

# Störfestigkeitsanalyse der Power Line Communication für das konduktive Laden von Elektrofahrzeugen

Thomas Opp, Forschungs- und Transferzentrum e. V. an der WHZ  
Dr. Bernd Körber, Forschungs- und Transferzentrum e. V. an der WHZ  
Norman Müller, Westsächsische Hochschule Zwickau  
Prof. Dr. Matthias Richter, Westsächsische Hochschule Zwickau  
Matthias Trebeck, Westsächsische Hochschule Zwickau

## 1 Einleitung

Ein regelmäßig genannter Kritikpunkt an der Praxistauglichkeit von Elektrofahrzeugen ist neben der Reichweite die vergleichsweise lange Ladezeit der verbauten Energiespeicher. Um diesem Nachteil zu begegnen, entstehen aktuell immer mehr öffentliche Ladestationen mit hoher Leistung. Die Auslegung der Ladetechnik und die damit verbundene maximale Ladeleistung von derzeit verfügbaren Serienfahrzeugen ist sehr vielfältig. Im Allgemeinen werden jedoch Ladeleistungen von über 22 kW nur beim DC-Laden unterstützt. DC-Laden ist in der IEC 61851-1 [1] als Mode 4 definiert und erfordert eine digitale Kommunikation auf Basis einer Power Line Communication (PLC) nach der HomePlug Green PHY (HPGP) Spezifikation [2]. Für AC-Laden nach Mode 3 der genannten Norm ist die digitale Kommunikation optional. Derzeit werden bereits einige AC-Ladestationen angeboten, welche diese Option unterstützen. Die digitale Kommunikation dient zum Austausch der erforderlichen Ladeparameter wie Strom und Ladespannung, ist sicherheitsrelevant und muss während des gesamten Ladevorganges aufrechterhalten bleiben. Ein Abbruch der Kommunikation führt zum Beenden des Ladevorgangs.

Die beim DC-Laden verwendete Leistungselektronik in der Ladestation und im Fahrzeug verbaute DC/DC-Wandler haben aufgrund der hohen Leistung ein hohes Störpotential, ebenso die Leistungselektronik des Laders im Fahrzeug beim AC-Laden.

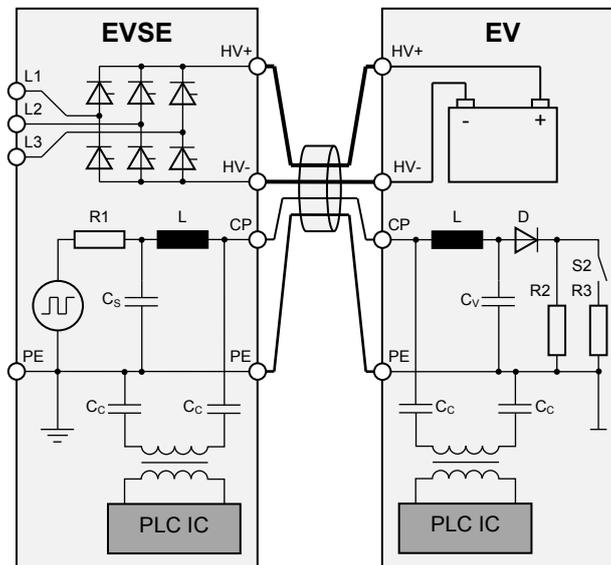
## 2 Systembeschreibung

### 2.1 Ladeschnittstelle am Beispiel DC-Laden nach IEC 61851-1 Mode 4

Die Ladeschnittstelle für das DC-Laden nach IEC 61851-1 Mode 4 verfügt über vier Kontakte, welche Ladeequipment und Fahrzeug verbinden. Zum einen sind dies die Ladestrom führenden Anschlüsse HV+ und HV- und der Schutzleiter (PE), zum anderen der Control Pilot (CP), welcher im Bezug zu PE das pulsweitenmodulierte Signal nach Anhang A der IEC 61851-1 realisiert. Die zusätzliche digitale Kommunikation, auch als High Level Communication bezeichnete Power Line Communication, nutzt gleichermaßen den Control Pilot im Bezug zu PE und ist dem PWM-Signal überlagert.

Das folgende Blockschaltbild in Bild 1 zeigt stark vereinfacht den Aufbau der Ladestation (Electric Vehicle Supply Equipment – EVSE) und des Elektrofahrzeugs (Electric Vehicle – EV). Die Ladestation verfügt über einen geregelten Gleichrichter, welcher die an die

fahrzeugspezifische Batteriespannung angepasste Gleichspannung zum Laden des Fahrzeugs zur Verfügung stellt. Das PWM-Signal für den Control Pilot wird ebenfalls von der Ladestation erzeugt. Auf Fahrzeugseite wird dieses mit den Widerständen R2 und R3 definiert belastet, was die Amplitude der positiven Pulse beeinflusst und somit verschiedene Zustände signalisiert. Der auf beiden Seiten verbaute PLC-Chip koppelt auf die CP- und PE-Leitung und ermöglicht damit die zusätzliche High Level Communication.



**Bild 1:** Blockschaltbild DC-Laden

Alle vier Leitungen (HV+, HV-, CP und PE) werden im selben Kabel geführt. Ein Schirm zwischen den einzelnen Leitungen ist nicht verbaut. Das Kabel darf nach aktueller Normenlage bis zu 10 m lang sein.

Die High Level Communication zwischen Fahrzeug und Ladestation ist in der ISO 15118 [3] definiert. Während dem initialen Kommunikationsaufbau wird die Dämpfungscharakteristik des Signalpegels zwischen EV und EVSE gemessen. Das dabei verwendete SLAC-Protokoll (Signal Level Attenuation Characterization) nutzt bestimmte Botschaften, welche vom Fahrzeug gesendet werden. Alle Ladestationen, die diese Botschaften empfangen, messen die Signalstärke und übermitteln das Messergebnis an das Fahrzeug zurück.

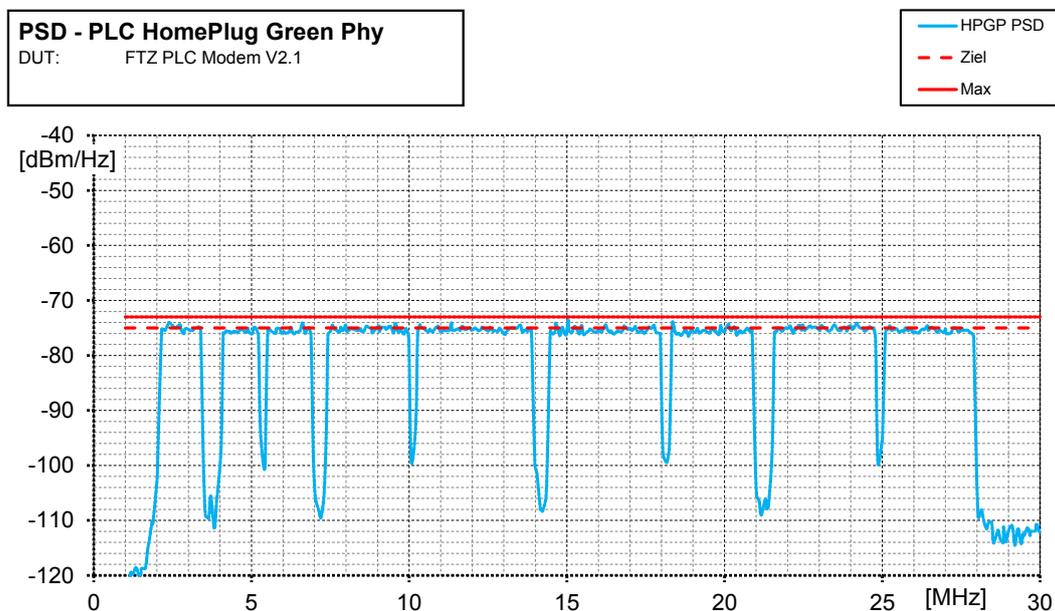
Die meisten Botschaften des SLAC-Protokolls, als auch des Anwendungsprotokolls, welches für die Steuerung des eigentlichen Ladevorgangs verantwortlich ist, sind als ein Nachrichtenpaar von Anfrage und Antwort definiert. Die Antwortzeit auf eine Anfrage des SLAC-Protokolls ist auf 200 ms festgelegt. Beim Anwendungsprotokoll beträgt das kürzeste Zeitlimit 250 ms. Aufgrund dieser beiden Zeitlimits wurde die maximal erlaubte Latenzzeit für eine Botschaft über PLC für alle Untersuchungen auf 60 ms festgesetzt. Latenzzeiten größer 60 ms werden damit als Kommunikationsfehler betrachtet. Für die Kommunikation hin- und zurück ergeben sich somit maximal 120 ms, womit für die höheren Protokollschichten des SLAC-Protokolls 80 ms und für die des Anwendungsprotokolls 130 ms verbleiben. Für die High Level Communication nach ISO 15118 ist eine Übertragungsrate von 500 kbps ausreichend. Die folgenden Untersuchungen wurden daher mit einer festen Datenrate von 500 kbps durchgeführt.

Die beschriebenen Systembedingungen für das DC-Laden gelten gleichermaßen für das AC-Laden nach Mode 3, wenn dieses über eine Power Line Communication verfügt. Der Aufbau des Systems unterscheidet sich lediglich darin, dass anstatt der Anschlüsse HV+ und HV- bis zu drei Phasen des Stromversorgungsnetzes und der Nullleiter mit dem Fahrzeug verbunden sind. Es werden ebenfalls alle Leitungen ungeschirmt in einem bis zu 10 m langen Kabel geführt. Die Leistungselektronik des geregelten Gleichrichters befindet sich beim AC-Laden im Fahrzeug und nicht in der Ladestation.

## 2.2 Power Line Communication nach HomePlug Green PHY Spezifikation

Die Power Line Communication nach der HomePlug Green PHY Spezifikation basiert auf einem orthogonalen Frequenzmultiplexverfahren mit 917 aktiven Trägern im Frequenzbereich von 2 bis 28 MHz. Die einzelnen Träger haben einen Abstand von 24,414 kHz und nutzen eine Vierphasen-Modulation (Quadrature Phase-Shift Keying – QPSK). Datenpakete werden stets mit Redundanz von zwei bis fünf Kopien übertragen. Die Anzahl der Datenkopien ist abhängig von der Qualität des Übertragungskanals und der Datenrate und wird vom HPGP-IC dynamisch angepasst. Aus diesen Vorgaben lassen sich je nach Redundanz Bruttodatenraten zwischen 3,77 und 9,85 Mbps berechnen. In der Praxis ergeben sich Nettodatenraten zwischen 2,44 und 5,90 Mbps.

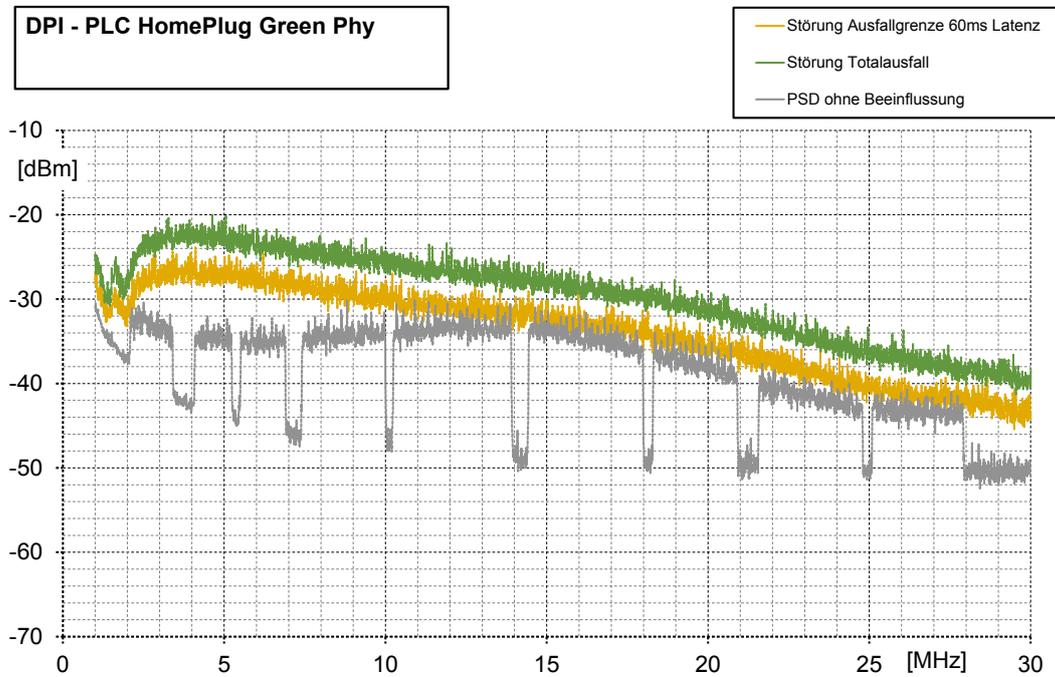
Der Frequenzbereich von 2 bis 28 MHz wird nicht vollständig mit Trägern belegt. Bestimmte zu schützende Amateurfunkbänder werden gezielt ausgeblendet. Diese Bänder sind in der North American Tone Mask definiert, welche Bestandteil der HPGP Spezifikation ist. Die spektrale Leistungsdichte (Power Spectrum Density – PSD) für die nicht ausgeblendeten Träger ist in der ISO 15118-3 nominal auf -75 dBm/Hz festgelegt. Das Maximum beträgt -73 dBm/Hz. Eine Anpassung der PSD des HPGP-ICs ist per Softwareeinstellung möglich. Es ergibt sich damit das folgende PSD-Messergebnis:



**Bild 2:** Diagramm PSD-Messung HPGP

Aufgrund der eingesetzten Redundanz ist das System immun gegen Schmalbandstörer, welche nur wenige Träger beeinflussen. Der Schwerpunkt der Untersuchungen wurde deshalb auf Breitbandstörer gelegt. Um eine Ausfallgrenze unabhängig von Leitungsre-

sonanzen ermitteln zu können, wurde eine DPI- (Direct Power Injection) Messung durchgeführt. Dafür wurden die PLC- und CP-Schaltungsteile der Ladestation und des Fahrzeugs auf einer Testplatine angeordnet. Auf den Leiterzug, welcher die CP-Leitung repräsentiert, wurde gegen PE mithilfe eines Funktionsgenerators ein breitbandiges Rauschen als Störsignal eingepreßt. Die resultierende Störspannung wurde mithilfe eines hochohmigen differentiellen Tastkopfs gemessen und in Bild 4 im Frequenzbereich dargestellt.



**Bild 4:** Diagramm Messergebnisse DPI

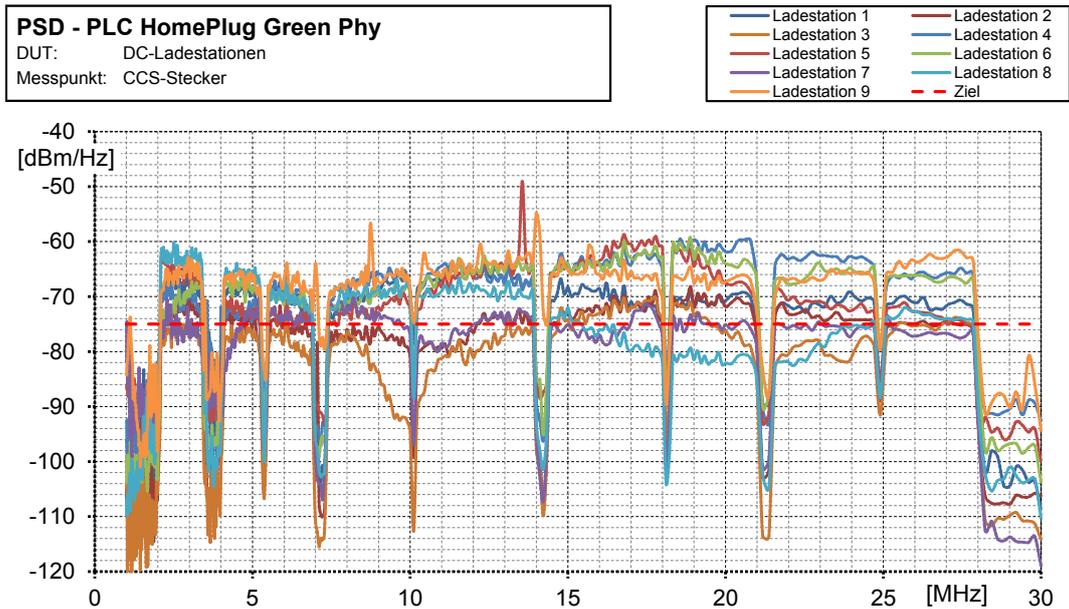
Die graue Messkurve (PSD ohne Beeinflussung) zeigt die Pegel der Power Line Communication ohne Störsignal. Die PSD wurde vorher auf  $-75 \text{ dBm/Hz}$  angepasst, ist aber bei der gezeigten Messung nicht konstant über die Frequenz, da bei einer Normgerechten PSD-Messung andere Impedanzverhältnisse vorliegen. Um Datenpakete der Testdaten im Maximum um 60 ms zu verzögern, ist ein breitbandiger Störeintrag im Mittel 3 dB über der PSD erforderlich (gelbe Kurve: Störung Ausfallgrenze 60 ms Latenz). Ist die Störung um weitere 4 dB höher (grüne Kurve: Störung Totalausfall) ist keine Kommunikation mehr möglich und auch der Link wird nicht mehr aufrechterhalten.

### 3 Einflussgrößen aus EMV-Sicht

#### 3.1 Spektrale Leistungsdichte PLC

Im folgenden Diagramm sind die PSD-Messergebnisse von neun verschiedenen realen DC-Ladestationen dargestellt. Es zeigen sich dabei zum Teil sehr große Abweichungen von der entsprechenden Normvorgabe. Die meist deutlich höhere Leistung ist für die Störfestigkeit der Power Line Communication prinzipiell von Vorteil, bedeutet aber auch einen klaren Verstoß gegen die aktuelle Norm. Kritisch für die Störfestigkeit der PLC ist der Umstand, dass in der ISO 15118-3 keine minimale Sendeleistung vorgeschrieben ist und somit prinzipiell geringere Leistungen erlaubt sind. Weiterhin erlaubt die Norm den Kommunikationsteilnehmern über bestimmte Konfigurationsbotschaften die jeweilige

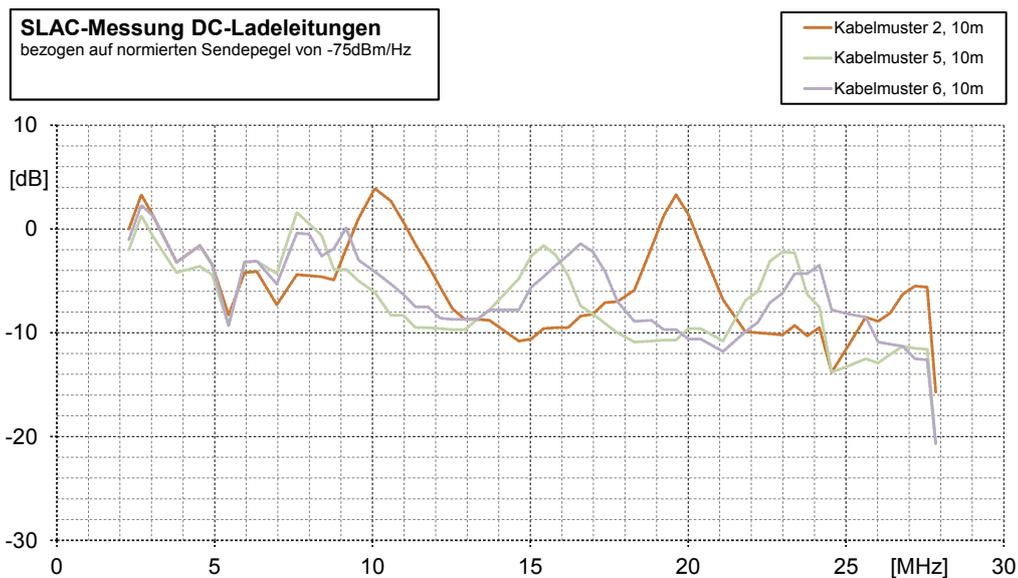
Gegenstelle zu einem weiteren Absenken der Sendeleistung zu zwingen. Eine lineare PSD mit  $-75 \text{ dBm/Hz}$  ist somit nicht verbindlich, sollte aber aus Gründen der Störfestigkeit angestrebt werden.



**Bild 4:** Diagramm Messergebnisse PSD

### 3.2 Dämpfung Signalpegel PLC

Die Dämpfung des PLC-Signalpegels über das Ladekabel kann direkt mit dem PLC-Chip gemessen werden. Dazu findet das bereits beschriebene SLAC-Protokoll Anwendung. Das folgende Diagramm zeigt die Ergebnisse von drei verschiedenen DC-Kabelmustern von jeweils 10 m Länge. Positive Messwerte sind auf abweichende Impedanzverhältnisse im Bezug zur PSD Messung und Resonanzeffekte der Ladeleitung zurückzuführen.



**Bild 5:** Diagramm Messergebnisse SLAC

Wie die Messergebnisse bei 19,5 MHz zeigen, sind je nach gewählter Ladeleitung bis zu 13 dB Unterschied in der Dämpfung bei gleicher Frequenz möglich. Zur vereinfachten Darstellung der Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen der Mittelwert der Dämpfung über das gesamte PLC-Band gezeigt.

Kabelmuster	Länge [m]	durchschnittliche Dämpfung [dB]
1	3	5,9
	5	5,5
2	5	5,6
	10	5,7
3	3	3,5
	5	4,3
4	3	3,8
5	5	5,6
	10	7,1
6	5	5,5
	10	6,3
7	3	3,7
	5	4,8

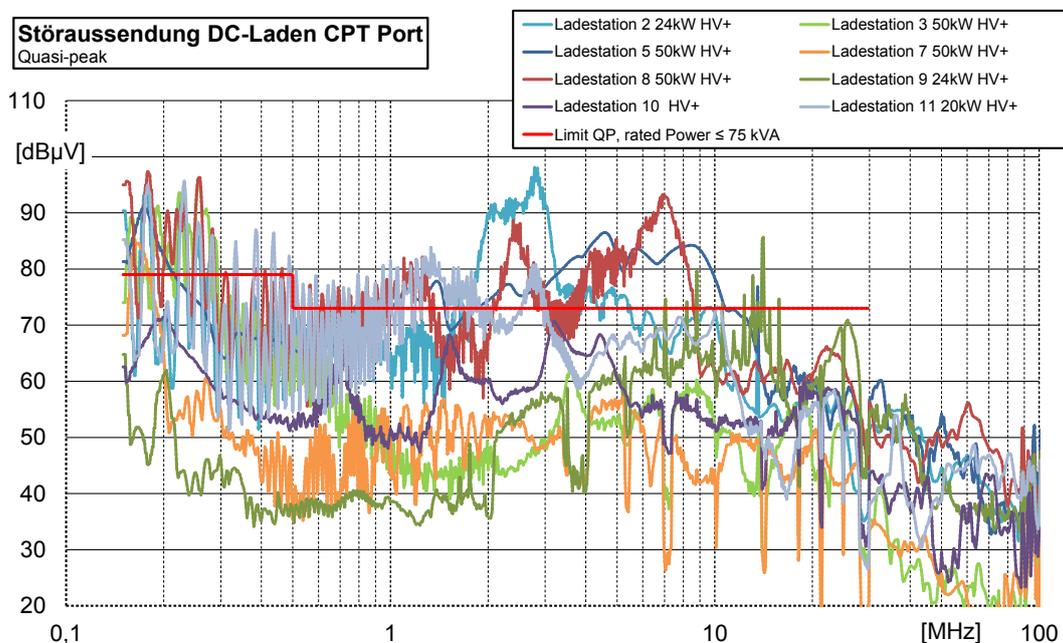
**Tabelle 1:** Dämpfungen DC-Ladekabel

Kabelmuster	Länge [m]	durchschnittliche Dämpfung [dB]
1	7,6	2,4
2	8,1	2,6
3	5,7	2,2
4	8,1	1,9
5	5,6	2,2
6	5,6	1,5
7	4,1	3,1
8	6,4	2,2
9	4,3	2,2

**Tabelle 2:** Dämpfungen AC-Ladekabel

Bei DC-Ladekabeln ist eine über das PLC-Band gemittelte Dämpfung bis zu 7,1 dB zu erwarten, bei AC-Ladekabeln bis zu 3,1 dB.

### 3.3 Störaussendung HV+/HV-



**Bild 6:** Diagramm Messergebnisse leitungsgeführte Störaussendung

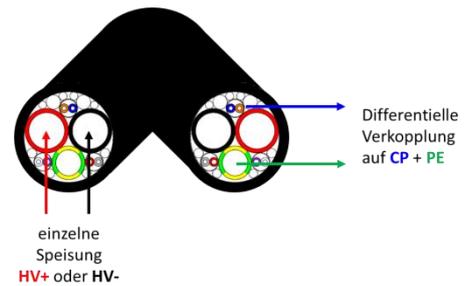
Der Aufbau sowie die Grenzwerte zur Messung der leitungsgeführte Störaussendung von Ladestationen ist in der IEC 61851-21-2 [4] definiert. Die Norm nennt Grenzwerte

für den Average- und den Quasi-Peak-Detektor. Im Folgenden werden nur die Messergebnisse für HV+ mit Quasi-Peak-Detektor betrachtet.

Das Diagramm aus Bild 6 zeigt die Ergebnisse für acht verschiedene Ladestationen. Für den Einfluss auf PLC ist der Frequenzbereich von 2 bis 28 MHz interessant. Bis 10 MHz sind deutliche Verletzungen des Grenzwertes bis zu 20 dB (Ladestation 8) zu erkennen. Im Frequenzbereich über 10 MHz existieren nur einige schmalbandige Grenzwertverletzungen.

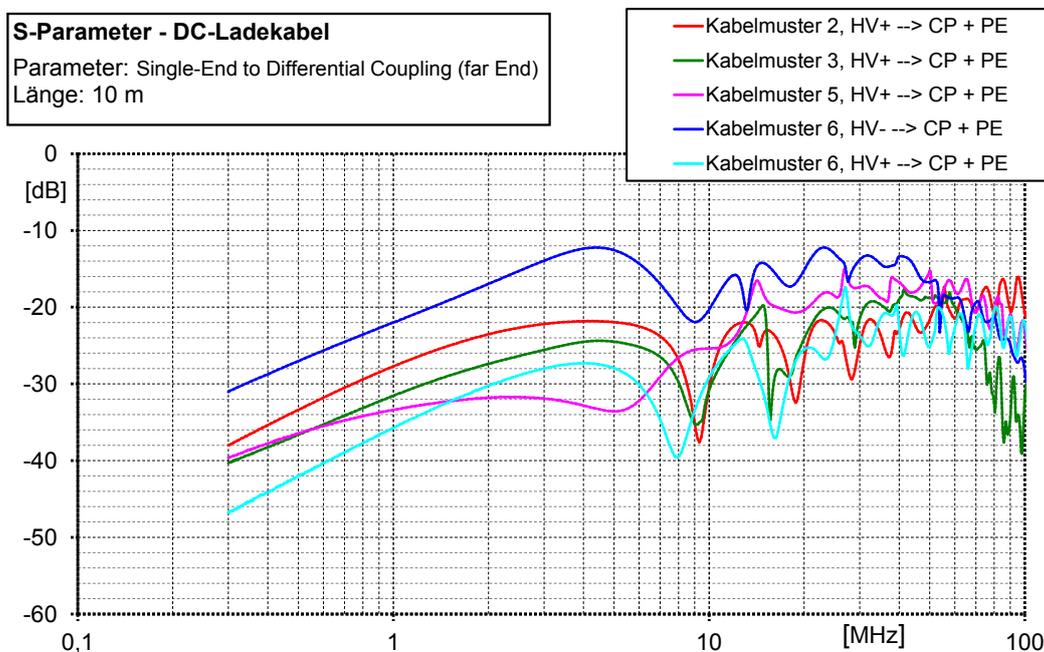
### 3.4 Überkopplung HV+/HV- nach CP

Bild 7 zeigt den Querschnitt eines typischen DC-Ladekabels. Für HV+, HV- und PE sind dedizierte Adern vorgesehen. Dazu kommt oftmals eine Mehrzahl von Signaladern, welche entweder als verdrehte Paare oder einzeln im Kabel geführt sind. Die Auswahl einer dieser Adern für CP ist im Allgemeinen dem Ladestationshersteller überlassen. Für die Überkopplungsmessung wurde mithilfe eines vektoriiellen Netzwerkanalysators eine der HV-Adern gespeist und die differentielle Verkopplung auf CP gegen PE gemessen.



**Bild 7:** Überkopplungsmessung DC-Ladekabel

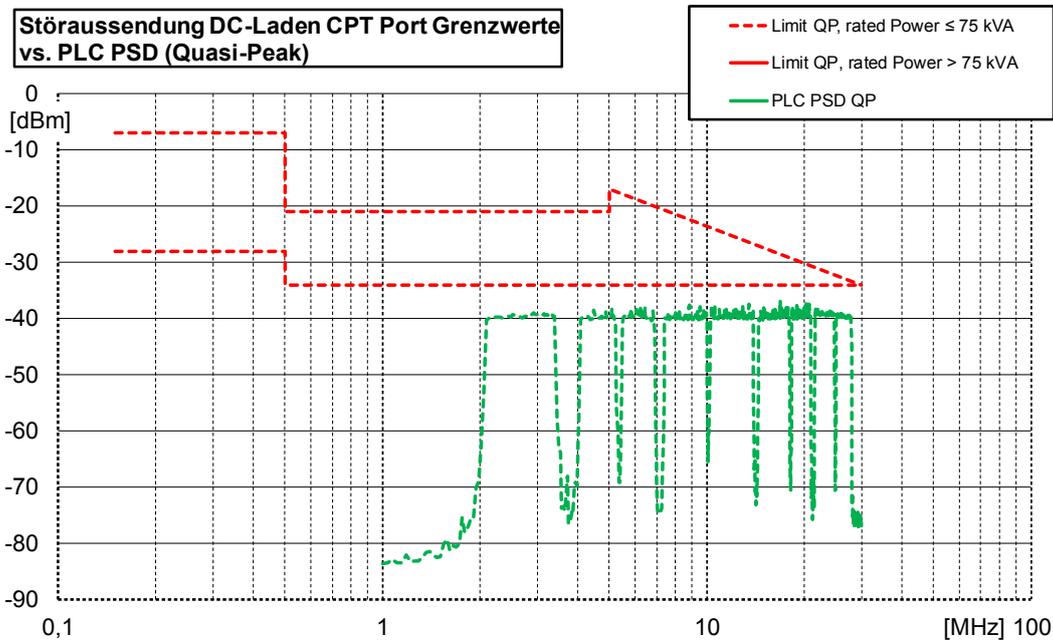
Im folgenden Diagramm sind ausgewählte Messergebnisse für verschiedene Kabelmuster mit 10 m Länge dargestellt. Bei Kabelmuster 6 ist zu erkennen, dass die Verkopplung von HV+ und HV- nach CP und PE je nach Lage im Kabel deutlich unterschiedlich sein kann. Im schlechtesten Fall kann lediglich mit einer Entkopplung von 12 dB (Kabelmuster 6 bei 4,5 MHz) gerechnet werden.



**Bild 8:** Diagramm Messergebnisse Überkopplung

## 4 Zusammenhang der Einflussgrößen

Die PSD der Power Line Communication von  $-75 \text{ dBm/Hz}$  entspricht  $-40 \text{ dBm}$  gemessen mit einem Quasi-Peak-Detektor mit  $9 \text{ kHz}$  Auflösungsbandbreite. Die zulässige leitungsgeführte Störaussendung für DC-Ladestationen größer  $75 \text{ kVA}$  ist in der IEC 61851-21-2 mit  $90 \text{ dB}\mu\text{V}$  bei  $5 \text{ MHz}$  linear fallend bei logarithmischer Frequenzachse auf  $73 \text{ dB}\mu\text{V}$  bei  $30 \text{ MHz}$  angegeben. Die Grenzwerte und die PSD sind im folgenden Diagramm dargestellt:



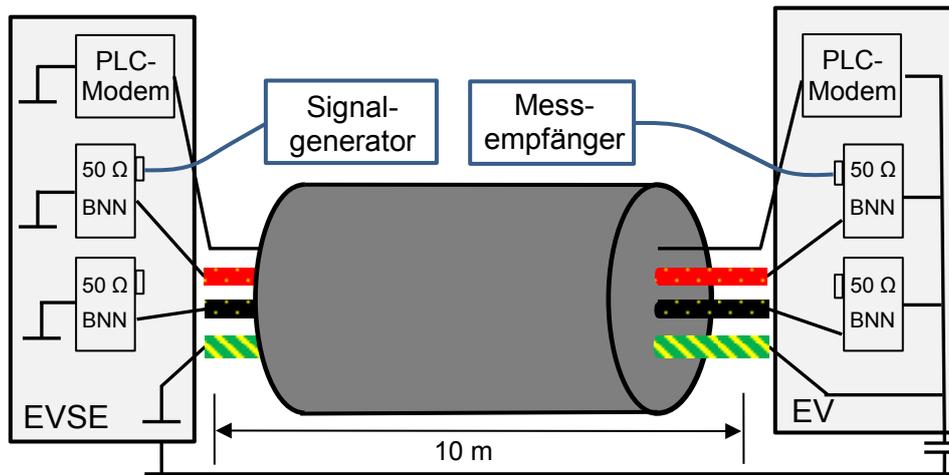
**Bild 9:** Diagramm Grenzwerte im Vergleich zu PSD

Der Grenzwert für die Störaussendung liegt damit bei  $5 \text{ MHz}$   $23 \text{ dB}$  über der PSD der PLC. Ein breitbandiges Störsignal mit  $3 \text{ dB}$  über der PSD ist nach den Ergebnissen aus Kapitel 2.2 akzeptabel. Die Dämpfung des PLC-Signals über ein  $10 \text{ m}$  langes Kabel beträgt im Durchschnitt  $6 \text{ dB}$ . Damit ergibt sich eine minimal erforderliche Entkopplung von  $26 \text{ dB}$  zwischen der PLC auf der CP-Leitung und den Leitungen von HV+ und HV-. Diese ist aber abhängig vom gewählten Ladekabel nach den Ergebnissen aus Kapitel 3.4 nicht in jedem Fall gegeben. Erschwerend kommt noch hinzu, dass bei den Überkopplungsmessungen nur das Ladekabel selbst betrachtet wurde und nicht die Verkabelung in der Ladestation oder im Fahrzeug. Die Entkopplung kann bei einem realen Ladevorgang daher noch geringer sein.

## 5 Verifikation anhand Messaufbau mit generischem Störer

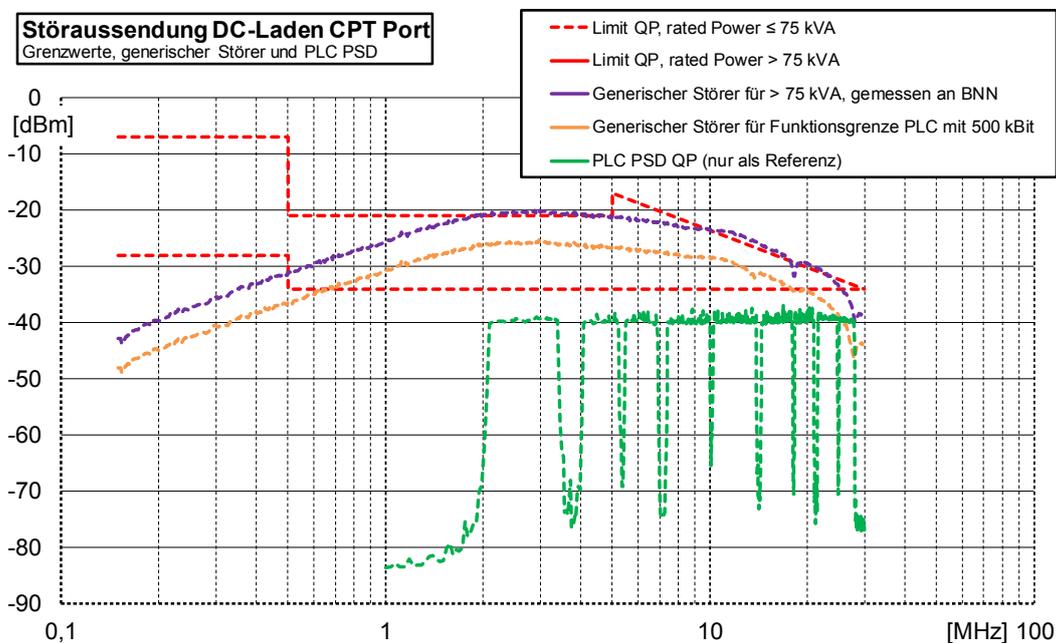
Zur Verifikation der Ergebnisse wurde ein Messaufbau mit einem  $10 \text{ m}$  langen DC-Ladekabel des Musters 2 gewählt. Das Kabelmuster 2 ist das am häufigsten eingesetzte Ladekabel bei den untersuchten Ladestationen und verfügt über eine Mindestentkopplung von  $22 \text{ dB}$  zwischen der CP-Leitung und den Hochvolt-Leitungen. Das Ladekabel wurde  $10 \text{ cm}$  über einer Masseplatte verlegt und beidseitig an HV+ und HV- mit einer Netznachbildung abgeschlossen. Auf beiden Seiten wurde ein PLC-Modem mit der CP-Leitung und der PE-Leitung verbunden, wobei das Modem auf EV-Seite isoliert und mit Batterie betrieben wurde. Mithilfe eines Signalgenerators wurde an der Netznachbildung

auf EVSE-Seite ein Störpegel angelegt und dieser auf EV-Seite mit einem Messempfänger gemessen. Das folgende Bild zeigt den beschriebenen Aufbau:



**Bild 10:** Messaufbau mit generischem Störer

Der Ausgangspegel des Generators wurde solange angepasst, bis der gemessene Störpegel auf der Gegenseite dem Verlauf des Grenzwertes nach IEC 61851-21-2 entsprach. In dieser Konfiguration war keine Power Line Communication möglich, was zum einen auf die mittlere Signaldämpfung von 5,7 dB über das 10 m lange Kabel zurückzuführen ist. Zum andern kann davon ausgegangen werden, dass die Entkopplung in einem realitätsnahen Aufbau geringer ist als die gemessenen 22 dB bei alleiniger Betrachtung des Ladekabels. Das folgende Bild zeigt ein Diagramm mit dem eingesetzten generischen Störer (violette Kurve).



**Bild 11:** Diagramm Störaussendung mit generischem Störer

Abschließend wurde der Störpegel des Generators reduziert, bis die Funktionsgrenze der PLC erreicht wurde. Der resultierende Störpegel ist ebenfalls im Diagramm dargestellt (orange Kurve).

## 6 Zusammenfassung

Breitbandige Störer nah am Grenzwert für DC-Ladestationen größer 75 kVA nach IEC 61851-21-2 sind kritisch für die Power Line Communication. Aktuell sind die Grenzwerte der genannten Norm noch nicht verbindlich, weshalb die Störaussendung bereits verfügbarer Ladestationen meist höher ist und damit ein echtes Gefährdungspotential für die PLC vorhanden ist. Oftmals ist derzeit trotzdem eine fehlerfreie Funktion möglich, da auch die PSD der PLC höher ist als die vorgeschriebenen  $-75\text{dBm/Hz}$ . Die höhere PSD kann allerdings zu Verletzungen der Störaussendungsgrenzwerte auf Netzseite oder im Fahrzeug führen, gerade auch weil von der PLC nach der North American Tone Mask auch Bänder genutzt werden, die je nach Fahrzeughersteller zu geschützten Frequenzbereichen zählen.

Die in den Analysen nicht betrachtete Überkopplung in der Ladestation und im Fahrzeug sowie mögliche Störaussendung des Fahrzeugs durch interne DC/DC-Wandler können die Verhältnisse noch weiter verschärfen. Zugleich können Mehrwertdienste über PLC, welche zwangsläufig die Datenrate erhöhen, die Störfestigkeit der Power Line Communication reduzieren.

Bei der Auslegung von DC-Ladestationen sollten die Grenzwert nach IEC 61851-21-2 nicht mit voller Bandbreite ausgereizt werden und es sollte stets auf eine gute Entkopplung zwischen HV+/HV- und CP geachtet werden, auch im Fahrzeug.

### Literaturangaben

- [1] IEC 61851-1: Electric vehicle conductive charging system – General requirements, Ed. 3, FDIS 2016
- [2] HomePlug Powerline Alliance, Inc.: HomePlug Green PHY Specification, Juli 2013
- [3] ISO 15118: Road vehicles - Vehicle to grid communication interface, 2015
- [4] IEC 61851-21-2: Electric vehicle conductive charging system – Electric vehicle requirements for conductive connection to an AC/DC supply - EMC requirements for off board electric vehicle charging systems, Ed. 1.0, FDIS 2017