

# Systematische Berücksichtigung der EMV beim Entwurf von induktiven Energieübertragungssystemen

Dipl.- Ing. Marc Wiegand, Leopold Kostal GmbH & Co KG, EE  
Dipl.-Phys. Daniel Klagges, Leopold Kostal GmbH & Co KG, AET 1  
M.Eng. Andreas Grewing, Leopold Kostal GmbH & Co KG, EE  
Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, EMC-Test NRW GmbH

## 1. Einleitung und Aufgabenstellung

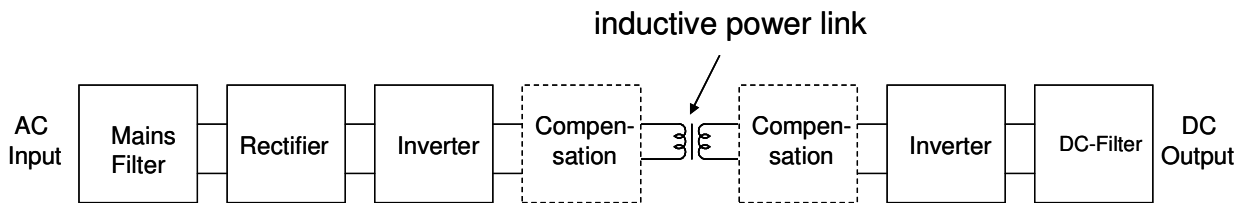
Induktive Energieübertragungssysteme bieten insbesondere im Bereich der Elektromobilität große Vorteile bei der Nutzerfreundlichkeit. Da hier Leistungen von mehreren Kilowatt kabellos übertragen werden, ist ein sorgfältiger Entwurf der Systeme hinsichtlich der Elektromagnetischen Verträglichkeit notwendig. Hierbei sind insbesondere die Störaussendung und Personenschutzgrenzwerte zu berücksichtigen.

Der Vortrag beschreibt hierbei den Entwurfsprozess zur induktiven Energieübertragung hinsichtlich der EMV sowie in diesem Rahmen durchgeführte Messungen. Berücksichtigt werden hierbei theoretische Betrachtungen zur Systemauslegung. Da insbesondere die Spulengeometrien der magnetischen Strecken die Störaussendung maßgeblich beeinflussen, wurden verschiedene Simulationen inklusive der magnetischen Felder im Bereich der Störaussendung und der Personenschutzgrenzwerte durchgeführt.

Basierend auf diesen Untersuchungen wurden mehrere Prototypen aufgebaut. Diese Prototypen berücksichtigen verschiedene Konfigurationen der magnetischen Strecken. Zur Evaluation der Prototypen wurden Störaussendungsmessungen durchgeführt. Da es zum Zeitpunkt der Messungen noch keine normativen Messverfahren für induktive Energieübertragungssysteme gab, lag ein Aspekt auf der Auswahl der geeigneten Messverfahren und Messaufbauten.

## 2. Systembeschreibung

Zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen wurde ein induktives Energieübertragungssystem entwickelt. Derzeit sind hier Systeme mit Spulen unter dem Fahrzeug und Systeme mit Kennzeichenspulen bekannt. Spulen hinter dem Kennzeichen bieten sich an, da es hier fahrzeugübergreifend eine geometrisch einheitliche Kontur gibt. An dieser Kontur ist Ankopplung einer Primärspule mit minimalem Luftspalt möglich. Das System besteht aus der Primärseite mit dem Netzanschluss, einer Leistungsfaktorkorrekturschaltung mit Gleichrichter, einem Hochfrequenz-Generator und dem Primärspulensystem. Die Sekundärseite besteht aus dem Sekundärspulensystem, dem aktiven Gleichrichter und dem Gleichspannungs-Netzanschluss. Abhängig vom Spulenaufbau ist zusätzlich eine elektrische Kompensation der Spulensysteme notwendig. Bild 1 zeigt diesen prinzipiellen Aufbau.

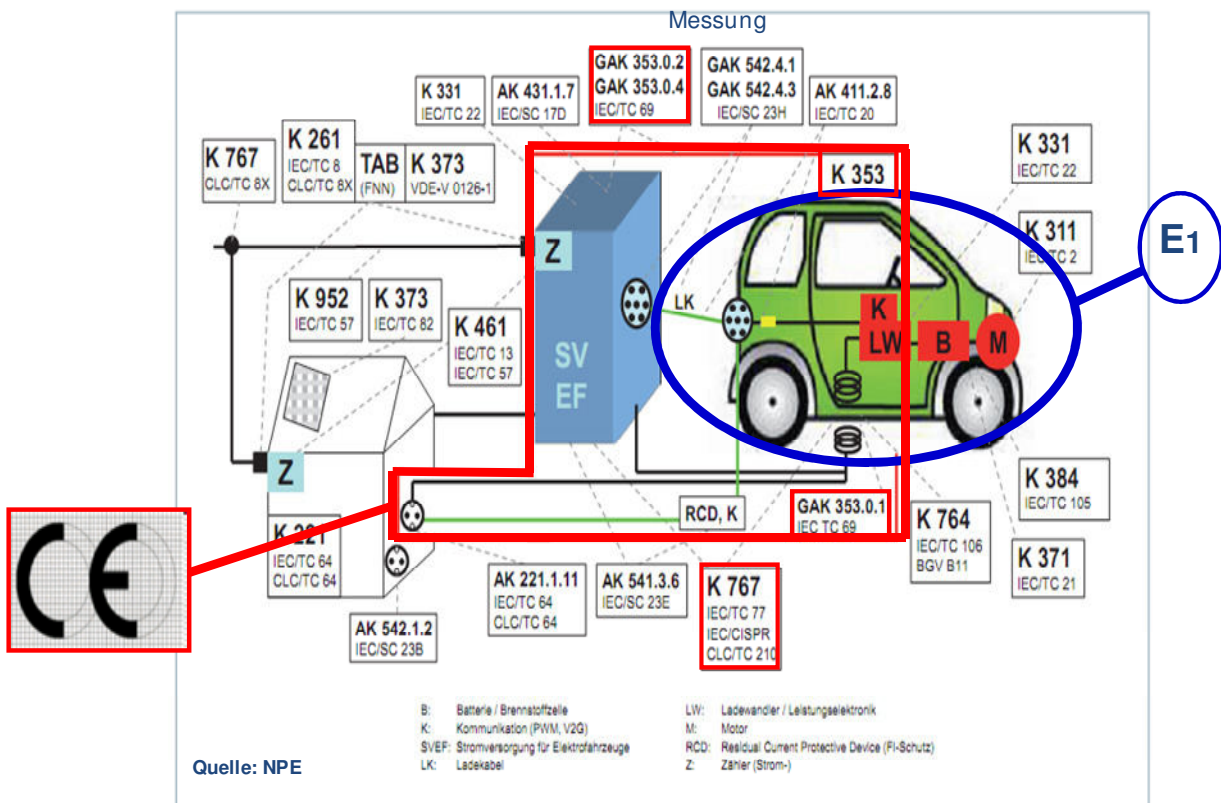


**Bild 1:** Systemansicht Induktivladesystem

Die Betriebsfrequenz des Systems beträgt 140 kHz, es kann eine Leistung bis zu 3300 Watt übertragen werden. Durch Änderung der Windungsverhältnisse kann das System auf verschiedene Bordnetzspannungen angepasst werden. Weiterhin kann über die Anpassung der Spulengeometrien und Ergänzung einer Kompensationsschaltung eine Leistungsübertragung über Abstände von 1 – 10 cm realisiert werden. Es wurden Prototypen von Systemen mit Kennzeichen- und mit Bodenplattenspulen aufgebaut.

### 3. Anforderungsanalyse aus EMV-Sicht

Bei Serienentwicklungsprojekten in der Automobilindustrie existieren im Allgemeinen recht detaillierte EMV Anforderungen inklusive der dazugehörigen Meßaufbauten. Bei dem betrachteten induktiven Ladesystem fehlen diese Informationen. Zudem sind aufgrund des Netzanschlusses gesetzliche EMV-Anforderungen sowie Anforderungen bezüglich der CE-Kennzeichnung zu berücksichtigen. Bild 2 zeigt eine Übersicht der in Frage kommenden Normen rund um das ladende Elektrofahrzeug.

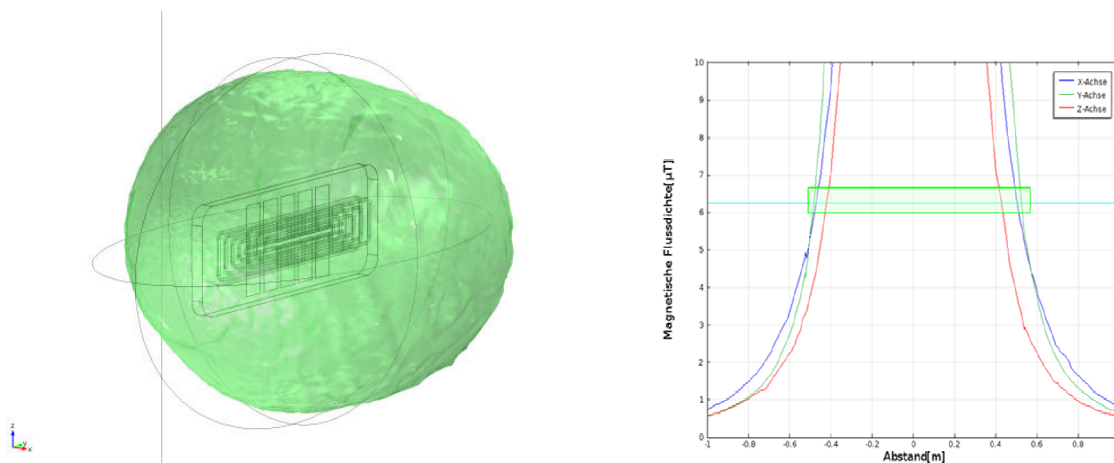


**Bild 2:** Normungswelt ladendes Elektrofahrzeug

Aufgrund der Menge und des Entwurfsstatus dieser Normen konnte im Rahmen der Vorentwicklung daher nur eine Konzeptverifikation stattfinden. Hierzu fand eine enge Abstimmung mit potentiellen Kunden sowie mit einem EMV- Testhaus als kompetenter Partner und benannter Stelle statt. Aus den potentiellen Anforderungen wurden Personenschutzgrenzwerte nach ICNIRP 1998 sowie gestrahlte Emissionen nach EN61000-6-3 als für die Konzeptverifikation besonders kritisch identifiziert. Aufgrund des potentiellen Einsatzortes wurden Grenzwerte für den Wohnbereich herangezogen. Da die Leistungsübertragung mit rund 140 kHz in einem Frequenzbereich nahe dem Langwellen-Rundfunkband erfolgt, wurde bei der Betrachtung hierauf besonderen Wert gelegt. Hinsichtlich der Personenschutzgrenzwerte wurde aufgrund der Positionierung der Ladesysteme am Fahrzeug ein Messabstand von 30 cm von der Außenkontur gewählt. Der Grenzwert für Magnetfelder bei der Betriebsfrequenz liegt bei  $6.25 \mu\text{T}$ .

#### 4. Vorbetrachtungen und Simulationsergebnisse

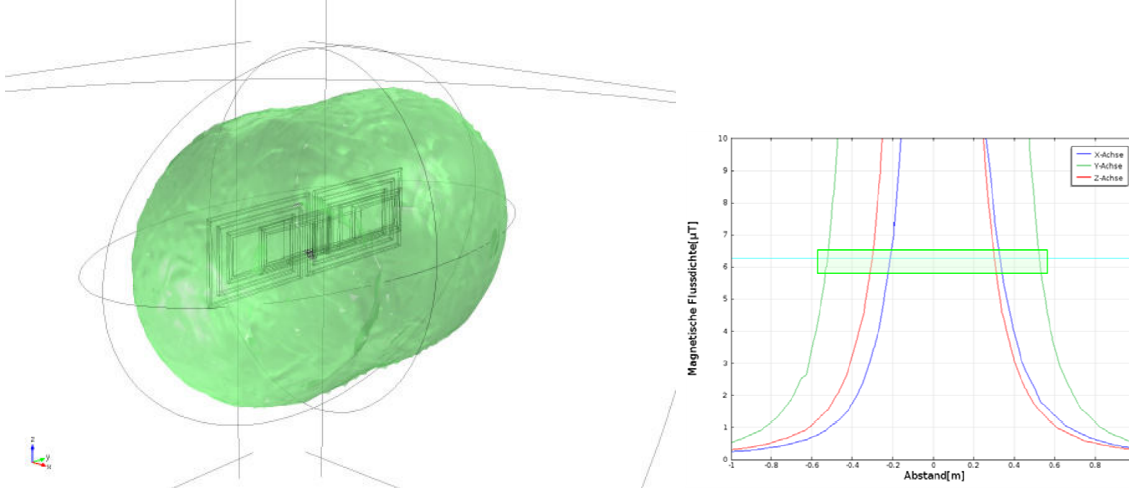
Um die Systemkenntnisse zu erweitern und eine Abschätzung der Auswirkungen von Systemänderungen durchführen zu können, wurde ein Simulationsmodell der Spulensysteme entwickelt. Dieser Prozess soll hier anhand eines Kennzeichenspulensystems gezeigt werden. Hierzu wurde zunächst von einer konstanten Stromdichteverteilung von  $1.5 \text{ A/mm}^2$  innerhalb des Querschnitts des Spulensystems ausgegangen. Die Abmessungen der Spulen betragen  $560 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$  für die Primärspule und  $560 \text{ mm} \times 110 \text{ mm}$  für die Sekundärspule. Dieses Modell wurde weiter verfeinert und die tatsächliche Windungsgeometrie angenähert. Im Rahmen der Simulation wurde der Feldverlauf um die Spule herum simuliert und dargestellt. Die Ergebnisse wurden als Feldverlauf entlang der Raumachsen sowie als 3D-Plot der Oberfläche des Feldwertes von  $6.25 \mu\text{T}$  dargestellt. Beim ursprünglich betrachteten Dipolspulensystem zeigt sich, dass der Grenzwert im Abstand von 30 cm im 3D Plot teilweise überschritten wird. Die Unsymmetrie der  $6.25 \mu\text{T}$ -Grenzfläche resultiert aus einem räumlichen Versatz der Spulen gegeneinander.



**Bild 3:** Simulation ursprüngliches Spulensystem (Dipolspule)

Es wurde ein optimiertes Quadrupolsystem entworfen und simuliert. Die Simulationsergebnisse sind in Bild 4 dargestellt. Bei diesem System sind die

magnetischen Felder deutlich geringer, das Grenzwertkriterium von  $6.25 \mu\text{T}$  im Abstand von 30 cm von der Oberfläche wird hier erfüllt.



**Bild 4:** Simulation optimiertes Quadrupolspulensystem

## 5. Meßaufbauten

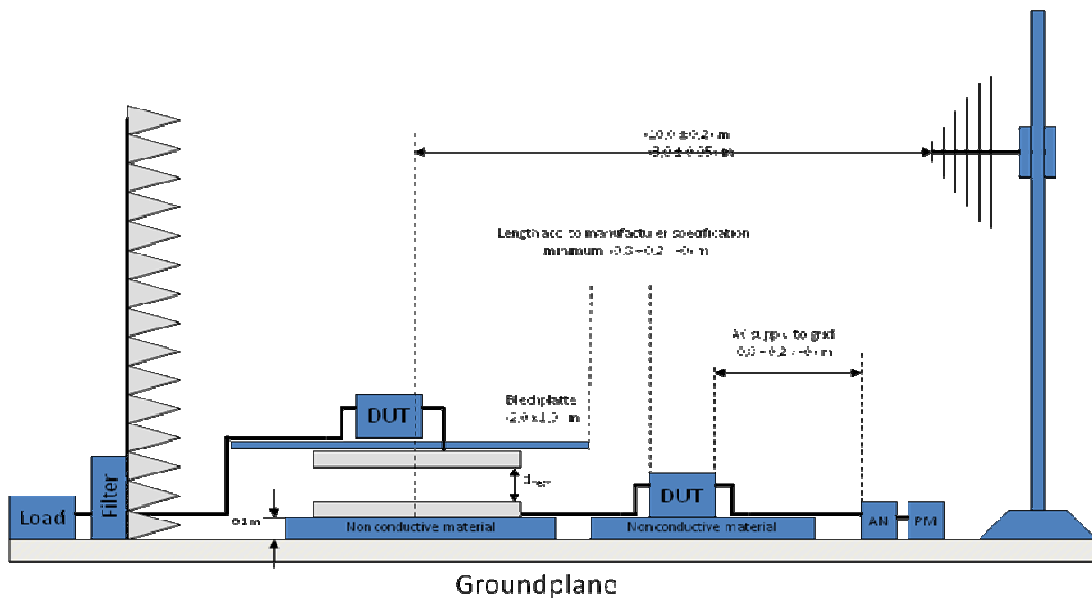
In relevanten Normentwürfen gab es zunächst keine Vorschriften für die Messaufbauten bei den EMV-Prüfungen. Zudem zielen die Normen zum induktiven Laden auf ein Bodenplattensystem. Es mussten daher in enger Abstimmung mit dem EMV-Testhaus eigene Messaufbauten entwickelt werden. Hierbei wurde die Verbausituation im Fahrzeug sowie auf der Primärseite berücksichtigt. Bild 5 zeigt einen exemplarisch einen solchen Messaufbau für ein Kennzeichenspulensystem.



**Bild 5:** Messaufbau Kennzeichenspulensystem

Die Primärseite links im Bild ist auf einem Tisch auf die Montagehöhe positioniert worden. Rechts daneben befindet sich das Kennzeichensystem. Dieses wurde mit Hilfe von

Isolierstoffblöcken auf die Montagehöhe von etwa 30 cm gebracht. Die Fahrzeugelektronik wurde auf einer Masseplatte als Simulation der Fahrzeugkarosserie platziert.



**Bild 6:** Messaufbau Bodenplattenspulensystem

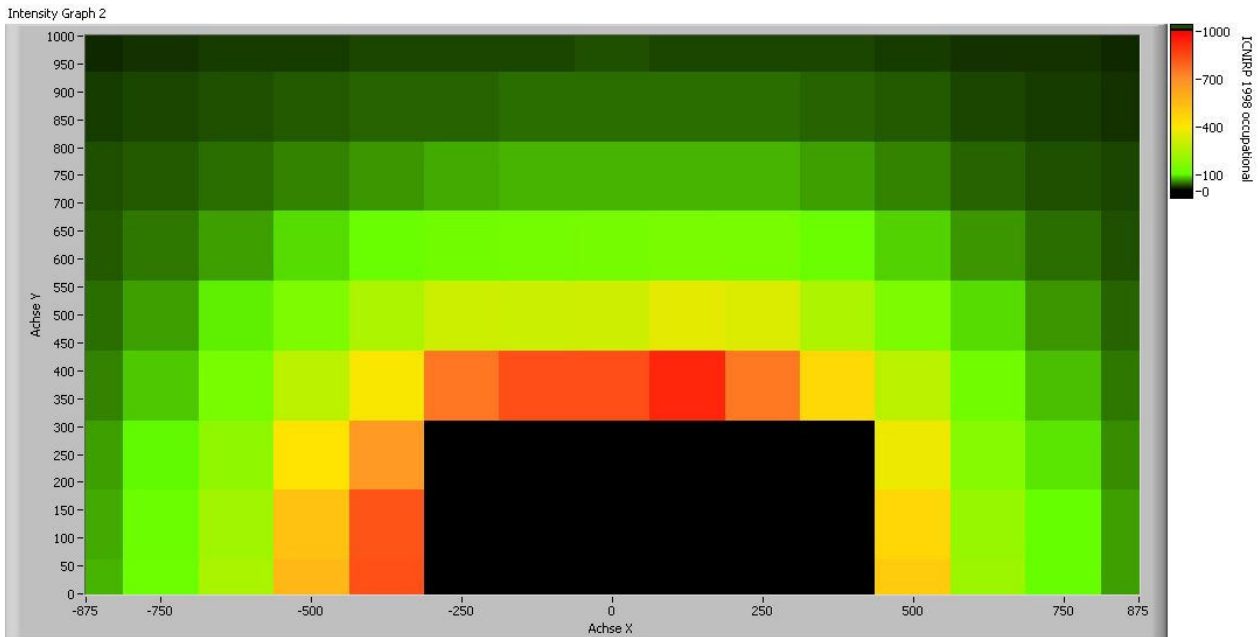
Ein Normentwurf für den Messaufbau eines Bodenplattenspulensystems ist in Bild 6 dargestellt. Im Rahmen der Messungen an einem vorhandenen Bodenplattenspulensystem wurden Variationen dieses Meßaufbaus untersucht. Gegenstand der Untersuchung waren zum Beispiel die Anordnung einer Blechplatte über der Fahrzeugspule sowie die Auswirkung der Isolationsunterlage unterhalb der Primärspule.

## 6. Exemplarische Messergebnisse

Zur Konzeptverifikation wurden exemplarisch einige Messungen durchgeführt. Der Fokus lag hierbei auf der Beurteilung der grundsätzlichen Realisierbarkeit. Daher wurden im Wesentlichen die Frequenzbereiche in der Nähe der Nutzfrequenz betrachtet. Eine Entstörung weiter entfernt liegender Frequenzbänder muss im Rahmen einer möglichen Serienentwicklung erfolgen.

### 6.1 Messung der Personenschutzgrenzwerte

Für eine Akzeptanz einer möglichen Serienlösung ist es unumgänglich, dass Personenschutzgrenzwerte bezüglich der emittierten Magnetfelder eingehalten werden. Daher wurde bereits mit den ersten Prototypen Messungen durchgeführt. Bei Bodenplattensystemen ist dieser Punkt, aufgrund des Abstandes der Spulen, noch einmal deutlich kritischer zu bewerten. Zur Beurteilung wurde ein Testsystem aufgebaut, das den Verlauf der Magnetfelder in der Umgebung des Spulensystems automatisch erfasst. Das Ergebnis einer solchen Messung ist in Bild 7 dargestellt.

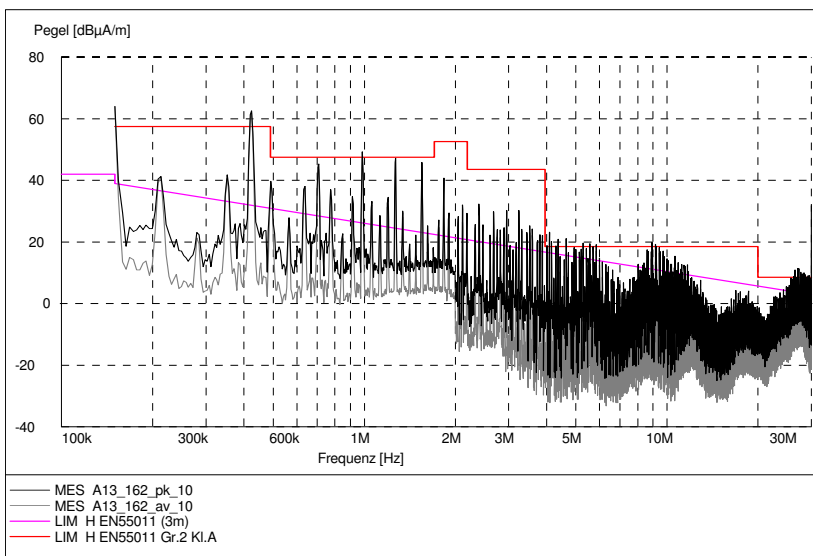


**Bild 7:** Magnetfeldmessung Bodenplattensystem

Es ist zu erkennen, dass der Grenzwert von  $6.25 \mu\text{T}$  in einer Entfernung größer 800 mm vom Mittelpunkt des Spulensystems eingehalten wird. Dies entspricht in etwa der Verbausituation im Fahrzeug hinsichtlich der Zugänglichkeit der Spulen.

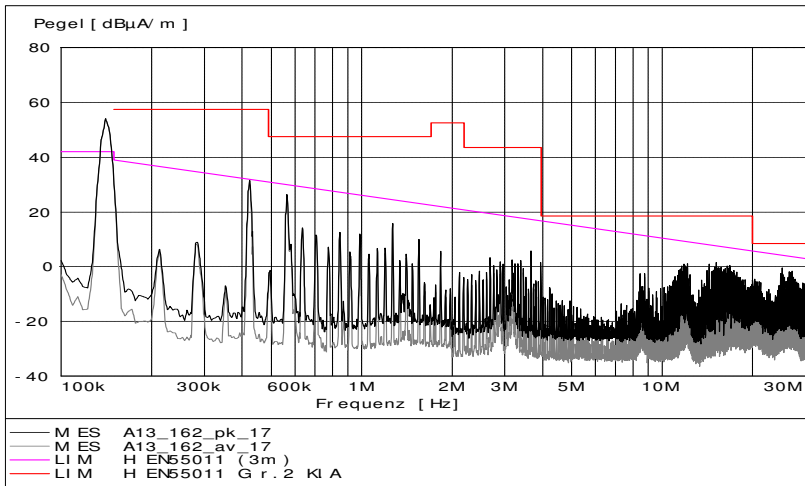
## 6.2 Störaussendungsmessungen

Die Magnetfelder der zuvor in der Simulation optimierten Spulensysteme wurden in der Absorberkabine vermessen. Die Messergebnisse in 3 m Abstand sind in Bild 7 und Bild 8 gegenübergestellt. Hier zeigt sich eine deutlich verringerte Störaussendung sowohl bei der Grundfrequenz der Leistungsübertragung als auch bei höheren Frequenzen. Die Tendenz der Simulation konnte hier messtechnisch bestätigt werden.



**Bild 8:** Störaussendungsmessung Dipolspule





**Bild 9:** Störaussendungsmessung Quadrupolspule

### 6.3 Störfestigkeitsmessungen

Zur Orientierung wurde eine Einstrahlungsmessung an einem Kennzeichensystem durchgeführt. Hierbei konnten Beeinflussungen der Leistungselektronik beobachtet werden. Als Koppelpfad wurde das Spulensystem identifiziert. Aufgrund der Arbeitsfrequenz und der hohen übertragenen Leistung besteht hier noch in Zukunft Untersuchungsbedarf hinsichtlich einer möglichen Schirmung bzw. Filterung.

## 7. Zusammenfassung und Ausblick

Der Prozess zur Konzeptverifikation eines induktiven Fahrzeugschlüsselsystems aus EMV-Sicht wurde dargestellt. Hierbei lag das Hauptaugenmerk auf der Betrachtung der Personenschutzgrenzwerte sowie der Störaussendung in der Nähe der Nutzfrequenz. Die betrachteten Systeme wurden mit Hilfe von Simulationen optimiert. Das Ergebnis dieser Simulation konnte tendenziell durch Messungen bestätigt werden. Hierbei konnte aus EMV-Sicht eine grundsätzliche Serienfähigkeit bestätigt werden. Zur tatsächlichen Umsetzung wird jedoch noch einiger Aufwand zu leisten sein. Hierbei sind derzeit noch im Entwurfsstadium befindliche Normen zu berücksichtigen.

## 8. Literaturverzeichnis

[1] ICNIRP guidelines for limiting exposure to time – varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74 (4):494-522, 1998

[2] EN 61000-6-3:2007 +A1:2011 Störaussendung für Wohnbereich, Geschäfts- und Gewerbebereiche sowie Kleinbetriebe