

# **Entwicklung, Implementierung und Verifizierung eines Emulorkonzepts als Gegenstelle zum Elektrofahrzeug für EMV Prüfungen bei DC Ladetopologien**

Dipl.-Ing. Marc Maarleveld, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Straße 76, 44227 Dortmund, Deutschland,

Dipl.-Ing. Jörg Bärenfänger, Dr.-Ing. Sebastian Jeschke, EMC Test NRW GmbH, Emil-Figge-Straße 76, 44227 Dortmund, Deutschland

M.Sc. Sergii Tsiapenko, Prof. Dr.-Ing. Holger Hirsch, Lehrstuhl ETS, Universität Duisburg-Essen, Bismarckstr. 81, 47057 Duisburg, Deutschland

M.Sc. Michael Tybel, Dr.-Ing. Michael Schugt, Scienlab electronic systems GmbH Lise-Meitner-Allee 27, 44801 Bochum, Deutschland

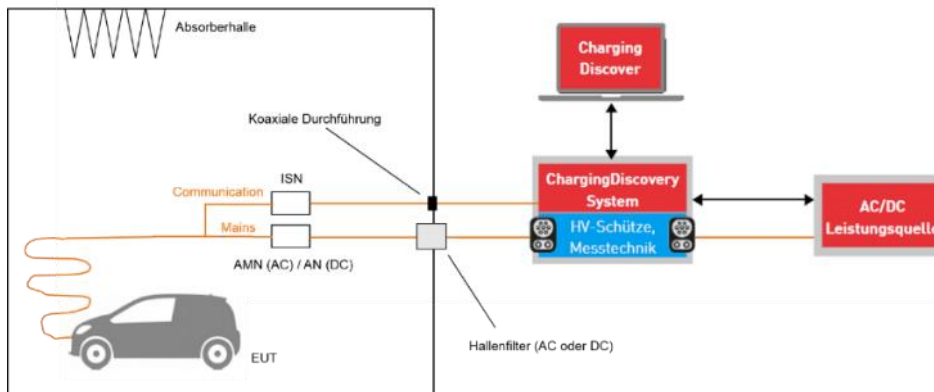
## **1. Einleitung**

Im Rahmen der weltweiten Einführung von Fahrzeugen mit elektrischem Antriebsstrang, deren Antriebsbatterie am Energieversorgungsnetz geladen werden muss, ist eine geeignete Ladeinfrastruktur zu realisieren. Aktuell werden weltweit die unterschiedlichsten Ladekonzepte sowohl beim Energietransfer als auch bei der Kommunikation eingesetzt. In Kombination mit den unterschiedlichen Fahrzeugen ergeben sich im Falle des Ladevorgangs viele mögliche Kombinationen von Ladestationen und Fahrzeugen. Um die Akzeptanz der Fahrzeuge zu steigern, sollte die Interoperabilität der unterschiedlichen Systeme gegeben sein. Für einen erfolgreichen Ladevorgang ist neben der Hauptverbindung für den Energietransfer auch eine funktionierende Kommunikation essentiell. Da es aktuell allerdings immer wieder zu Problemen beim Ladevorgang kommt, ist es notwendig, alle am Ladevorgang beteiligten Komponenten vorab bzgl. ihrer Interoperabilität unter verschiedensten Gesichtspunkten zu überprüfen. Die Motivation ist daher eine Hardware-Testumgebung zu schaffen, die es ermöglicht die am Ladevorgang beteiligten Komponenten sowohl bzgl. ihrer Funktion als auch bzgl. der gültigen EMV-Anforderungen zu untersuchen. Hauptziel des zu Grunde liegenden Förderprojektes ist es, durch Kommunikationsemulatoren in Kombination mit einer leistungsfähigen regelbaren Energiequelle eine Testumgebung zu schaffen die es erlaubt, die am Ladevorgang beteiligten Komponenten durch entsprechende Tests vorab auf Eignung sowie Kompatibilität hinsichtlich eines erfolgreichen Ladevorgangs zu untersuchen. Dabei sollen sowohl die Themenfelder Funktionalität bzw. funktionale Sicherheit als auch elektromagnetische Verträglichkeit behandelt werden. Zentraler Bestandteil ist hierbei die Ladekommunikation, da diese direkt für einen funktionierenden Ladevorgang verantwortlich ist. Da der Emulator selbst die Peripherie in der Testumgebung darstellt darf dieser zur korrekten Beurteilung des EMV-Verhaltens des Prüflings selbst keinerlei Beitrag zum EMV-Verhalten beitragen. Dies bedeutet, dass eine EMV-optimierte Emulation der Gegenstelle im Anwendungsfall EMV-Prüfung der Topologie Fahrzeug im Ladevorgang von Nöten ist

## **2. Ausgangssituation und Zielsetzung**

Im Rahmen des Förderprojekts wird eine Emulationsumgebung erstellt, die es ermöglicht, sämtliche am konduktiven Ladevorgang beteiligten Komponenten auf ihre Funktionalität so-wie die Einhaltung der EMV-Anforderungen zu überprüfen. Aufgrund der unterschied-

lichen Anforderungen bzgl. der Tests der einzelnen Komponenten im Ladebetrieb ergeben sich zwei Hauptanforderungen an die Emulationsumgebung. Die eine bezieht sich auf den Test bzgl. der Funktionalität der betrachteten Komponente im Ladevorgang und die andere auf Erfassung der Störemissionen. Wobei hier eine zu hohe Störemission auch Auswirkungen auf die Funktionalität haben kann. Hauptbestandteil des Aufbaus sind Power HiL Emulatoren (Charge Discovery System - CDS) des Projektpartners Scienlab, welche den Energiefluss während des Ladevorgangs realisieren. Darüber hinaus muss für die Abbildung des Ladevorgangs ebenfalls die notwendige Ladekommunikation nachgebildet werden. Hierbei handelt es sich im Falle des DC Ladens mit Combined Charging System (CCS) Steckertechnologie [01] um Control Pilot sowie Powerline Communication (PLC): Bild 1 zeigt den Testaufbau für ein DC-Quickcharge Ladesystem



**Bild 1:** Test Setup – Prüfling (EUT) ist Elektrofahrzeug

Rein funktional steht somit bereits ein Prüfaufbau zur Erprobung des Ladevorgangs eines E-Fahrzeugs mit Verwendung des CDS Systems als Emulation der Ladesäule zur Verfügung. Im folgenden wird nun die Anpassung des Systems mit den Ziel der Einhaltung der Vorgaben hinsichtlich der Elektromagnetischen Verträglichkeit näher beschrieben. Beim Leistungsteil der Emulation handelt es sich um DC Quelle mit hoher Leistung. Die verwendete Umrichtertechnologie zur Erzeugung der hohen DC Spannungen ist hierbei eine Quelle potentieller Emissionen (hohe Ströme geschaltet in kurzer Zeit). Somit muss für den Leistungsteil hinsichtlich der EMV ein Kompromiss aus Funktionalität/ Energieeffizienz und EMV Eigenschaften gefunden werden. Die verwendete Kommunikationstechnologie hat ebenfalls EMV Störpotential. Hier besteht die Herausforderung respektive Zielsetzung darin eine funktionierende Ladekommunikation zu realisieren, die gleichzeitig möglichst EMV konform ausgeführt ist.

### 3. EMV Verhalten

Ein typischer Anwendungsfall für die Verwendung einer Ladesäulenemulation stellt die Homologationsprüfung eines E-Fahrzeugs gemäß ECE R10 Rev. 5 [02] zur Erlangung einer Typgenehmigung dar. Bei den notwendigen Prüfungen ist unter anderem die gestrahlte Störfeldstärke des Prüflings, respektive des E-Fahrzeugs im Ladevorgang zu ermitteln. Leitungsgeführte Prüfungen sind zwar ebenfalls Bestandteil der zu Grunde liegenden Norm, in diesem Bericht wird sich jedoch aus Kapazitätsgründen hauptsächlich auf die gestrahlte Emission beschränkt. Im ersten Schritt wird zunächst nur der leistungselektronische Teil der Emulation zur Bereitstellung der Ladeleistung hinsichtlich seines EMV Verhaltens untersucht sowie optimiert (Kapitel 3.1). Anschließend wird das Gesamt-

system (Leistungsteil sowie Emulation) hinsichtlich der EMV betrachtet (Kapitel 3.2). Hierbei fließen direkt erste Erkenntnisse aus dem Vorangegangenen in die weitere Optimierung und Verifikation mit ein.

### 3.1 Betrachtung des leistungselektronischen Teils der Emulation ohne Kommunikation

#### Verwendung eines Eigenbaufilters

Das folgende ESB zeigt schematisch den verwendeten Eigenbaufilter, welche nötig ist, um die Entstörung der DC Quelle zu realisieren. Erste Erprobungen/ Messungen hatten gezeigt, dass vor allem große Induktivitäten im Längstpfad eine zufriedenstellende Filtercharakteristik bewirken. Daher wurde die CISPR 11 [03] AN (60  $\mu$ H) als filterndes Element mit eingesetzt.

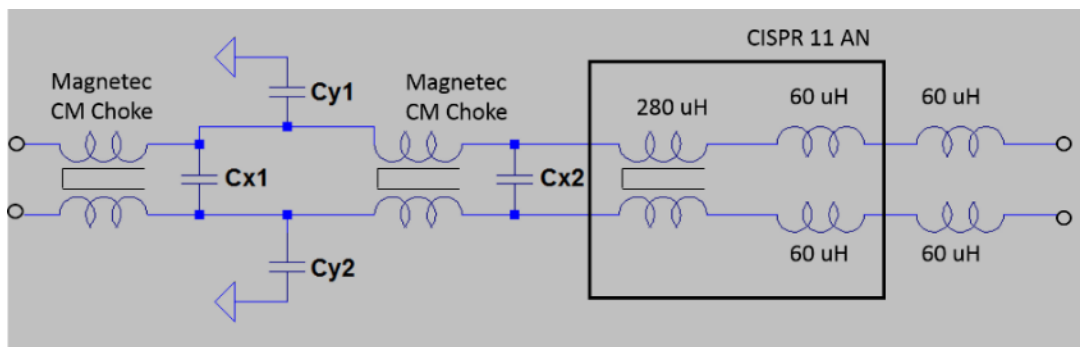
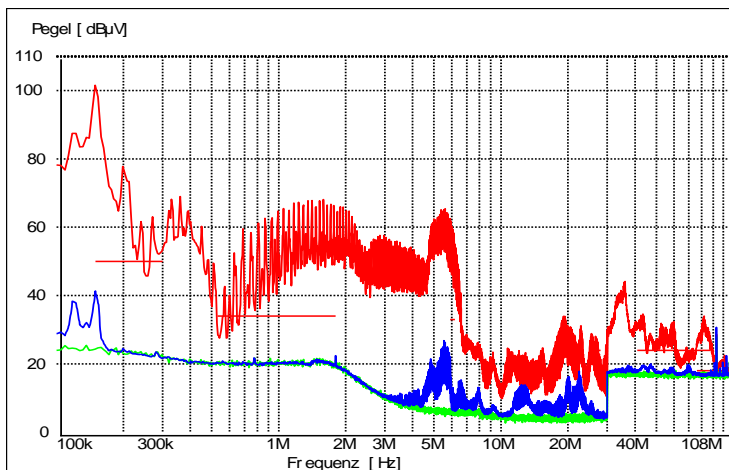


Bild 2: ESB Eigenbaufilter

Mit Hilfe dieser Filtertopologie kann bereits im Frequenzbereich der leitungsgeführten Messungen (100 kHz bis 108 MHz) eine deutliche und zufriedenstellende Filterwirkung erzielt werden. Die erzielten Resultate zeigt das folgende Bild.



Average Messwerte  
Leermessung (grün)  
ohne Entstörung (rot)  
mit Entstörung (blau)

Bild 3: Messergebnisse leitungsgeführte Störemission, Grenzwerte CISPR 25 Class 5 Average

Im folgenden gilt es die Eignung des entwickelten Filters für die Entstörung des Leistungsteils/ der DC Quelle der Emulation im Bereich der gestrahlten Messungen näher zu untersuchen. Es standen zu diesem Untersuchungszeitpunkt insgesamt 3 Lastwiderstände als

Belastung zur Verfügung, so dass mit einer Leistung von 12 kW (400 V, 30 A) getestet werden konnte.

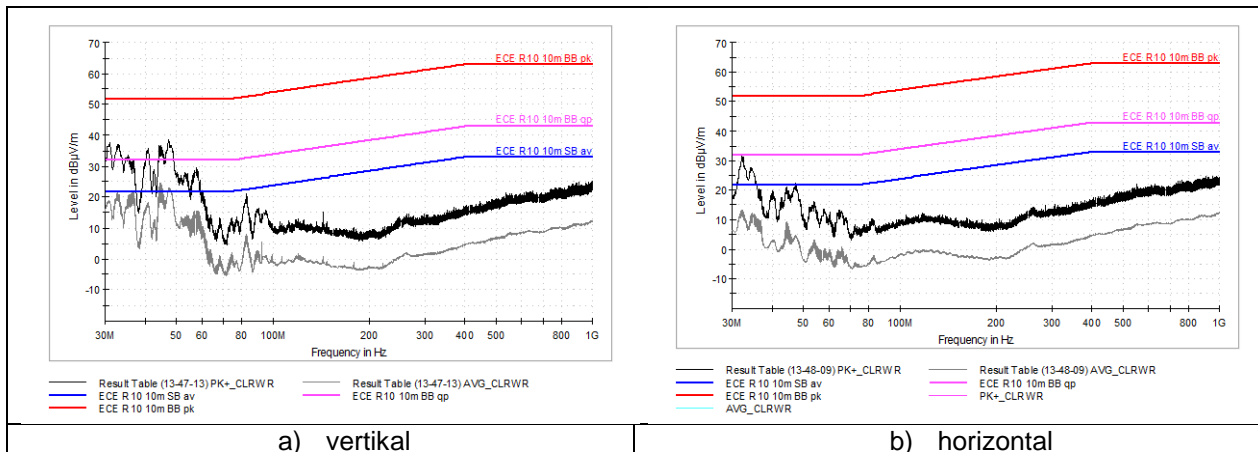
Der Messaufbau für die gestrahlten Messungen ist in Bild 4 zu sehen. Dieser unterscheidet sich zu dem für die leitungsgeführten Messungen lediglich dadurch, dass die Netznachbildungen (AN- Artificial Network) nicht mehr als Messabgriff genutzt werden, sondern als definierte Impedanz gemäß Aufbau nach [02] dienen.



**Bild 4:** Messaufbau gestrahlte Emissionsmessung

Bei Verwendung des Eigenbaufilters befindet sich dieser im Inneren der Absorberhalle. Die DC Leitungen werden über Kamineinsätze/ -durchführungen in die Absorberhalle geführt und der Filter entsprechend nahe der Durchführung angeschlossen.

Die Bilder 5 a) sowie 5 b) zeigen das resultierende Emissionsspektrum im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz bei horizontaler und vertikaler Antennenausrichtung.



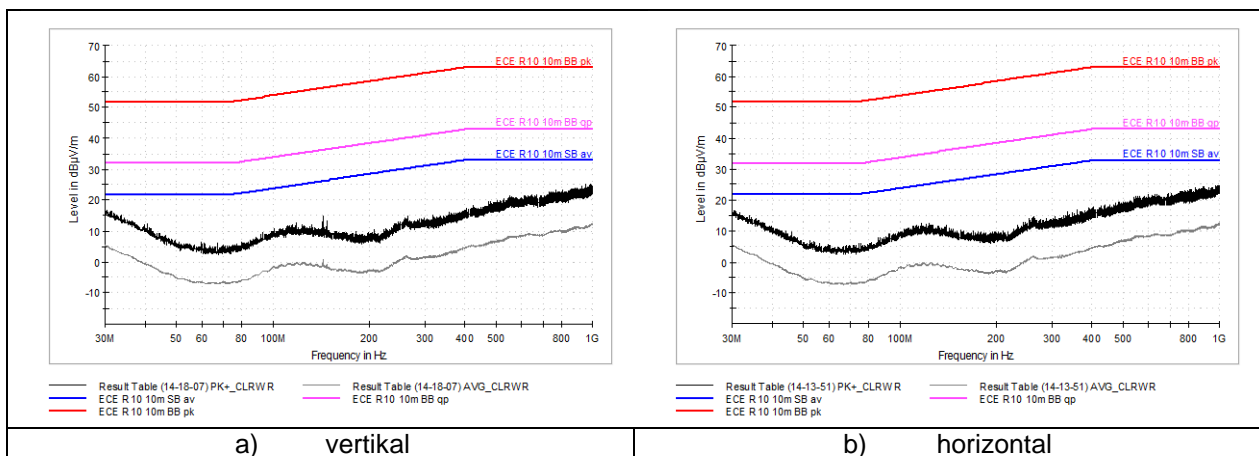
**Bild 5:** Messung mit Eigenbaufilter - Emulator aktiv, 12 kW (400 V, 30 A), 30-1000MHz, MBW 120kHz Peak (PK) / Average (AV)

Es zeigt sich, dass die Performance des auf Basis von leitungsgeführten Messungen entwickelten Eigenbaufilters nicht ausreichend ist, um den Leistungsteil der Emulation für die gestrahlten Messungen ebenfalls ausreichend zu entstören. Vor allem im Frequenzbereich bis 100 MHz sowie für die vertikale Polarisierung ist ein deutliches Emissionsspektrum zu erkennen, welches den Anforderungen an eine emissionsarme Emulation nicht genügt

(Average Grenzwert überschritten). Daher wird im nächsten Schritt die Verwendung des Hallenfilters der Absorberhalle näher untersucht.

### Verwendung des Hallenfilters der Absorberhalle

Der Messaufbau entspricht dem vorangegangenen. Lediglich die Position/ Anbindung des Filters unterscheidet sich. Es wird die Verwendung des Hallenfilters der Absorberhalle erprobt. Dieser ist direkt an der Außenseite der Halle angebracht. Die Bilder 6 a) sowie 6 b) zeigen das resultierende Emissionsspektrum im Frequenzbereich von 30 MHz bis 1 GHz bei horizontaler und vertikaler Antennenausrichtung.



**Bild 6:** Messung mit Hallenfilter – Emulator (Leistungsteil) aktiv, 30-1000MHz, Peak (Pk) / Average (AV)

Bei Verwendung des Hallenfilters werden zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Es ist kein signifikantes Emissionsspektrum des Leistungsteils der Emulation zu erkennen. Die Messkurven entsprechen nahezu einer Leermessung. Im nächsten ist nun die gesamte Emulation, bestehend aus Leistungsteil sowie Ladekommunikation zu verifizieren und gegebenenfalls zu optimieren.

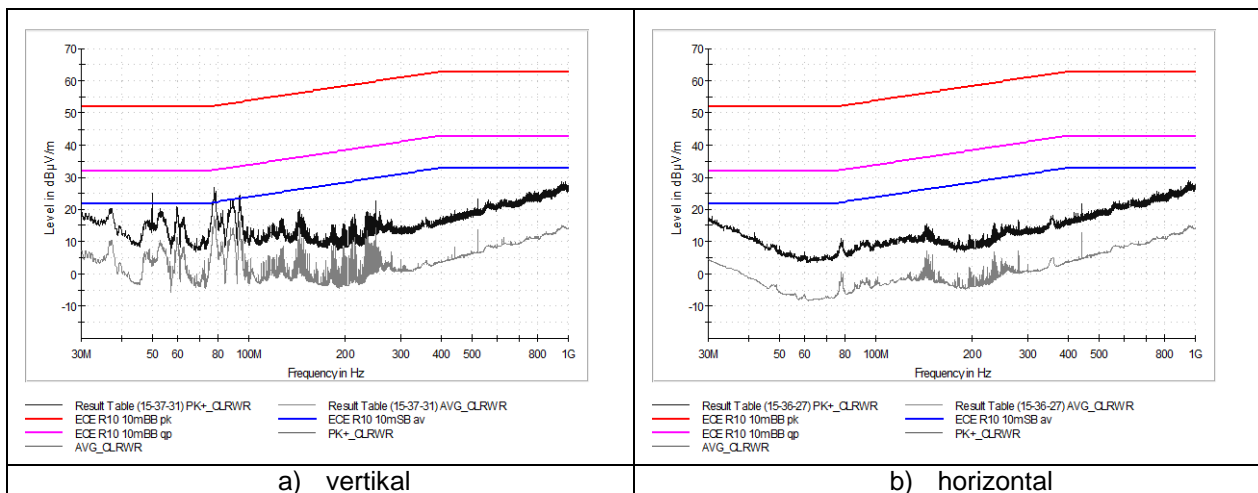
### 3.2 Ermittlung sowie gegebenenfalls Optimierung des EMV Verhaltens des Gesamtsystems (Leistungsteil plus Kommunikation)

Die Untersuchung des EMV Verhaltens des Gesamtsystems findet am im Laufe des Projekts entwickelten „EMV-optimierten“ Emulator statt. Die Entwicklung sowie Optimierung bezieht sich hierbei vor allem auf den Kommunikationsteil, welcher die notwendige Kommunikation beim DC Laden mittels CSS Technologie, heißt Ladekommunikation mittels Control Pilot sowie PLC realisiert. Für den Messaufbau wird wiederum der Hallenfilter der Absorberhalle verwendet. Durch zahlreiche Messungen der leitungsgeführten Störemission des Aufbaus, gemessen an der Netznachbildung, wurde bereits im Vorfeld eine Optimierung des Systems vorgenommen (Anpassung der Filter, Ferrite, etc.). Mit dieser optimierten Realisierung wird nun abschließend die gestrahlte Störemission des Emulators untersucht. Bild 7 zeigt den Gesamtaufbau. Die silberfarbene Box auf der linken Seite realisiert die Emulation der Ladekommunikation sowie weitere Überwachungsfunktionen (Spannungsmessungen, Strommessungen, etc.). Die rot-weiße Box auf dem Tisch sowie der sich dahinter befindlich Lastwiderstand stellen das Interface (originales Ladekabel sowie CCS Ladestecker verwendet) und die notwendige Last sowie Gegenstelle für den zu vermessenen Betriebspunkt dar.



**Bild 6:** Messaufbau zur Untersuchung des EMV Verhaltens des Gesamtsystems

Das folgende Bild 7 a) sowie b) zeigt das resultierende Emissionsspektrum der Emulation bei aktiver Ladekommunikation sowie einer Ladeleistung von 9,2 kW im Frequenzbereich bis 1 GHz für horizontale und vertikale Ausrichtung der Antenne.

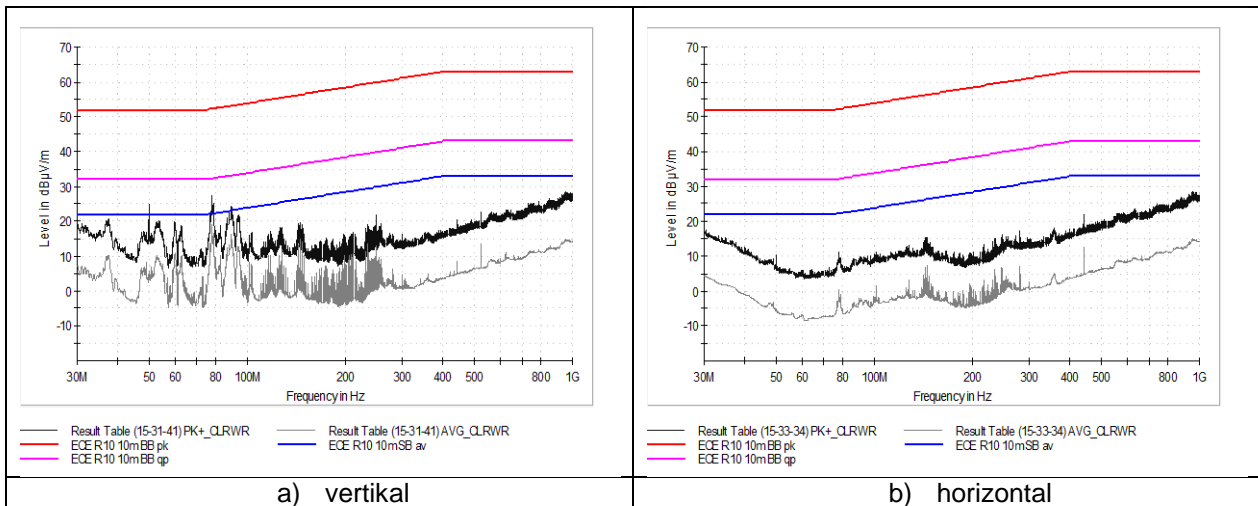


**Bild 7:** Messung mit Hallenfilter - Emulator (Gesamtsystem) aktiv, 30-1000MHz, Peak (Pk) / Average (AV)

Im Frequenzbereich bis ca. 300 MHz ist für vertikale Polarisation deutlich das Emissionsspektrum der Emulation zu erkennen. Bei horizontaler Ausrichtung hingegen sind deutlich weniger Emissionen zu ermitteln. Dies lässt vermuten, dass die Emission respektive die Abstrahlung vor allem von dem nahezu senkrecht verlaufendem Teil des Ladekabels zwischen meanderförmiger Verlegung auf dem Boden und dem Interface auf dem Tisch verursacht wird. Generell liegt das Emissionsspektrum unterhalb der Grenzwerte der ECE R10 und stellt somit im ersten Schritt ein zufriedenstellendes Ergebnis dar.

Abschließend wird der genaue Wirkmechanismus respektive die Quelle der Emission des Emulators näher untersucht. Hierzu wird die Ladeleistung auf 0 kW gesetzt, so dass lediglich der Kommunikationsteil der Emulation aktiv ist. Das in diesem Betriebszustand resultierende Spektrum ist den folgenden Bildern 8 a) sowie b) zu entnehmen.





**Bild 8:** Messung mit Hallenfilter - Ladekommunikation aktiv, **Ladeleistung 0 kW**, 30-1000MHz, Peak (Pk) / Average (AV)

Vergleicht man die Bilder 7 und 8 so wird deutlich, dass kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Emissionsspektren respektive den beiden Betriebszuständen zu erkennen ist. Somit ist anzunehmen, dass die Hauptquelle der detektierten Emissionen in der Emulation der Ladekommunikation zu finden ist. Für einen ersten Evaluationsschritt ist die vorherrschenden Emission als akzeptabel, da unter den Grenzwerten zu sehen. Im nächsten Schritt ist jedoch das Gesamtsystem weiter zu optimieren, um den Abstand zwischen gemessener Emission und Grenzwert weiter zu erhöhen. Da die Emulation die Peripherie/ Gegenstelle zum Prüfling darstellt, sollte diese selbst möglichst störungsarm sein.

#### 4. Zusammenfassung

Mit den getroffenen Entwicklungs- sowie Optimierungsmaßnahmen konnte eine Emulation einer DC Ladesäule mit Leistungsteil sowie Kommunikationsnachbildung realisiert werden, welche sowohl funktional als auch im Hinblick auf die EMV zufriedenstellend funktioniert. Die notwendige Messumgebung sowie Peripherie (Emulation) zur Realisierung der EMV Prüfungen eines Elektrofahrzeugs im Ladevorgang lässt sich somit grundlegend abbilden. Im nächsten Schritt gilt es die Emulation respektive deren Entstörung weiter zu verbessern, so dass die Eigenemission des Emulators größeren Abstand von den Grenzwerten der UN ECE R10 nimmt und ebenfalls die teilweise härteren hersteller-spezifischen Anforderungen an die Grenzwerte einhält. Der im ersten Schritt implementierte Eigenbaufilter zeigt im Bereich der leitungsgeführten Emissionsmessungen zufriedenstellende Resultate, ist jedoch für höhere Frequenzen, heißt den gestrahlten Bereich nicht geeignet. Es zeigt sich jedoch, dass die Verwendung eines handelsüblichen Hallenfilters einer Absorberhalle für die Entstörung des Leistungsteils einer solchen Emulation ausreichend ist. Der Kommunikationsteil bedarf einer aufwendigeren Entwicklung und Optimierung zur Entstörung, da dieser maßgeblich für das Emissionsspektrum bei Messung der gestrahlten Emission verantwortlich ist. Aber auch hier zeigt das bereits implementierte Gesamtsystem gute erste Ergebnisse. Wie bereits erwähnt, gilt es nun die Optimierung weiter voranzutreiben sowie das Gesamtsystem weiter zu verbessern.

## 5. Literatur

- [01] IEC 62196-1: Stecker, Steckdosen, Fahrzeug-Stecker, Fahrzeug-Inlets – Konduktives Laden von EV - Allgemeine Anforderungen
- [02] UN ECE R10 Rev. 5: Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich EMV
- [03] CISPR 11: Industrial, scientific and medical equipment - Radio-frequency disturbance characteristics - Limits and methods of measurement