

Störfestigkeitsanforderungen an die Auslegung der PLC-Schnittstelle für das konduktive Laden von Elektrofahrzeugen

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

1 Einleitung

Das konduktive Laden von Elektrofahrzeugen wird wegen der verfügbaren Ladeschnittstellen an den E-Fahrzeugen und der bereits aufgebauten Infrastruktur auf absehbare Zeit der Standard im Bereich der Ladetechnologien bleiben. Für das Laden mit Leistungen ab 22kW wird in der Regel Gleichstrom (DC) genutzt. Das DC-Laden ist in der Europäischen Union in der Spezifikation nach IEC 61851-1 [1] als Mode 4 über das Combined Charging System (CCS) Typ 2 definiert. Hierbei wird von der Ladestation über Gleichrichter eine vom Fahrzeug angeforderte Ladeleistung bereitgestellt. Dabei entstehen auf Grund der geschalteten hohen Spannungen und Ströme auch entsprechende große Störungen.

Für den Ladevorgang ist eine zweistufige, leitungsgebundene Kommunikation erforderlich, über die sicherheitsrelevante Parameter des Ladevorganges übertragen werden. Diese wird während des gesamten Ladevorganges aufrechterhalten. Schon eine Latenzzeitverletzung oder ein Verlust einer einzelnen Botschaft kann zum Ladeabbruch führen. Ein ausreichender Schutz dieser Kommunikation vor Störeinflüssen ist damit entscheidend für einen erfolgreichen DC-Ladevorgang. Die Störungen und die Kommunikationssignale laufen in den Ladeleitungen über Strecken von mehreren Metern parallel, was Verkopplungen verursachen kann.

2 Ladekommunikation mit Power Line Communication

In der Ladeschnittstelle zum Fahrzeug, dem Conductive Power Transfer Port (CPT Port), sind neben den Leitungen für den Ladestrom, DC+ und DC-, noch die Anschlüsse Control Pilot (CP), Proximity Pilot (PP) und der Schutzleiter (PE) definiert.

Die Ladekommunikation erfolgt auf CP mit Bezug zu PE. Die Low-Level-Kommunikation erfolgt mittels eines PWM-Signals. Die High-Level-Kommunikation wird über Power Line Communication (PLC) nach dem HomePlug Green PHY Standard (HPGP) realisiert.

Für die Übertragung der High-Level Kommunikation wird die HPGP North America Tone Mask genutzt. Damit stehen für die Datenübertragung 918 Träger im Frequenzband von 2 – 28 MHz zur Verfügung. Die Information wird mittels Orthogonalen Frequenzmultiplexverfahren übertragen. Die Bits sind mit dem Quadraturphasenumtastungsverfahren (QPSK) aufmoduliert. Die Daten werden redundant übertragen. Die Anzahl der Kopien ist von der Kanalqualität abhängig.

Für das PLC-Signal ist ein Maximalpegel, jedoch kein Minimalpegel definiert. Weiterhin ist die Länge des Signalweges nach [2] / [3] mit 10 m begrenzt. Wobei diese Begrenzung aufgrund der nicht definierten Einzelleitungslängen für Ladestation und Fahrzeug nur in Bezug auf die sichtbare Länge des Ladekabels angewandt wird.

Die Botschaften der Ladekommunikation sind als Frage-Antwort-Paar mit einer Latenzzeit festgelegt. Diese minimale Übertragungszeit liegt je nach Nachrichtentyp bei 200 ms für den SLAC-Prozess (Signal Level Attenuation Characterization) bzw. bei 250 ms für das Anwendungsprotokoll, das den Ladevorgang steuert.

Die genutzte Datenrate liegt derzeit bei maximal 500 kbps bei systemspezifisch realisierbaren Nettodatenraten zwischen 2,44 und 5,90 Mbps.

3 Parameter und Nachweis einer Kommunikationsbeeinflussung

3.1 Parameterbeschreibung

Einer der Gründe für eine mögliche Störung der Ladekommunikation liegt in der späten Definition des Grenzwertes für die Störaussendung beim DC-Laden. Die Norm IEC 61851-21-2 [3], in der dieser Grenzwert definiert ist, wurde zwar 2018 veröffentlicht, aber viele Ladestationen sind bereits vor der Normierung entwickelt und in den Markt gebracht. Daher sind derzeit viele bereits auf dem Markt befindliche Ladestationen ohne Überprüfung der leitungsgebundenen Störaussendung am CPT Port in Betrieb. Prinzipbedingt sind die Störpegel in den Ladestationen hoch und die Grenzwerte können nur mit kostenintensiven Zusatzmaßnahmen wie Filtern erreicht werden. Abhängig von der Leistung der Ladestation sind zwei Grenzwertvorgaben in [4] für Leistungen kleiner oder größer 75 kVA definiert.

Einzelne schmalbandige Störer sind in der Regel unkritisch für PLC. Durch die implementierte Redundanz und weitere implementierte Maßnahmen kann der Informationsverlust einzelner gestörter Träger ausgeglichen werden. Breitbandige Störer beeinflussen mehrere Träger und führen somit ab einer bestimmten Bandbreite des Störeintrages zu einer signifikanten Beeinflussung der Übertragung. In der Realität überlagern sich schmal- und breitbandige Störsignale aus der Ladestation und dem Fahrzeug am CPT Port.

Die DC-Ladekabel für alle üblichen Ladeleistungen sind nicht für die Datenübertragung optimiert. Oft enthalten sie mehrere potentielle Leitungen für die Nutzung als CP. Entsprechend des inneren Aufbaus und der Leitungslänge ergeben sich teilweise sehr geringe Entkopplungen zwischen den DC-Leitungen und den „Kommunikationsadern“ im Ladekabel. Die Entkopplung beträgt teilweise nur 10 dB breitbandig im PLC-Kommunikationsband. Weitere Verkopplungen können im Lader und im Fahrzeug selbst entstehen.

Beim Verbindungsaufbau wird zwischen Ladestation und Fahrzeug eine Dämpfungsmessung durchgeführt, der sogenannte SLAC-Prozess [2, 3]. Hier wird für die Trägerfrequenzen die entsprechende Dämpfung ermittelt. Diese Maßnahme dient aber nur der Ermittlung des Kommunikationspartners mit der geringsten Dämpfung für den Verbindungsaufbau. Neben der längenabhängigen Dämpfung weist die Signalübertragung entsprechend der Leitungslängen Resonanzen auf. Diese können signifikante Werte aufweisen. Diese Resonanzen entstehen, weil die Leitungen im Ladekabel in der Regel nicht auf eine bestimmte Impedanz ausgelegt sind und es an den Übergangstellen zu den PLC-Modems zu Fehlanpassungen kommt. Für die Kommunikationsstrecke anhand des SLAC eine maximale Dämpfung von 20 dB in [2, 3] vorgeschrieben. Die Implementationen im Feld bauen aber im Allgemeinen immer eine Verbindung zu der Gegenstelle mit der geringsten Dämpfung auf, auch wenn diese Vorgabe verletzt wird. Das kann zu geringen Empfangspegeln führen.

In [2, 3] sind weitere mögliche Pegelabsenkungen des PLC-Signals auf Anforderung sowohl vom Fahrzeug als auch von der Ladestation möglich. Die entsprechende Funktion ist optional, um mögliche nationale EMV-Vorgaben einzuhalten.

Damit ergeben sich folgende wesentliche Punkte für die potentielle Bedrohung der Ladekommunikation:

1. Nichteinhaltung der Grenzwerte für die Störaussendung am CPT Port,
2. keine ausreichende Entkopplung im Ladekabel und daraus resultierende Überkopplung der Störungen vom CPT Port auf CP/PE,
3. keine Festlegung der Dämpfung der Signalpegel der Ladekommunikation im Ladekabel,
4. niedrige Ausgangspegel für die Ladekommunikation.

Der kritische Punkt im Kommunikationskanal ist dabei der Empfangspegel in der Ladestation, da hier

1. die Störung durch die Ladestation am höchsten ist, weil sie noch nicht auf dem Weg zum Fahrzeug gedämpft wurde,
2. die Verkopplung am nahen Ende zwischen CPT Port und PLC-Signal am höchsten ist,
3. das Signal vom Fahrzeug über die Leitungslänge und Resonanzeinflüsse gedämpft ist.

Auch ohne Worst-Case-Annahmen kann ein Szenario entstehen, bei dem trotz Einhaltung der Störaussendungsgrenzwerte nach [4] am CPT-Port für größer 75 kVA, einer mittleren Entkopplung im Ladekabel von 20 dB über alle Träger und einem nominalen Sendepiegel des PLC-Signals von -75 dBm/Hz [2, 3] die PLC-Kommunikation nicht mehr fehlerfrei möglich ist. Dies kann mithilfe eines Laboraufbaus mit künstlich erzeugter und eingekoppelter Störung nachgewiesen werden [5].

Im Feld und bei Testreihen treten vereinzelt immer wieder Situationen auf, bei denen insbesondere beim Hochfahren der Stromrampe am Anfang des Ladevorganges Probleme auftreten. Ein Test im Feld ist hier schwierig, weil sich die Ladefehler oft nicht eindeutig zuordnen lassen und ein Auslesen der Kommunikation für eine Analyse nicht einfach möglich ist.

3.2 Messtechnischer Nachweis

Ladestationen, die eine Störaussendung aufweisen, die deutlich über dem Grenzwert liegt, weisen auch meist einen deutlichen Störeintrag auf den CP auf. Allerdings können auch Stationen, die formal grenzwertkonform sind, hier einen signifikanten Störeintrag haben. Eine ungünstige Platzierung in Bezug auf die Verkopplung oder eine schlechte Anbindung des Modems sowie eine geringe Entkopplung im Kabel können sich hier auswirken.

Bedingt durch die getaktete Arbeitsweise der Gleichrichter in den Ladern nehmen die Störpegel mit zunehmender Frequenz ab. Signifikante Störeinträge bei gemessenen Prüflingen liegen oft bis in den Bereich um 10 MHz vor. Damit können sich die Störungen bereits auf nahezu ein Drittel aller verfügbaren Trägerfrequenzen auswirken.

Dieses Verhalten ist exemplarisch in den folgenden Abbildungen dargestellt. Bild 1 zeigt die Störaussendung am CPT Port für eine Ladestation mit 350 kVA Nennleistung, Bild 2 die Pegel auf dem CP-Leiter mit und ohne Ladevorgang. Hier ist deutlich der Störeintrag durch den Ladevorgang zu erkennen. Das Verhalten im Frequenzbereich zwischen 2 und 10 MHz von Störung und übergekoppelten Störsignal korreliert gut.

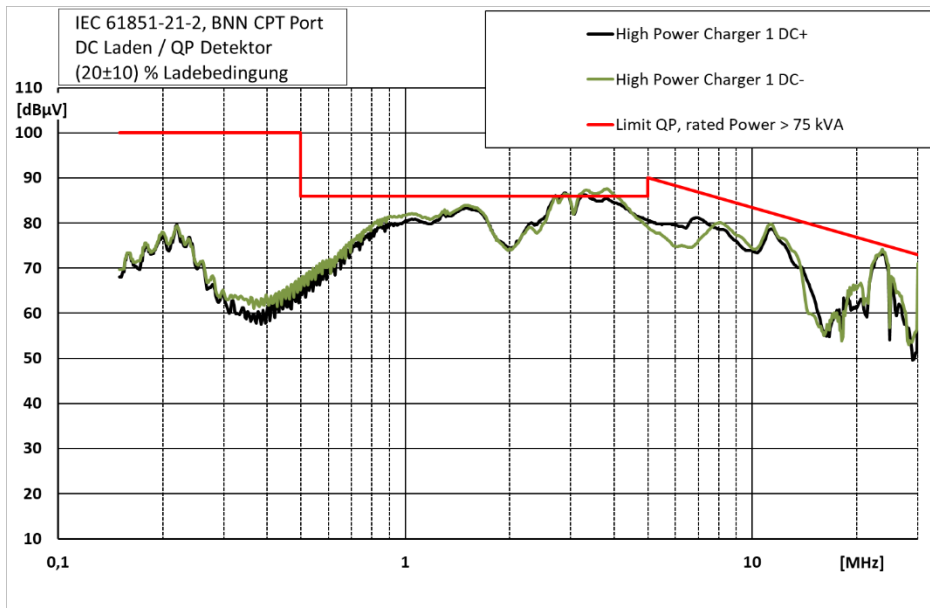


Bild 1:
Störaussendungs-
messung nach IEC
61851-21-2 am CPT
Port beim DC-
Ladevorgang mit
Lastbedingung
(20±10) % für einen
High Power Charger
mit einer
Nennleistung von
350 kVA

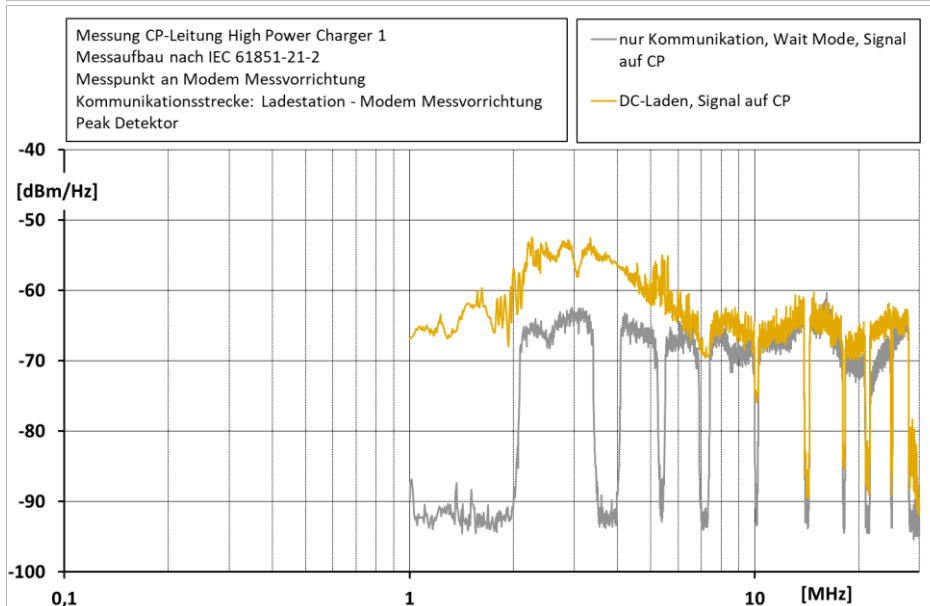


Bild 2:
Pegelmessung auf
dem CP beim
Ladevorgang mit
Lastbedingung
(20±10) % und nur
PLC-
Kommunikation für
einen High Power
Charger mit einer
Nennleistung von
350 kVA

4 Ermittlung der Funktionsgrenze der PLC-Ladekommunikation

Unter Störbeeinflussung kommt es bei der Ladekommunikation zuerst zu einer Zunahme der Übertragungszeit, dann zu Botschaftsverlusten und schließlich zum Linkabbruch. Dabei sind die Übergänge fließend und weisen einen geringen Abstand der notwendigen Störpegel auf.

Um eine bestimmte Datenrate mit der vorgegebenen Latenzzeit zu übertragen ist eine Mindestanzahl von ungestörten Trägern notwendig. Die Funktionsgrenze ergibt sich damit aus der Anzahl der Träger, die mindestens notwendig ist oder aus dem Störpegel, der breitbandig anliegen kann, ohne die Parameter der Ladekommunikation soweit zu verletzen, dass mit entsprechender Redundanz die Latenzzeitbedingung erfüllt bleibt. Aufgrund der beiden Zeitlimits aus dem Protokoll wurde die maximal erlaubte Latenzzeit für eine Botschaft über PLC auf 60 ms festgesetzt. Latenzzeiten größer 60 ms werden damit als Fehler betrachtet. Für die Kommunikation ergeben sich somit maximal 120 ms

für die Antworten im Protokoll auf dem Physical Layer. Für die höheren Protokollschichten des SLAC-Protokolls verbleiben 80 ms und für die des Anwendungsprotokolls 130 ms. Aus durchgeführten Messreihen ergibt sich, dass für die Übertragung der 500 kbps mit einer Latenz von 60 ms mindestens 400 ungestörte Träger notwendig sind. Der Störpegel für die Ausfallschwelle ist deutlich von der Anzahl der aktiven Träger abhängig. Damit wird bei einer Störung eines Teiles der aktiven Träger die verbleibende Ausfallschwelle der Übertragung signifikant abgesenkt.

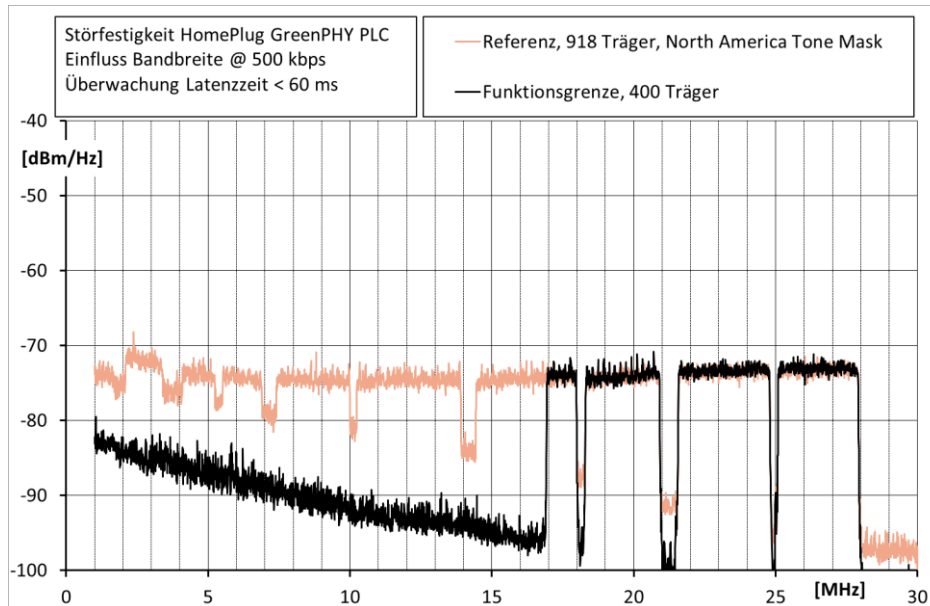


Bild 3:
Anzahl notwendiger Träger für die Funktionsgrenze der Ladekommunikation; 400 Träger, z.B. von 16,9 MHz – 28 MHz; Messung an einer reinen Kommunikationsstrecke ohne Ladefunktion

5 Mögliche Prüf- und Schutzmaßnahmen

Für einen verbesserten Schutz der Ladekommunikation sind folgende Maßnahmen möglich:

1. Anpassung des Grenzwertes für den CPT Port für Leistungen >75 kVA:
Die Grenzwerte am CPT Port sind bei steigenden Ladeleistungen nur mit hohem Aufwand erreichbar, eine weitere Verschärfung ist hier in der internationalen Normung nicht zu erwarten.
2. Vorgabe und Prüfung einer Mindestentkopplung zwischen den Ladestromleitungen DC+ / DC- und den PLC-Leitungen CP / PE:
Die Bestimmung der Entkopplung für den gesamten Messaufbau z.B. nach [4] ist messtechnisch anspruchsvoll und abhängig von den realen Impedanzen im System, die sich von denen der 50-Ω-Messtechnik unterscheiden.
3. Einführung eines Grenzwertes für die CP-Leitung und eines Messverfahrens zum Nachweis:
Für den CP ist nach aktuellem Normenstand keine EMV-Messung vorgesehen. Am CPT Port erfolgt die Messung nur an den Leitungen zur Leistungsübertragung ([4], Clause 6.3.3.).
Bei einer Nutzung des Messaufbaus für die leitungsgebundene Störaussendung nach [4] ergeben sich jedoch einige Vorteile für die Umsetzung eines Messverfahrens. Damit kann der Nachweis für den CP mit einem vorhandenen Aufbau durchgeführt werden, was den zusätzlichen Aufwand gering hält.

6 Vorschlag Messverfahren

Die Messung muss während des Ladevorganges erfolgen, um das Störlevel zu bestimmen. Die Lastbedingung, 20 % oder 80 %, sollte sich aus dem Worst Case der Störaussendungsmessungen ableiten.

Der optimale Messpunkt für die Ermittlung des übergekoppelten Störpegels auf CP liegt wie bereits in Abschnitt 3.1 dargelegt in der Ladestation. Eine Messung ist aber hier nicht ohne erheblichen Aufwand möglich. Es müsste in der Ladestation auf dem Modem oder einem vergleichbaren Auskoppelpunkt ein Messabgriff vorhanden sein, der auch bei geschlossener Station eine Messung ermöglicht.

Bei Nutzung eines Messpunktes am Koppelnetzwerk für den Aufbau nach [4], Bild 4, erfolgt die Prüfung an dem Punkt der Ladestrecke, an welchem die Störpegel nach [4] definiert sind. Im Prüfaufbau, Bild 4, ist für den CPT Port neben den HV-Bordnetznachbildungen (5) für die Messung der Störaussendung auch eine Abschlussimpedanz (4) für die Kommunikationsstrecke, in dem Fall CP, vorgesehen. Der Kommunikationssimulator als Gegenstelle (6) kann sich direkt mit an 4 befinden, oder abgesetzt sein.

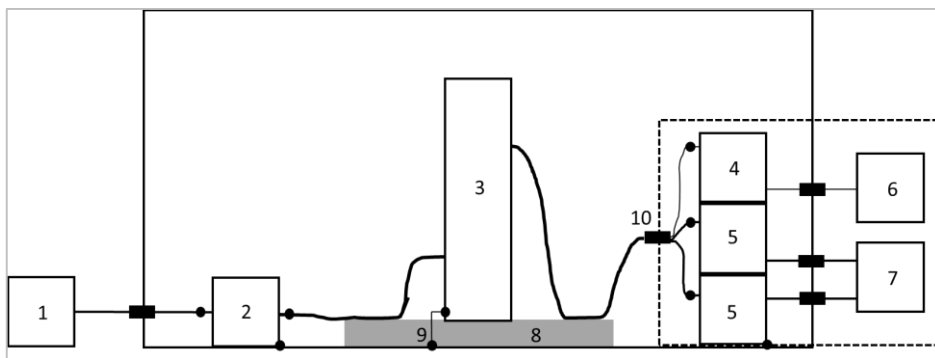


Bild 4:
Vereinfachte
Darstellung des
Beispiels für einen
Messaufbau in einer
geschirmten Kabine
nach [4], Messung
Störpegel auf CP an
4

- | | |
|---------------------------------------|--|
| 1 Versorgung für DUT | 6 Kommunikationssimulator |
| 2 Netznachbildung für Versorgung | 7 Last |
| 3 Prüfling (DUT), Ladestation | 8 Isolation, 10 cm |
| 4 Abschluss für Kommunikationsstrecke | 9 Masseverbindung |
| 5 HV-Bordnetznachbildung | 10 Conductive Power Transfer
Port (Ladestecker) |

Ein Messabgriff der PLC-Pegel auf der Kommunikationsstrecke sollte hochohmig erfolgen, um die Signalpegel auf CP nicht zu beeinflussen.

Bei einer Überprüfung des Störeinflusses sind die Pegelunterschiede zwischen Rauschen in den Notches, die nach der North America Tone Map vorgeschrieben sind, und dem Signal ein guter Indikator. In Bild 5 ist eine Messung des CP Signales beim Ladevorgang für einen DC-Lader mit geringer Störüberkopplung zu sehen. Die Notches zeigen einen deutlichen Unterschied zum Signal. Die Resonanzbildung entsteht durch die Leitungslänge der Kommunikationsstrecke. Aus der Messung lässt sich abschätzen, dass der Störpegel auf CP im Vergleich zum Signal gering ist.

Für eine sichere Bewertung ist jedoch eine durchgehende Messung der Störung ohne überlagerte Kommunikation im gesamten Frequenzbereich notwendig. Da die Kommunikation für den Ladeprozess zwingend erforderlich ist, kann sie für die Messung nicht vollständig unterbunden werden. Die PLC-Pegel müssen aber soweit abgesenkt werden, dass ein durchgehender Nachweis des Störpegels möglich ist.

Die Messung erfolgt durch eine Absenkung des Signalpegels in Teilen des Kommunikationsbandes der Messung des Störpegels im Bereich ohne Kommunikation

und der anschließenden Zusammenführung der Ergebnisse. Damit ist eine durchgehende Bewertung im Kommunikationsband möglich.

Dies lässt sich mit verschiedenen Methoden umsetzen. Eine Variante können auswählbare softwarebasierte Testmodi in den Ladestationen sein. Eine Umsetzung im laufenden Betrieb über HPGP-Managementnachrichten ist auch möglich.

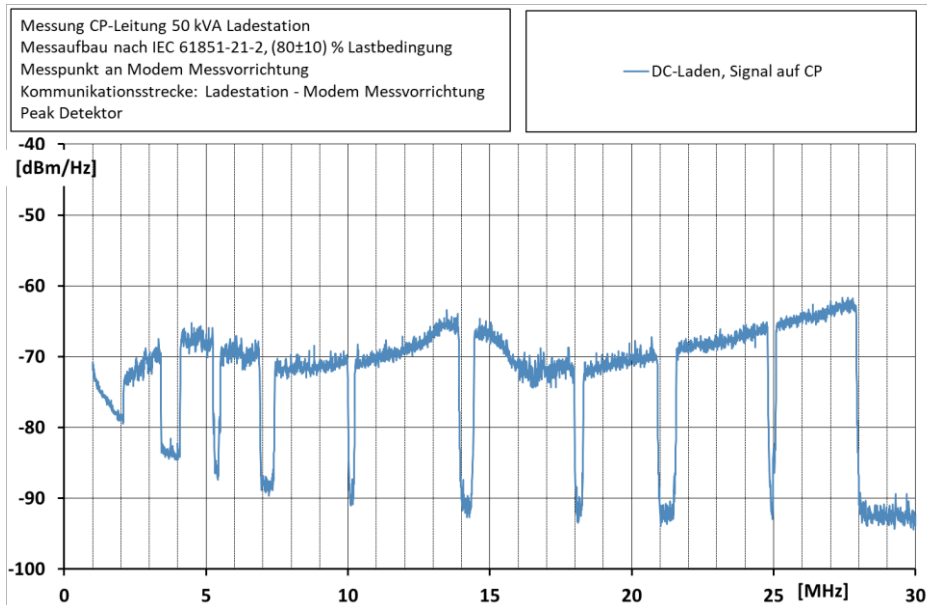


Bild 5:
 Pegelmessung auf dem CP beim Ladevorgang mit Lastbedingung (80±10) % für einen Lader mit einer Nennleistung von 50 kVA

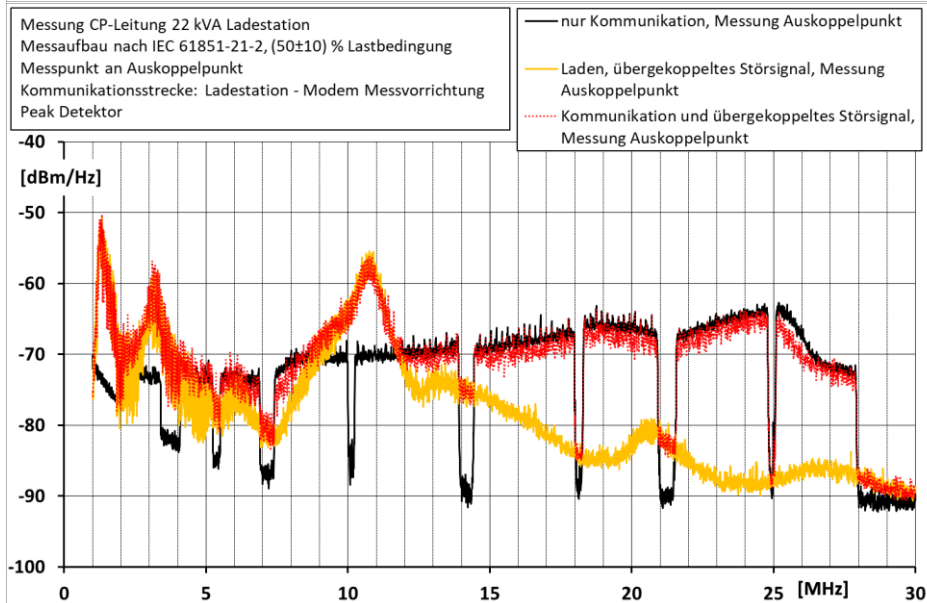


Bild 6:
 Pegelmessung auf dem CP bei Ladevorgang (rot) und nur PLC-Kommunikation im Wait Mode (schwarz) und der ermittelte übergekoppelte Störpegel (gelb)

In Bild 6 ist das beschriebene Vorgehen anhand von drei Messkurven für einen bestimmten Lader mit 22 kVA dargestellt. Die Messung von Kommunikationspegel und übergekoppelter Störung (rote Kurve) auf CP wurde durchgeführt. Die Kommunikation ohne geschalteten Ladestrom im Wait Mode, Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation, aber keine Ladefunktion aktiv, ist zum Vergleich mit dargestellt (schwarze Kurve). Gut ist zu erkennen, dass der Störpegel in einigen Frequenzbereichen die Kommunikationspegel zum Teil signifikant überschreitet. Mit der beschriebenen Möglichkeit wurde zusätzlich der reine Störpegel (gelbe Kurve) ermittelt. Aus den abgesenkten Teilbereichen lässt sich für diesen Prüfling ableiten, dass die Ladekommunikation im Frequenzbereich bis 12 MHz von den übergekoppelten Störungen signifikant beeinflusst wird. In diesem Testfall sind zur Aufrechterhaltung der Ladefunktion

für die Messungen im Frequenzbereich oberhalb von 10 MHz beim Ausblenden immer mindestens 750 verbleibende aktive Träger notwendig. Das bedeutet, dass im Bereich von 2 MHz – 12 MHz von den dort vorhandenen 353 Trägern ein Großteil gestört ist, denn es müssen zusätzlich dazu 400 weitere Träger in anderen Frequenzbereichen aktiv sein. Wird die Anzahl der aktiven Träger durch Ausschalten reduziert, bricht der Ladevorgang beim Hochlaufen der Stromrampe am Anfang des Ladevorganges ab. Für eine Messung des Störpegels im unteren Frequenzbereich mit einem Ausblenden der Träger für $f < 12$ MHz sind signifikant weniger aktive Träger notwendig, um die Ladefunktion zu realisieren. Was zu den Erkenntnissen aus anderen Messungen passt, in denen die Anzahl der notwendigen ungestörten Träger mit 400 ermittelt wurde. Für eine ungestörte Kommunikation wie in Bild 5 sind 3 Messungen für das ganze Kommunikationsband notwendig.

Ein Vergleich zwischen dem Störpegel an der Ausfallschwelle und den zugehörigen Signalpegeln ist in [5] zu finden. Eine Grenzwertkurve für den CP muss unterhalb der Kommunikationspegel liegen. Die Dämpfung auf dem Pfad bis zum Modem ist für die üblichen Leitungslängen an den Ladestationen zwischen 4 m und 8 m und muss auf den Grenzwert aufgeschlagen werden, da die Messung für die Stör- und die Kommunikationspegel am CPT Port erfolgt. Die Kommunikationspegel werden auf dem Weg zur Station noch gedämpft, die Störung können durch die Leitungen auf dem Weg zum CPT Port ebenfalls geringer sein als am Ausgang der Ladestation. Für einen fundiert abgesicherten Vorschlag sind noch weitere Untersuchungen notwendig.

7 Zusammenfassung

Die Ladekommunikation ist aufgrund hoher Störpegel und fehlender normativer Vorgaben zu Entkopplung und Dämpfung nicht immer ausreichend geschützt. Ladeabbrüche können durch Kommunikationsfehler verursacht werden.

Eine Methode zur Messung des übergekoppelten Störpegels zur Bewertung des ausreichenden Schutzes der PLC-Kommunikation auf dem CP als mögliche Ergänzung zur IEC 61851-21-2 Ed.2 wurde vorgestellt.

Literatur

- [1] IEC 61851-1:2017: Electric vehicle conductive charging system – General requirements, Ed. 3, IEC, 2017
- [2] ISO 15118: Road vehicles - Vehicle to grid communication interface, ISO, 2015
- [3] DIN SPEC 70121:2014-12, Elektromobilität – Digitale Kommunikation zwischen einer Gleichstrom-Ladestation und einem Elektrofahrzeug zur Regelung der Gleichstromladung im Verbund-Ladesystem, DIN e.V., 2014
- [4] IEC 61851-21-2:2018, Electric vehicle conductive charging system – Part 21-2: Electric vehicle requirements for conductive connection to an AC/DC supply – EMC requirements for off-board electric vehicle charging systems, IEC, 2018
- [5] Opp, T.: Störfestigkeitsanalyse der Power Line Communication für das konduktive Laden von Elektrofahrzeugen, Tagungsband EMV2018, mesago, 2018