

Störfestigkeitsuntersuchungen der Ladekommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Smart Home im Hinblick auf Funktionalität und Sicherheit bei Anrechnungsvorgängen

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

Dipl.-Ing. Jonas Maasmann,
Kompetenzzentrum Elektromobilität, Infrastruktur und Netze, Emil-Figge-Straße 76,
44227 Dortmund, Deutschland

1. Einleitung

Elektrofahrzeuge (EV) werden sich nur dann am Markt durchsetzen, wenn der Ladevorgang komfortabel und zuverlässig erfolgt, an nahezu allen Steckdosen ohne aufwändige Zusatzinstallationen geladen werden kann und benutzerfreundliche Abrechnungssysteme zur Verfügung stehen. Wichtige Grundlage hierfür ist eine zuverlässige Kommunikation zwischen dem Fahrzeug, der Hauselektrik, Smart Metern und der Abrechnungsstelle. Fragen der einfachen und kostengünstigen Implementierung in die Elektroinstallation, der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV), der IT-Sicherheit, der Standardisierung und der elektrizitätswirtschaftlichen Konformität sind hierbei von zentraler Bedeutung. Die oben genannte veränderte Situation bedingt neue Herausforderungen sowie Anforderungen hinsichtlich Funktionalität aber auch Elektromagnetischer Verträglichkeit an die zugrunde liegende Technologie. Des Weiteren ist das Thema Sicherheit essentiell. Dies meint sowohl einen gefahrlosen Ladevorgang sowie dessen korrekte Abrechnung hinsichtlich Energiemenge sowie Preis. Diese Thematik ist sowohl hinsichtlich funktionaler Sicherheit als auch EMV zu untersuchen. Anhand von bereits bekannten Störphänomenen basierend auf normativen Vorgaben [01] und/ oder vorherigen Untersuchungen [02], [03] werden Prüfeinrichtungen zur synthetischen Generierung von Störgrößen für Festigkeitsprüfungen konzipiert, aufgebaut sowie erprobt. Ziel ist es eine erste Aussage über die Zuverlässigkeit, Störfestigkeit sowie Robustheit des Kommunikationskanals zwischen EV und Smart Home treffen zu können. Mit Hilfe der gewonnenen Messergebnisse und Erkenntnisse sollen offenen Fragen hinsichtlich Grenzwertvorgaben und Messaufbauten, wie sie in den Normengremien [04] diskutiert werden, zum Teil beantwortet beziehungsweise Hinweise auf mögliche Probleme gegeben werden.

2. Einbindung eines E-Fahrzeugs in die Smart Home Infrastruktur

Die Ergebnisse dieser Arbeit entstammen aus einem Förderprojekt im Rahmen des EF-RE Ziel 2-Programm mit dem Titel ZAESAR – Zuverlässige Anbindung von Elektrofahrzeugen in zukünftigen Smart Home Infrastrukturen. Im Rahmen der Entwicklung, Konzeptionierung sowie Umsetzung der Projektidee sind EMV Aspekte ein Parameter, den es zu berücksichtigen gilt. Dies motiviert die EMV Untersuchungen im Förderprojekt. Im Folgenden ist das grundlegende Konzept des Projekts im Allgemeinen sowie die für diese Arbeit respektive die beschriebenen Untersuchungen wichtigen Kommunikationstechnologien im Speziellen näher erläutert.

2.1 Grundlegendes Konzept des Projekts

Um in Zukunft einen effizienten Umgang mit Energie zu gewährleisten, wird der systemweite Einsatz von intelligenten Komponenten notwendig sein. Dies gilt für das Versorgungsnetz ebenso, wie für die Verbraucher im Haushalt und natürlich auch das Elektrofahrzeug. Damit an jeder Steckdose eine individuelle Abrechnung zu Lasten des jeweiligen Elektrofahrzeugs möglich ist, ist ein intelligenter Zähler im Fahrzeug notwendig. Der Energiezähler im Fahrzeug muss auf höchst zuverlässige und sichere Kommunikationskanäle aufbauen können. Nur dadurch kann sich in der Zukunft ein Elektrofahrzeug in jedes intelligente Haus integrieren. In Abbildung 1 ist das geplante Konzept eines autonom abrechnenden Fahrzeugs in Verbindung mit einem intelligenten Haus skizziert.

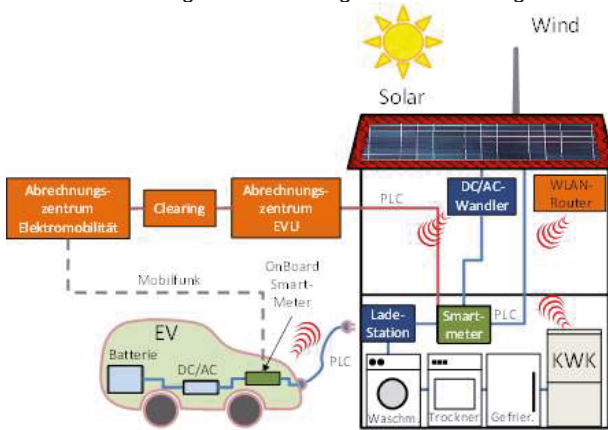


Abbildung 1: Konzept eines intelligenten Hauses mit EV und integriertem Zähl- und Abrechnungssystems basierend auf einer Smart Meter Infrastruktur

Die heute eingesetzten und auch in naher Zukunft nur in Frage kommenden Kommunikationstechniken wie Power Line Communication (PLC) oder Wireless LAN können grundsätzlich die gestellten Kommunikationsanforderungen erfüllen. Gebäudeinstallationen sind jedoch nicht einheitlich aufgebaut. Auch die EMV-Eigenschaften variieren erheblich, so dass in vielen Fällen die genannten Kommunikationstechniken bei weitem nicht die notwendige Funktion und Zuverlässigkeit bieten können. Auch kann die Leistungselektronik von Elektrofahrzeugen erhebliche Störungen erzeugen und damit sowohl die leitungsgebundene als auch die drahtlose Kommunikation stören oder sogar vollständig zum Erliegen bringen. Dies birgt die Gefahr, dass aufgrund von Besonderheiten der Hausinstallation oder von Fahrzeugstörungen wichtige Informationen im Identifikations- und Abrechnungsprozess nicht übermittelt werden können, was zur Folge haben kann, dass der gewünschte Ladezustand der Elektrofahrzeugbatterie nicht erreicht und die Nutzung des Fahrzeugs somit eingeschränkt wäre. Ebenso ist denkbar, dass Mehrwertdienste des Elektrofahrzeugs, wie bspw. die Zwischenspeicherung regenerativ erzeugter Energie, oder zukünftig die Rückspeisung von Energie, nicht wie gewünscht abgerufen werden können. Derartige Fehler führen zu nachlassender Nutzerakzeptanz und so zur Ablehnung der Technik.

Deshalb wird im Rahmen des Projekts neben dem Grundkonzept der Fahrzeugintegration in das intelligente Haus insbesondere auch eine leistungsfähige Mess- und Prüftech-

nik entwickelt und aufgebaut, die es erlaubt, die entsprechenden EMV Untersuchungen durchzuführen. Ein Prüf- und Messmittel ist mit speziellen Generatoren, die Störungen erzeugen können, sowie mit Geräten für die Messung und Quantifizierung dieser Störungen ausgestattet. Die Realisierung dieses Mess- und Prüfmittels ist in Kapitel 3 näher beschrieben.

Mit der sicheren und zuverlässigen Kommunikation werden auch wichtige neue und sehr attraktive Ladetechniken möglich. Unbestritten maßgeblich für die Verbreitung der Elektromobilität ist eine maximale Flexibilität beim Laden der Fahrzeugenergiespeicher. Besitzer von Elektrofahrzeugen werden sich zukünftig in der freien Wahl des Ladepunktes nicht auf wenige verfügbare öffentliche Ladesäulen oder, falls vorhanden, die heimische Garage beschränken lassen. Jede Steckdose im eigenen Haus, an der Arbeitsstelle, bei Freunden oder Verwandten muss zukünftig in der Lage sein, einem Elektrofahrzeug die gewünschte Energie zu liefern. Der Schlüssel dafür ist eine flexible Abrechnungstechnik, die im Fahrzeug integriert ist. Die notwendige Technik wird zurzeit aus diversen Gründen jedoch noch nicht mit der notwendigen Priorität entwickelt. Die Fahrzeughersteller setzen fast ausschließlich auf Ladesäulen der EVUs oder das Laden in der heimischen Garage mit speziellen Anschlussinstallationen. Vorhandene Potenziale werden dadurch nicht erschlossen und die Elektromobilität verliert in der Praxis an Attraktivität.

2.2 Kommunikationspfade der betrachteten Systemtopologie

Im Folgenden ist die tatsächliche Realisierung der Kommunikationspfade im Anwendungsfall EV lädt an einer hierfür vorgesehenen Steckdose des Smart Home näher beschrieben. Hierbei muss zwischen der eigentlichen Ladekommunikation und der Kommunikation zur Abwicklung des Abrechnungsvorgangs bezüglich der Ladeleistung unterschieden werden.

Die Ladekommunikation findet über die standardisierte Control Pilot Kommunikation gemäß IEC 61851 statt. Da es sich bei dem betrachteten Ladevorgang um ein sogenanntes Mode 2 Laden handelt [05], kommt ein In Cable Control and Protection Device (ICCPD) zum Einsatz. Dieses stellt den Kommunikationsgegenpart zum EV dar und coordiniert entsprechend die verfügbare Leistung respektive den verfügbaren Ladestrom, auf den sich der Onboard Lader des EV einstellen muss. Das Smart Home selbst beziehungsweise die verwendete Schutzkontaktsteckdose muss somit keinerlei Intelligenz hinsichtlich der Control Pilot Kommunikation besitzen. Die folgenden Abbildung zeigt die Topologie im Anwendungsfall Mode 2 Laden.

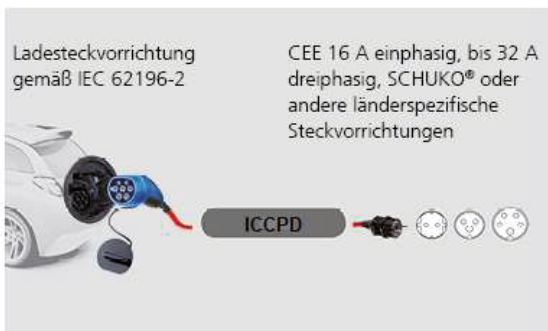


Abbildung 2: Ladebetriebsart Mode 2 [Quelle: Mennekes.de]

Hinsichtlich der Kommunikationstechnologie für die Abrechnungszwecke wurde von der ursprünglichen Planung der Verwendung der Powerline Communication (PLC) Technologie abgewichen. Stattdessen wurde ein cloudbasiertes Konzept realisiert. Entscheidend ist hierbei, dass somit kein direkter Kommunikationspfad der Abrechnungskommunikation über das Ladekabel existiert. Stattdessen dient der cloudbasierte Clearing Server als Schnittstelle respektive Verbindung zwischen EV und Ladeanschlusspunkt hinsichtlich der Abrechnungskommunikation. Abbildung 3 zeigt schematisch die vorliegende Systemtopologie.

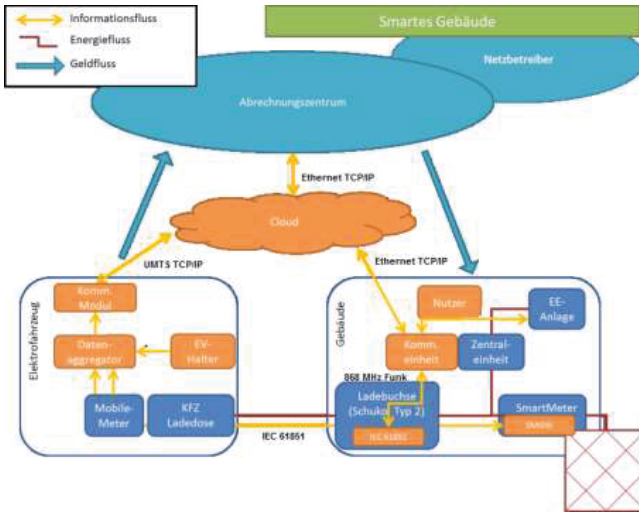


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Ladetopologie EV lädt an Steckdose des Smart Home

Der Informationsaustausch läuft hierbei wie folgt ab: Die Fahrzeug ID, die Ladepunkt ID, der Zeitstempel und die geladene Energie werden aus der Cloud/ Clearing Server an das Abrechnungszentrum gesendet. Gleichsam werden an die Cloud alle Daten aus dem Kommunikationsmodul des Fahrzeuges gesendet, nachdem sie vom Datenaggregator zusammengefasst wurden. Die ID_KFZ ist im Datenaggregator hinterlegt, die ID_Ladepunkt wird vom Smart Meter Gateway (SMGW) an den Datenaggregator übermittelt. Zeitstempel und Ladeenergie werden im Mobil Meter generiert und an den Datenaggregator übermittelt.

Da in dieser Arbeit Störfestigkeitsprüfungen auf der Ladeleitung durchgeführt werden und wie bereits beschrieben die Abrechnungskommunikation nicht über diesen Pfad realisiert wird, besteht somit direkt und implizit eine entsprechende Störfestigkeit gegenüber der Einkopplung von Störgrößen. Nichts desto trotz ist eine Überkopplung vom Anschlusspunkt der Ladeleitung (Ladebuchse/ KFZ Ladedose) auf die entsprechenden Kommunikationsmodule denkbar und bedarf daher der Prüfung. Details hierzu sind dem folgenden Kapitel (Kapitel 3) zu entnehmen.

Die Ladekommunikation gemäß IEC 61851 hingegen ist standardmäßig über die Control Pilot und PE Leitung im Ladekabel realisiert und liegt somit im direkten Einfluss der getesteten Störeinkopplung. Die genauen Prüfaufbauten sind ebenfalls Kapitel 3 zu entnehmen.

3. EMV Untersuchungen

Kernpunkt dieser Arbeit ist die Feststellung der Störfestigkeit der Kommunikation gegenüber auf der Ladeleitung eingekoppelten Störungen. Hierbei meint Kommunikation zum einen die Low Level Ladekommunikation gemäß IEC 61851, darüber hinaus ist die Kommunikation zur Abrechnung der Ladeleistung (Übermittlung der verbrauchten Energie) gemeint. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben findet keine direkte Kommunikation für Abrechnungszwecke über die Ladeleitung statt, sondern es wird eine cloudbasierte Funkübertragung genutzt. Eine in die Ladeleitung eingekoppelte Störgröße wirkt somit nicht direkt auf diesen Kommunikationspfad. Es ist jedoch ein Übersprechen der Störung von der Ladeleitung auf die am Ende angeschlossenen Interfaces (EV – Mobile Meter, Smart Home – Kommunikationseinheit; siehe Abb.3) denkbar. Somit ergibt sich zumindest eine implizite Störfestigkeitsuntersuchung der Abrechnungskommunikation. Die Low Level Ladekommunikation zur Ablaufsteuerung des Ladevorgangs findet hingegen gemäß der normativen Vorgaben über die Control Pilot (CP) respektive Protection Earth (PE) Leitungen im Ladekabel statt. Hinsichtlich dieser Kommunikation wird entsprechend eine direkte Störfestigkeitsprüfung durch Einkopplung einer Störgröße auf die Ladeleitung realisiert. Die Mechanismen sowie die verwendeten Prüfaufbauten sind im Folgenden näher beschrieben.

3.1 Testscenario für die Störfestigkeitsprüfungen

Es wird die Störfestigkeit gegenüber Störungen untersucht, welche mit Hilfe einer Stromzange eingespeist werden (BCI – Bulk Current Injection). Hierbei werden zunächst zwei grundlegende Einspeisepunkte unterschieden. Zum einen wird das Störsignal zwischen EV und ICCPD eingespeist (a)). Somit findet eine Einkopplung auf den Phasenleitungen und der CP Kommunikationsleitung statt. Einspeisepunkt b) hingegen befindet sich zwischen ICCPD und dem Anschlusspunkt am Smart Home. In diesem Abschnitt enthält das Ladekabel lediglich die Phasenleitungen, so dass eine Einspeisung der Störung entsprechend nur auf diese Leitungen realisiert wird. Abbildung 4 zeigt den Messaufbau für die beschriebenen Setups

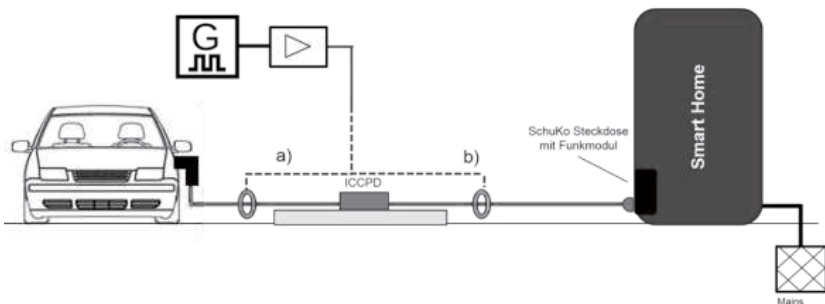


Abbildung 4: Messaufbau für Störfestigkeitsprüfungen mittels BCI Einkopplung

In beiden Fällen wird das Störsignal in Form eines Gleichtaktsignals eingespeist, da die Einkopplung sowohl in die CP Leitung als auch in die PE Leitung erfolgt. Des Weiteren soll die Auswirkung einer Störgröße bei Einkopplung ausschließlich in die Kommunikationsleitungen untersucht werden. Als Einspeisepunkt hierfür wird der Leitungsstrang hinter dem Ladeinlet im Fahrzeug gewählt, da hier die Möglichkeit besteht

die verschiedenen Leitungen aufzusplitten und einzeln zu beaufschlagen. Das folgende Bild zeigt die Einspeisung der Störgröße mittels Stromzange in die Kommunikationsleitung (CP).



Abbildung 5: Einspeisung der Störung in Kommunikationsleitungen innerhalb des EV

Darüber hinaus handelt es sich bei der Einspeisung gemäß der Darstellung in Abbildung 5 im Unterschied zu Variante a) und b) um eine Gegentakteinspeisung, da nur in die CP Leitung eingespeist wird, die PE Leitung jedoch nicht beaufschlagt wird. Generell ist zu sagen, dass sich die eingespeiste Störung in beide Laufrichtungen auf der den Leitungen ausbreiten kann. Im Beispiel wird bei Einkopplungspunkt a) sowohl das EV als auch das ICCPD der Störung ausgesetzt.

3.2 Ergebnisse der Untersuchungen

Bei der Untersuchung der Störfestigkeit der Ladekommunikation gegen leitungsgeführte Störgrößen eingekoppelt mittels Stromzange (BCI Methode) wird im ersten Schritt die Störfestigkeit gegen Continuous Wave (CW) sowie amplitudenmodulierte (AM) Signale erprobt. Dies sind für die BCI Prüfung gebräuchliche Signale, wie sie zum Beispiel in der VW TL spezifiziert sind. Der Frequenzbereich wird ebenfalls an gelehnt an [01] gewählt. Hierdurch ergeben sich Untersuchungen für Frequenzen von 150 kHz bis 400 MHz. Um die notwendigen Pegel für die Erprobung der Störfestigkeit der Ladekommunikation zu evaluieren findet in einem ersten Schritt ein synthetischer Aufbau statt. Mittels Signalgenerator und der entsprechenden Widerstandsbeschaltung aus IEC 61851 wird die Gesamtschaltung des Kommunikationspfades aufgebaut. Mit Hilfe der Stromzange und der Verstärkerschaltung wird ein Störsignal eingespeist und gleichzeitig über ein Oszilloskop im üblichen Messpunkt der Auswertung der Spannungspegel das PWM Kommunikationssignal gemessen. Ziel ist es diejenige, notwendige Einspeiseleistung für die Stromzange zu ermitteln, die notwendig ist, um das PWM Signal um mindestens 1 V zu verändern. Dieser Spannungswert entspricht dem Toleranzbereich der Spannungsniveaus und somit den gültigen Betriebszuständen gemäß Norm [05]. Durch Änderung um mehr als 1 V müsste sich also der Zustand beeinflussen lassen. Konkret beträgt im Ladevorgang der positive Anteil der CP PWM Signals 6 V, darf jedoch gemäß IEC 61851-1 zwischen 5 V und 7 V schwanken. Bei Änderungen um mehr als + 1 V, heißt $U_{CP} > 7 V$ ergibt sich ein nicht definiertes Spannungsniveau. Die nächste definierte Stufe beträgt $U_{CP\ nominal} = 9 V$ mit einem Gültigkeitsbereich zwischen 8 V und 10 V. Eine CP Spannung größer 7 V ist also kein definierter Zustand, was wiederum zu einem Abbruch des Ladevorgangs führen sollte. Die für die gewünschte Beeinflussung der Spannung not-

wendige Signalleistung des Signalgenerators gilt es zu eruieren. Das folgende Bild zeigt den Evaluationsaufbau zur Ermittlung der notwendigen Leistungspegel.

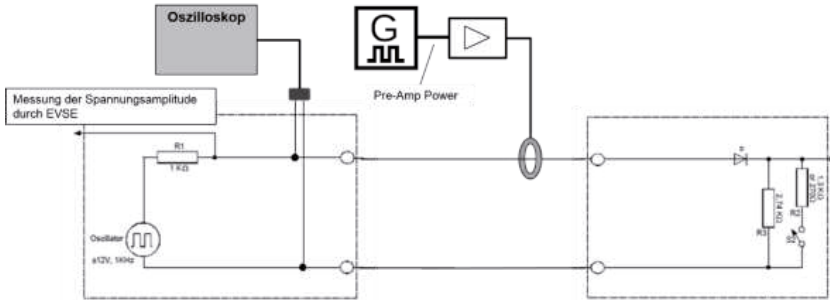


Abbildung 6: Synthetische Nachbildung des Kommunikationspfades zur Ermittlung der notwendigen Störleistung

Es zeigt sich, dass nicht der gesamte Frequenzbereich untersucht werden kann. Bei einer Frequenz von 400 MHz ist es dem Signalgenerator nicht möglich eine ausreichende Leistung zur Verfügung zu stellen, um einen gewünscht hohen Störpegel (1V) aufzuprägen. Daher finden lediglich Untersuchungen der Störfestigkeit bis zu einer Frequenz von 300 MHz statt.

Die folgende Tabelle zeigt die durchgeführten Prüfungen hinsichtlich gewählten Parameter aus Tabelle 1 sowie die Prüfungsreaktion

Einspeisepunkt	Frequenz	Signalform	Prüflingsreaktion
a)	150 kHz - 400 MHz	CW	Reaktion bei 10 MHz: Smart Home Steckdose schaltet ab; alles spannungsfrei
	150 kHz - 400 MHz	AM	Reaktion bei 10 MHz: Smart Home Steckdose schaltet ab; alles spannungsfrei
b)	150 kHz - 400 MHz	CW	Keine Prüfungsreaktion
	150 kHz - 400 MHz	AM	Keine Prüfungsreaktion
Hinter Ladeinlet	150 kHz - 400 MHz	CW	Keine Prüfungsreaktion bei Prüfpegeln gemäß Evaluierung <u>Störschwellenermittlung:</u> -7 dBm @ 200 kHz: Ladezustand ändert sich von Charge auf ready -5 dBm @ 500 kHz: Ladezustand ändert sich von Charge auf ready
	150 kHz - 400 MHz	AM	Keine Prüfungsreaktion

Tabelle 2: Prüfergebnisse bei Einkopplung der Störgröße mittels BC1

Es lassen sich insgesamt zwei verschiedene Reaktionen der Systemtopologie EV lädt an Smart Home hinsichtlich der Störfestigkeitsuntersuchungen unterscheiden. Zum einen kann die Schaltfunktion der Schutzkontaktsteckdose des Smart Homes beeinflusst werden, so dass diese das gesamte System spannungsfrei schaltet. Dies ist bei Einkopplung einer Störgröße mit einer Frequenz von 10 MHz zu beobachten. Dass diese Reaktion nur bei Einspeisung in Punkt a) – hier ist zwischen Stromzange und Steckdose noch das ICCPD – zu erzielen ist, jedoch nicht bei Einspeisung in Punkt b) (Stromzange direkt vor Steckdose) ist reproduzierbar, jedoch hinsichtlich der Ursache noch nicht geklärt. Die CP Ladekommunikation lässt sich bei Verwendung der evaluierten Prüfpegel nicht stören. Dies bedeutet die Zielsetzung das CP Spannungssignal so weit zu beeinflussen, dass es einen gemäß Norm nicht definierten Wert erreicht ($U_{CP} > 7\text{ V}$) hat keine Reaktion bewirkt. Vermutlich weicht der reale Kommunikationspfad hinsichtlich seiner Topologie von der synthetischen Nachstellung ab, was wiederum Einfluss auf die evaluierten Prüfpegel hat. Im realen Anwendungsfall ist eventuell der Störpegel respektive die erzeugte Spannungsänderung nicht hoch genug/ geringer als die angestrebten 1 V.

Für den Einspeisepunkt hinter dem Ladeinlet, was eine Einkopplung einer Gegentaktstörung entspricht, ist ebenfalls keine Beeinflussung bei Verwendung der ermittelten Prüfpegel zu verzeichnen. Allerdings hat eine Störschwellenermittlung die notwendigen Pegel zur Beeinflussung ergeben. Hierfür sind jedoch hohe Leistungen notwendig, bedeutet die Pegel liegen deutlich oberhalb der ursprünglich evaluierten Werte. Bei Verwendung dieser Pegel lässt sich die Ladekommunikation stören, heißt eine Reaktion hervorrufen. Konkret wird zum einen der Pegel des PWM Signals beeinflusst, so dass sich der Ladezustand/ -status von Ladebetrieb (Charge) auf Bereit zum Laden (ready) ändert. Bei Erprobung der in der Störschwellenermittlung ermittelten Pegel im Anwendungsfall der synthetischen Nachbildung des Kommunikationspfades gemäß Abbildung 6 zeigt sich, dass sich bei Verwendung der entsprechenden Pegel der CP Spannungswert um mehr als 2 V beeinflussen lässt. Dies bedeutet, die Auswirkung stimmt mit der Zustandsänderung des Ladevorgangs überein. Wird der Nominalwert für den Ladevorgang $U_{CP} = 6\text{ V}$ um mehr als 2 V verändert, so ist dieser entsprechenden $> 8\text{ V}$ und somit im gültigen Wertebereich für den Ladestatus ready ($9\text{ V} \pm 1\text{ V}$, siehe oben).

Gleichzeitig ist bei Verwendung der sich aus der Störschwellenermittlung ergebenden Pegel eine Veränderung des Tastgrades des Signals zu beobachten. Dies bedeutet, dass sich eine Beeinflussung der Codierung der maximalen Ladestromstärke ergibt.

4. Zusammenfassung

Insgesamt zeigt sich eine hohe Störfestigkeit der Ladekommunikation und der Smart Home Steckdose gegenüber Störgrößen, welche mittels BCI Verfahren eingekoppelt werden. Es kann eine Beeinflussung der Systemtopologie bei Verwendung entsprechend hoher Störpegel erzielt werden. Bei Transformation in ein 50 Ohm System entsprechen die Prüfpegel Störströmen von 120 mA basierend auf der in der Störschwellenermittlung bestimmten eingekoppelten Leistung.

5. Literatur

[01] VW TL 81000, 02/2013

[02] *Ermittlung typischer Störspannungen in Antriebssystemen für Elektro- und Hybridfahrzeuge*; S. Jeschke, M. Maarleveld, H. Hirsch, Universität Duisburg-Essen; M. Obholz, J. Bärenfänger, EMC Test NRW GmbH, Dortmund

[03] *Emissionsverhalten von Elektrofahrzeugen im Ladebetrieb*; M. Maarleveld, S. Jeschke, H. Hirsch, Universität Duisburg-Essen

[04] IEC 61851-21-2

[05] IEC 61851-1