

Physikalische Grundlagen und Lösungsansätze zum Schalten von Gleichströmen

Timo Mützel

Umicore AG & Co. KG, Hanau, Deutschland, timo.muetzel@eu.umicore.com

Kurzfassung

Aktuelle Entwicklungen in den Bereichen regenerative Energien und Elektromobilität erfordern vermehrt das Schalten von Gleichspannungen. Die Kenntnis der physikalischen Grundlagen des Schaltlichtbogens ist Voraussetzung für das sichere Beherrschen der geforderten Schaltaufgaben. Insbesondere lassen sich aus den Existenz- und Lösungsbedingungen von Gleichspannungslichtbögen geeignete Designmaßnahmen ableiten.

Um das Schalten von hohen Gleichspannungen mit ausgebildeten Schaltlichtbögen in elektromechanischen Schaltgeräten zu beherrschen ist das Gerätedesign von entscheidender Bedeutung. Darüber hinaus ergeben sich beim Schalten von Gleichstromlasten erhöhte Anforderungen an die eingesetzten Kontaktwerkstoffe, insbesondere hinsichtlich Abbrandfestigkeit, Lichtbogenkommutierung und den Effekt der Materialwanderung.

Prinzipielle Lösungsansätze zum Schalten von Gleichspannung sind zwar bekannt, offen ist jedoch wie diese optimal für die Umsetzung in entsprechenden Schaltgeräten in den jeweiligen Anwendungsgebieten zu kombinieren sind. Leistungsfähige Kontaktwerkstoffe können im Gesamtkonzept entscheidend zur Lösungsfindung beitragen.

1 Einleitung

Das bekannteste heutige Anwendungsgebiet für Gleichspannungsschaltgeräte der Energietechnik ist der Automotive Sektor. Derzeit werden hier typischerweise Spannungen von 12 V bzw. 24 V eingesetzt.

Im KFZ nimmt der elektrische Energiebedarf stetig zu, so dass das jetzige 12 V Bordnetz an seine Grenzen stößt. Aus diesem Grund wird bei deutschen OEMs über ein 42 V Bordnetz für „Hochstromverbraucher“ nachgedacht [1], da mit der höheren Spannung kleinere Bauräume und Massen z.B. von Akkumulatoren realisiert werden können. Im Gegensatz zu früheren Ansätzen soll das bisherige 12 V Bordnetz für Steuerungsanwendungen parallel weiter betrieben werden. Darüber hinaus sind im Bereich der Elektromobilität für den Antriebsstrang zwischen Energiespeicher und Wechselrichter Bordnetzspannungen bis 700 V in Diskussion. Das Verwenden von Spannungsebenen wie 42 V oder darüber ist dabei von grundsätzlicher Bedeutung, weil es hier prinzipiell zur Ausbildung stabil brennender Gleichstromlichtbögen kommen kann.

Andere Entwicklungen erfordern das Beherrschen von ähnlich hohen bzw. noch höheren Gleichspannungen. Dies ist zum einen der Bereich der regenerativen Energien [2], hierbei insbesondere die Photovoltaik. Durch die Reihen- und Parallelschaltung mehrerer Module zu Stacks werden

Betriebsspannungen von $U \approx 600$ V und Nennströme von $I \approx 120$ A erreicht. Von der eingesetzten Schutztechnik/Schutzschaltern werden teilweise Schaltspannungen von bis zu $U = 1500$ V gefordert.

Weitere derzeitige Einsatzgebiete hoher Gleichspannungen sind Unterbrechungsfreie Stromversorgungen (USV), Rechenzentren, Bahnanwendungen [3] sowie die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ).

Die oben angeführten Anwendungen unterscheiden sich zum Teil deutlich hinsichtlich ihrer Quellencharakteristik. Sowohl für das betriebsmäßige Schalten als auch für die Schaltanforderungen im Fehler- und Kurzschlussfall ergibt sich dadurch ein ähnlich breites Spektrum von Schaltanforderungen wie bei Wechselspannung, jedoch mit den besonderen Problemfeldern Kontaktmaterialwanderung und Lichtbogenlöschung.

2 Physikalische Grundlagen

2.1 Grundlagen zu Schaltlichtbogen

Der beim Öffnen von Stromkreisen auftretende Schaltlichtbogen führt den Strom gezielt zu Null und verhindert dadurch extreme Schaltüberspannungen, wie sie beim Schalten induktiver Lasten mit einem idealen Schalter entstehen würden.

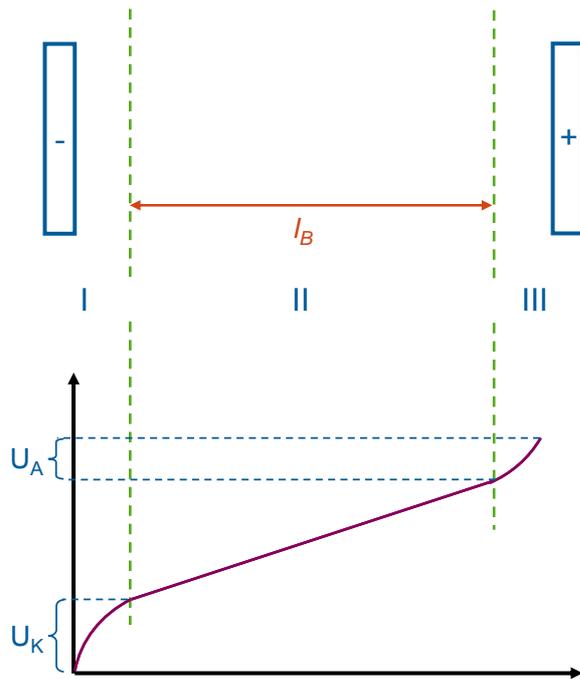


Bild 1 Potentialverlauf zwischen Elektroden

In Bild 1 ist ein exemplarischer Potentialverlauf eines statischen Lichtbogens zwischen zwei Elektroden dargestellt. Die Gesamtlichtbogen­spannung U_{LB} setzt sich aus den Teilspannungen des Anodenfalls U_A , des Kathodenfalls U_K und dem Säulengradienten (Lichtbogenlänge l_B) zusammen. Für einen frei brennenden Lichtbogen in Luft beträgt dieser $E \approx 30 \text{ V/mm}$.

$$U_{LB} = U_A + U_K + l_B \cdot E \quad (1)$$

Innerhalb der Lichtbogensäule treten Temperaturen von ungefähr 7.000 K bis 20.000 K auf. Man spricht von einem quasineutralen Plasma in dem die Elektronendichte gleich der Ionendichte ist. Für Berechnungen wird häufig die Annahme eines lokalen thermischen Gleichgewichts, d.h. Ionentemperatur \approx Elektronentemperatur \approx Neutralteilchentemperatur getroffen.

An der Kathode werden Elektronen über Thermofeld­emission generiert. Diese Elektronen tragen zu ca. 99% den Strom innerhalb des Lichtbogens. Die Fallspannung innerhalb des Kathodenraumes, mit einer Ausdehnung von 10^{-5} cm bis 10^{-4} cm , beträgt ungefähr 8 V.

Die Fallspannung innerhalb des Anodenraumes, erzeugt durch eine negative Raumladungszone vor der Anode, ist geringer und beträgt ungefähr 4 V. An der Anode wird der Elektronenstrom von der Kathode aufgenommen. Gleichzeitig werden positiv geladene Ionen erzeugt. Für einen weiten Strombereich können Anoden- und Kathodenfallspannung als unabhängig

von der Höhe des Lichtbogenstroms betrachtet werden.

In Bild 2 ist die statische Lichtbogengrenzkurve frei brennender Lichtbögen dargestellt. Im Bereich 1), d.h. bei Strömen kleiner I_{min} bzw. Spannungen kleiner U_{min} , kann kein Lichtbogen existieren („Schaltfunken“). Nähert man sich dem Bereich von Lichtbogenmindestspannung und –strom – Bereich 2 – so können beim Schaltvorgang kurze, instabile Lichtbögen ohne Lichtbogenplasma auftreten, wobei der Lichtbogenabriss statistisch ist. Erst bei sicherer Überschreitung dieser vom Elektrodenwerkstoff abhängigen, statistischen Grenzwerte können stabil brennende Schaltlichtbögen (Bereich 4), wie oben beschrieben, auftreten. Der ebenfalls dargestellte Bereich 3) beschreibt das Phänomen der Glimm- bzw. Koronaentladung, bei der durch Feldemission aufgrund der hohen äußeren Feldstärke Ladungsträger aus den Elektroden emittiert werden.

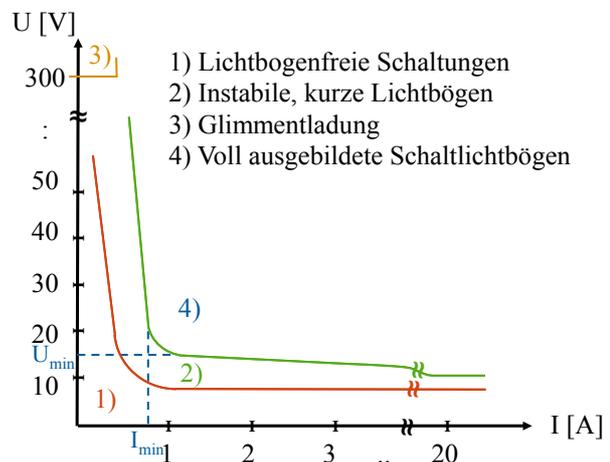


Bild 2 Statische Lichtbogengrenzkurve frei brennender Lichtbögen

Ob es in einem Stromkreis zu stabil brennenden Lichtbögen kommt, hängt somit von der Quellspannung und der Last ab. Die Verhältnisse in einem ohmschen Kreis mit der Last R sind in Bild 3 beschrieben, welches die Spannungs-Strom-Kennlinie des Lichtbogens und die Widerstandsgerade zeigt. Mit Hilfe dieser Darstellung lassen sich die Effekte beim Ausschaltvorgang innerhalb des ohmschen Gleichstromkreises erklären.

Aus den Schnittpunkten der Widerstandsgeraden und der Lichtbogenkennlinie ergeben sich zwei mögliche Arbeitspunkte (AP). Arbeitspunkt AP1 ist ein „stabiler Arbeitspunkt“. Bei Erhöhung des Stroms I erfordert der Lichtbogen eine höhere Bogen­spannung U_B als sie durch die Widerstandsgerade gegeben ist. Dies führt zu einem Widerstandsanstieg im Bogen da der äußere Leistungs-/Spannungseintrag zu gering ist,

weshalb der Strom wieder auf Wert von AP1 sinkt. Eine Reduzierung des Stroms führt zu einem Spannungsüberschuss am Bogen, durch den dieser aufgeheizt wird, Ladungsträger erzeugt werden und somit dessen Spannungsbedarf sinkt, weshalb der Strom wieder auf den Wert von AP1 ansteigt.

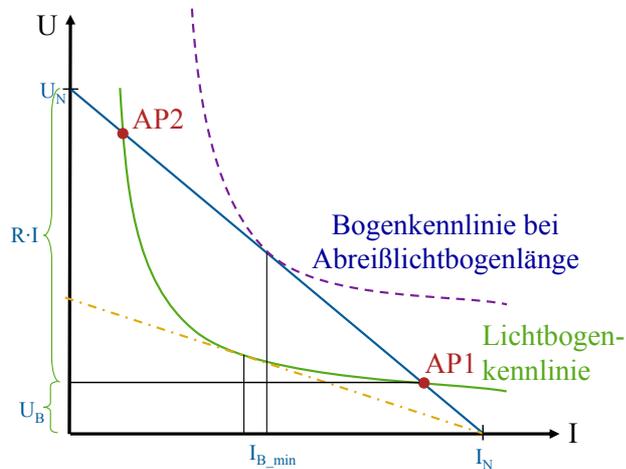


Bild 3 Arbeitspunkte der statischen Lichtbogenkennlinie

Beim Arbeitspunkt AP2 spricht man von einem „instabilen Arbeitspunkt“. Eine Erhöhung des Stroms führt zu einem Spannungsüberschuss, infolge dessen die Stromstärke auf Wert von AP1 ansteigt. Eine Reduzierung des Stroms erhöht den Spannungsbedarf über das Verfügbare hinaus, weshalb der Strom weiter sinkt bis der Lichtbogen erlischt.

Verlängert man den Lichtbogen so steigt dessen Spannungsbedarf an. In der grafischen Darstellung bedeutet dies eine Verschiebung der Lichtbogenkennlinie. Existiert zwischen Lichtbogen und Widerstandsgerade nur noch ein Berührungspunkt, so ist die Abreißlichtbogenlänge erreicht, der Lichtbogen wird instabil und wird bei weiterer Verlängerung verlöschen.

2.2 Einschaltlichtbogen

Aufgrund der mechanischen Elastizität der Schaltstücke und –träger kommt es beim Einschaltvorgang in der Regel nach der ersten Kontaktgabe zu einem Prellvorgang. Dieser Vorgang ist unter der Voraussetzung gegebener Lichtbogenmindestbedingungen (U_{min} , I_{min}) mit einem Lichtbogen verbunden.

Bild 4 zeigt den Einschaltvorgang eines Schließerkontaktes bei Lampenlast ($U = 13,5 \text{ V}$). Im Verlauf der Kontaktspannung sind die beiden dabei auftretenden Prellsprünge deutlich zu erkennen. Aufgrund der geringen Lichtbogenlänge während des

Prellvorganges, typischerweise deutlich kleiner 1 mm, kann hier von einem reinen Metaldampf- bzw. Anodenbogen ausgegangen werden. Der Einschaltstrom bricht aufgrund der im Vergleich zur treibenden Spannung relativ hohen Lichtbogenspannung von etwa 12 V für die Dauer der Prelllichtbögen deutlich ein, ohne allerdings ganz abzubrechen.

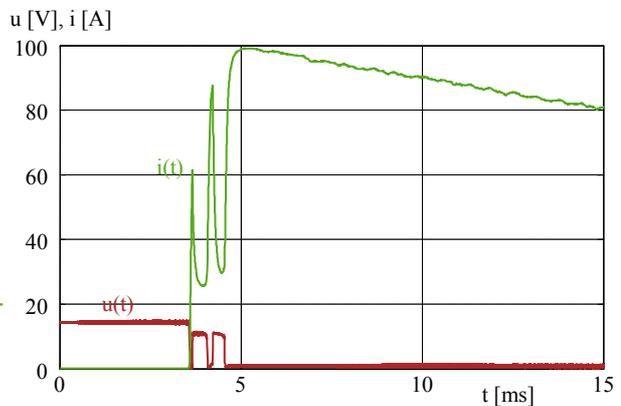


Bild 4 Einschaltprellsprünge eines Schließerkontaktes bei Lampenlast

Bei höherer Betriebsspannung wie z.B. 42 V wird dieser Einbruch des Stroms deutlich schwächer ausfallen, wodurch die Aufschmelzungen im Lichtbogenfußpunktbereich größer werden und damit die Gefahr des Verschweißens der Kontakte steigt.

2.3 Ausschaltlichtbogen

Der Ausschaltvorgang eines elektromechanischen Schaltgerätes lässt sich in folgende Phasen einteilen.

- Verringerung der Kontaktkraft
- explodierende Schmelzbrücke
- Metaldampfbogen / Anodenbogen / Kathodenbogen
- Gasbogen
- Lichtbogenlöschung

Die Mechanismen des im vorangegangenen Kapitel beschriebenen Einschaltprelllichtbogens sind vergleichbar, jedoch treten hier in der Regel nur die ersten drei Phasen auf.

Durch den Ausschaltlichtbogen muss der Strom zu Null gezwungen werden und danach die Lichtbogenstrecke vom leitenden in den nichtleitenden Zustand überführt werden. Weiterhin muss die Schaltstrecke nach Strom-Null ausreichend spannungsfest sein, um Wiederzündungen aufgrund der transienten wiederkehrenden Spannung (TRV) zu verhindern. Beim Schalten/Trennen von Gleichspannung wird zusätzlich eine hohe Kriechstromfestigkeit zur Sicherstel-

lung der permanenten Isolation nach dem Ausschalten gefordert.

Für einen ohmsch-induktiven Gleichstromkreis gilt folgende Maschengleichung:

$$U = L \frac{di}{dt} + R \cdot i + u_{LB} \quad (2)$$

Somit lässt sich als Grundvoraussetzung für einen erfolgreichen Ausschaltvorgang formulieren:

$$\frac{di}{dt} = \frac{U - R \cdot i - u_{LB}}{L} < 0 \quad (2a)$$

$$u_{LB} > U - R \cdot i \quad (2b)$$

Die Ausschaltdauer hängt im Wesentlichen von der Höhe der aufgebauten Lichtbogenspannung u_{LB} und der in der Induktivität L gespeicherten Energie ab. In Bild 5 ist exemplarisch der strombegrenzende Ausschaltvorgang eines Gleichstromkurzschlusses dargestellt.

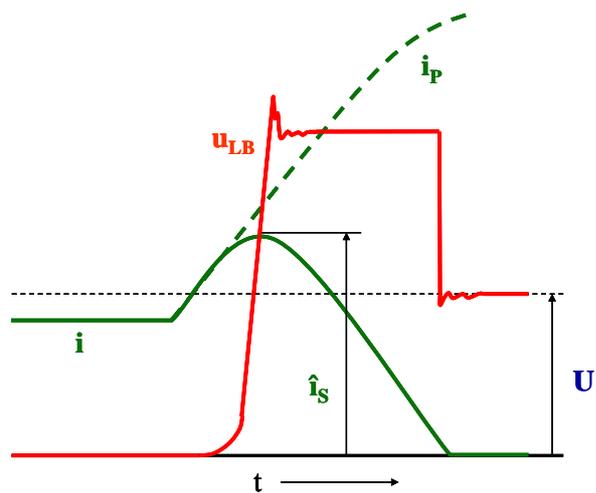


Bild 5 Prinzipieller Strom-/Spannungsverlauf eines DC Kurzschlussausschaltvorgangs

Direkt nach dem Zünden des Lichtbogens steht die Anoden-Kathodenfallspannung über den sich öffnenden Kontakten an. Die Lichtbogenspannung steigt linear mit der Öffnungsstrecke l zwischen den Elektroden bis es beim Einlauf in das Löschsystem zum steilen Anstieg der Bogenspannung kommt. Der Strom wird durch den Schaltlichtbogen begrenzt und zu Null gezwungen. Der Lichtbogen erlischt und über den Kontakten steht die volle Netzspannung U an.

3 Konstruktive Lösungen zum strombegrenzenden Schalten

Zur Erzeugung einer für das Gleichstromschaltprinzip (strombegrenzendes Schalten) ausreichend hohen Lichtbogenspannung bieten sich unterschiedliche konstruktive Maßnahmen an.

Zunächst kann über die Anzahl der beim Schalten auftretenden Teillichtbögen und somit gleichzeitig die Zahl der auftretenden Anoden-Kathodenfälle erhöht werden. Dies kann zum einen durch das Prinzip der „Vielfachunterbrechung“ erreicht werden. Um Gleichströme abzuschalten werden hierbei die Unterbrecherstellen der einzelnen Phasen klassischer Drehstromschaltgeräte in Reihe geschaltet, wobei die Unterbrecherstellen häufig (Schütze, Motorschutzschalter, tlw. Leistungsschalter) als Doppelunterbrechung ausgeführt sind.

Beim so genannten „Deion-Prinzip“ wird der Lichtbogen in die Löschbleche von entsprechend konstruierten Löschblechkammern getrieben und aufgeteilt, wodurch sich dessen Spannungsbedarf ebenfalls vervielfacht (siehe Bild 6).

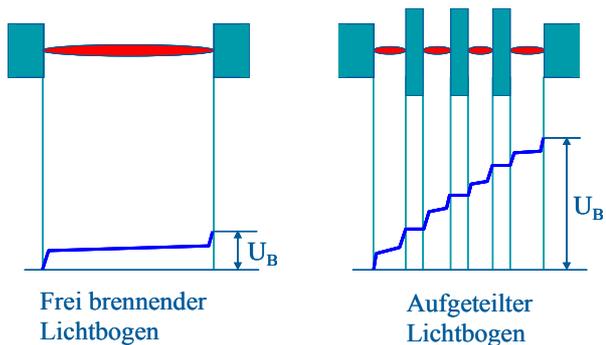


Bild 6 Spannungsverlauf an frei brennendem und aufgeteiltem Lichtbogen (Deion-Kammer)

Grundvoraussetzung für die Lichtbogenkommutierung in Löschsysteme wie z.B. Deion-Kammer ist das Erreichen eines Mindestabstandes zwischen den Kontakten für den Lichtbogenlauf. Bei so genannten Schnellschaltern erfolgt die schnelle Kontaktöffnung mittels optimierter mechanischer und elektrodynamischer Systeme bzw. den Einsatz spezieller Aktoren [6]. Hierdurch wird nicht nur der für eine Lichtbogenkommutierung notwendige Mindestabstand zwischen den Elektroden geschaffen, sondern auch die Lichtbogenlänge l_B in kurzer Zeit verlängert. Die Öffnung des Bewegkontaktes kann durch den gezielten Einsatz der Lorentzkraft

$$\vec{F}_L = \vec{j} \times \vec{B} \quad (3)$$

in Form z.B. eines Slot-Motors (Bild 7) gezielt unterstützt werden.

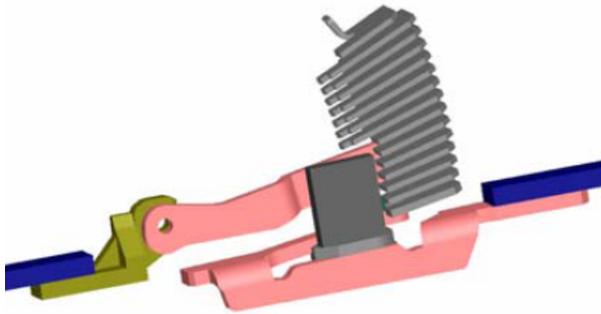


Bild 7 Slot-Motor Prinzip [7] zur Unterstützung der mech. Öffnungsbewegung

Aus Gleichung 1 ist ersichtlich, dass der Spannungsbedarf des Lichtbogens auch von der Lichtbogenfeldstärke E abhängt. Diese Lichtbogenfeldstärke ist zum einen abhängig von dem im Plasma auftretenden Strom i , lässt sich aber auch durch weitere konstruktive Maßnahmen beeinflussen. Nach Gleichung 4, welche vereinfacht die Zusammenhänge in einem zylindrischen Lichtbogen wiedergibt, bieten sich hierfür mehrere Möglichkeiten.

$$E \approx \frac{i}{r^2 \cdot \pi \cdot e \cdot N_e \cdot b_e} \quad (4)$$

So wird in Isolierstoffkammern (Bild 8) der Lichtbogen verlängert, insbesondere wird aber durch die intensive Kühlung der Plasmasäule die Elektronendichte N_e herabgesetzt, wodurch die Lichtbogenfeldstärke ansteigt.

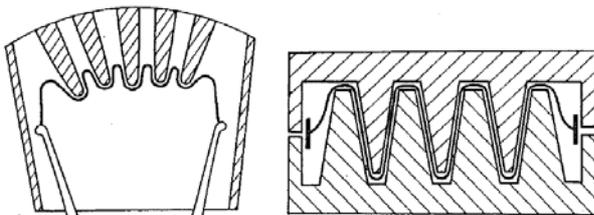


Bild 8 Grundprinzipien von Isolierstofflöschkammern [11]

Zusätzlich kann durch den Einschluss des Lichtbogens in enge Kanäle z.B. Ringspaltlöschkammern [8] dessen Querschnitt $r^2 \cdot \pi$ verkleinert und gleichzeitig die Kühlung intensiviert werden, was die Feldstärke und damit die Lichtbogen Spannung zusätzlich ansteigen lässt. Beim Einsatz gekapselter Schaltgeräte steigt der Gasdruck im Inneren bei Lichtbogenentwicklung deutlich an, wodurch die

Elektronenbeweglichkeit b_e verringert wird. Zusätzlich kann in gekapselten Schaltern das Schaltmedium variiert werden. Unter anderem wird in [9, 10] der Einsatz von H_2 als Schaltmedium beschrieben, wodurch wie in Bild 9 dargestellt die Lichtbogenfeldstärke ebenfalls erhöht werden kann.

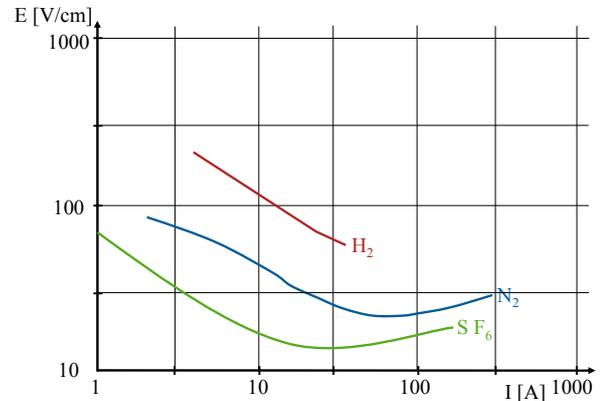


Bild 9 Stromabhängigkeit der Lichtbogenfeldstärke in unterschiedlichen Gasen [4]

Neben reinen Isolierstoffen finden gasende Kunststoffe zur Erhöhung des Drucks in der Schaltkammer, zur Kühlung des Lichtbogens und zur Verbesserung der Lichtbogenkommutierung in die Löschkammersysteme Einsatz.

Als Grundvoraussetzung für die Lichtbogenkommutierung wird im Gerätedesign die Gasströmung aber auch die Lorentzkraft gezielt ausgenutzt. Diese letztere elektromagnetische Bogenbebläsung kann durch Leiterschleifen im Kontaktträger oder durch eine zusätzliche Spule umgesetzt werden. Ist bei Gleichspannungsschaltern die Polarität bekannt und fest vorgegeben, wird wie in [9, 10] beschrieben, insbesondere bei Geräten kleiner Leistung, auch auf eine permanentmagnetische Bogenbebläsung zurückgegriffen.

In der Praxis erfolgt die Optimierung der Strombegrenzung im Gerätedesign üblicherweise durch die Kombination mehrerer der oben dargestellten Mechanismen.

Neben dem Aufbau einer hohen Lichtbogen Spannung bzw. -feldstärke und der damit verbundenen Strombegrenzung kann durch eine geeignete Beschaltung der Schaltstrecke ein Stromnulldurchgang bei DC erzeugt werden. Unter anderem in [2] wird gezeigt, wie durch die Parallelschaltung eines Löschkondensators bzw. -schwingkreises der Stromnulldurchgang und die Lichtbogenlöschung erzwungen werden können.

Die Beschaltung der Schaltstrecke ermöglicht den Einsatz von Technologien die eigentlich nicht für DC geeignet sind, wie Vakuumschalter [12] oder SF6 Leistungsschalter. Auf diese Weise sollen auch Schaltlösungen für HGÜ realisiert werden [13], was nach [14] bis heute jedoch noch nicht zufriedenstellend gelungen ist.

Durch die Kombination von Leistungselektronik und mechanischen Trennern lassen sich so genannte Hybridschalterkonzepte entwickeln. Der Einsatz solcher Hybridschalter wird sowohl im Anwendungsfall Photovoltaik [2] als auch Elektromobilität [15] diskutiert. Beim Schalten von Gleichströmen sind jedoch Maßnahmen zur Umwandlung der induktiv im Kreis gespeicherten Energie notwendig (Kommutierungskreise).

4 Anforderungen an Kontaktwerkstoffe zum Schalten von Gleichspannungen

Beim Schalten von Gleichstromlasten ergeben sich durch die im Vergleich zu Wechselspannung prinzipiell intensivere Lichtbogeneinwirkung erhöhte Anforderungen an die Abbrandfestigkeit der Kontaktwerkstoffe. Daneben ist der Kontaktwerkstoff insbesondere für die Lichtbogenkommutierung und den Effekt der Materialwanderung von Bedeutung.

4.1 Lichtbogenverharrzeiten

Um die Belastung für den Kontaktwerkstoff durch die Lichtbogenfußpunkte und die damit verbundene Erosion zu minimieren, aber auch um Maßnahmen der Strombegrenzung effektiv zu nutzen, ist ein gutes Lichtbogenlauf und -kommutierungsverhalten notwendig. In Bild 10 sind die Lichtbogenverharrzeiten unterschiedlicher Kontaktwerkstoffe in Abhängigkeit vom magnetischen Blasfeld dargestellt. Prinzipiell zeigen homogene Werkstoffstrukturen wie Feinsilber (Ag) und Wolfram (W) deutlich kürzere Lichtbogenverharrzeiten im Vergleich zu heterogenen Verbundwerkstoffen wie AgNi30 oder AgW40 [16]. Der Einfluss des Kontaktwerkstoffes auf die Lichtbogenverharrzeiten wirkt insbesondere bei kleineren Blasfeldstärken und einer vom Lichtbogenfußpunkt dominierten Bogenwanderung. Bei Ag/SnO₂ Kontaktwerkstoffen wird die Lichtbogenverharrzeit in starkem Maße vom vorliegenden Gesamtmetalloxidgehalt beeinflusst und nimmt mit steigenden Metalloxydgehalten zu [17].

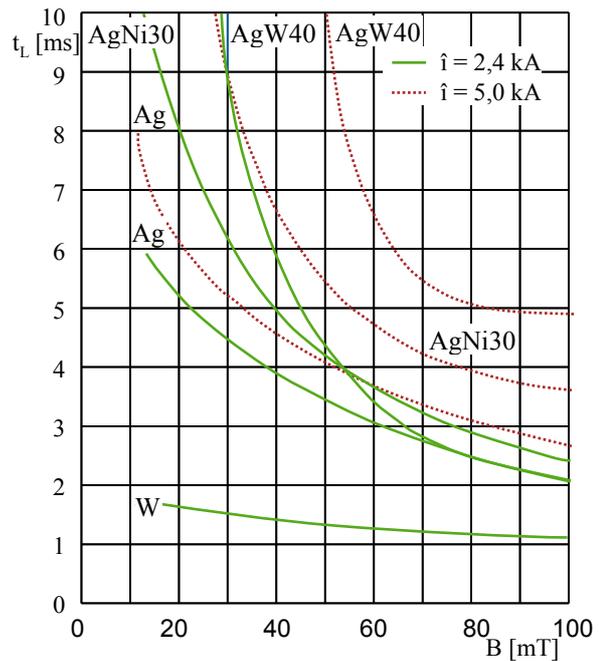


Bild 10 Lichtbogenverharrzeiten unterschiedlicher Werkstoffe [16]

Eine Reduzierung der Lichtbogenverharrzeiten durch Einbringung vormagnetisierbarer Partikel in den Kontaktwerkstoff wurde in [18] vorgestellt. Hierbei gilt es sicherzustellen, dass die Blasfeldwirkung unabhängig vom Kontaktwerkstoffabbrand erreicht wird. In [19] wurde ein Schaltsystem mit klassischen externen Permanentmagneten (Nd-Fe-B) zur Umsetzung der Schaltaufgabe bei hohen Gleichspannungen zurückgegriffen.

4.2 Materialwanderung

Lichtbögen zwischen Elektroden bewirken oft eine Materialwanderung von einem Schaltstück zum anderen. Für die unterschiedlichen transienten Lichtbogenphasen (Anodenbogen, Kathodenbogen) können verschiedene Materialwanderungsmechanismen und -richtungen beobachtet werden. Nach dem Schaltvorgang wird lediglich der Nettotransfer zwischen den Elektroden sichtbar. Beim Schalten von Wechselspannung wird der Vorgang der Materialwanderung durch die statistisch wechselnde Elektrodenpolarität bei Ein- und Ausschaltvorgang aufgehoben. [20]

Bild 11 zeigt den Ausfall eines KFZ Relais nach extremer Materialwanderung aufgrund eines ungünstigen DC Lastfalles (Kontaktwerkstoff Ag/SnO₂ 88/12).

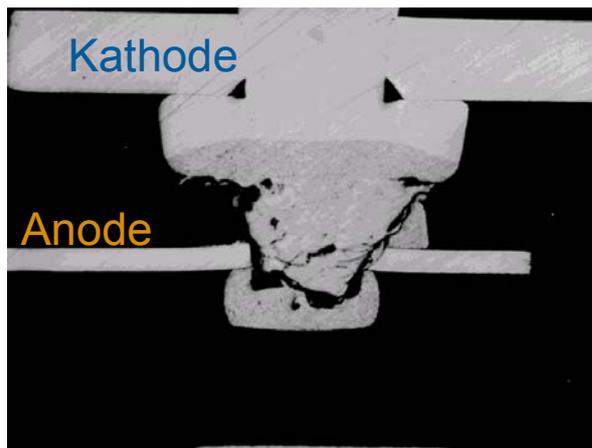


Bild 11 Extreme Materialwanderung durch ungünstigen Lastfall [21]

Materialwanderung ist jedoch keinesfalls auf den Bereich geringer Strom- und Spannungswerte limitiert, sondern kann bei Silberbasiswerkstoffen auch im Bereich von einigen 100 V und einigen 100 A von zu beobachten [22, 23, 24].

Der Effekt der Materialwanderung ist neben dem eingesetzten Kontaktwerkstoff sehr stark abhängig vom Schaltgerätedesign. Insbesondere Öffnungs- und Schließgeschwindigkeit, Prellverhalten, Tangentialkomponente in der Kontaktbewegung [25, 26] sowie eine unsymmetrische Kontakt erwärmung nehmen hier deutlichen Einfluss. Weiterhin spielt auch der zu schaltenden Stromkreis/Last eine wichtige Rolle.

5 Zusammenfassung

Verschiedene Entwicklungsrichtungen z.B. in den Bereichen regenerativer Energien und Elektromobilität erfordern das Schalten von Gleichspannungen in Bereichen in denen mit stabil brennenden Gleichstromlichtbögen zu rechnen ist. Der gezielte Einsatz des Schaltlichtbogens in elektromechanischen Schaltgeräten und die Kenntnis zu dessen Beeinflussungsmöglichkeiten können Lösungen für diese Anforderungen aufzeigen. Hierbei sind insbesondere die Existenz- und Löschbedingungen von Gleichspannungslichtbögen zu beachten.

Neben konstruktiven Maßnahmen zur Optimierung der Strombegrenzung und Lichtbogenlöschung bei DC nimmt auch der Kontaktwerkstoff Einfluss auf das Schaltverhalten, hierbei insbesondere auf die Lichtbogenverharrzeiten und somit auf die Effektivität von Bogenverlängerung oder Löschkammersystemen.

Besondere Beachtung beim Schalten von Gleichspannung ist dem Phänomen der Materialwanderung

zu widmen. Diese kann die Kontaktgabe verschlechtern oder durch mechanisches Verhacken auch zum Totalausfall im Gerät führen.

Prinzipiell sind zahlreiche Lösungsansätze bekannt. Spannend bleibt jedoch die finale Umsetzung in entsprechenden Schaltgeräten oder Gerätekombinationen. Leistungsfähige Kontaktwerkstoffe können im Gesamtkonzept zur Lösungsfindung beitragen.

6 Literatur

- [1] Vollmer, A.: Deutsche OEMs setzen Standards, AE – All Electronics, <http://www.all-electronics.de>, 2011
- [2] Meckler, P.: Schalten von Photovoltaik-Anlagen – Spezielle Anforderungen an das Schaltverhalten von Niederspannungsschaltgeräten, 20. VDE Seminar Kontaktverhalten und Schalten, Karlsruhe, 2009
- [3] Theisen, P.: A DC Switching Renaissance – Emerging Renewable Energy and Storage Applications Demand Modern Switching Technologies for Control and Protection, Morton Antler Lecture, 25th International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Charleston, SC, USA, 2010
- [4] Erk, A.; Schmelzle, M.: Grundlagen der Schaltgerätetechnik, Springer Verlag, 1974, S. 53
- [5] Braumann, P.; Warwas, T.: Analyse des Einschaltvorganges von Motorschaltern für die Entwicklung von Kontaktwerkstoffen, 11. VDE Seminar Kontaktverhalten und Schalten, Karlsruhe, 1991
- [6] Mützel, T.: Verfahren der Kurzschlussfrüherkennung zur Verbesserung der strombegrenzenden Wirkung von Niederspannungs-Leistungsschaltern, Dissertation, TU Ilmenau, 2008
- [7] Anheuser, M.; Zhong, Y.; Ferree, J.: Der Einfluss mechanischer Baugruppen auf das Schaltverhalten von Kompakt-Leistungsschaltern – Simulation und Experiment, 18. VDE Seminar Kontaktverhalten und Schalten, Karlsruhe, 2005
- [8] Schrank, T.; Wilkening, E.-D.; Kurrat, M.: Löschverhalten von DC-Schaltern mit Ringspaltlöschkammer, 20. VDE Seminar Kontaktverhalten und Schalten, Karlsruhe, 2009
- [9] Hauck, U.: Komponenten für Hochvolt-Energiespeicher und –bordnetze, International CTI Forum, München, 2009

- [10] Schneider, S.: EV-Relais für Hybridfahrzeuge – Innovative Technik, Relais aktuell, <http://www.schaltrelais.de/>, 2005
- [11] Bätz, H.; Rutzen, S.: Elektrotechnische Schaltgeräte, 6., stark bearb. Auflage, VEB Verlag Technik, Berlin, 1986
- [12] Shi, Z.Q.; et al.: Investigation on DC interruption based on artificial current zero of vacuum switch, 24th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV), Braunschweig, 2010
- [13] Kumar, A.; Lagerkvist, M.; Eklund, M.; QingYun, Y.: Three Gorges - Changzhou HVDC: Ready to Bring Bulk Power to East, 4th International Conference on Power Transmission & Distribution Technology, Changsha, 2003
- [14] Franck, C.M.: HVDC Circuit Breakers: A Review Identifying Future Research Needs, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, Issue 2, 2011, S.998 – 1007
- [15] Adlkofer, H.: Laden und Management von Lithium-Ionen Batterien, VDE-Kongress 2010: E-Mobility: Technologien – Infrastruktur – Märkte, Leipzig, 2010
- [16] Erk, A.; Schröder, K.-H.: Stabilisierung magnetisch abgelenkter Lichtbogenfußpunkte durch Verbundstoffe, Elektrie, Heft 4, 1969
- [17] Mützel, T.; Braumann, P.; Niederreuther, R.: Neue Ergebnisse zur Interaktion von Kontaktwerkstoff, Schaltgerät und Last beim Übertemperaturverhalten von Schützen, 20. VDE Seminar Kontaktverhalten und Schalten, Karlsruhe, 2009
- [18] Doublet, L.; Ben Jemaa, N.; Rivoirard, S.; Bourda, C.; Carvou, E.; Sallais, D.; Givord, D.; Ramoni, P.: New Contact Material for Reduction of Arc Duration for DC Application, 24th International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Saint-Malo, France, 2008
- [19] Vassa, A.; Carvou, E.; Rivoirard, S.; Doublet, L.; Bourda, C.; Jeannot, D.; Ramoni, P.; Ben Jemaa, N.; Givord, D.: Magnetic blowing of break arcs up to 360 V_{DC}, 25th International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Charleston, SC, USA, 2010
- [20] Neuhaus A.; Rieder, W.: The influence of kinetic parameters on failure mechanisms caused by material transfer, 50th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Seattle, WA, USA, 2004
- [21] Braumann, P.: Kontaktwerkstoffe auf Silberbasis, Seminarunterlagen Schaltkontakte in der elektrischen Energietechnik, Technische Akademie Wuppertal, 2011
- [22] Turner, H.W.; Turner, C.: Material Transfer between Heavy Current Contacts, 10th International Conference on Contact Phenomena, Budapest, Hungary, 1980
- [23] Gengenbach, B.; Michal, R.; Horn, G.: Erosion Characteristics of Silver Based Contact Materials in a DC Contactor, 12th International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Chicago, IL, USA, 1984
- [24] Behrens, V.; Honig, Th.; Michal, R.: Influence of Contact Material to the Performance of a DC Contactor, 43rd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Philadelphia, PA, USA 1997
- [25] Meyer, C.-L.: Prüfmethode und Werkstoff-Fragen bei funkenfreien Abschaltvorgängen an Abhebekontakten, Schweizer Archiv f. angew. Wiss. U. Technik 19, 1953, S. 148 – 153
- [26] Hewett, B.L.; Charman, D.: Contact erosion of reed relay materials, 4th International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Swansea, UK, 1968