

## Störlichtbögen in AC- und DC-Systemen – Ergebnisse aktueller Forschungsarbeiten

Holger Schau, Technische Universität Ilmenau

### Kurzfassung

Kontinuierliche Forschungsarbeiten zu Lichtbogensvorgängen und -auswirkungen, zu elektrischen Schutzgeräten, zu Persönlichen Schutzausrüstungen (PSAgS) und deren Prüfung sind Voraussetzungen, dass ein wirksamer Schutz von Personen beim Arbeiten an elektrischen Anlagen in Stromversorgungsnetzen erreichbar ist und der Störlichtbogenschutz immer weiter verbessert werden kann. Es sind deshalb u.a. Forschungsprojekte zu

- Lichtbogene Ausbildung und den energetischen Kenngrößen von Störlichtbögen in Drehstromsystemen (unterschiedliche Anlagenkonfigurationen)
- Emission optischer Strahlung durch Störlichtbögen (Strahlungsspektren, Strahlungsleistungen, Gefährdungskennwerte)
- Koordination von Persönlichen Schutzausrüstungen mit Überstromstrom-Schutzeinrichtungen (Schmelzsicherungen) im Niederspannungsbereich
- Vergleich von Störlichtbögen in AC- und DC-Systemen

durchgeführt worden. Auf den letztgenannten Aspekt soll nachfolgend hauptsächlich eingegangen werden.

Gleichstromkurzschlüsse mit Störlichtbögen und der Schutzes von Personen und Anlagen vor deren Wirkungen sind bisher kaum untersucht worden. Deshalb fehlen auch belastbare Aussagen und Ansätze zum Schutz von Personen bei DC-Kurzschlüssen mit Störlichtbögen. Die Anwenderhilfen für Gefährdungsbeurteilungen geben hierzu noch keine gesonderte Hinweise, sondern empfehlen, die Erkenntnisse zu den Wechsel- bzw. Drehstromkurzschlüssen zu übertragen. Anwendungsgebiete für DC-Systeme, die eine spezifische Betrachtung der DC-Verhältnisse erfordern, existieren bereits in großem Umfang: beginnend bei Wechselrichter gespeisten DC-Anlagen bspw. im Bereich der dezentralen Netzeinspeisungen (Photovoltaikanlagen) und in DC-Abnehmernetzen bis hin zu Batteriespeichern und E-Mobilität mit Hochvoltbatterien (Montage, Betrieb, Laden). Umfang und Verbreitung der DC-Systeme werden zunehmen. Vergleichende Betrachtungen zu den existierenden Erkenntnissen zu AC-Lichtbögen sind deshalb notwendig, um Aussagen zu den Leistungs- und Energiekennwerten von DC-Störlichtbögen zu gewinnen, die bei DC-Kurzschlüssen in elektrischen Anlagen zu erwarten sind.

Es sind deshalb systematische Untersuchungen zur Ausbildung von Störlichtbögen in DC-Systemen und zu deren energetischen Auswirkungen begonnen worden. Die

ersten messtechnischen Untersuchungen erfolgten im Hochstromlabor einerseits an Batterie gespeisten Elektrodenanordnungen (Lithium-Ionen-Hochvolt-Batterien) und andererseits bei Speisung des Systems durch DC-Generator (Induktionsgenerator). Dabei sind Grundanordnungen im Spannungsbereich von 100...750 V und Strombereich von 1...6 kA untersucht worden.

Wichtige Erkenntnisse daraus sollen nachfolgend dargestellt werden, auch wenn eine Reihe von Schlussfolgerungen noch keine abschließende Bestätigung besitzt.

Die Untersuchungen zeigen, dass man in der Beschreibung der elektrischen Verhältnisse trotz Nichtlinearität und Zeitvarianz der Größen von quasistationären Bedingungen und einer Linearisierung in dem sich jeweils einstellenden Arbeitspunkt ausgehen kann. Die elektrischen Größen Strom und Spannung werden dann durch Mittelwerte beschrieben (Bild 1). Der Lichtbogenwiderstand muss iterativ bestimmt werden, da die Lichtbogenspannung sowohl vom Elektrodenabstand als auch vom Lichtbogenstrom abhängt.

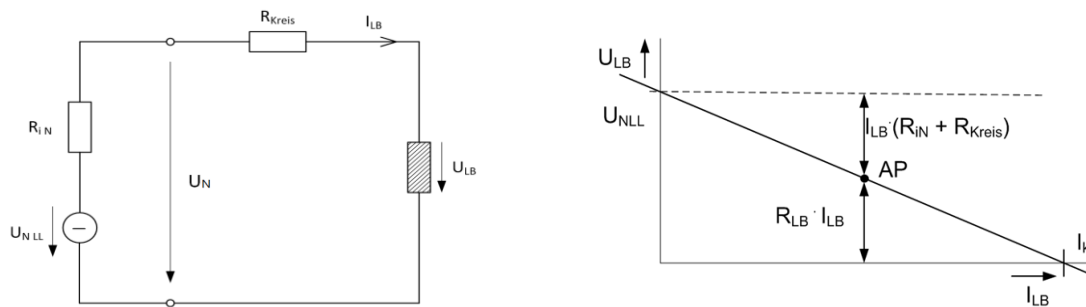


Bild 1: Ersatzstromkreis und Strom-Spannungsdiagramm für den DC-Stromkreis

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die Lichtbogens Ausbildung in AC- und DC-Systemen ähnlich erfolgt. Auch die gemessenen Erwärmungskurven an Oberflächen, die durch einen Lichtbogen thermisch beaufschlagt wurden, zeigen eine vergleichbare Charakteristik (siehe Bild 2). Bei sich gegenüberstehenden Elektroden sind die Wärmeübertragungsmechanismen gleich (siehe Bild 3).

Ein prinzipieller Unterschied zwischen AC- und DC-Lichtbögen besteht hinsichtlich des Einflusses des Netz- bzw. Stromkreiswiderstandes. Im DC-Kreis bestimmt die Größe des ohmschen Widerstands (Innenwiderstand der Quelle und Kreiswiderstand) den Arbeitspunkt und den Leistungsumsatz im Lichtbogen. Die maximal mögliche Lichtbogenleistung ergibt sich, wenn Lichtbogen- und Vorwiderstand gleich groß sind und beträgt 25 % der Kurzschlussleistung. Die Größe der Induktivität hat in beiden Fällen Einfluss auf die Stabilität des Lichtbogens. Im DC-Kreis bestimmt sie die Zeitkonstante  $L/R$ , die ausschlaggebend für Stromänderungen ist. Beim AC-Lichtbogen hängt der Leistungsumsatz dagegen vom  $R/X$ -Verhältnis der Stromkreisimpedanz ab (je kleiner das  $R/X$  desto größer die maximal mögliche Leistung; Bereich 25...45 % der Kurzschlussleistung); die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung hat außerdem Einfluss auf das Wiederzünden des Lichtbogens nach dem Nulldurchgang des Stroms. Generell

zeigen die Laboruntersuchungen, dass in DC-Stromkreisen u.U. unter sonst vergleichbaren Bedingungen Lichtbögen größerer Länge möglich sind.

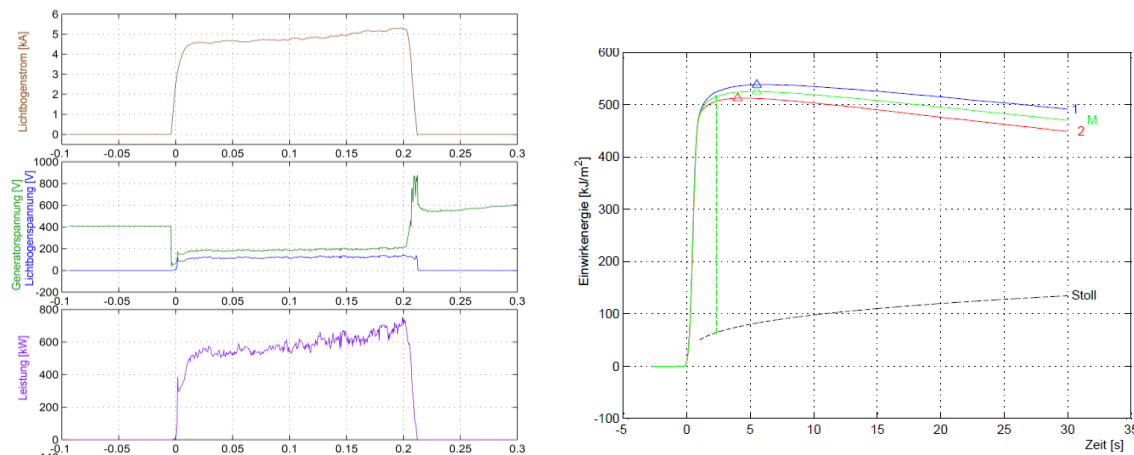


Bild 2: Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf sowie Erwärmungskurven (Abstand 300 mm) für einen DC-Lichtbogen (Beispiel: 400 V, 6 kA)

Wichtige Einflussgrößen auf die Parameter und das Verhalten von DC-Lichtbögen sind die Leerlaufspannung der DC-Quelle (des Netzes), die Stromhöhe (Kurzschlussstrom), die Zeitkonstante und die Elektrodenkonfiguration (Elektrodenabstand, Elektrodenorientierung, Material, Form, Umgebung).

Für Lithium-Ionen-Batterien wurden im Hinblick auf die Stabilität von DC-Lichtbögen im Bereich prospektiver Kurzschlussströmen von 1...5 kA folgende Zusammenhänge festgestellt [2,3]:

Leerlaufspannung	Lichtbogenverhalten	Randbedingungen
40...60 V	Selbstverlöschen	auch bei Elektrodenabständen von $d = 5$ mm
60...120 V	Kurze Lichtbogendauer 20...200 ms	Bei geringen Elektrodenabständen und induktiver Stabilisierung
120...200 V	Lichtbogendauer 200...300 ms möglich	Bei Elektrodenabständen von 5...10 mm
160...200 V	Relativ stabile Lichtbögen	Auch bei größeren Elektrodenabständen bei konischen Elektroden
400 V	Stabile Lichtbögen	Lichtbögen auch bei bis zu $d$ von 100 mm (konische Elektroden)

Bei Lichtbogenzeiten von  $< 200$  ms und Kupferelektroden ergeben sich unter diesen Bedingungen im allgemeinen keine Einwirkenergien, die oberhalb der Stollgrenze für das Auftreten von Hautverbrennungen 2. Grades liegen.

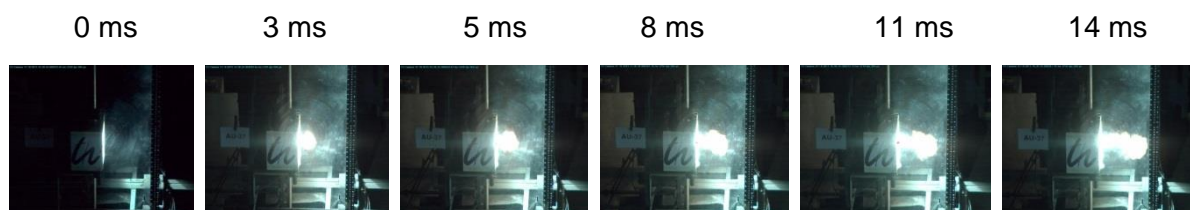


Bild 3: Ausbildung der Gaswolke des DC-Lichtbogens bei Boxanordnung

Die Untersuchungen im Generatorkreis lassen weitere Schlussfolgerungen zu den energetischen Verhältnissen zu. Die DC-Tests für Bedingungen der Klasse 1 des Boxtests (400-V-System mit prospektivem Kurzschlussstrom 4 kA) [3] zeigen bis zu ca. 1,3-fach höhere Werte für die elektrische Lichtbogenleistung und –energie. Allerdings bestanden in den DC-Tests zwei Modifikationen zu den Standard-Boxtest-Bedingungen: es wurden Elektroden Kupfer-Kupfer im Unterschied zur Kombination Aluminium-Kupfer im Standardtest verwendet und die Elektroden besaßen konische Enden im Gegensatz zu den planen Enden des Standardaufbaus. Bei konischen Enden bilden sich im DC-Kreis sehr stabile Lichtbögen aus, deren Länge deutlich größer als der Elektrodenabstand ist und sich infolge des Materialabbrandes noch vergrößert.

Die Einwirkenergie besitzt in etwa gleiche Größe wie im Boxtest. Das Verhältnis zwischen Einwirkenergie und Lichtbogenenergie liegt im Bereich 0,66...1 m<sup>2</sup> und entspricht den Werten, die sich auch für Batteriekreise bei kleineren Absolutwerten gezeigt hatten. Die Einwirkenergien der DC-Lichtbögen gelten allerdings für die Elektrodenpaarung Kupfer-Kupfer, während im AC-Standardboxtest Elektroden Aluminium-Kupfer verwendet werden. Bei AC-Tests mit Kupfer-Kupfer-Elektroden betragen nach durchgeführten Messungen die Pegel der Einwirkenergie nur ca. 60 % der Werte für die Standardpaarung Aluminium-Kupfer.

Diese Ergebnisse geben erste Aufschlüsse, müssen jedoch noch weiter bestätigt und erweitert werden. Dafür sind fortsetzende Untersuchungen vorgesehen. Die Zielsetzung besteht darin, fundierte Anwenderhilfen für die Auswahl von PSaGS zu erarbeiten, die auf gesicherten Kenntnissen und der Bestimmung der energetischen Lichtbogenkenngrößen basieren.

## **Literatur**

- [1] Ranziger, R.; Schau, H.; Schmidt, J.: Analysis of DC arcs – first results. Intern. Symp. Electricity and Safety in the 21st century, 28-29 August 2014 Frankfurt/M.
- [2] Schau, H.: Protection against the hazards due to AC and DC arcs. Intern. Symp. Electricity and Safety in the 21st century, 28-29 August 2014 Frankfurt/M.
- [3] IEC 61482-1-2:2014

## **Danksagung**

Der Autor bedankt sich für die Unterstützung und Förderung durch die Berufsgenossenschaft Elektro Textil Energie Medienerzeugnisse Köln, NH/HH-Recycling e.V., AUDI AG und Dehn + Söhne GmbH + Co. KG.

Wesentliche Impulse und eine breite fachliche Mitwirkung wurden darüber hinaus durch das UK 214.3 „Arbeiten unter Spannung“ im DKE gegeben.

## **Autor:**

PD Dr.-Ing. habil. Holger Schau

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung – 2164,

Postfach 100565, D-98684 Ilmenau, Tel.: +49 3677 69 1489, Fax: +49 3677 69 1496, e-mail: [holger.schau@tu-ilmenau.de](mailto:holger.schau@tu-ilmenau.de)