

# Der Einfluss des Schaltlichtbogens auf den Übergangswiderstand von Ag/SnO<sub>2</sub> Kontaktwerkstoffen

Timo Mützel, Ralf Niederreuther

Umicore AG & Co. KG, Hanau, Deutschland, [timo.muetzel@eu.umicore.com](mailto:timo.muetzel@eu.umicore.com)

## Kurzfassung

Silberzinnoxid (Ag/SnO<sub>2</sub>) wird in zahlreichen Schützen und Relais als Kontaktwerkstoff eingesetzt. Die Approbation solcher Schaltgeräte erfordert gemäß gültiger Normen zahlreiche Prüfungen zum Erwärmungsverhalten, sowohl im Neu- als auch im geschalteten Zustand. Für die verschiedenen Prüfsequenzen können erfahrungsgemäß mitunter erhebliche Unterschiede im Erwärmungsverhalten beobachtet werden. Neben den Unterschieden nach verschiedenen Schaltlasten der Prüfsequenzen sind teilweise auch Unterschiede zwischen einzelnen Phasen eines Gerätes, insbesondere im geschalteten Zustand, beobachtbar.

Daher wurde in der vorliegenden Arbeit das Kontaktwiderstandsverhalten unter verschiedenen Lastbedingungen untersucht. Hierzu wurden AC-3 und AC-4 Lebensdauerversuche mit Schützen durchgeführt, und die elektrischen Signale (Strom, Kontaktspannung) beim Schließen und Öffnen der Kontakte aufgezeichnet und analysiert. Anschließend wurden diese Schaltlichtbogenkenngrößen mit dem Kontaktwiderstand – gemessen im Zuge von Übertemperaturversuchen – ins Verhältnis gebracht und ausgewertet. Zudem wurde über metallurgische Methoden die erzeugte Schaltoberfläche charakterisiert. Auf diese Weise konnte ein Zusammenhang zwischen den durch Ein- und Ausschaltlichtbogen erzeugten Oberflächenstrukturen und dem sich einstellenden Kontaktwiderstand herausgearbeitet werden.

## 1 Einleitung

Silberzinnoxid (Ag/SnO<sub>2</sub>) wird in zahlreichen Schützen und Relais als Kontaktwerkstoff eingesetzt. Mit der fortschreitenden Miniaturisierung steigen in diesen Anwendungsfeldern die von den Schaltgeräten zu beherrschenden Leistungsdichten stetig an. Zudem verändern sich die Schaltanforderungen durch Entwicklungen auf der Lastseite. Als Beispiele seien hier die hohen Einschaltströme von Startersystemen für Energiesparlampen oder energieeffizienten elektrischen Maschinen genannt. Um den Anforderungen bezüglich reduzierter dynamischer Schweißneigung und verringertem Materialabbrand bei hoher Schaltlichtbogenbelastung gerecht zu werden, werden in diesen Anwendungen vermehrt Ag/SnO<sub>2</sub> Kontaktwerkstoffe mit höherem Summenoxidgehalt eingesetzt [1, 2].

Die Typzulassung von Schaltgeräten erfordert gemäß gültiger Normen zahlreiche Prüfungen zum Erwärmungsverhalten, sowohl im Neu- als auch im geschalteten Zustand. Für die verschiedenen Prüfsequenzen können erfahrungsgemäß mitunter erhebliche Unterschiede im Erwärmungsverhalten beobachtet werden. Neben den Unterschieden nach verschiedenen Schaltlasten der Prüfsequenzen sind teilweise auch Unterschiede zwischen einzelnen Phasen eines Gerätes, insbesondere im geschalteten Zustand, beobachtbar [3]. Daher ist das Verständnis der Interaktion von Schaltlichtbögen bei verschiedenen Lasten, eingesetztem Kontaktwerkstoff und dem resultierenden Kontaktwiderstand entscheidende

Grundvoraussetzung zur Weiterentwicklung von Schaltgeräten und Kontaktwerkstoffen. Der Temperatureinfluss auf die Entmischung und die Ausbildung von Silberausschwitzungen auf der Kontaktfläche von Silbermetalloxidwerkstoffen wurde in [4] untersucht und dargestellt. In dieser Arbeit soll die Entwicklung des Kontaktwiderstandes bei unterschiedlicher Schaltlichtbogenbelastung näher betrachtet werden.

## 2 Beschreibung der Versuchssparameter

Als Basis der Untersuchungen diente ein Schütz der Leistungsklasse 11 kW. Als Kontaktmaterial wurde Ag/SnO<sub>2</sub> 86/14 PMT3, mit Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> und CuO Wirkzusätzen dotiert, verwendet. Der Kontaktwerkstoff wurde hergestellt über:

- Mischen von Silber- und Metalloxidpulvern
- Isostatisches Pressen
- Sintern
- Strangpressen und Walzen an Endmaß

Die so bestückten Schütze wurden AC-3 und AC-4 Lebensdaueruntersuchungen gemäß [5] unterzogen. Die Versuchssparameter sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Zur Sicherstellung konstanter Versuchsrandbedingungen wurden die Schütze einem Produktionslos entnommen und mechanisch vorvermessen (z.B. Überhub, statische Kontaktkraft).

	AC-3	AC-4	Temperaturverhalten
Spannung $U$	400/67 V	400 V	ca. 5 V
Strom $I$	150/25 A	150 A	45 A
Leistungsfaktor $\cos\varphi$	0,35	0,35	-
Schalzhäufigkeit	600 h <sup>-1</sup>	360 h <sup>-1</sup>	1 h <sup>-1</sup> lastlos
Schaltspiele $n$	500.000	10.000	24

**Tabelle 1** Übersicht der Versuchsparameter

Während der Durchführung der Lebensdaueruntersuchungen wurde besonderes Augenmerk auf die Lichtbogenvorgänge während der Ein- und Ausschaltphase gelegt. Hierzu wurden die Phasenströme und der Spannungsabfall über dem Schaltgerät je Phase während des Schaltvorgangs über entsprechende Messwandler mit einem Transientenrekorder erfasst. Aus diesen Messdaten konnten die Lichtbogenfußpunktenergien, welche mit dem Kontaktwerkstoff in Wechselwirkung treten, abgeschätzt werden. Dabei wird die mittlere Einschaltlichtbogenenergie  $W_E$  je Phase durch Multiplikation der Anoden-Kathodenfallspannung  $U_{AK}$  mit dem Integral des Phasenstromes  $i(t)$  über der Prellzeit  $t_{prell}$  unter Anwendung von Gleichung 1 bestimmt.

$$W_E = U_{AK} \cdot \int_{t_{prell}} i(t) dt \quad (1)$$

Die Berechnung der Ausschaltlichtbogenenergie  $W_A$  je Phase erfolgt für ein Schütz mit Doppelunterbrechung gemäß Gleichung 2. Hierzu wird aufgrund der Doppelunterbrechung die zweifache Anoden-Kathodenfallspannung multipliziert mit dem Integral des Phasenstromes von Lichtbogenbeginn  $t_l$  bis zur Lichtbogenkommutierungsspannung  $t_{100V}$ .

$$W_A = 2 \cdot U_{AK} \int_{t_l}^{t_{100V}} i(t) dt \quad (2)$$

In Tabelle 2 sind die mittleren Lichtbogenenergien je Phase, als arithmetisches Mittel aus ca. 2.000 Messwerten, zusammengefasst.

	Prüfsequenz und Phase					
	AC-3			AC-4		
	L1	L2	L3	L1	L2	L3
Einschaltprelllichtbogenenergie [Ws]	0,32	0,82	0,60	0,46	0,89	0,53
Ausschaltlichtbogenenergie [Ws]	1,1	1,3	0,8	12,3	15,2	7,9

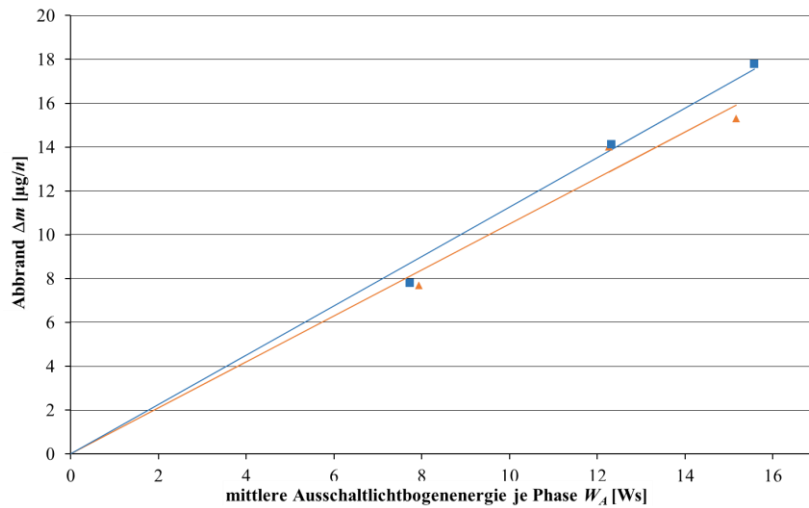
**Tabelle 2** Lichtbogenfußpunktenergien je Phase

Für beide untersuchten Lastbedingungen wurden vergleichbare Prelllichtbogenenergien berechnet (identischer Einschaltstrom). Die Ausschaltlichtbogenenergien unterschieden sich jedoch deutlich aufgrund der um den Faktor 6 geringeren Ströme und Spannungen im AC-3 Lastfall.

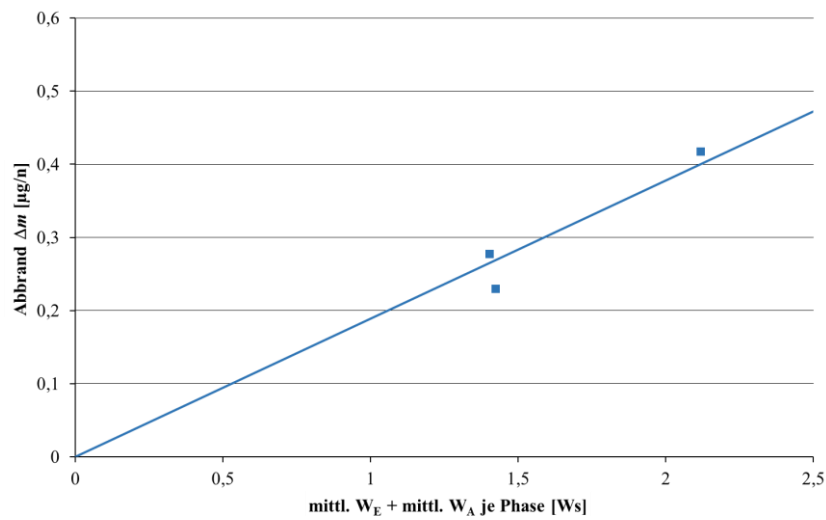
Untersuchungen zum Erwärmungsverhalten, beginnend mit einer Erwärmung des Gerätes im Neuzustand, wurden in Intervallen von ca. 20% der erwarteten Schaltlebensdauer begleitend zu den Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde der Lebensdaueruntersuchung unterbrochen, und das Schütz mit dem konventionellen thermischen Strom  $I_{th}$  belastet. Dieser beträgt 45 A, musste jedoch für die Prüfungen an Geräten aus der AC-3 Lebensdauerprüfung im geschalteten Zustand auf einen Prüfstrom von 30 A reduziert werden, da die Übertemperaturen  $\Delta T$  100 K an den Anschlussklemmen überstiegen. Nach einer Stunde Belastung des Gerätes mit Prüfstrom wird ein stabiler Endwert der Klemmentemperatur erreicht. Der Maximalwert aus den sechs Klemmentemperaturen wird gespeichert, und anschließend ein stromloser Schaltzyklus durchgeführt. Danach wird das Gerät wieder für eine Stunde mit dem Prüfstrom beaufschlagt. Dieses Vorgehen wurde 24-mal bei jeweils einer Lebensdauerschaltzahl zur Verbesserung der Statistik wiederholt. Zusätzlich wurde neben den Klemmentemperaturen auch der Kontaktwiderstand jeder Kontaktbahn während der Erwärmungsuntersuchung erfasst.

### 3 Lebensdaueruntersuchungen in Schützenanwendungen

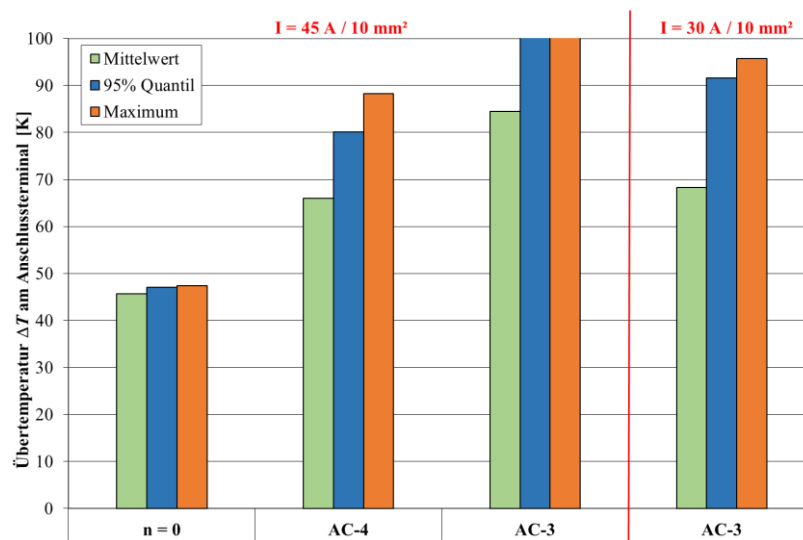
Nach Abschluss der Erwärmungsuntersuchung wurden die Kontaktsätze aus den Schützen ausgebaut und gewogen. Unter Berücksichtigung der Masseabnahme von einem zum nächsten Erwärmungszyklus konnte so der Masseverlust für jede Schützphase ermittelt werden. Da unter AC-4 Schaltbedingungen der Einfluss des Einschaltlichtbogens auf den Gesamtmasseverlust vernachlässigt werden kann [6], ist in Bild 1 der Masseverlust je Bahn auf die jeweilige Ausschaltlichtbogenenergie bezogen. Für jedes der beiden getesteten Schütze ist in Bild 1 jeweils eine Ausgleichsgerade für den Abbrand dargestellt, auch wenn strenggenommen kein lineares Verhältnis zwischen Abbrandverhalten und Lichtbogenenergie vorliegt [2]. Allerdings kann für das schmale betrachtete Lichtbogenenergiefenster von 8 bis 15 Ws im Zuge einer Kleinbereichsnäherung die Abbrandrate für den Kontaktwerkstoff Ag/SnO<sub>2</sub> 86/14 PMT3 unter den in diesem Schütztyp vorliegenden Randbedingungen bei AC-4 Last zu 1 µg/Ws bestimmt werden.



**Bild 1** Masseverlust je Kontaktbahn über Ausschaltlichtbogenenergie (AC-4)



**Bild 2** Masseverlust je Kontaktbahn über Summe aus Ein- und Ausschaltlichtbogenenergie (AC-3)



**Bild 3** Erwärmungsverhalten unter verschiedenen Lastbedingungen

Insbesondere seit dem aufkommenden Nutzen von FEM Software im Bereich der Schaltgeräteentwicklung wurde das Prellverhalten elektromechanischer Schütze optimiert, und dadurch die Prelllichtbogenenergien beim Einschalten minimiert. Diese Optimierungsmaßnahmen führen dazu, dass unter AC-3 Schaltbedingungen Prell-  $W_E$  und Ausschaltlichtbogenenergien  $W_A$  auf vergleichbarem Niveau liegen. Während in der Vergangenheit wesentlich der Einschaltvorgang zur Analyse der Abbrandmechanismen unter AC-3 in Betracht gezogen wurde [7], kann nach Optimierung des Prellverhaltens der Einfluss des Ausschaltvorgangs nicht mehr länger vernachlässigt werden, da beide ihren Beitrag zu den Reaktionen an der Kontaktfläche leisten.

Dementsprechend ist für AC-3 in Bild 2 der Kontaktmaterialmasseverlust  $\Delta m$  je Bahn über der Summe der mittleren Lichtbogenenergien ( $W_E + W_A$ ) aufgetragen. Diese Darstellung legt die Annahme zugrunde, dass beide Lichtbogenenergien gleichermaßen zum Abbrand beitragen und vernachlässigt Selbstheilungseffekte durch das Zusammenwirken der Lichtbögen, wie sie unter anderem in [8] aufgezeigt wurden. Unter diesen Annahmen lässt sich aus Bild 2 eine Abbrandrate von  $0,2 \mu\text{g}/\text{Ws}$  für den Kontaktwerkstoff Ag/SnO<sub>2</sub> 86/14 PMT3 unter AC-3 Last im vorliegenden 11 kW Schütz ableiten.

Weiterhin wurden Untersuchungen zum Temperaturverhalten unter den in Kapitel 2 genannten Randbedingungen durchgeführt. In Bild 3 sind die Maximalwerte, 95% Quantile und Mittelwerte der Klemmenübertemperaturen dargestellt, welche über 24 einzelne Einstundenzyklen im Neuzustand ( $n=0$ ) und 5 weiteren Zyklen verteilt über die Lebensdauer, für die jeweilige Gebrauchskategorie ermittelt wurden.

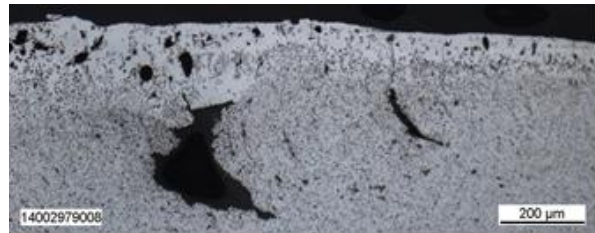
Stabile – geringe Abweichungen zwischen Mittel- und Maximalwert – sowie durch Auswertung mehrerer Schütze gut reproduzierbare Ergebnisse konnten zum Temperaturverhalten im Neuzustand erzielt werden. Nachdem die Schütze gemäß der Gebrauchskategorien belastet wurden steigen die Übertemperaturwerte insbesondere bezüglich der 95% Quantil- und Maximalwerte deutlich an. Unter AC-4 Last steigt die Klemmenübertemperatur nahezu um den Faktor 2 an. Aufgrund der noch höheren Temperaturen in einzelnen Phasen des Schützes mit AC-3 Vorbelastung musste hier der thermische Dauerstrom für die Prüfungen auf 30 A reduziert werden.

## 4 Diskussion der Ergebnisse

Nach Erreichen der Solllebensdauer wurden die Kontakte aus den Schützen ausgebaut, und metallographische Schlitze angefertigt. Anhand der Schlitze

soll versucht werden die Unterschiede bezüglich der Übertemperatur in den verschiedenen Prüfsequenzen zu erklären. Bild 4 und Bild 5 zeigen jeweils die für AC-4 und AC-3 typischen Lichtbogeneinflusszonen an der Kontaktfläche im Schliff.

In beiden Schliffbildern sind nach Schaltlichtbogenbelastung vertikale Entlastungsrisse aufgrund thermomechanischer Spannungen zu beobachten. Zusätzlich sind Entmischungen im Kontaktmaterial, insbesondere in der Wärmeeindringzone nahe der Kontaktfläche feststellbar.



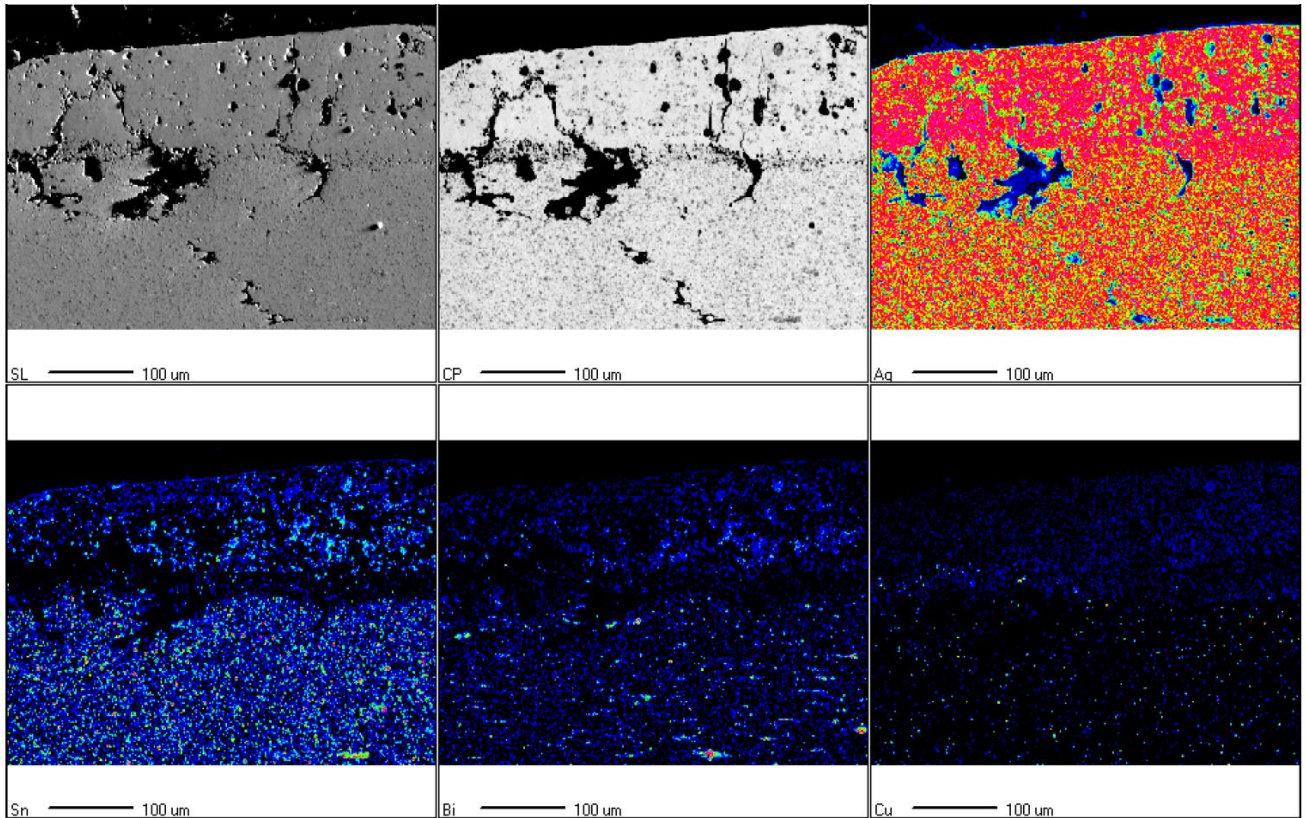
**Bild 4** Schliffbild nach AC-4 Lebensdauer



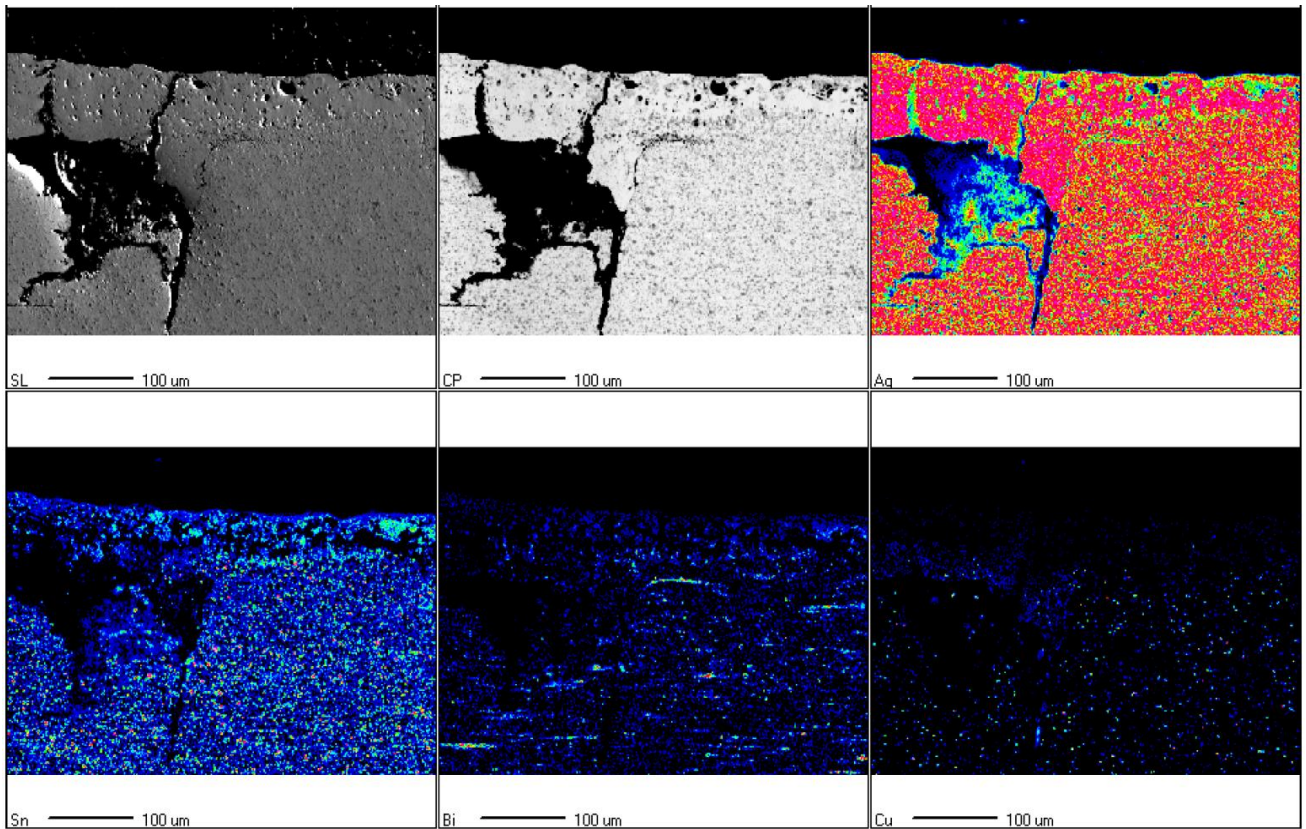
**Bild 5** Schliffbild nach AC-3 Lebensdauer

Mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) wurden die im Schliffbild sichtbaren Entmischungen innerhalb der Wärmeeindringzone näher untersucht. In Bild 6 und Bild 7 sind für die unterschiedlichen Schaltbelastungen jeweils die Sekundärelektronen- (SL) und die Materialkontrastbilder (CP), sowie die Elementverteilungsbilder für Silber (Ag), Zinn (Sn), Bismut (Bi) und Kupfer (Cu) im Schliff dargestellt.

Die Elementverteilung im Schliff nach AC-4 Belastung (Bild 6) zeigt starke Anreicherungen von Silber an der Kontaktfläche und eine Bildung grobkörniger Metalloxidagglomerate innerhalb der Wärmeeinflusszone auf. Nach AC-3 Belastung (Bild 7) fallen in der Elementverteilung insbesondere die Verarmung von Kupfer, sowie die Anreicherung von Zinn und Bismut an der Kontaktfläche auf. Diese Bismut-Zinn-Oxid Deckschicht, vermutlich Bismut Stannat Bi<sub>2</sub>Sn<sub>2</sub>O<sub>7</sub> [9], bildet aufgrund ihrer vergleichsweise geringen elektrischen Leitfähigkeit eine Sperrschicht zwischen den Kontakten im geschlossenen Zustand aus. Diese Sperrschicht ist somit verantwortlich für die hohen Übertemperaturen nach AC-3 Belastung (Bild 3), welche eine Reduzierung des Prüfstromes erforderten.



**Bild 6** EDX Elementverteilung im Schliffbild nach AC-4 Belastung



**Bild 7** EDX Elementverteilung im Schliffbild nach AC-3 Belastung

Während der Versuche zum Erwärmungsverhalten wurden neben den Temperaturen an den Anschlussklemmen auch die Spannungsabfälle über den einzelnen Kontaktbahnen sowie der Strom gemessen. Durch Division lässt sich aus beiden Werten der Kontaktwiderstand  $R_k$  zum jeweiligen Zeitpunkt  $t$  ermitteln.

Auf Basis der berechneten Kontaktwiderstände soll im Folgenden die Abhängigkeit der Übertemperatur von den Schaltlichtbogenenergien untersucht werden. Da die Übertemperatur eine Folge Joulescher Erwärmung, hervorgerufen durch den Kontaktwiderstand sowie abhängig vom Gerätedesign ist, muss der Einfluss der Lichtbogenfußpunktenergien auf den Kontaktwerkstoff basierend auf der physikalischen Größe des Kontaktwiderstandes untersucht werden. Jedoch konnte bei Auswertung der Versuche zunächst keine direkte Korrelation zwischen Kontaktwiderstand und Prell- bzw. Ausschaltlichtbogenenergien ermittelt werden.

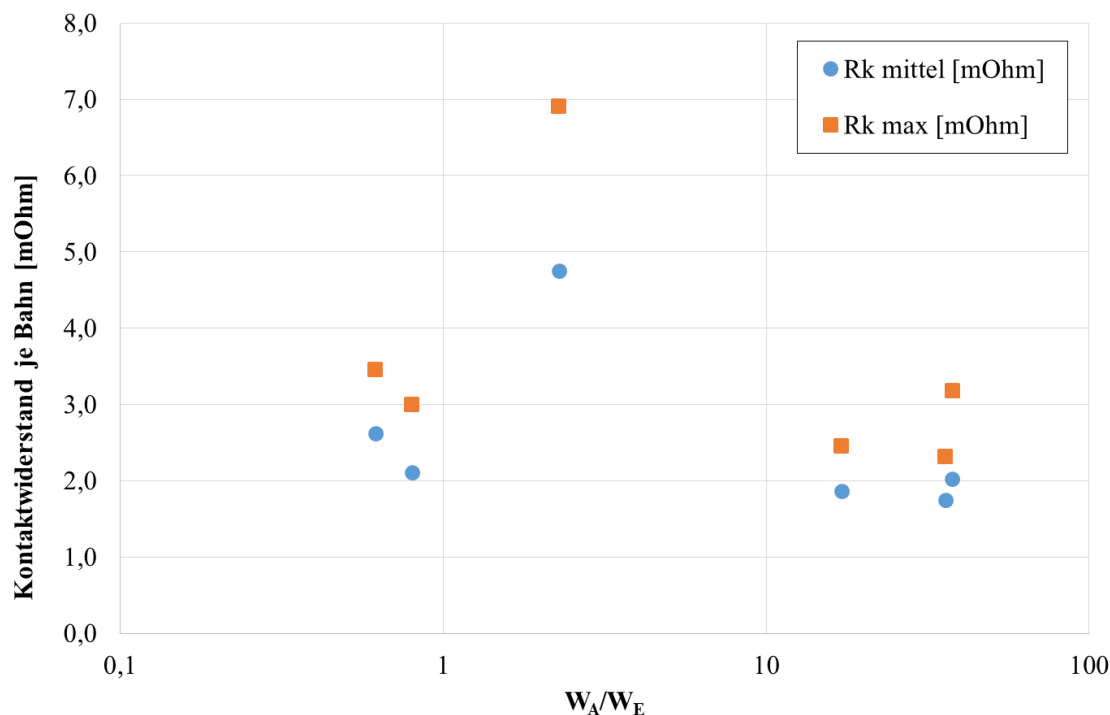
Daher wurde in weiteren Auswerteschritten der Kontaktwiderstand mit dem Quotienten aus mittlerer Ausschaltlichtbogen- und Prellbogenenergie  $W_A/W_E$  verglichen. Das zugehörige Ergebnis ist exemplarisch bei halber Lebensdauer –  $n = 250.000$  für AC-3 und  $n = 5.000$  für AC-4 – in Bild 8 dargestellt.

Beim Schalten unter AC-4 Last dominieren die Lichtbogenfußpunktenergien des Ausschaltlichtbogens im Vergleich zum Prelllichtbogen, insbesondere aufgrund der längeren mittleren Einwirkdauer während des

Ausschaltvorgangs. Das typische Verhältnis zwischen Aus- und Einschaltlichtbogenenergie liegt im Bereich  $W_A/W_E > 10$ . Die Kontaktwiderstände für diesen Bereich liegen, ebenso wie die Übertemperaturwerte unter AC-4 Last, auf einem vergleichsweise niedrigem Niveau mit einem Mittelwert von 2 mΩ und Maxima von 2,5 bis 3,2 mΩ.

Ein Verhältnis  $W_A/W_E < 1$ , bei dem die Prelllichtbogenenergien größer oder annähernd gleich den Ausschaltenergien sind, ist typisch für den AC-3 Schaltfall. Hier können ebenfalls niedrige Bahnwiderstände im Bereich von 2,0 bis 3,5 mΩ beobachtet werden.

Eine der drei Kontaktbahnen des unter AC-3 Last getesteten Schützes liefert aufgrund des Schaltsynchronismus [10] ein Lichtbogenenergieverhältnis  $W_A/W_E$  zwischen 1 und 10. Im vorliegenden Fall handelt es sich um Phase L1, welche statistisch gesehen häufig als erstes geschlossen war. Aufgrund des Schließverzuges und des nicht geerdeten Sternpunktes waren die in L1 auftretenden Prellsprünge nicht lichtbogenbehaftet, da unter diesen Bedingungen ein Stromfluss erst nach dem Schließen der zweiten Kontaktbahn erfolgen kann. Diese Randbedingungen führen nahezu zu einer reinen Ausschaltbelastung in der betroffenen Phase, und generieren die mit Abstand höchsten gemessenen Bahnwiderstände von bis zu 7 mΩ. Ursache für die hohen Widerstände sind die in Bild 7 dargestellten Oxiddeckschichten, welche sich unter diesem Schaltregime bevorzugt auszubilden scheinen.



**Bild 8** Kontaktwiderstand bezogen auf Lichtbogenenergien

Der dargestellte Fall zeigt deutlich wie empfindlich das System Schaltgerät-Kontaktwerkstoff, insbesondere im Bereich Kontaktwiderstand, auf Veränderungen bzw. kleine Unterschiede reagiert. Daher müssen auch geringfügige Änderungen im Gerätedesign bezüglich ihrer Auswirkungen auf das Gesamtsystem sehr sorgfältig betrachtet werden.

## 5 Zusammenfassung

Es wurden Lebensdauerversuche mit Schützen der Leistungsklasse 11 kW unter Normal- und Schwerlast (Gebrauchskategorien AC-3 und AC-4) durchgeführt. Als Kontaktwerkstoff wurde Ag/SnO<sub>2</sub> 86/14 PMT3 in den Schützen eingesetzt. Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit waren Untersuchungen zum Über- und Kontaktwiderstandsverhalten nachdem die Kontaktoberfläche unter den verschiedenen Gebrauchskategorien vorbelastet war.

Während der Untersuchungen zum Erwärmungsverhalten waren signifikante Unterschiede im Kontaktwiderstand zu beobachten. Einzelne Phasen wiesen unter speziellen Bedingungen den doppelten Bahnwiderstand in Vergleich zu anderen Versuchsrandbedingungen auf. Die hohen Kontaktübergangswiderstände konnten durch den metallographischen Nachweis von Bismut-Zinn-Oxid-Deckschichten erklärt werden, welche sich unter diesen Randbedingungen in besonderem Maße ausbilden. Besonders hervorzuheben ist, dass diese Randbedingungen durch das Verhältnis der auftretenden Lichtbogenfußpunktenergien beim Ein- und Ausschaltvorgang  $W_A/W_E$  beschrieben werden konnten. Ein tiefgehendes Verständnis der durch den Lichtbogen im Kontaktwerkstoff hervorgerufenen Reaktionen ist Grundvoraussetzung für die Entwicklung neuer optimierter Kontaktwerkstoffe.

## 6 Literatur

- [1] F. Hauner, D. Jeannot, K. McNeilly, "Advanced AgSnO<sub>2</sub> Contact Materials with High Total Oxide Content," 21<sup>st</sup> International Conference on Electrical Contacts, Zurich, Switzerland, 2002
- [2] T. Mützel, R. Niederreuther, „Kontaktwerkstoffe für Hochleistungsanwendungen“, 21. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2011
- [3] T. Mützel, P. Braumann, R. Niederreuther, „Neue Ergebnisse zur Interaktion von Kontaktwerkstoff, Schaltgerät und Last beim Über- und Kontaktwiderstandsverhalten von Schützen“, 20. Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 2009
- [4] T. Schöpf, F. Hauner, I. Hundt, "Effects of Different Loads on the Surface of Silver Metal Oxide Contacts for General-Purpose Relays," 19<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, Nuremberg, Germany, 1998
- [5] DIN EN 60947-4-1 VDE 0660-102:2014-02 Niederspannungsschaltgeräte: Teil 4-1: Schütze und Motorstarter – Elektromechanische Schütze und Motorstarter
- [6] P. Braumann, H. Kolb, K.-H. Schröder, W. Weise, "Optimization of Ag/SnO<sub>2</sub> Contact Material for Use in Contactors," 16<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts, Loughborough, UK, 1992
- [7] P. Braumann, J. Lang, "Kontaktverhalten von Ag-Metalloxiden für den Bereich höherer Ströme", 11. VDE Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 1991
- [8] E. Hetzmanseder, W. Rieder, "The Influence of Bounce Parameters on the Make Erosion of Silver/ Metal-Oxide Contact Materials," 39<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Pittsburgh, PA, USA, 1993
- [9] M. Graff, „Einfluß oxidischer Zusätze auf die Phasenbildung und die Schalteigenschaften von Kontaktwerkstoffen auf Silber/Zinnoxid-Basis“, Dissertation, TU Darmstadt, 2001
- [10] P. Braumann, „Auswirkungen von Schalt-Synchronismus, Phasenfolge und Schließverzögerung auf das Abbrandverhalten von Kontaktwerkstoffen“, 12. VDE Albert-Keil-Kontaktseminar, Karlsruhe, 1993