-836, 2010.
- [5] I. O. f. Standardization, *820 rev 640 ISO 19363 WD Electrically propelled road vehicles -- Magnetic field wireless power transfer -- Safety and interoperability requirements*, ISO, 2014.