

Applikationshinweis für DC-SPDs innerhalb von DC-Schnell-Ladesystemen

Florian Grumm*, Maximilian Schifferdecker, Detlef Schulz
 Professur für Elektrische Energiesysteme
 Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr
 Hamburg, Deutschland
 *florian.grumm@hsu-hh.de

Ralph Brocke*, Thomas Böhm
 DEHN SE
 Neumarkt i.d.OPf., Deutschland
 *ralph.brocke@dehn.de

Kurzfassung – Dieser Applikationshinweis beschreibt die Gefahr, die bei unzureichender Überstrom-Absicherung von DC-SPDs in DC-Schnell-Ladesystemen besteht. DC-Schnell-Ladesysteme verbinden sich direkt mit der Traktionsbatterie eines elektrischen Kraftfahrzeuges. Tritt ein niederohmiger Kurzschluss des DC-SPD's auf, speist die Traktionsbatterie den entstehenden Kurzschlussstrom. Aufgrund der hohen Kurzschlussströme von Traktionsbatterien im Kiloampere - Bereich entsteht bei unzureichender Überstrom-Absicherung des DC-SPD's eine Brandgefahr innerhalb des DC-Schnell-Ladesystems. In diesem Beitrag werden zwei Maßnahmen zur Überstrom-Absicherung der DC-SPDs vorgestellt, um die Brandgefahr zu vermeiden.

Stichworte – Überspannungsschutz, DC-Schnell-Ladesystem, High Power Charger, Kurzschlusschutz, DC-SPD

NOMENKLATUR

BEV	Elektrofahrzeug (engl. battery electric vehicles)
CP	Ladepunkt (engl. charge point)
HPC	DC-Schnell-Ladesystem (engl. high power charger)
HV	Hochvolt (engl. high voltage)
SPD	Überspannungsschutzgerät (engl. surge protective device)
PE	Schutzleiter (engl. protective earth)
L1	Erster Außenleiter Wechselspannung
L2	Zweiter Außenleiter Wechselspannung
L3	Dritter Außenleiter Wechselspannung
DC+	Positiver Außenleiter Gleichspannung
DC-	Negativer Außenleiter Gleichspannung
MOV	Metalloxid-Varistoren (engl. metal oxide varistor)
GDT	Gasentladungsableiter (engl. gas discharge tube)
U_p in V	Spannungsschutzpegel: maximaler Wert, auf den das SPD die Überspannung begrenzt

U_{1mA} in V	mA-Punkt Varistor: Nennspannung des Varistors bei definiertem Strom von 1 mA
EOL	Lebensdauerende (engl. end-of-life)

I. EINLEITUNG

Kraftfahrzeuge mit elektrischem Antrieb fahren emissionsfrei, daher sind sie für die Umwelt von Vorteil und werden von der Bundesregierung gefördert. Prognosen erwarten zwischen 7,4 und 19,4 Millionen Elektrofahrzeuge (BEV engl. battery electric vehicles) bis 2030, realistische Schätzungen erwarten 10 Millionen [1]. Für die BEV werden Ladepunkte (CP: engl. charge point) benötigt. Daher ist das Ziel der Bundesregierung 1 Million öffentliche Ladepunkte zu schaffen [2]. Dieses Ziel ist im Einklang mit der europäischen Richtlinie 2014/94/EU, die ein Verhältnis von einem CP für je zehn BEVs vorsieht [3].

Um das Nachladen der Traktionsbatterien (engl. battery) zu verkürzen, wurden DC-Schnell-Ladesysteme (HPC: engl. high power charger) entwickelt, die den AC/DC-Wandler im Fahrzeug (engl. onboard charger) übergehen. Die ABBILDUNG 1 und 2 zeigen den Unterschied: Die AC/DC-Wandler von HPC-Systemen besitzen eine höhere Ladeleistung als die AC/DC-Wandler im Fahrzeug und verbinden sich galvanisch mit dem Hochvolt-Bereich der Traktionsbatterie, siehe orange Verbindungen in ABBILDUNG 2.

Mit „hochvolt“ (HV) werden bei Elektrofahrzeugen Gleichspannungen im Bereich von über 60 V bis 1500 V bezeichnet [4]. Die typischen HV-Systeme für die Traktionsbatterien sind die Spannungsebenen 400 V und 800 V.

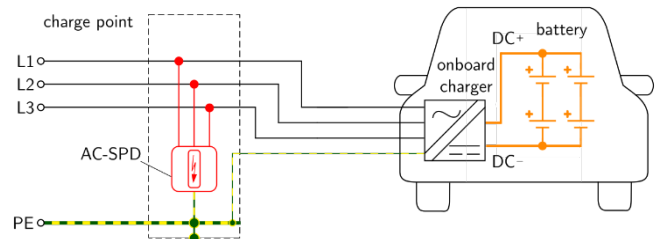


ABBILDUNG 1: AC CHARGE POINT FÜR DAS LADEN MIT DEM ONBOARD CHARGER.

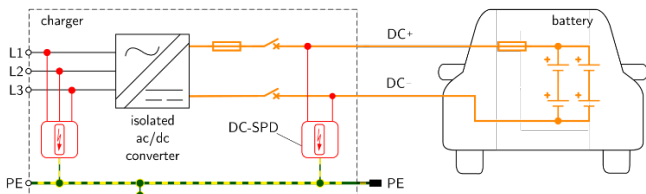


ABBILDUNG 2: HPC-SYSTEM FÜR DAS LADEN MIT HOHER LEISTUNG; DC-SPD BEFINDET SICH ZWISCHEN AC/DC-WANDLER UND TRAKTIONSBATTERIE.

Überspannungs-Schutzeinrichtungen (SPDs: engl. surge protective devices) dienen dem Schutz elektrischer Anlagen bei transienten Überspannungen infolge atmosphärischer Einflüsse, die über das Stromversorgungsnetz übertragen werden, inklusive direkter Blitzeinschläge in das Versorgungssystem und bei transienten Überspannungen infolge von Schaltvorgängen.

Entsprechend IEC 60364-5-53 Abschnitt 534 / DIN VDE 0100-534 dienen SPDs der Spannungsbegrenzung, um die Isolationskoordination der nachgeordneten elektrischen Anlagen und Betriebsmittel (z.B. der AC/DC-Wandler) sicherzustellen. Somit gewährleisten SPDs den Schutz bei transienten Überspannungen zwischen den aktiven Leitern und gegen Erde.

Bei Gleichstromladestationen für Elektrofahrzeuge ist entsprechend IEC 61851-23 [5] jede Versorgungs- und Kommunikationsleitung gegen Blitz- oder Schaltüberspannungen zu schützen. DC-SPDs für lineare Quellen werden zukünftig nach der Norm IEC 61643-41 [6] geprüft. Diese wird gerade erarbeitet und soll Ende 2024 veröffentlicht werden.

Da die meisten öffentlichen HPC-Systeme Bestandteile von Gebäuden oder Verkehrsinfrastrukturen wie Parkplätzen oder Tankstellen sind, sind außerdem die Blitzschutznormen der Reihe IEC 62305 zu beachten. SPDs sollten demnach auf der AC- und DC-Seite installiert sein, wie es in ABBILDUNG 1 und 2 dargestellt ist.

Die installierten SPDs begrenzen transiente Überspannungen in Folge von Blitzströmen zwischen der Schutzterde PE und den aktiven Leitern L1, L2 und L3 bzw. DC+ und DC-. Gleichzeitig wird die Isolationsspannung des AC/DC-Wandlers eingehalten, durch das Ansprechen des AC-SPD's und des DC-SPD's.

II. DC-SPDS FÜR HPC-SYSTEME

Die SPDs für AC-Systeme sind nach bekannten VDE-Richtlinien für Niederspannungsanlagen auslegbar. Daher werden diese Systeme aus der Betrachtung ausgenommen. Der Fokus liegt auf externen HPC-Systemen nach ABBILDUNG 2, deren DC-SPD sich während eines Ladevorgangs zwischen dem Ausgang des AC/DC-Wandlers und der Traktionsbatterie des Fahrzeuges befindet.

Üblicherweise werden in DC-SPDs Metalloxid-Varistoren (MOV: engl. metal oxide varistor) mit Gasentladungsableitern (GDT: engl. gas discharge tube) kombiniert; es können auch nur MOVs verwendet werden. ABBILDUNG 3 zeigt die typischen Konfigurationen von MOV und GDT in DC-SPDs für HPC [7].

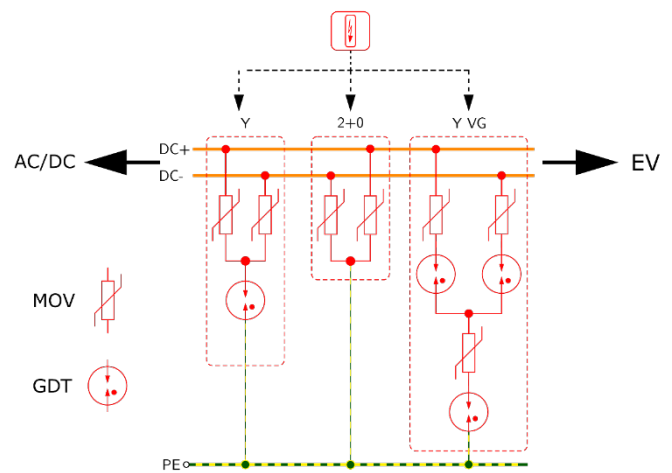


ABBILDUNG 3: SCHALTUNGS-KONFIGURATIONEN VON DC-SPDS FÜR HPC.

- Die Y-Konfiguration (ABBILDUNG 3 links) besteht aus zwei MOVs und einer GDT. Der Vorteil dieser Konfiguration ist der niedrigere Spannungsschutzpegel U_p , der vor allem durch die unterschiedlichen parasitären Kapazitäten von GDT und MOV beeinflusst wird. Die parasitäre Kapazität einer GDT mit mehreren pF ist wesentlich geringer als die eines MOV mit mehreren nF. Die kleinere Kapazität der GDT bewirkt ein schnelleres Ansprechen (über der GDT bricht die Spannung zusammen) im Vergleich zu einer Konfiguration mit drei MOVs. Dies führt zu einem niedrigeren U_p , da die MOVs die Spannung nur dann begrenzen, wenn die GDT aktiv ist. Zusätzlich erzeugt eine GDT eine galvanische Trennung zwischen DC+/DC- und Masse, welche durch MOVs nicht gegeben ist.
- Die 2+0-Konfiguration (ABBILDUNG 3 Mitte) besitzt keine galvanische Isolierung gegen PE und über den MOVs fällt im Betrieb die volle Betriebsspannung ab. Dafür ist der Platzbedarf bei dieser Konfiguration geringer und der Aufbau ist einfacher. Dennoch hat die Schaltung Nachteile für die Anwendung innerhalb von HPC, da die Belastung der MOVs mit der dauerhaft anliegenden Betriebsspannung die Lebensdauer reduzieren kann. Um eine entsprechende Ausfallsicherheit zu erreichen, muss die Bemessungsspannung der MOVs (U_{1mA}) vergleichsweise hoch ausgelegt werden, was zu einem hohen Schutzpegel U_p führt, oder als Reihenschaltung mit einem galvanisch isolierenden Element (z.B. Funkenstrecke) ausgeführt werden.
- Die Y-VG-Konfiguration (ABBILDUNG 3 rechts) kombiniert die Vorteile der galvanischen Isolierung und des modularen Aufbaus miteinander. Zusätzlich löschen die MOVs den Strom der GDT, wenn die Spannung über dem MOV sinkt. Es entsteht kein Folgestrom nach einem Ansprechen des SPD's. Der Nachteil dieser Konfiguration gegenüber der Y-Konfiguration ist, dass der Schutzpegel U_p durch die zusätzlichen GDTs und den zusätzlichen MOV höher ist.

III. GEFAHREN DURCH EINEN NIEDEROHMIGEN BETRIEBSZUSTAND AM EOL VON DC-SPDS

Allen SPD-Konfigurationen gemeinsam ist, dass die Komponenten (MOV, GDT) durch den Ableitvorgang altern, wenn sie Überspannungen begrenzen. Durch das Altern der Komponenten kann am Lebensdauerende (EOL: engl. end-of-life) ein niederohmiger Betriebszustand auftreten. Weitere Gründe für die Alterung sind [8], [9], [10]:

- Überschreiten des ausgewiesenen Nennableitstoßstroms;
- Überschreiten der geprüften Dauer der Überspannungsimpulse (energiereiche Impulse);
- Häufigkeit der Überspannungsimpulse;
- Überschreiten der höchsten Dauerspannung im laufenden Betrieb.

Sinkt die Bemessungsspannung durch die genannten Belastungen allmählich ab, trennt eine thermische Abtrennvorrichtung im SPD die betroffenen Bauteile ab. Die Leistungsfähigkeit dieser Abtrennvorrichtungen ist jedoch bei hohen DC-Spannungen sehr begrenzt und beträgt i.a. nur einige wenige Ampere [10]. Zum Schutz vor Kurzschlussströmen im Kiloampere-Bereich sind die thermischen Abtrennvorrichtungen ungeeignet.

Werden die Bauteile im SPD am EOL sehr niederohmig, kann ein Kurzschluss zwischen den aktiven Leitern DC+ und DC- auftreten, siehe ABBILDUNG 4. Die zukünftige Produktnorm IEC 61643-41 [6] für SPDs in DC-Anwendungen fordert deshalb einen entsprechenden Kurzschluss- bzw. Überstromschutz.

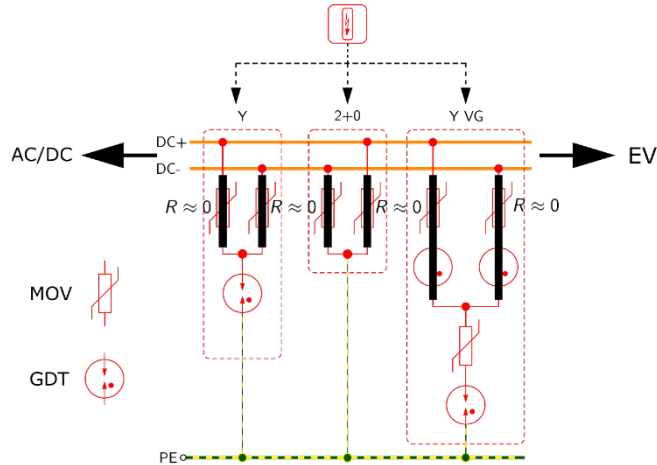


ABBILDUNG 4: KURZSCHLUSS ZWISCHEN DEN POLEN DC+ UND DC- AM LEBENSDAUERENDE VON SPD-KOMPONENTEN.

Wie die ABBILDUNG 5 zeigt, entsteht ein Kurzschlussstrom durch den SPD; im Worst-Case-Szenario speist sich dieser Kurzschlussstrom aus dem Batteriestrom und dem Strom des AC/DC-Wandlers.

ABBILDUNG 6 zeigt die Simulationsergebnisse aus [7] der auftretenden Ströme für die typischen Spannungsebenen und zwei Kapazitäten der Traktionsbatterie.

Es ist ersichtlich, dass der Kurzschlussstrom durch den DC-SPD in diesen Beispielen zwischen 5 und 18 kA beträgt (in [11] wird ein Kurzschlussstrom von mehr als 20 kA angenommen).

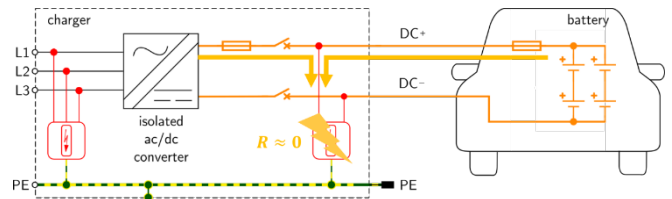
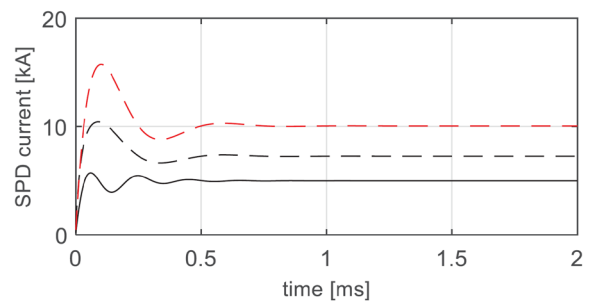
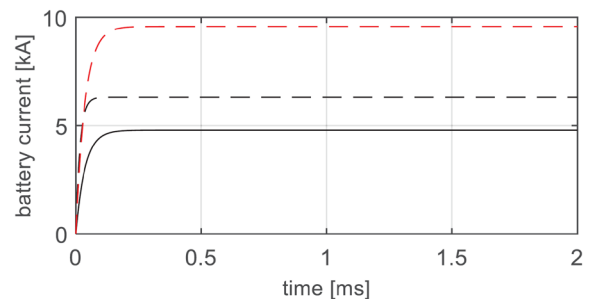
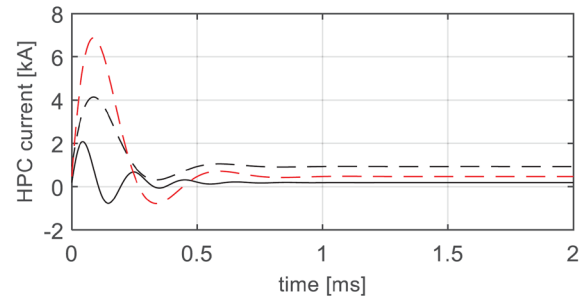


ABBILDUNG 5: KURZSCHLUSSSTROM DURCH DEN SPD BEI EINEM AUSFALL AM LEBENSDAUERENDE.



—	400 V 20 kWh 50 kW
- - -	400 V 125 kWh 250 kW
- - -	800 V 125 kWh 250 kW

ABBILDUNG 6: SIMULATIONSERGEBNISSE DER STRÖME FÜR UNTERSCHIEDLICHE TRAKTIONSBATTERIEN AUS [7].

Die folgenden Faktoren beeinflussen den Kurzschlussstrom durch den DC-SPD:

- Kapazität der Traktionsbatterie;
- Spannung des HV-Systems im Fahrzeug;
- Ausgangskapazität des AC/DC-Wandlers.

Für den DC-SPD-Kurzschluss aus ABBILDUNG 5 ergibt sich, dass sowohl die Schmelzsicherung im Fahrzeug als auch die Schmelzsicherung am Ausgang des AC/DC-Wandlers des HPC-Systems auslösen kann. Für diesen Kurzschlussfall ergeben sich grundsätzlich folgende Beeinträchtigungen:

- Erstens wird ein Austausch der Schmelzsicherung im Fahrzeug notwendig und die Ladung des Fahrzeuges ist eingeschränkt oder unmöglich. Es kann sogar an der Ladesäule liegen bleiben.
- Zweitens besteht die Gefahr eines Brandes, wenn die Schmelzsicherung des Fahrzeuges nicht auf das DC-SPD abgestimmt ist: Durch den hohen Kurzschlussstrom im Kiloampere-Bereich wird thermische Energie innerhalb des DC-SPD's durch Kontakt-, Übergangs- und Restwiderstandswiderstände der beschädigten Bauteile freigesetzt. Da die Widerstandsfähigkeit gegenüber dieser thermischen Energie eines DC-SPD's begrenzt ist, können hohe Temperaturen entstehen, die zu einem Schmelzen bzw. Brennen des SPD-Gehäuses führen.

Da die Systeme HPC und Fahrzeug unabhängig voneinander konzipiert werden, ist es unwahrscheinlich, dass die Schmelzsicherungen des Fahrzeuges auf das DC-SPD abgestimmt sind, eine Brandgefahr ist deshalb als sehr hoch einzuschätzen.

IV. BEISPIEL AUS DER PRAXIS FÜR EIN MANGELHAFTES DC-SPD-DESIGN

Die ABBILDUNG 7 zeigt die Installation der DC-SPDs am DC-Ausgang in einem HPC mit zwei Ports und einer Ladeleistung von 360 kW. Es ist zu erkennen, dass die DC-SPDs keine separaten Überstrom-Schutzeinrichtungen besitzen.

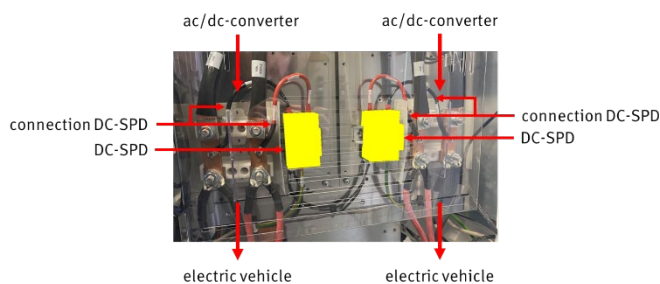


ABBILDUNG 7: INSTALLATION VON DC-SPDs IN EINEM HPC.

Zusätzlich ist der Querschnitt der Anschlussleitungen (connection DC-SPD) für den erwartbaren Kurzschlussstrom von einigen Kiloampere zu gering bemessen. Ohne separate Schutzeinrichtung sollte der Querschnitt des SPD-Anschlusses dem Querschnitt der DC-Leiter zum Fahrzeug entsprechen, da sonst eine zusätzliche Brandgefahr besteht.

In diesem Beispiel ist die Brandgefahr bei einem Kurzschluss des DC-SPD's innerhalb des HPC gegeben. Daher sollte hier eine separate Überstrom-Schutzeinrichtung, die auf den DC-SPD abgestimmt ist, installiert werden.

V. MAßNAHMEN ZUR ABSICHERUNG VON DC-SPDs IN HPCs

Die effektivste Maßnahme zum Schutz vor Brand und Beschädigung des Fahrzeuges ist eine separate Überstrom-Schutzeinrichtung zu installieren, die auf das DC-SPD abgestimmt ist und die das Ableitvermögen des DC-SPD's nicht unzulässig verringert.

Relevant für die Beurteilung der Schutzeinrichtung ist, dass die Durchlassenergie der Schutzeinrichtung geringer ist als die maximale thermische Energie, die das DC-SPD ableiten kann. Gleichzeitig gilt es zu beachten, dass der durch

eine Überspannung hervorgerufene Stoßstrom durch die Schutzeinrichtung fließt und diese nicht auslösen darf.

A. Absicherung mit einer Schmelzsicherung

Der Schutz des DC-SPD's kann durch eine separate Schmelzsicherung erfolgen, die in Reihe zum SPD geschaltet ist, wie es die ABBILDUNG 8 zeigt. Jedoch muss die Sicherung die Impulsströme aushalten. Der Nachteil dieses Schutzes ist, dass die Sicherung zusätzlichen Bauraum innerhalb der Ladesäule benötigt.

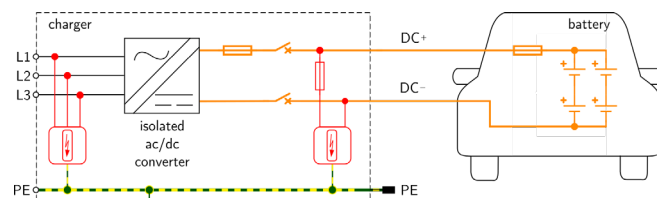


ABBILDUNG 8: MAßNAHME GEGEN BRAND UND BESCHÄDIGUNG DES FAHRZEUGES: INSTALLATION EINER SCHMELZSICHERUNG IN REIHE ZUM DC-SPD.

B. Absicherung mittels einer Abschalt-Funkenstrecke

Alternativ kann ein DC-SPD mit einer integrierten Überstromschutzeinrichtung auf Basis einer Abschalt-Funkenstrecke geschützt werden. Diese zusätzliche Abschalt-Funkenstrecke wird durch eine Triggerschaltung gezündet, um die Schutzwirkung des DC-SPD's nicht oder nur geringfügig zu verändern. Die Überspannungsschutzwirkung des SPD's bleibt erhalten, wird aber um einen wirksamen Kurzschlusschutz erweitert.

Sollte das DC-SPD infolge seines EOL in einen niederohmigen, kurzgeschlossenen Zustand übergehen und es tritt ein weiteres Überspannungereignis auf, zündet die Abschalt-Funkenstrecke. Der Lichtbogen in der Funkenstrecke wird über spezielle Elektroden schnell in die Löschkammer geführt. Damit steigt die Lichtbogenspannung an und der Kurzschlussstrom wird begrenzt und nach sehr kurzer Zeit gelöscht. Gleichzeitig wird die Abschalt-Funkenstrecke von einer Defekterkennung deaktiviert, dies trennt das DC-SPD von den Leitern. Ebenfalls kann eine Defektanzeige, bzw. eine Status-Fernmeldung erfolgen. Somit hat die Abschalt-Funkenstrecke die gleiche Schutzfunktion wie eine Schmelzsicherung.

Ein weiterer wichtiger Vorteil dieses Aufbaus ist, dass er im Vergleich zu einer geeigneten Schmelzsicherung einen wesentlich geringeren Bauraum benötigt als die Schmelzsicherung aus ABBILDUNG 8. Die geringeren Durchlassströme Absicherung mittels einer Abschalt-Funkenstrecke ermöglichen eine bessere Koordination mit den vorhandenen Schutzeinrichtungen im BEV bzw. im HPC.

VI. ZUSAMMENFASSUNG

Damit Elektrofahrzeuge eine Alternative zu Fahrzeugen mit fossilen Kraftstoffen sind, sollte die Traktionsbatterie innerhalb von ca. 15 min auf 80 % geladen werden. Dafür sind DC-Schnell-Ladesysteme notwendig mit einer Ausgangsleistung von mehreren 100 kW, die sich direkt mit der Traktionsbatterie verbinden.

Die meisten öffentlichen HPC befinden sich im Außenbereich auf Parkplätzen oder Tankstellen, daher sind SPDs zum Schutz vor Überspannungen zu installieren. Die DC-SPDs des HPC befinden sich zwischen der Traktionsbatterie des Fahrzeuges und der Ausgangseite des AC/DC-Wandlers. Wenn das DC-SPD am Lebensdauerende einen Kurzschluss

verursacht, fließt ein Strom von mehreren Kiloampere durch das DC-SPD. Ist keine separate Schutzeinrichtung in Reihe zum DC-SPD vorhanden, schaltet die Schmelzsicherung im Ladeanschluss des Fahrzeuges den Kurzschlussstrom ab.

Aufgrund der Fahrzeugvielfalt ist es unwahrscheinlich, dass diese Schmelzsicherung auf das DC-SPD abgestimmt ist. Es kann eine Brandgefahr in der Ladesäule entstehen, wenn das DC-SPD durch den Kurzschlussstrom thermisch überlastet wird. Daher ist eine separate Schutzeinrichtung in Reihe zum DC-SPD zwingend erforderlich. Nutzbar sind dafür Schmelzsicherungen oder SPDs mit integrierter Abschalt-Funkenstrecke, welche die Rolle des Überstromschutzes übernimmt und eine Koordination mit den vorhandenen Überstromschutzeinrichtungen im BEV und in der HPC deutlich erleichtert.

LITERATUR

- [1] Nationale Leitstelle Ladeinfrastruktur, „Ladeinfrastruktur nach 2025/2030 Szenarien für den Markthochlauf (Studie im Auftrag des BMVI),“ Berlin, 2020.
- [2] BMU, „Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050,“ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Nukleare Sicherheit, 2019.
- [3] EUROPEAN PARLIAMENT, *Directive 2014/94/EU*, 2014.
- [4] ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik und, *Spannungsklassen in der Elektromobilität*, Frankfurt am Main, 2021.
- [5] IEC 61851-23, *Electric vehicle conductive charging system - Part 23: DC electric vehicle supply equipment*.
- [6] IEC 61643-41 ED1:2023, *Low-voltage surge protective devices - Part 41: Surge protective devices connected to DC- low-voltage power systems - Requirements and test methods*, Geneva, 2023.
- [7] F. Grumm, T. Böhm, R. Brocke und D. Schulz, „Protective measures for SPD in DC chargers for BEV,“ in *7th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2023)*, Kopenhagen, 2023.
- [8] E. C. Sakshaug, J. J. Burke und J. S. Kresge, „Metal oxide arresters on distribution systems: fundamental considerations,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 2076-2089, 1989.
- [9] K. Mardira, T. Saha und R. A. Sutton, „The effects of electrical degradation on the microstructure of metal oxide varistor,“ in *2001 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition. Developing New Perspectives*, Atlanta, 2001.
- [10] T. E. Tsovilis, „Critical Insight Into Performance Requirements and Test Methods for Surge Protective Devices Connected to Low-Voltage Power Systems,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 3055-3064, 2021.
- [11] M. Lau und K. Calzada, „Breaktor™ Battery Disconnect Unit,“ in *22. internationales Stuttgarter Symposium*, Stuttgart, 2022.
- [12] K. Brown, „<https://iaeimagazine.org/>,“ IAEI Magazine, 16 3 2004. [Online]. Available: <https://iaeimagazine.org/2004/march2004/metal-oxide-varistor-degradation/>. [Zugriff am 23 1 2024].