Zeitschrift: bulletin.ch / Electrosuisse
Herausgeber: Electrosuisse
Band: 101 (2010)
Heft: 1

Artikel: Magnetnische Löschung von Schaltlichtbögen
Autor: Halbach, P. / Hinrichsen, V. / Hörtz, F. / Teichmann, J.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-856042

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 08.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Magnetische Löschung von Schaltlichtbögen

Verhalten des Lichtbogens während des Ausschaltvorgangs

Ein Prinzip zur Löschung von Schaltlichtbögen in SF_6-isolierten Schaltanlagen ist die magnetische Ablenkung des Lichtbogens durch ein stationäres Magnetfeld. Wie verhält sich ein so abgelenkter Lichtbogen in der Praxis? Einige Hochgeschwindigkeitseinblicke in die Wirkungsweise von magnetischer Lichtbogenbeeinflussung.

P. Halbach, V. Hinrichsen, F. Hörtz, J. Teichmann

Die Mittelspannung, die sich zwischen ca. 3 kV und 52 kV bewegt, stellt eine zentrale Spannungsebene innerhalb des Versorgungsnetzes dar. Betriebsmittel der Mittelspannungsebene zeichnen sich einerseits durch ein sehr hohes Mass an Betriebssicherheit aus, da meist eine grosse Anzahl Verbraucher an diese Anlagen angeschlossen sind und bei deren Fehlverhalten grössere wirtschaftliche Schäden entstehen können. Andererseits müssen Mittelspannungsbetriebsmittel kostengünstig sein, da sie in hohen Stückzahlen von den Energieversorgern eingesetzt werden und sich die dadurch verursachten Investitionen direkt im Kundenendpreis für die Kilowattstunde elektrischer Energie zeigen.

Die Betriebsmittel der Mittelspannung sind also immer als sinnvoller Kompromiss zwischen wirtschaftlichen Erwägungen und geforderter Zuverlässigkeit zu betrachten.

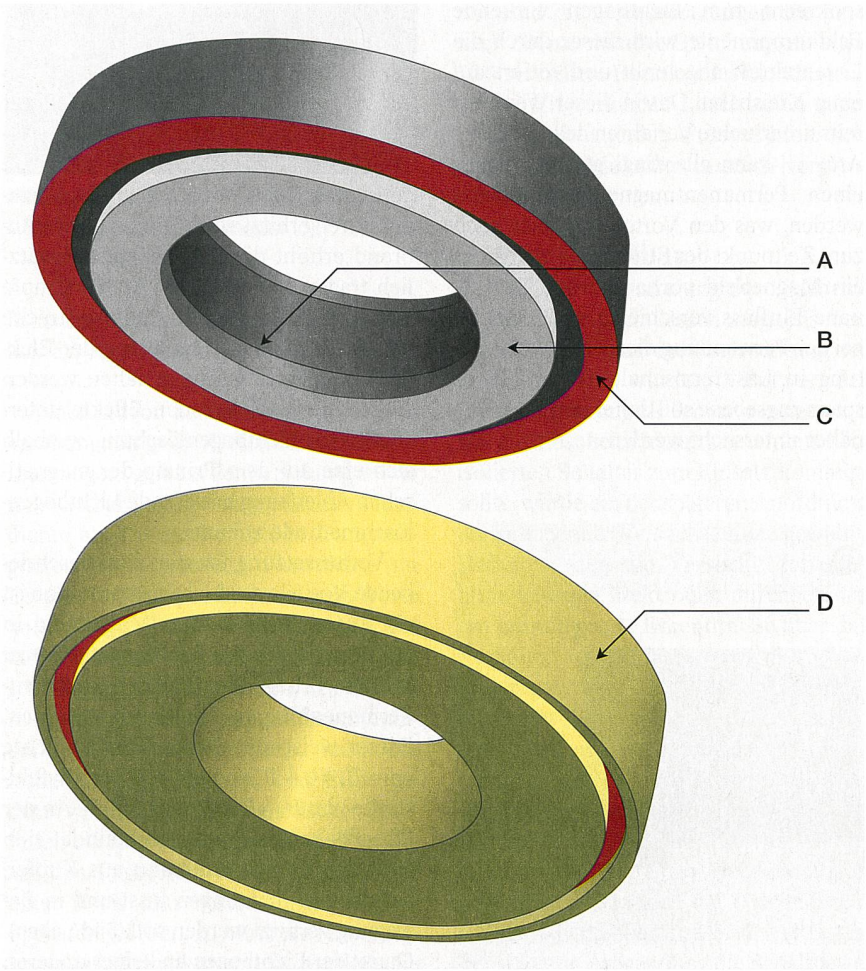

Bild 1 Permanentmagnet mit Laufbahn und Abdeckung (A: Permanentmagnet, B: Eisenrückschluss, C: Laufbahn, D: Kunststoffabdeckung).

Schaltanlagen

Neben Transformatoren und Leitungen stellen Schaltanlagen ein zentrales Element der Energieverteilung dar. Hier haben sich in den vergangenen 3 Jahrzehnten vor allem in hochwertigen Kabelnetzen SF_6-isolierte Schaltanlagen als der beste Kompromiss zwischen Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit erwiesen. Diese SF_6-isolierten Schaltanlagen werden in Leistungsschalteranlagen und Lastschalteranlagen unterschieden. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass die wesentlichen unter elektrischer Spannung befindlichen Elemente in einem gekapselten, mit SF_6 gefüllten Behältnis integriert sind.

Leistungsschalter

Leistungsschalter haben hauptsächlich die Aufgabe, Netzzweige vor den Folgeschäden etwaig auftretender Kurzschlüsse – Ströme von einigen 10 kA – zu schützen. Hierfür werden Schutzsysteme eingesetzt, bestehend aus Stromwandlern, elektronischen, oftmals mikroprozessorgesteuerten Schutzrelais und Auslösespulen, die im Falle einer Anregung den vorgespannten Federspeicherantrieb des Leistungsschalters zum Ausschalten entklinken. Leistungsschalter nutzen entweder SF_6 oder Vakuum als Schaltmedium, wobei in der Regel eine besondere Kapselung des Schaltraums gegenüber des sonstigen, mit SF_6 gefüllten Behälters besteht, um erstens besondere Geometrien oder Drücke, die für das Ausschalten des Kurzschlussstroms erforderlich sind, zu ermöglichen, und

zweitens nicht durch Schaltvorgänge das Isoliervermögen der Schaltanlage zu beeinflussen.

Lastschalter

Lastschalter dagegen werden für zeitlich geplante Aus- und Umschaltvorgänge im Netz verwendet. Da diese nicht den Kurzschlussstrom, sondern nur Lastströme – üblicherweise bis zu 630 A – ausschalten müssen, kann man auf aufwendige Löschverfahren bzw. Sonderkapselung verzichten. Diese Lastschalter werden direkt im Isoliergas der Schaltanlage angebracht und nutzen das Isoliergas auch als Löschmedium.

Lichtbogenlöschung

Das verwendete SF_6 besitzt neben vorzüglichen Isoliereigenschaften auch die Fähigkeit, besonders schnell zu rekombinieren und die bei einem Schaltlichtbogen entstehenden freien Ladungsträger besonders schnell zu binden bzw. zu neutralisieren, sodass eine zuverlässige Lichtbogenlöschung ermöglicht wird.

Ohne weitere Massnahmen können so bei treibenden Spannungen von typischerweise 20 kV Lastströme von einigen wenigen 100 A allein durch die Gaseigenschaften gelöscht werden. Für höhere Ströme müssen zusätzliche Elemente eingebracht werden, die die Löschung des Schaltlichtbogens unterstützen. Dafür existieren prinzipiell 3 verschiedene Verfahren [1, 2]:

- Über einen Kompressionsmechanismus wird während der Schalthandlung SF_6-Gas zunächst komprimiert, und sowohl Schaltstrecke als auch der Lichtbogen werden bereits während der Kompression beblasen. Auf diese Weise wird der Lichtbogen strömungsstabilisiert, gekühlt und die Schaltstrecke nach dem Stromnulldurchgang effizient entionisiert und wiederverfestigt.
- Die zweite Möglichkeit besteht darin, den Lichtbogen durch starke Wechselwirkung mit Oberflächen zu kühlen und zu entionisieren.
- Drittens kann der Lichtbogen auch durch die Wechselwirkung mit magnetischen Feldern in eine Bewegung versetzt werden. Durch diese Bewegung in kaltem Hintergrundgas wird der Lichtbogen ebenfalls effizient gekühlt. Eine funktions- und kostenoptimale Ausführung einer solchen Vorrichtung wird im Folgenden beschrieben.

Lichtbogenrotation in äusserem Magnetfeld

Die hier behandelte Löscheinrichtung löscht den Lichtbogen durch eine Ablenkung der Bogensäule mittels eines magnetischen Felds, das entweder durch den Stromfluss selbst oder durch eine externe Quelle erzeugt wird. Beim Einsatz einer sogenannten Löschspule fliesst der Strom durch deren Wicklungen, wodurch ein Magnetfeld entsteht. Durch die senkrecht zum Lichtbogen wirkende Feldkomponente wird dieser durch die Lorentzkraft abgelenkt und rotiert auf einer Kreisbahn. Das in dieser Weise bereits untersuchte Verfahren des «Rotating Arc» [3] kann allerdings genauso durch einen Permanentmagneten umgesetzt werden, was den Vorteil hat, dass auch zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs ein Magnetfeld vorhanden ist. Der genaue Einfluss verschiedener Parameter bei der Verwendung dieser Löscheinrichtung in Lasttrennschaltern der Mittelspannungsebene soll daher im Folgenden näher untersucht werden.

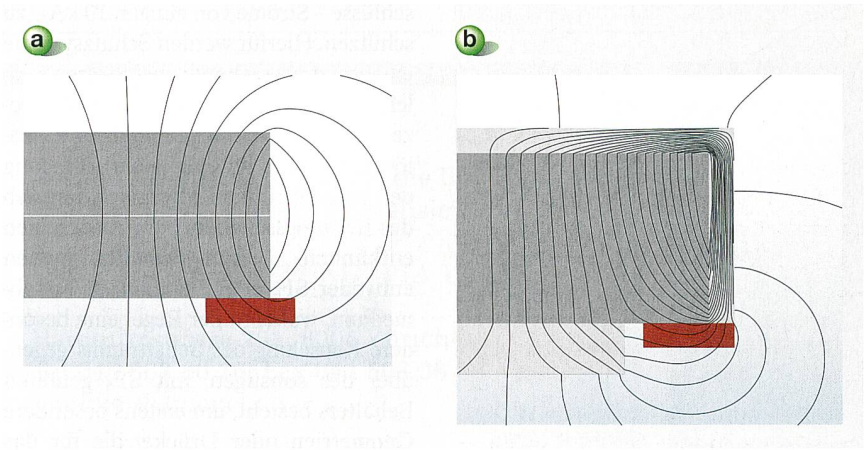

Bild 2 Radialkomponente der Flussdichte im Bereich der Laufbahn.
a) Ohne Eisenrückschluss, b) mit Eisenrückschluss.

Modellierung

Zur Modellierung des Lichtbogens im Magnetfeld kann dieser als fester zylinderförmiger Stab angesehen werden, da er eine wesentlich höhere Viskosität als das umgebende Gas besitzt. Die magnetische Blaskraft leitet sich dabei unmittelbar aus der bekannten Lorentzkraft her, wobei der Lichtbogen vereinfacht als starrer elektrischer Leiter angesehen wird [4]. Dieser Kraft steht der Widerstand der Strömung gegenüber, der auf den Bogen bei dessen magnetfelderregter Bewegung wirkt. Setzt man die Kräfte gleich, was für den vereinfachten stationären Fall gilt, so ergibt sich für die Geschwindigkeit v des Lichtbogenzylinders

$$v = \mathrm{k} \times \sqrt{\frac{I \times B}{d \times}}$$

wobei k einer Konstanten, I dem Bogenstrom, B der magnetischen Flussdichte, d dem Zylinderdurchmesser und ρ der Dichte des Umgebungsgases entsprechen.

Die derart erreichte magnetische Beschleunigung des Lichtbogens kann in der Praxis genutzt werden, um den Bogen durch die ihn umgebenden Strömungen zu kühlen, wodurch er höhere Gegenspannungen aufbaut. Ein weiterer Vorteil besteht in der Fusspunktbewegung, da auf diese Weise die Elektrode in geringerem Masse durch die hohen Temperaturen erhitzt wird. Der geringere Abbrand erhöht die Lebensdauer. Zusätzlich tragen die erzeugten Metalldämpfe zur Ionisierung der Entladungsstrecke bei, weshalb die Verdampfung der Elektrode möglichst gering gehalten werden sollte. Die beschriebenen Effekte unterstützen die Lichtbogenlöschung, weshalb sich eine auf dem Prinzip der magnetischen Ablenkung basierende Lichtbogenlöschmethode anbietet.

Voraussetzung für die oben beschriebenen Vorteile der Lichtbogenrotation ist ein ausreichend starkes Magnetfeld in der Umgebung des Lichtbogens. Dazu soll im vorliegenden Fall ein Hartferrit-Permanentmagnet verwendet werden. Dieser weist eine Remanenzflussdichte von $B_r = 0{,}4$ T und eine Koerzitivfeldstärke von $H_c = 260$ kA/m auf [5]. An der Oberfläche des Magneten befindet sich eine ringförmige Laufbahn aus Kupfer, auf der der Lichtbogen fusst und in Bewegung versetzt werden soll **(Bild 1 oben)**. Damit der Lichtbogen an keiner anderen Stelle der Einrichtung Fusspunkte bilden kann, wird der gesamte Magnet in eine

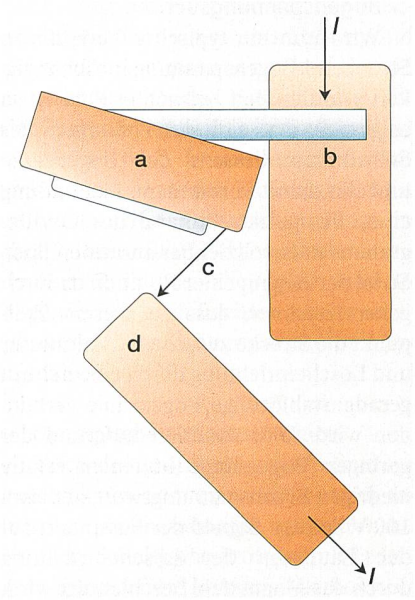

Bild 3 Löscheinrichtung und Schaltsystem (a: Löscheinrichtung, b: Festkontakt, c: Lichtbogen, d: Schaltmesser).

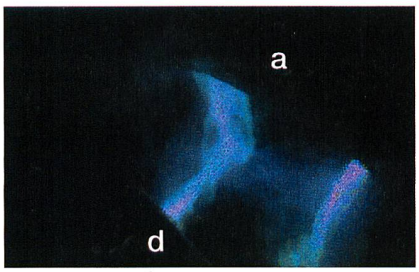

Bild 4 Plasmaströmung zwischen Löscheinrichtung (a) und Schaltmesser (d).

Kunststofffassung gebracht, sodass lediglich die Kupferlaufbahn frei bleibt **(Bild 1 unten)**.

Nach zuvor beschriebenem Zusammenhang hängt die Geschwindigkeit des Lichtbogens gemäss der Beziehung $v \sim \sqrt{B}$ unmittelbar von der magnetischen Flussdichte ab. Da die durch den Dauermagneten hervorgerufene Flussdichte im Bereich des Fusspunkts maximale Werte annehmen soll, ist es erstrebenswert, die auf den Bogen wirkenden Kräfte in diesem Bereich zu fokussieren, um die daraus resultierende Fusspunktbeschleunigung zu verstärken. Hierzu kann die hohe Permeabilitätszahl von Eisen genutzt werden, um die magnetischen Feldlinien zu führen. Sollen die Kräfte, die auf den Fusspunkt wirken und ihn auf einer Kreisbahn beschleunigen sollen, optimiert werden, so muss die Kraftkomponente maximal ausgelegt werden, die orthogonal zur stromdurchflossenen Bogensäule und zur Flussdichte steht. In diesem Fall ist die Tangentialkomponente der Kraft entscheidend, um den Fusspunkt stets in der Kreisbahn zu bewegen. Gemäss der Gesetzmässigkeit von Lorentz muss also der magnetische Flussdichtevektor in radialer Richtung maximale Werte besitzen, um eine ideale Fusspunktbeschleunigung zu erhalten. Es wurden mit der Feldsimulationssoftware Ansoft Maxwell 3-D-Simulationen mit verschiedenen Rückschlussanordnungen durchgeführt und dabei die berechneten Radialflussdichten an der Laufbahnoberfläche verglichen.

Bild 2 zeigt ein Beispiel für die Ausführung des Eisenrückschlusses als Querschnitt eines ringförmigen Permanentmagneten (b) im Vergleich zu einem Magneten ohne Rückschluss (a). Die dargestellten Varianten sind anhand der radialen Flussdichteverteilung in Abhängigkeit der radialen Ausdehnung verglichen worden. Es zeigt sich, dass im Bereich der 3 mm breiten Laufbahn die Flussdichte im mittleren Bereich bei Verwendung eines Eisenrückschlusses mit etwa 0,18 T deutlich höher ist als bei Verzicht auf den Rückschluss (0,08 T). Somit sind die Voraussetzungen für eine nach oben stehender Gleichung um etwa 50% schnellere Rotation des Lichtbogens und somit verkürzte Löschzeiten gegeben, da die auf den Fusspunktbereich wirkenden Feldkräfte deutlich vergrössert werden können.

Versuchsaufbau

Nach der Optimierung der Löscheinrichtung bezüglich dessen magnetischen Eigenschaften und der Kraftwirkung auf den Lichtbogen wurde ein Entwurf der Löscheinrichtung als Prototyp umgesetzt. Da die Löscheinrichtung in einem SF_6-isolierten Schalter zum Einsatz kommen sollte, wurde ein der späteren Anordnung entsprechender Versuchsaufbau gewählt. Dabei wurden die Versuche zunächst ohne bewegte Elektroden durchgeführt, um grundlegende Erkenntnisse über das Verhalten des Lichtbogens bezüglich seiner magnetischen Ablenkung zu erhalten und weitere Einflüsse, die durch den dynamischen Schaltvorgang entstünden, auszuschliessen. **Bild 3** zeigt den Aufbau der Anordnung. Zu erkennen sind die Löscheinrichtung a und der damit verbundene Festkontakt b. Der Lichtbogen c verbindet elektrisch die Löscheinrichtung mit dem Schaltmesser d, welches in der späteren Anwendung die Schaltbewegung durchführt. Bedingt durch die anfangs feste Anordnung des Schaltmessers wurde der Lichtbogen durch eine zusätzliche Hilfseinrichtung gezündet und zwischen Schaltmesser und Löscheinrichtung geführt. In späteren Versuchen wurde diese Einrichtung entfernt und der Strompfad über Schaltmesser und Festkontakt mithilfe eines Federantriebs getrennt.

Die Versuche wurden in einem synthetischen Prüfkreis nach dem Stromüberlagerungsverfahren von Weil-Dobke [6] durchgeführt. Da die Analyse des Lichtbogenverhaltens während der Rotation im Vordergrund stehen sollte, wurde allerdings in dieser Versuchsreihe auf die Aufschaltung einer transienten Einschwingspannung verzichtet. Die Auswertung erfolgte mittels Transientenrekorderaufzeichnung von Strom- und Bogenspannungsverlauf und einer Hochgeschwindigkeitskamera.

Ergebnisse

Es wurden Versuche mit einer Stromhalbwelle bei Effektivwerten von 630–1500 A durchgeführt. Dabei hat sich gezeigt, dass sich das Erscheinungsbild des Lichtbogens bei hohen Stromstärken (I_{eff} = 1500 A) grundsätzlich von einem Bogen geringeren Stroms unterscheidet. Die Bewegung des Fusspunkts ist zwar wesentlich schneller, aber auch ungleichförmiger, was durch ein erheblich häufigeres Selbstkurzschliessen des Bogens erklärt werden kann. Aufgrund des hohen Stroms ist der Energieumsatz des Lichtbogens im Gasbereich unter der Löscheinrichtung ungleich grösser als bei den untersuchten geringen Stromstärken (I_{eff} = 630 A). So kann sich der Gasraum schneller aufheizen, was zu einem verringerten Widerstand des ionisierten Löschgases führt. Dadurch kommt es in der Regel bereits nach einer kurzen Fusspunktbewegung zu einem Kurzschliessen von Einzelabschnitten der träge zurückeilenden Säule.

Während dies bei den geringen Stromstärken im Mittel nach etwa einer halben Rotation zu beobachten war, zeigt sich dieser Effekt bei höheren Strömen bereits nach einer Teilrotation von etwa 10–30° des Umlaufwinkels. Zusätzlich fällt auf, dass der Radius der Bogensäule mit ansteigendem Strom deutlich zunimmt. Dies führt ebenso zu einer stärkeren Beeinträchtigung des umliegenden Gasraums, wodurch das Durchzünden des Lichtbogens begünstigt wird. Die Erscheinung des Plasmabogens in den Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera zeigt für höhere Ströme

ebenfalls charakteristische Merkmale. Während der Übergang zwischen Fusspunkten und Bogensäule bei einer Effektivstromstärke von 630 A fliessend und deutlich erkennbar verläuft, bilden sich bei den höheren Strömen oftmals sogenannte Jets an den Elektroden, die durch eine stromlinienförmige Bewegung der Ladungsträger gekennzeichnet sind **(Bild 4)**. Häufig bildet sich daher auch keine typische Bogenform aus, da 2 gegenüberliegende Jets lediglich durch eine Plasmaströmung verbunden sind, die den Stromfluss ermöglicht. Für diesen Fall lässt sich nahezu kein Einfluss des Magnetfelds auf die vorhandenen Strombahnen erkennen, weshalb hier ein möglicher Kühleffekt verhindert wird und die Löschfähigkeit dadurch begrenzt scheint.

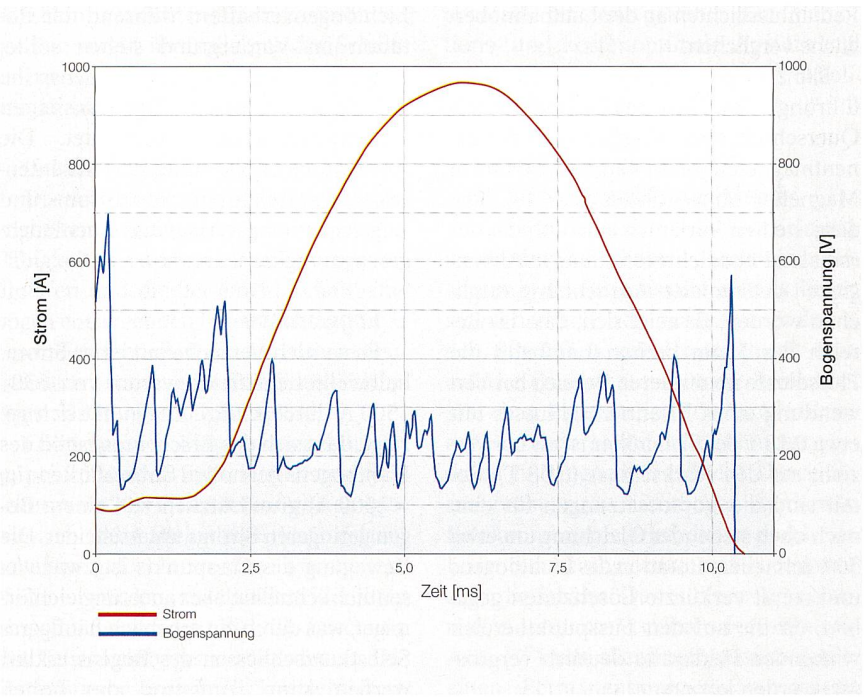

Bild 5 *U-I-t*-Diagramm für einen rotierenden Lichtbogen.

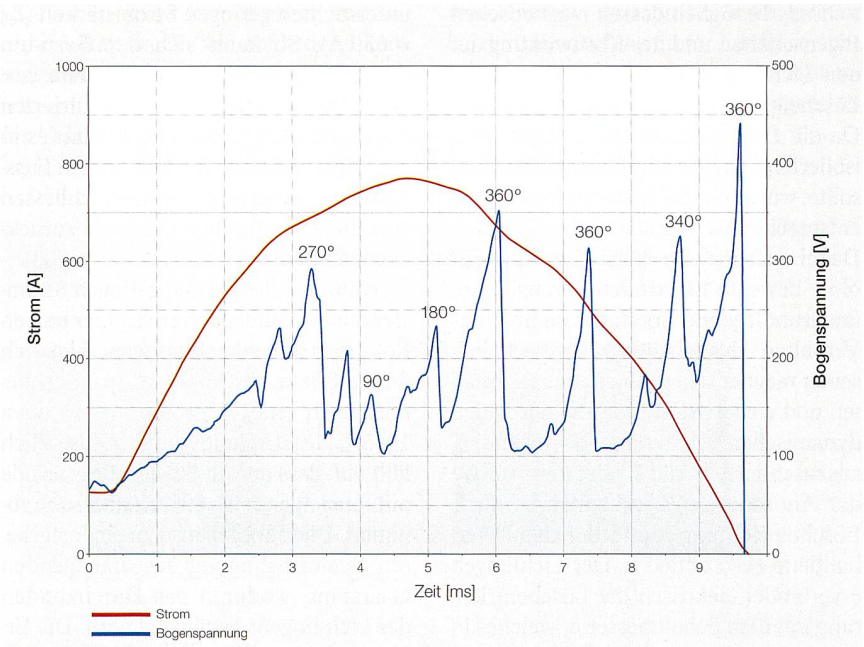

Bild 6 Laufverhalten eines rotierenden Lichtbogens.

Bilder: Halbach et al.

Bogenspannungsverlauf

Wird nun ein typischer Verlauf von Strom und Bogenspannung in Abhängigkeit von der Zeit betrachtet **(Bild 5)**, so zeigt sich, dass sich das Phänomen des Selbstkurzschliessens der Bogensäule und die damit verbundene Neubildung eines Fusspunkts anhand des Oszillogramms nachvollziehbar zuordnen lässt. So ist der Beginn einer Rotation dadurch gekennzeichnet, dass zu diesem Zeitpunkt die Strecke zwischen Schaltmesser und Löscheinrichtung durch eine nahezu gerade, stabförmige Bogensäule verbunden wird. Dies resultiert aufgrund der geringen Bogenlänge in einem relativ niedrigen Brennspannungswert, der etwa 100 V beträgt. Sobald der Fusspunkt auf der Laufbahn der Löscheinrichtung durch das Magnetfeld beschleunigt wird, lässt sich ein starker Anstieg der Bogenspannung verzeichnen. Der Gradient zwischen Spannung und Zeit ist dabei abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit. Diese wiederum wird in der Hauptsache durch den Momentanwert des Stroms und das anliegende Magnetfeld bestimmt, welches für jede Anordnung konstant ist. So sind im Bereich der Stromamplitude die steilsten Spannungsanstiege zu beobachten. Für die Zeitbereiche hohen Stromflusses wird deutlich, dass in diesem Fall die Spannung «unruhiger» verläuft. Dies kann durch die hohe Zahl der Durchzündungen begründet werden. In dem Moment, in dem ein solches Selbstkurzschliessen auftritt, fällt die Spannung sehr rasch auf den zuvor beschriebenen Wert von etwa 100 V ab, da die Länge der Bogensäule stark reduziert wird.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass mit der zurückgelegten Strecke des Fusspunkts die Spannung linear ansteigt. Ursache hierfür ist die Trägheit der Bogensäule, welche durch das Vorauseilen des Fusspunkts so lange aufgeweitet wird, bis sie in die Nähe eines Laufbahnabschnitts gelangt, wo sie den Fusspunkt kurzschliessen kann.

Spannungsamplitude

In den Versuchen hat sich ausserdem gezeigt, dass der Wert der Spannungsamplitude, die durch die Rotationsbewegung aufgebaut wird, von der unterbrechungsfreien Rotation des Fusspunkts abhängt. **Bild 6** stellt den Bogenspannungsverlauf und die bei den Maximalwerten zurückgelegte Strecke im Winkelmass dar, wobei 360° einer vollen Umdrehung und dem Umfang der Lauf-

bahn entsprechen. Je länger der Fusspunkt wandern kann, umso höher sind die erreichten Spannungswerte. Sobald sich der Bogen selbst kurzschliesst, fällt die Spannung auf einen typischen Wert von etwa 100 V. In den Versuchen hat sich gezeigt, dass der Lichtbogen nicht mehr als eine vollständige Rotation (360°) durchführt, da spätestens zu diesem Zeitpunkt die träge zurückliegende Bogensäule einen Berührungspunkt gefunden hat, um sich selbst kurzzuschliessen.

Dynamische Untersuchungen

Nach den grundlegenden Versuchen bei fester Anordnung wurden nun dynamische Schalthandlungen betrachtet, die in einem Schaltgeräteprototyp mit Federantrieb ausgeführt wurden. Hierbei fand die galvanische Trennung des Strompfads etwa 1–2 ms nach Beginn der Stromhalbwelle statt. Danach werden noch 1–3 ms für die Kommutierung des Fusspunkts von dem Festkontakt auf die Löscheinrichtung benötigt, sodass schliesslich der Lichtbogen für etwa 5–8 ms auf der Löscheinrichtung läuft, bevor er zum Zeitpunkt des Stromnulldurchgangs erlöschen kann.

Für die dynamischen Untersuchungen lassen sich im Gegensatz zur statischen Anordnung zusätzliche Beobachtungen machen: So zeigt sich, dass die mittlere Bogenspannung im Wesentlichen von der Lichtbogenlänge abhängt. Die Spannung steigt im Mittel linear an, sobald sich die Schaltmesser von der Löscheinrichtung wegbewegen. Die mechanische Bewegung der Messer läuft im Zeitbereich der Prüfstromhalbwelle näherungsweise linear ab. Ausserdem lässt sich erkennen, dass es grundsätzlich 2 unterschiedliche Erscheinungsformen der Lichtbogenbewegung gibt. Zum einen kommt es vor, dass der Fusspunkt auf der Laufbahn mit gleichmässiger Geschwindigkeit wandert und sich nach einer halben bis ganzen Rotation selbst überbrückt, wie es bereits beschrieben wurde. Zum anderen ist es oft der Fall, dass sich der Fusspunkt nicht kontinuierlich, sondern nur schrittweise fortbewegt und permanent rückzündet. Die kurzen Strecken, die er dabei auf der Laufbahn zurücklegt, sind oftmals kleiner als 10 mm.

Zusammenfassung

In den Untersuchungen wurde zunächst ein allgemeines Verständnis über das Verhalten von magnetisch beeinflussten Schaltlichtbögen während des Ausschaltvorgangs bei Mittelspannungslasttrennschaltern in SF_6-isolierten Schaltanlagen aufgebaut. Der Fokus lag dabei auf einem durch das Magnetfeld eines Permanentmagneten abgelenkten Lichtbogen und seinen elektrischen Eigenschaften während der Rotation. Aussagen über die Länge des Lichtbogens konnten näherungsweise mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera getroffen werden. Dabei hat sich gezeigt, dass eine grosse magnetische Flussdichte im Bereich des Fusspunkts eine beschleunigte Rotation der gesamten Bogensäule hervorruft. Dadurch werden die Löscheigenschaften des Schalters verbessert, da die Bewegung des Lichtbogens in kaltem Löschgas dessen Energieumsatz verringert. Voruntersuchungen haben in Simulationen deutlich gemacht, dass der Betrag der magnetischen Flussdichte im Gebiet der Laufbahn durch die Verwendung eines Eisenrückschlusses verdoppelt werden kann. Die auf diese Weise optimierte Löscheinrichtung wurde dann auf ihre Wirkungsweise mit einem synthetischen Prüfkreis untersucht. Es hat sich gezeigt, dass ein Lichtbogen mit einem Effektivstrom von 630 A mithilfe der angewendeten Methode der magnetischen Ablenkung zuverlässig gelöscht werden kann. Für höhere Ströme dagegen verläuft die Fusspunktrotation teilweise sehr inhomogen, sodass eine ausreichende Kühlung des Bogens nicht immer sichergestellt ist. Für diesen Fall sind weitere Untersuchungen hinsichtlich der Auslegung der Löscheinrichtung notwendig.

Das vorgestellte Löschsystem auf Basis der Lichtbogenablenkung durch ein mit einem Permanentmagneten hervorgerufenen Magnetfeld eignet sich bezüglich der äusseren Beeinflussung des Schaltlichtbogens während der Stromhalbwelle grundsätzlich für den Einsatz in SF_6-Mittelspannungslasttrennschaltern. Die bisherigen positiven Ergebnisse wurden hinsichtlich des Schaltvermögens in Schaltleistungsversuchen unter Generatoreinsatz erfolgreich bestätigt.

Résumé **Extinction magnétique des arcs de coupure**

Comportement de l'arc électrique au moment de la coupure

Un principe d'extinction de l'arc dans les postes de couplage isolés au gaz SF_6 consiste à faire dévier l'arc par un champ magnétique stationnaire. Comment un arc ainsi dévié se comporte-t-il en pratique ? Quelques vues prises à grande vitesse du fonctionnement de l'influence magnétique des arcs de coupure.

Referenzen

[1] A. Müller: Mittelspannungstechnik – Schaltgeräte und Schaltanlagen. Erlangen, Siemens, 2005.
[2] V. Crastan: Elektrische Energieversorgung 1: Netzelemente, Modellierung, stationäres Verhalten, Bemessung, Schalt- und Schutztechnik, 2. Auflage. Berlin, Springer-Verlag, 2007.
[3] S. Zhang: Das Wanderungs- und Löschverhalten magnetisch beblasener Lichtbögen auf ringförmigen Elektroden in ruhendem SF_6. RWTH Aachen, 1982.
[4] W. Rieder: Plasma und Lichtbogen. Braunschweig, Vieweg-Verlag, 1967.
[5] W. Schufft: Taschenbuch der elektrischen Energietechnik. Leipzig, Hanser Fachbuch, 2007.
[6] T. Fugel: Schalt- und Ausgleichsvorgänge in einer Reihenanordnung von zwei 24-kV-Vakuumschaltkammern. Darmstadt, Shaker Verlag, 2004.

Angaben zu den Autoren

Dipl.-Ing. **Patrick Halbach** studierte Elektrische Energiesysteme an der TU Darmstadt. Seit 2007 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter am dortigen Fachgebiet für Hochspannungstechnik. Er promoviert auf dem Gebiet der Vakuumschalttechnik für die Anwendung in Mittelspannungs-Schaltanlagen.

TU Darmstadt, D-64283 Darmstadt, halbach@hst.tu-darmstadt.de

Prof. Dr.-Ing. **Volker Hinrichsen** ist seit 2001 ordentlicher Professor an der Technischen Universität Darmstadt und leitet dort das Fachgebiet Hochspannungstechnik. Seine Forschungsschwerpunkte liegen auf den Gebieten Überspannungsschutz, Isoliersysteme, Schalttechnik und Diagnostik/Monitoring. Er ist Vorsitzender bzw. Mitglied in diversen Arbeitsgruppen bei IEC, Cigré, IEEE und DKE.

TU Darmstadt, D-64283 Darmstadt, hinrichsen@hst.tu-darmstadt.de

Dr.-Ing. **Frank Hörtz** studierte Elektrische Energietechnik an der TU Darmstadt und promovierte dort 2003 im Fachgebiet Hochspannungstechnik. Bis Ende 2007 war er verantwortlich für die Lastschalterentwicklung im Siemens-Schaltanlagenwerk Frankfurt. Heute arbeitet er als Project Manager für Turnkey-Lösungen für Stromversorgungsanlagen der Mittelspannungstechnik im Siemenskonzern.

Siemens AG, D-68165 Mannheim, frank.hoertz@siemens.com

Dr.-Ing. **Jörg Teichmann** studierte Elektrotechnik an der Ruhr-Universität Bochum und promovierte dort 1998 am Lehrstuhl für Elektrooptik und elektrische Entladungen. Bis Anfang 2008 war als Projektleiter verantwortlich für die Entwicklung von Lastschaltanlagen im Siemens-Schaltanlagenwerk Frankfurt. Heute leitet er im Siemenskonzern die Entwicklung von Vakuumschaltröhren in Berlin

Siemens AG, D-13629 Berlin, joerg.teichmann@siemens.com

CARTOON

« ... et demain, votre connection en fibre optique sera installée ...
Avec meilleures salutations, votre installateur électricien. »