

# Emissionsverhalten von Elektrofahrzeugen im Ladebetrieb

Dipl.-Ing. Marc Maarleveld, M.Sc. Sebastian Jeschke, Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch  
Lehrstuhl für Energietransport und –speicherung, Universität Duisburg

## 1 Einleitung

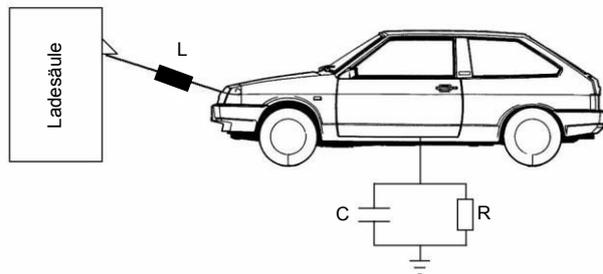
Elektrofahrzeuge (EV) gewinnen immer mehr an Bedeutung und Akzeptanz, bedeuten aber hinsichtlich der technischen Anforderungen auch eine Reihe neuer Herausforderungen sowie Randbedingungen [01]. So stellt der Ladevorgang eines EV einen völlig neuartigen Betriebszustand dar, der bei konventionellen Kraftfahrzeugen mit Verbrennungsmotor keine Anwendung findet. Diese veränderte Situation muss auch hinsichtlich der Prüfungen der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) berücksichtigt werden. Dies bedeutet konkret, dass die EMV Prüfungen um die Teilprüfungen Emission sowie Störfestigkeit im Ladebetrieb zu erweitern sind. Hierbei kann es zu einem neuartigen und teils nicht vorherzusehendem Verhalten des gesamten Prüfaufbaus E-Fahrzeug mit Ladeleitung und Ladesäule (EVSE) kommen. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit einem Teilaspekt dieses Verhaltens im Falle einer Emissionsprüfung. Grundlage ist die Annahme, dass das EV mit der zugehörigen Ladeleitung einen induktiv-kapazitiven Schwingkreis darstellt, welcher unter gewissen Bedingungen angeregt werden kann. Die Induktivität wird hierbei durch die Ladeleitung abgebildet, der kapazitive Anteil begründet sich in der Kapazität der Fahrzeugkarosse gegenüber Erde. Die resultierende Resonanz dieses Schwingkreises kann im Emissionsspektrum des Aufbaus in Form einer Pegelüberhöhung sichtbar werden. Die Höhe der Ausprägung ist hierbei von den Randbedingungen abhängig. Des Weiteren muss entsprechend ein Signal auf der Ladeleitung vorherrschen, welches zur Anregung führt.

Es werden eine Simulation des Frequenzverlaufs des Schwingkreises sowie mehrere reale Messungen des Gesamtsystems durchgeführt. Bei den Messungen kommen eine Fahrzeugnachbildung sowie zwei reale Fahrzeuge zum Einsatz. Das Resonanzverhalten der Anordnung wird hierbei über verschiedene Messungen (Streuparameter, Störstrommessung) gezeigt.

Abschließend wird die Wahl des Untergrundes, die die Fahrzeugkapazität gegen Erde maßgeblich beeinflusst, untersucht. Hierbei wird zwischen zwei Szenarien unterschieden. Bei einem alltäglich auftretenden Ladevorgang ist davon auszugehen, dass der Untergrund aus Beton oder Ähnlichem besteht. Dies gilt sowohl für öffentliches Laden als auch die heimische Garage. Der Untergrund, wie der bei Emissionsprüfungen normativ festgelegt ist, ist hingegen strukturell völlig andersartig [02]. So findet bei Emissionsmessungen nach CISPR25 ein metallischer Untergrund Verwendung. Es kann gezeigt werden, dass die Ausprägung der Resonanz des Schwingkreises im Spektrum eine Abhängigkeit vom Untergrund aufweist. Dieser wirkt auf den Kapazitätswert des Fahrzeuges gegen Erde und somit auf das Resonanzverhalten des gesamten schwingfähigen Systems.

## 2 Systemeigenschaften im Ladebetrieb

Grundgedanke der folgenden Untersuchungen ist, dass die Ladetopologie bestehend aus Ladesäule, Ladeleitung sowie Fahrzeug einen Reihenschwingkreis darstellt. Das entsprechende schematische Modell zeigt Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Modell des resultierenden Schwingkreises im Ladebetrieb

Im Folgenden werden die Einzelelemente des Schwingkreises sowie das zur Anregung notwendige Signal bestimmt bzw. näher beschrieben.

### 2.1 Schwingkreisparameter

Zur Bestimmung der Fahrzeugkapazität gegenüber Erde wird ein Messverfahren aus der Hochspannungstechnik angewandt. Mittels Hochspannungsquelle und einem Omicron Messsystem wird ein Aufbau nach dem Prinzip der Schering Messbrücke verwendet [03], um die Kapazität zu bestimmen. Konkret werden zwei Fahrzeuge vermessen. Es sei hierbei angemerkt, dass es sich bei den beiden Fahrzeugen um keine EVs handelt. Tatsächlich sind es PKWs mit klassischem Verbrennungsmotor. Da jedoch die Karosserieeigenschaften respektive deren Kapazität gegen Erde den entscheidenden Systemparameter darstellen, ist dies zweitrangig. Es ergibt sich ein Kapazitätswert von  $C = 760 \text{ pF} - 880 \text{ pF}$ .

Die Leitungsinduktivität der Ladeleitung wird auf Basis ihrer Geometriedaten abgeschätzt. Zur Verifikation des Werts wird die Leitung darüber hinaus mittels LCR - Messtechnik vermessen. Hieraus ergibt sich bei vorliegender Topologie ein Wert von  $L = \sim 5 \text{ } \mu\text{H}$ .

Bei den gegebenen Werten der Schwingkreiselemente kann die Resonanzfrequenz wie folgt berechnet werden. Der Widerstandswert zwischen Karosserie und Untergrund wird hierbei als sehr hochohmig angenommen und vernachlässigt.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (01)$$

Hieraus ergibt sich für die Resonanzfrequenz ein Wert von  $f_0 = \sim 2,5 \text{ MHz}$ .

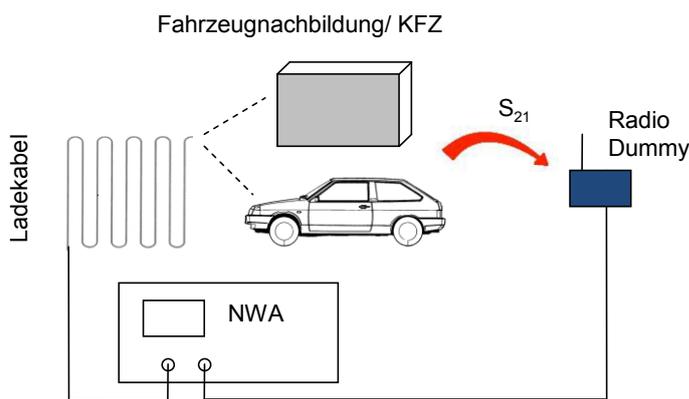
### 2.2 Anregendes Signal

Um den gegebenen Schwingkreis anzuregen, muss ein entsprechendes Signal vorhanden sein. Denkbar ist hier z.B. das für die High Level Kommunikation über die Ladeleitung verwendete Signal der Power Line Communication (PLC) Technologie.

Dieses hat ein Spektrum zwischen 2 MHz und 28 MHz [04] und ist somit als Anregung denkbar, da es die berechnete Resonanzfrequenz beinhaltet. Daher stellt es einen realen Anwendungsfall dar und wird für spätere Untersuchung (Kapitel 4) als Anregung verwendet.

### 3 Messtechnische Bestimmung des Resonanzverhaltens

Das Resonanzverhalten im Allgemeinen sowie die Resonanzfrequenz im Speziellen sollen in einem ersten Schritt über die Bestimmung des Transmissionskoeffizienten  $S_{21}$  gezeigt werden. Den hierfür verwendeten Messaufbau zeigt Abbildung 3.



**Abbildung 2** : Schematischer Messaufbau zur Bestimmung des Resonanzverhaltens

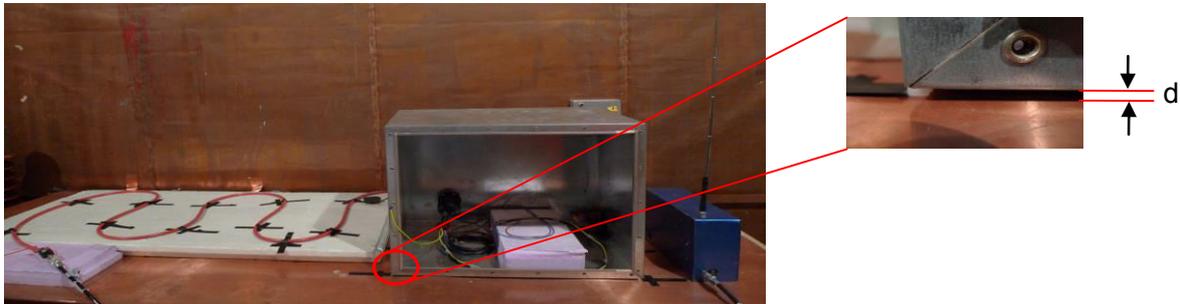
An den Sendeport des Network Analyzers (NWA) wird die Nachbildung der Ladetopologie angeschlossen. Konkret bedeutet dies, dass der Sendeport das Signal in das Ladekabel einkoppelt. Dies geschieht in Anlehnung an den Realfall, in dem über die entsprechenden Leitungen das anregende Signal, wie in 2.3 beschrieben, geführt wird. Über den standardisierten AC Ladestecker vom Typ 2 sind Ladeleitung und KFZ Nachbildung respektive Fahrzeugkarosse miteinander verbunden. Der Empfangsport des NWA ist mit einem Radio Dummy verbunden. Die vermutete Resonanzcharakteristik der Anordnung resultiert in einer gewissen Abstrahlung der Ladeleitung, welche sich vor allem im Resonanzpunkt zeigen sollte. Diese Abstrahlung soll durch Verwendung des Radio Dummys detektiert werden.

#### 3.1 KFZ Nachbildung

In einem ersten Schritt wird die bestimmte Fahrzeug-Erd-Kapazität über eine KFZ Nachbildung nachgebildet. Hierzu kommt eine rechteckige Metallbox zum Einsatz. Die Grundfläche der Box bildet mit der Massefläche eine Art Plattenkondensator, so dass durch

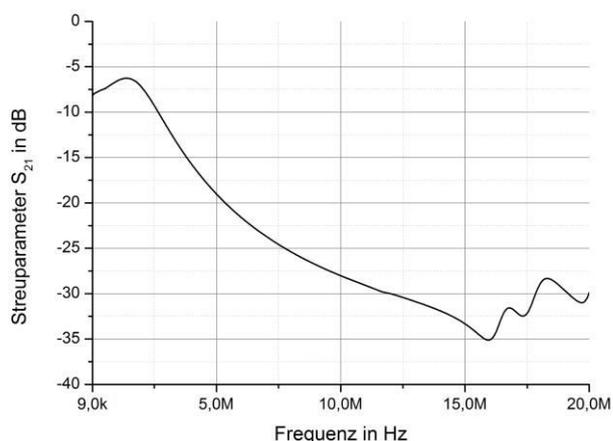
$$C = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d} \Rightarrow d = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot A}{C} \quad (02)$$

der notwendige Abstand zwischen Massefläche und Box bestimmt werden kann, um die entsprechende Kapazität einzustellen. Mit  $C = 760 \text{ pF} - 880 \text{ pF}$  und  $A = 0,24 \text{ m}^2$  ergibt sich ein Abstand  $d$  von  $2,79 \text{ mm} - 2,41 \text{ mm}$ . Abbildung 4 zeigt den Messaufbau im Ganzen sowie den Abstand zwischen Metallbox und Massefläche zur Realisierung der gewünschten Kapazität.



**Abbildung 3:** Realisierung der Kapazität durch Fahrzeugnachbildung

Der untersuchte Frequenzbereich erstreckt sich von 9 kHz bis 20 MHz. Die untere Grenze ist hierbei durch den verwendeten NWA vorgegeben. Abbildung 5 zeigt den Verlauf des Transmissionskoeffizienten für den angegebenen Frequenzbereich.



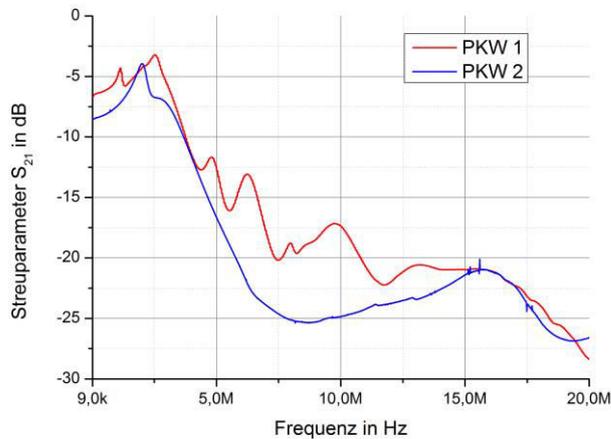
**Abbildung 4:** Transmissionskoeffizient  $S_{21}$  bei Messung mit KFZ Nachbildung

Es ist ersichtlich dass der Maximalwert des  $S_{21}$  von ca. -6 dB im Bereich um  $\sim 2 \text{ MHz}$  auftritt und somit in guter Näherung mit der errechneten Resonanzstelle korrespondiert. Somit kann durch diese erste Messung ein erster Hinweis für das resonante Verhalten der Ladeanordnung gefunden werden.

### 3.2 Reale Fahrzeugkarossen

Um den Unterschied zwischen einer idealisierten Karosserie-Erd-Kapazität (wie in 3.1 durch die Box dargestellt) und der Kapazität einer realen Fahrzeugkarosse näher zu untersuchen, werden Im Folgenden Messungen mit zwei verschiedenen PKWs durchgeführt. Ziel der Untersuchung ist unter anderem die Auswirkung realer Karosserien zu untersuchen. Des Weiteren unterscheiden sich die gewählten PKWs durch ihre Größe und somit Grundfläche gegenüber Masse. Die Auswirkung dieser Eigenschaft soll ebenfalls näher untersucht werden. Zur Verbindung der Ladeleitung

mit dem Fahrzeug/ der Fahrzeugkarosse wird wiederum der AC Ladestecker Typ 2 verwendet, der entsprechend am Fahrzeug kontaktiert wird. Abbildung 6 zeigt wiederum den Verlauf des Transmissionskoeffizienten  $S_{21}$  im Frequenzbereich von 9 kHz bis 20 MHz.

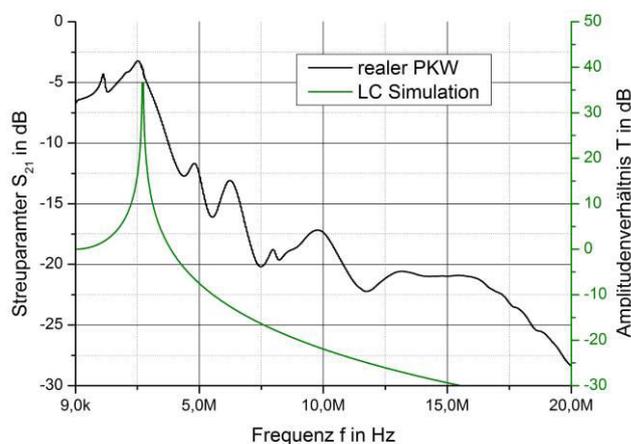


**Abbildung 5:** Transmissionskoeffizient  $S_{21}$  bei Messung mit realem Fahrzeug

Zwei zentrale Erkenntnisse sind hinsichtlich der Messergebnisse zu erkennen. Die bereits im vorangegangenen erkennbare sowie berechnete Resonanzstelle im Bereich um 2 MHz ist bei beiden PKWs deutlich sichtbar. Die Ausprägung sowie der genaue Frequenzpunkt divergieren leicht, die Existenz der Resonanz ist jedoch in beiden Fällen deutlich gegeben. Des Weiteren zeigt sich, dass die Karosseriegröße Einfluss auf den Frequenzverlauf des  $S_{21}$  hat. Dies zeigt sich vor allem im Bereich zwischen 5 MHz und 15 MHz. Darüber hinaus hat PKW 2 eine deutlich glattere Kurvenform als PKW 1.

### 3.3 Vergleich zwischen Simulation und Messung

Um den gesamten Verlauf zu verifizieren findet abschließend ein Vergleich zwischen dem berechneten Frequenzverlauf des Schwingkreises mit den bestimmten Systemparametern und dem einer Messung eines realen PKW statt. Die folgende Abbildung zeigt das entsprechende Ergebnis.

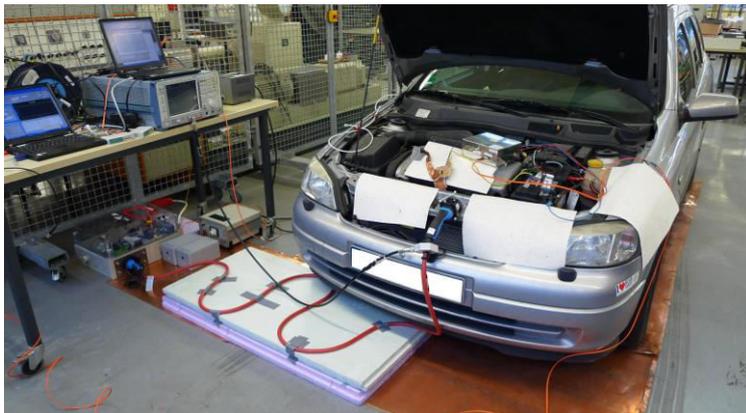


**Abbildung 6:** Vergleich des Resonanzverhaltens für Simulation und Messung

Es ist wiederum zu sehen, dass sich die theoretische Resonanzfrequenz, wie in der Simulation in der Überhöhung des Amplitudenverhältnisses zu erkennen, ebenfalls in der Messung zeigt. Darüber hinaus zeigt die Simulation eine deutliche schmalere sowie schärfere Überhöhung als in Realität ersichtlich. Der Unterscheid begründet sich vor allem im einfachen Simulationsmodell des Schwingkreises. Parasitäre Komponenten, wie sie in der kompliziert zu beschreibenden realen Anordnung vorhanden sind, sind hier nicht berücksichtigt. Für eine erste Abschätzung des Resonanzpunktes in Abhängigkeit der Systemparameter ist das Modell jedoch ausreichend geeignet.

#### 4 Emissionsspektrum in Abhängigkeit des Untergrunds

Es ist zu vermuten, dass die Ausprägung der Resonanz des Schwingkreises im Spektrum eine Abhängigkeit vom Untergrund aufweist. Dieser wirkt auf den Kapazitätswert des Fahrzeuges gegen Erde und somit auf das Resonanzverhalten des gesamten schwingfähigen Systems. Daher werden im Folgenden mittels BCI Zange Störstrommessungen auf dem Ladekabel durchgeführt, um das entsprechende Verhalten zu untersuchen. Es kommen zwei Testszenarien zum Einsatz. Zum einen befindet sich der PKW auf einem metallischen, geerdeten Untergrund [02]. Im zweiten Fall steht das Fahrzeug direkt auf einem Betonboden. Abbildung 8 zeigt den Messaufbau für den erst genannten Fall.



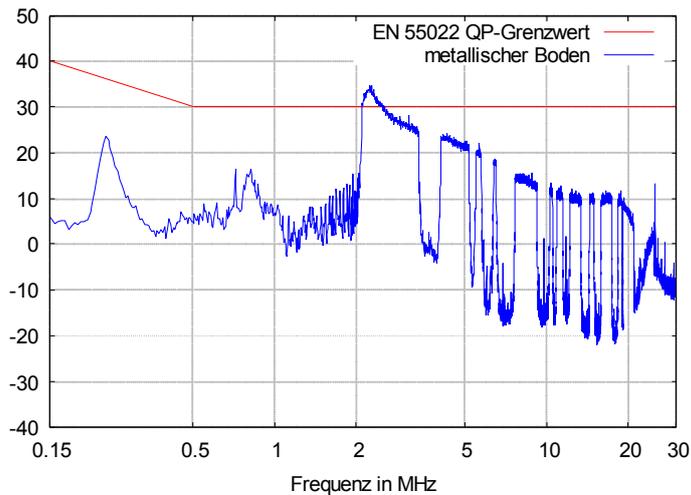
**Abbildung 7:** Messaufbau für Störstrommessung auf der Ladeleitung bei metallischem Untergrund

In diesem Szenario findet eine Datenkommunikation mittels zweier Laptops sowie JPerf über die Kommunikationsleitung (Control Pilot) des Ladekabels statt. Die technische Umsetzung erfolgt durch die PLC Technologie, so dass das anregende Signal dem in Kapitel 2.3 beschriebenen entspricht. Kommunikationsendpunkt ist jeweils ein Modem, welches sich im Fahrzeug bzw. in einer prototypischen, selbstgebauten Wallbox befindet.

##### 4.1 Aufbau nach CISPR 25

Angelehnt an die normative Vorgabe aus [02] wird für diesen Aufbau ein metallischer Boden verwendet. Der PKW steht direkt auf dieser Massefläche. Das Ladekabel ist

meanderförmig gelegt und hat einen Abstand von 100 mm zur Bodenfläche. Den mittels Stromzange detektierten Störstrom auf der Ladeleitung zeigt Abbildung 9.

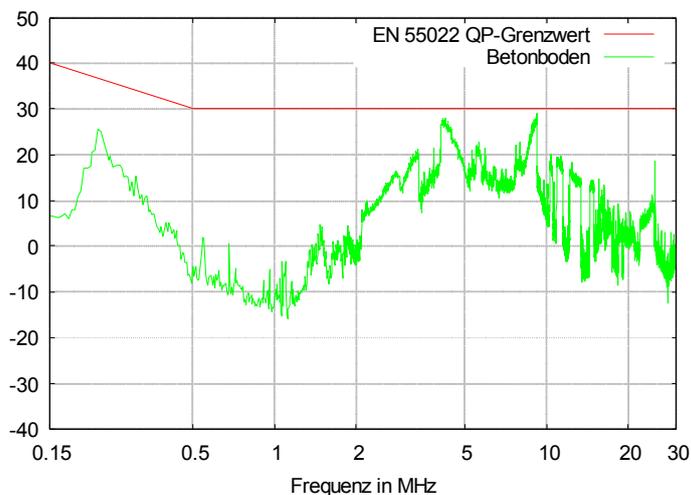


**Abbildung 8:** Störstrom auf der Ladeleitung bei metallischem Untergrund

Im Frequenzbereich zwischen 2 MHz und 28 MHz ist deutlich das PLC Spektrum zu erkennen. Dieses Signal interagiert mit der Resonanzfrequenz des Aufbaus. Es regt den durch den Aufbau gegebenen Schwingkreis an, so dass ohne weitere Maßnahmen der gegebene Grenzwert bei der Resonanzfrequenz von ca. 2 MHz überschritten wird.

## 4.2 Aufbau in Anlehnung an realen Ladebetrieb

Im realen Ladebetrieb kann nicht von einem metallischen Untergrund, wie in CISPR25 beschrieben, ausgegangen werden. Stattdessen ist sowohl beim öffentlichen Laden als auch bei der Heimanwendung von einem Untergrund in Form eines Betonbodens auszugehen. Um dies nachzubilden wird aus dem vorherigen Messaufbau die Massefläche entfernt, so dass als Untergrund der Betonboden der Halle gegeben ist. Das Ergebnis der Störstrommessung für diesen Aufbau zeigt die folgende Abbildung.



**Abbildung 9:** Störstrom auf der Ladeleitung bei Betonboden

Es ist ersichtlich, dass der Verlauf des Kommunikationssignals deutlich weniger ausgeprägt im Spektrum zu erkennen ist. Des Weiteren wird bei diesem Aufbau die Resonanzfrequenz nicht mehr erkennbar angeregt.

## 5 Zusammenfassung

Das angenommene resonante Verhalten des Gesamtsystems E-Fahrzeug im Ladebetrieb kann sowohl in der Theorie als auch in verschiedenen Testszenarien bzw. Messaufbauten gezeigt werden. Die Elemente des einfachen Schwingkreismodells, wie sie in der Simulation verwendet wurden, können zur Bestimmung der resultierenden Resonanzfrequenz herangezogen werden.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Ausprägung der Resonanz vom Untergrund respektive Messaufbau abhängig ist. Die Beschaffenheit des Untergrunds beeinflusst den Wert der Fahrzeug-Erd-Kapazität und somit folglich auch das Resonanzverhalten der gesamten Ladetopologie.

Generell sollte die Möglichkeit einer Resonanzanregung im Ladebetrieb nicht unberücksichtigt bleiben. Form und Ausprägung des resultierenden Störspektrums sind dabei jedoch stark von den Gegebenheiten abhängig. Bei einem normativ verankerten Messaufbau mit Metallboden ist mit einem kritischeren Pegel zu rechnen als im realen Anwendungsfall beim öffentlichen Laden oder in der heimischen Garage (Betonboden).

## Literaturverzeichnis

- [01] *Vehicle Electrification: Status and Issues*, A.G. Boulanger, D.L. Waltz, IEEE Vol. 99, No.6, June 2011
- [02] *CISPR 25 – Funk-Entstörung zum Schutz von Empfängern in Fahrzeugen, Booten und Geräten*, 2003
- [03] *Hochspannungstechnik, Grundlagen – Technologien – Anwendungen*, A. Küchler, 2005
- [04] *Powerline Communications: Significant Technologies to become Ready for Integration*, A. Schwager, 2010