

Kontaktwerkstoffe für Hochleistungsanwendungen

Timo Mützel, Ralf Niederreuther

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

Kurzfassung

Aufgrund aktueller Entwicklungen in den Anwendungsgebieten regenerative Energien, Industrie und Automobile werden besondere Anforderungen an elektromechanische Schaltgeräte sowie Kontaktwerkstoffe gestellt. Insbesondere steigen aufgrund weitergehender Geräteminiaturisierung die Energiedichten in den Geräten an. Zudem zwingt der Anstieg der Edelmetallpreise Schaltgerätehersteller zur Edelmetalleinsparung bei Kontaktwerkstoffen.

In Schützversuchen unter Schwerlast wurde der Anstieg der Energiedichten simuliert und ein stark exponentieller Zusammenhang zwischen Ausschaltenergie und Abbrand aufgezeigt. Generell konnte der positive Einfluss von höheren Metalloxidgehalten auf das Abbrandverhalten von Silber-Zinnoxid Kontaktwerkstoffen gezeigt werden, welcher sowohl Maßnahmen zur Leistungssteigerung als auch zur Edelmetalleinsparung ermöglicht.

Als weitere wichtige Eigenschaft von Kontaktwerkstoffen wurde die Sicherheit gegen dynamische Verschweißungen betrachtet. Insbesondere beim Einsatz unsymmetrischer Kontaktpaarungen aus AgNi und Silber-Metalloxid bestehen bezüglich der Schweißneigung von Ag/ZnO und Ag/SnO₂ deutliche Unterschiede. Verschweißkräfte können bei AgC im Wesentlichen durch den Graphitgehalt im Kontaktwerkstoff und den Umformgrad beeinflusst werden.

Die im Beitrag vorgestellten experimentellen Ergebnisse zum Einfluss der Kontaktwerkstoffe auf das Schaltverhalten können als Basis für Schaltgerätelösungen in Hochleistungsanwendungen, die aktuellen Entwicklungen auf dem Energiesektor gerecht werden, aufzeigen.

1 Einleitung

Das Umfeld elektrischer Kontakte der Energietechnik ist charakterisierbar durch einen steigenden Bedarf an elektrischer Energie, sowie Megatrends wie „Regenerative Energien“ und „Elektrifizierung der Automobile“. Für den Bedarf an elektrischer Energie ist für den Zeitraum von 2007 bis 2035 ein Anstieg von +49% prognostiziert. Der Anteil elektrischer Energieträger soll im gleichen Zeitraum überproportional um +87% [1] steigen. Dieser Anstieg und die Dezentralisierung der Energieerzeugung durch Regenerative Energieträger erfordert komplexere Netzstrukturen mit großen Übertragungswegen sowie die Etablierung von Smart Grids.

Parallel existieren technologische Trends auf dem Gerätesektor. Durch die voranschreitende Geräteminiaturisierung wachsen die Leistungsdichten in den Schaltern. Zur Verringerung der Energieaufnahme im eingeschalteten Zustand werden z.B. in Schützen gleichzeitig die Kontaktkräfte verringert.

Der kontinuierliche Anstieg der Edelmetallpreise – Verdopplung bei Silber in den letzten 12 Monaten – dessen Ende nicht abzusehen ist, zwingt Schaltgeräte-

hersteller zur Edelmetalleinsparung bei Kontaktwerkstoffen.

Insbesondere durch das Wachstum der Anwendungsgebiete „Regenerative Energien“ und „Elektrifizierung der Automobile“ wird von den Schaltgeräten das sichere Beherrschen von hohen Gleichspannungen (Photovoltaik, Batterien als Energiespeicher) gefordert.

Aus der Summe dieser Entwicklungen ergeben sich zusätzliche Anforderungen an das Schalten mit elektromechanischen Schaltgeräten und damit insbesondere an die eingesetzten Kontaktwerkstoffe in allen drei Grundeigenschaften – Schweißresistenz, Kontaktwiderstand, Abbrandfestigkeit. Beim Schalten von Gleichspannungen treten zudem Löscheigenschaften und Materialwanderungsaspekte in den Vordergrund. Ziel des Beitrags ist es Lösungsansätze aufzeigen, um der sich abzeichnenden Entwicklung gerecht zu werden.

2 Schützenanwendung

Elektromechanische Schütze werden in der elektrischen Energieverteilung zum Schalten von Motor-

lasten eingesetzt. Als Kontaktwerkstoffe sind in Schützen kleiner Leistung Silbernickel (AgNi) und bei mittlerer bzw. großer Leistung Silber-Zinnoxide (Ag/SnO₂) verbreitet.

Die Herstellung aller, hinsichtlich ihrer Schalteigenschaften in Hochleistungsanwendungen untersuchten, Kontaktwerkstoffe erfolgte mittels Pulvertechnologie durch Mischen, Pressen, Sintern und Strangpressen. Die folgenden Angaben zur Zusammensetzung beziehen sich auf Masseprozent.

- Ag/SnO₂ 88/12 SPW7: Wirkadditive Bi₂O₃, WO₃
- Ag/SnO₂ 86/14 PMT3: Wirkadditive Bi₂O₃, CuO
- Ag/ZnO 92/8 SP(ohne Wirkadditive)
- AgNi 90/10

Ziel der Untersuchungen ist eine Charakterisierung der Kontaktwerkstoffe für Schützenanwendungen im Hochleistungsbereich bezüglich Abbrand, Kontaktwiderstand und Schweißresistenz unter Einbeziehung von unsymmetrischen Werkstoffpaarungen. Bei der Auswahl der Versuchsparameter wurde besonderer Wert auf zukünftige Schaltanforderungen der Kontaktwerkstoffe in diesem Einsatzgebiet gelegt.

Die Versuchsparameter der durchgeführten Schaltversuche in einem 132 kW Standardschütz sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

| Parameter | Wert |
|-------------------------------|---------|
| Spannung U | 400 V |
| Strom I | 1000 A |
| Leistungsfaktor $\cos\varphi$ | 1 |
| Schaltfrequenz | 250 1/h |

Tabelle 1 Versuchsparameter 132 kW Schütz

Zur Beschreibung des Abbrandes ist in Bild 1 der Abbrand Δm_n über der mittleren Ausschaltenergie W_A dargestellt. Die Berechnung der Ausschaltenergie eines Schützes mit zwei Unterbrecherstellen (beidseitig) erfolgt dabei nach [2] durch Multiplikation der doppelten Anoden-Kathodenfall-Spannung mit dem Integral des Leiterstromes vom Öffnen der Kontakte t_l bis zum Erreichen einer Lichtbogen-spannung von 100 V:

$$W_A = 2 \cdot U_{AK} \int_{t_l}^{t_{100V}} i(t) dt \quad (1)$$

Nach Erreichen der Schwellspannung von 100 V kann von einer Kommutierung des Lichtbogens vom Kontaktmaterial in die Lichtbogenlöschkammer ausgegangen werden. Der mittlere Masseverlust pro Schaltung Δm_n wird für jede Phase durch Wägung der Kontakte ermittelt. Jeder Punkt im wiedergegeben Diagramm beschreibt damit das Abbrandverhalten einer der drei Phasen des jeweiligen Schützes. Die zugehörigen Regressionsgeraden wurden unter Vernachlässigung des Einschaltvorgangs durch den Nullpunkt gelegt. Die Steigung der Geraden,

$$m_a = \Delta m_n / W_a \quad (2)$$

beschreibt damit die Qualität des Kontaktwerkstoffes bezüglich seines Abbrandes.

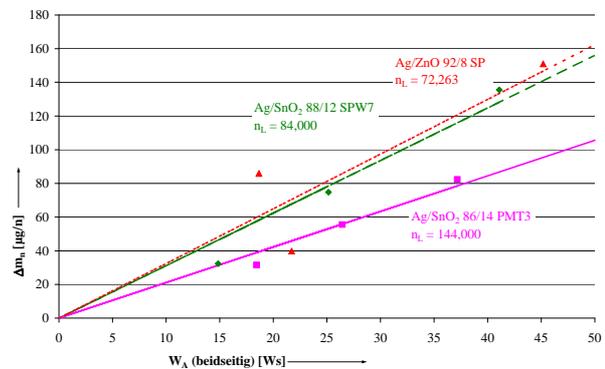


Bild 1 Abbrand Δm_n über der Ausschaltenergie W_A verschiedener Silber-Metalloxid Werkstoffe

Geht man von Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 als Standardwerkstoff aus, so zeigt Ag/ZnO 92/8 SP bezüglich des Abbrandes ein vergleichbares Verhalten (Bild 1), dokumentiert durch die nahezu identische Steigung der Regressionsgeraden. Die etwas geringere Lebensdauer von Ag/ZnO dürfte auf den etwas höheren Energieumsatz in der am stärksten belasteten Phase zurückzuführen sein, als eine Folge des Synchronismus des Schützes mit dem Netzsinus beim Ausschalten [2].

Die Variante Ag/SnO₂ 86/14 PMT3 zeigt gegenüber den anderen beiden Werkstoffen ein günstigeres Abbrandverhalten, wie sich im flacheren Verlauf der Regressionsgeraden widerspiegelt. Es wird nahezu die doppelte Lebensdauer erreicht. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass aufgrund des Synchronismus die Energiewerte der am stärksten belasteten Phase hier am geringsten war.

Bezüglich des Temperaturanstiegs bei Nennstrom liegen Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 und Ag/ZnO 92/8 auf gleichem Niveau, wie aus Bild 2 hervorgeht. Die Werte von Ag/SnO₂ 86/14 PMT3 liegen dagegen um etwa 5 K höher. Auffallend ist hier die geringere

Streuung der Messwerte. Dieses Verhalten der Variante PMT3 hat sich auch in anderen Versuchsserien bestätigt.

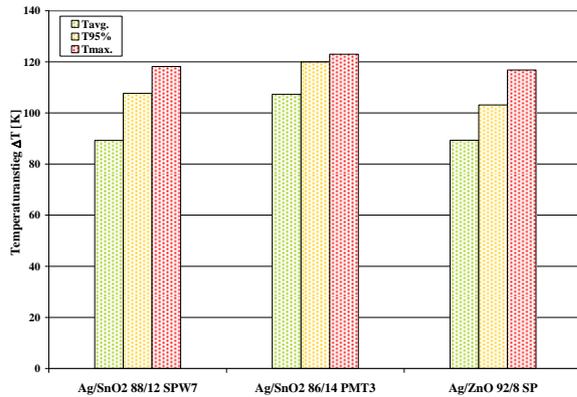


Bild 2 Temperaturanstieg ΔT an den Kontaktbrücken bei Nennstrombelastung

Die in Bild 1 dargestellte lineare Regression zur Betrachtung von Abbrandphänomenen ist nur für kleine Ausschaltenergiebereiche zulässig. Bereits in [3] ist für Ausschaltlichtbögen eine exponentielle Abhängigkeit des Abbrandes vom Lichtbogenstrom bzw. der Lichtbogenarbeit dargestellt. Im Folgenden soll das Abbrandverhalten der beiden Ag/SnO₂ Varianten (88/12 SPW7 und 86/14 PMT3) über einen größeren Energiebereich verglichen werden. Hierzu wurden die oben dargestellten Experimente durch Schützversuche in anderen Leistungsbereichen ergänzt. Als Ein- und Ausschaltstrom wurde der vierfache AC-3 Nennstrom der Schütze bei einem Leistungsfaktor $\cos\varphi = 1$ zur Durchführung der Schützlebensdauerversuche gewählt. In Bild 3 sind die Abbrandwerte des Kontaktwerkstoffes Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 wiedergegeben.

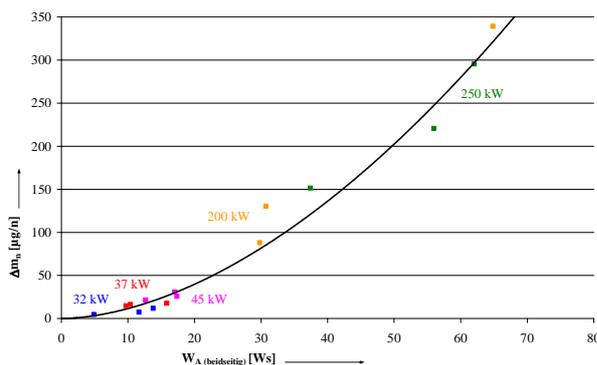


Bild 3 Abbrand Δm_n über der Ausschaltenergie W_A von Werkstoffe Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 in Schützen verschiedener Leistungsklassen

Durch Regression kann für den Kontaktwerkstoff Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 folgender Zusammenhang

zwischen Abbrand und Ausschaltenergie ermittelt werden:

$$\Delta m_n = 0,194 \cdot W_A^{1,78} \quad (3)$$

In analoger Weise sind in Bild 4 die Abbrandwerte für Ag/SnO₂ 86/14 PMT3 dargestellt.

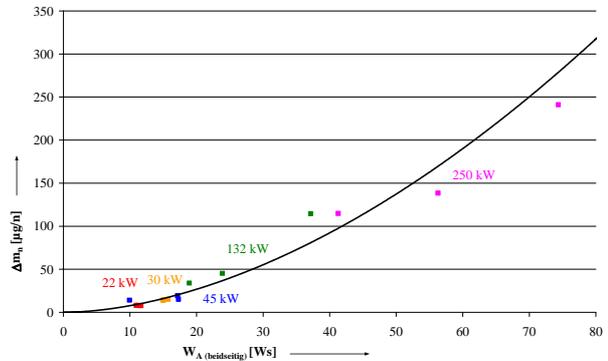


Bild 4 Abbrand Δm_n über der Ausschaltenergie W_A von Werkstoffe Ag/SnO₂ 86/14 PMT3 in Schützen verschiedener Leistungsklassen

Die Regression für Ag/SnO₂ 86/14 PMT3 berechnet sich zu:

$$\Delta m_n = 0,129 \cdot W_A^{1,78} \quad (4)$$

Ein Vergleich der Abbrandfaktoren kann aus dem Verhältnis der Gleichungen 3 und 4 ermittelt werden:

$$\frac{0,129 W_A^{1,78}}{0,194 W_A^{1,78}} = 0,665 \quad (5)$$

Dieses Verhältnis entspricht einer Reduzierung des Kontaktwerkstoffabbrandes um 33,5% bei Einsatz von Ag/SnO₂ 86/14 PMT3 anstelle von Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 unter Schwerlastbedingungen. Weiterführende Versuche haben gezeigt, dass dieser Effekt im Wesentlichen durch den Gesamtmetalloxidgehalt der Ag/SnO₂ Werkstoffe und nicht durch den Einsatz verschiedener Wirkzusätze bestimmt ist.

Durch den niedrigeren Silbergehalt in Verbindung mit geringerem Masseverlust bieten Silber-Zinnoxide mit höherem Metalloxidgehalt wie die dargestellte Variante 86/14 PMT3 nicht nur technische Vorteile bezüglich Abbrand, sondern auch Potential zur Edelmetalleinsparung.

Für die unterschiedlichen Schützbaugrößen werden verschieden große Kontaktwerkstoffauflagen und Gerätekonstruktionen eingesetzt. Hinsichtlich des Gerätedesigns sind dies insbesondere Öffnungsgeschwindigkeiten, -wege, magnetisches Blasfeld,

Einsatz von Löschkammern etc. Um den Einfluss der Baugrößen aus den Abbrandergebnissen herauszurechnen wurde in Bild 5 am Beispiel von Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 der Masseverlust auf eine flächenbezogene Ausschaltenergie W_{AF} (Ausschaltenergie dividiert durch Kontaktstückfläche) dargestellt.

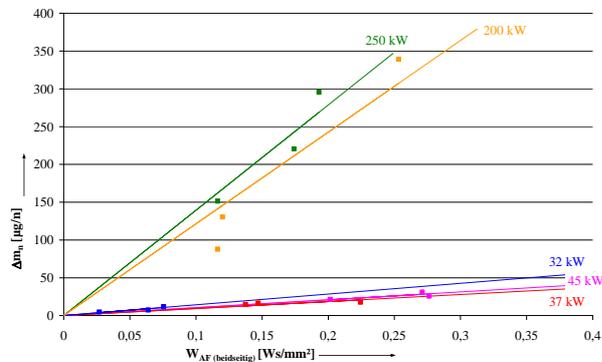


Bild 5 Abbrand Δm_n über der flächenbezogenen Ausschaltenergie W_{AF} bei Ag/SnO₂ 88/12 SPW7

Im Bereich kleiner und mittlerer Schütznennleistungen (bis 45 kW) ergibt sich ein linearer Zusammenhang zwischen Masseverlust und flächenbezogener Ausschaltenergie mit geringem Streubereich. Auch für Schütze großer Nennleistung werden ähnliche Flächenbelastungen der Kontaktstücke erzielt. Jedoch kommt es trotz dieser scheinbar identischen Belastung zu einem Sprung in den Masseverlusten. Dieser wird durch deutliche Unterschiede in Gerätedesign zwischen diesen Baugrößen hervorgerufen. In den Schützen großer Leistung wird durch eine magnetische Lichtbogenbebläsung die Lichtbogenkommutierung in ein Löschesystem erzwungen, wodurch die Lichtbogenverharrzeit – und damit die Ausschaltenergie W_A – auf den Kontaktstücken reduziert wird. Der signifikante Einfluss der magnetischen Blasfeldstärke auf den Ausschaltabbrand von Kontakten wurde am Beispiel von AgW Werkstoffen in [4] gezeigt. Bei gleicher umgesetzter Fußpunktleistung ist eine Vervielfachung des Materialverlustes mit zunehmender Blasfeldstärke zu beobachten, worüber auch in [3] berichtet wird.

Neben Abbrand ist insbesondere die dynamische Schweißneigung von Kontaktwerkstoffen während des Prellvorgangs beim Einschalten von Bedeutung. Insbesondere, da nach [5] immer höhere Anforderung an das Einschaltvermögen von Schützen im Zuge des Einsatzes energieeffizienter Maschinen gestellt werden. Transiente Einschaltströme vom 15 bis 20fachen Nennstrom werden für den Direktanlauf elektrischer Antriebe genannt.

Das dynamische Schweißverhalten unterschiedlicher Werkstoffkombinationen für Schützanwendungen kann nur unter stabilen und konstanten Prellbedingungen untersucht werden. Um dies zu gewährleisten, wurden Untersuchungen mit einem in [6] detailliert beschriebenen Einschalt-Modellschalter durchgeführt. Die zur Beurteilung der Werkstoffkombinationen herangezogenen Versuchsparameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

| Parameter | Wert |
|-------------------------------|--------|
| Spannung U | 230 V |
| Strom (Spitzenwert) \hat{i} | 700 A |
| Leistungsfaktor $\cos\varphi$ | 0,35 |
| Schließgeschwindigkeit v | 1 m/s |
| Kontaktkraft F | 3,5 N |
| Zahl der Schaltvorgänge n | 300 |
| Durchmesser D der Kontakte | 4,0 mm |

Tabelle 2 Versuchsparameter Einschalt-Modellschalter

Die aus den Modellschalteruntersuchungen resultierenden Verschweißkräfte F_S symmetrischer und unsymmetrischer Werkstoffkombinationen sind in Bild 6 aufgetragen. Dargestellt sind die 99,5% Schweißkraftquantile und deren Streubereiche aus mindestens zwei unabhängigen Versuchen.

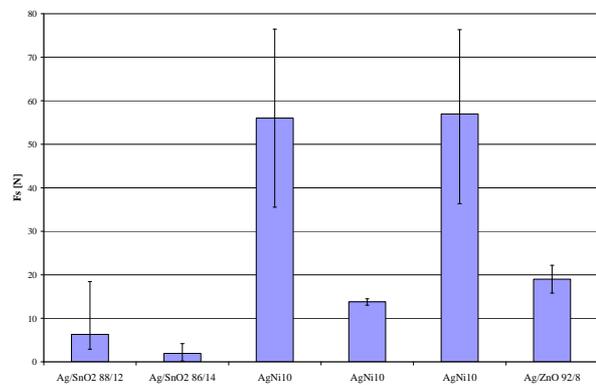


Bild 6 Verschweißkräfte typ. Schützwerkstoff/-kombinationen

Die niedrigsten Schweißkräfte können in dieser Versuchsserie für die symmetrischen Ag/SnO₂ Werkstoffvarianten beobachtet werden. Innerhalb dieser Werkstoffgruppe können diese sowohl durch den Gesamtmetalloxidgehalt als auch der Wahl der Wirkadditive beeinflusst werden. So sind im geprüften Leistungsbereich die Schweißkräfte von Ag/SnO₂ 86/14 PMT3, aufgrund des höheren Metalloxidgehaltes und des Einsatzes eines den Ver-

bundwerkstoff versprödenden Wirkzusatzes (Bi_2O_3), deutlich geringer als bei Ag/SnO_2 88/12 SPW7. Deutlich höhere Verschweißkräfte wurden für das Silbermetalloxid Ag/ZnO 92/8 gefunden. Zu beachten ist der hier etwas niedrigere Gesamtmetalloxidanteil von lediglich acht Masseprozent, wobei für die ausgebildeten Verschweißkräfte der Volumenanteil entscheidend ist (Tabelle 3). $\text{AgNi}10$ bildet erwartungsgemäß unter den getesteten symmetrischen Kontaktpaarungen die mit Abstand stärksten Verschweißkräfte aus, da es hier zu reinen intermetallischen Verbindungen – ohne versprödende und damit Verschweißkraft reduzierende Phasen – im Schaltgefüge kommt.

| Kontaktwerkstoff | Metalloxid [Vol.-%] |
|--------------------------------|---------------------|
| Ag/SnO_2 88/12 | 17,1 |
| Ag/SnO_2 86/14 | 19,7 |
| Ag/ZnO 92/8 | 14,5 |

Tabelle 3 Volumenanteile Metalloxid

Interessante, durch Geräteversuche bestätigte, Resultate wurden für die unsymmetrischen Kombinationen der Silbermetalloxide mit Silber-Nickel gefunden. Für die Kombination $\text{AgNi}10$ als Beweg- und Ag/SnO_2 88/12 SPW7 als Festkontakt liegt das 99,5% Quantil der Verschweißkräfte auf einem Wert zwischen denen der jeweiligen symmetrischen Kontaktpaarung. Ersetzt man den Festkontakt durch Ag/ZnO 92/8 SP so erhält man Verschweißkraftwerte die denen der symmetrischen $\text{AgNi}10$ Kombination identisch sind.

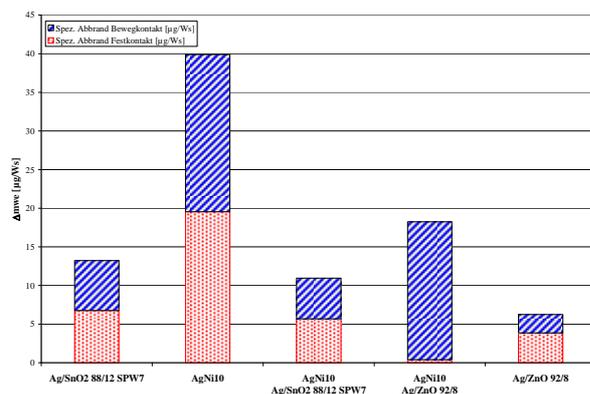


Bild 7 Spezifischer Einschaltabbrand Δm_{we} verschiedener Kontaktwerkstoffkombinationen

Des Weiteren wurde mittels Wägung der Einschaltabbrand der Kontaktstücke ermittelt. Der Einschaltabbrand wird neben dem Verdampfen von Kontaktmaterial durch den Prelllichtbogen von Schmeldeeffekten aufgrund des mechanischen Einschaltimpulses hervorgerufen. Dividiert man den absoluten

Masseverlust des Kontaktstückes durch die während des Prellvorgangs umgesetzte Lichtbogenfußpunktarbeit W_e , so erhält man den in Bild 7 dargestellten spezifischen Einschaltabbrand Δm_{we} .

Zu beobachten ist ein gleichmäßiger Materialverlust an Fest- und Bewegkontakt der symmetrischen Werkstoffpaarungen, wobei der Materialverlust bei $\text{AgNi}10$ deutlich am höchsten ist. Auffallend sind, wie bei den Verschweißkräften, die Unterschiede der unsymmetrischen Kombination von $\text{AgNi}10$ als Bewegkontakt mit Silbermetalloxiden als Festkontakt. Bei der Kombination von AgNi mit Ag/SnO_2 ist ein annähernd gleich hoher Nettomasseverlust an beiden Kontakten zu beobachten, während bei der Kombination mit Ag/ZnO dieser Verlust fast ausschließlich am Bewegkontakt stattfindet.

Die Erklärung für die Ergebnisse bezüglich Verschweißkraft und Einschaltabbrand kann durch eine Betrachtung der Schliffbilder der Kontakte nach Versuchsdurchführung gefunden werden. In Bild 8 ist ein Querschliff durch das oberflächennahe Schaltgefüge der Kombination $\text{AgNi}10$ (Bewegkontakt, oben) mit Ag/ZnO 92/8 (Festkontakt, unten) gezeigt.

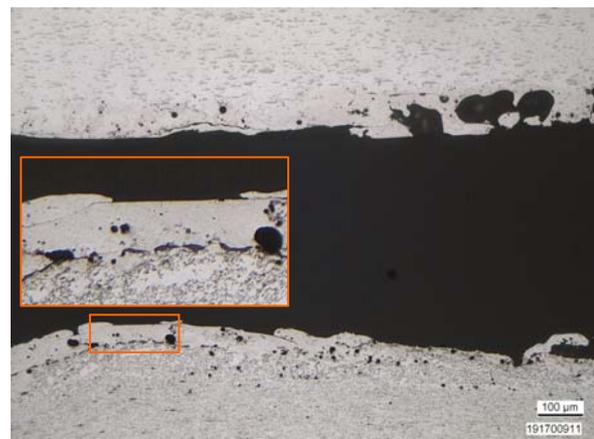


Bild 8 Schliffbild $\text{AgNi}10$ (oben) vs. Ag/ZnO 92/8 (unten) nach Einschaltbelastung

Im Schliffbild kann eine Materialwanderung von AgNi zu Ag/ZnO festgestellt werden, weshalb der Ag/ZnO Kontakt auch keinen Nettomasseverlust in Bild 7 aufweist. Die beim Prelllichtbogen auftretenden Verschweißungen zwischen den Kontakten trennen sich beim Öffnen im AgNi Schaltgefüge. Da sich somit aber auch eine AgNi -Deckschicht auf dem Silbermetalloxidkontakt aufbaut ist unter den verwendeten Prüfbedingungen in dieser Materialkombination die Verschweißneigung des AgNi dominant. Bei Betrachtung der Einzelwerte kommt es nach einer Einlaufphase nur noch zu Verschweißungen innerhalb einer AgNi Phase.

In Bild 9 ist ein Querschliff durch die Kontaktkombination AgNi10 (Bewegkontakt, oben) mit Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 (Festkontakt, unten) nach Beendigung der Modellschalterversuche gezeigt. Hier findet der Materialtransfer in umgekehrter Richtung vom Ag/SnO₂ zum AgNi statt. Somit sinken die Schweißkräfte während der Versuchsdurchführung mit zunehmender Schaltzahl und folglich auch zunehmender Materialwanderung von Ag/SnO₂ zu AgNi auf das Niveau von Ag/SnO₂ in symmetrischer Anordnung. Die Verschweißungen während des Einschaltprellens finden somit nur noch in einem spröden, porösen und metalloxidreichen Schaltgefüge statt.



Bild 9 Schliffbild AgNi10 (oben) vs. Ag/SnO₂ 88/12 SPW7 (unten) nach Einschaltbelastung

3 Schutzschalteranwendung

In Schutzschalteranwendungen wird neben einem niedrigen und stabilen Kontaktwiderstand und einem geringen Abbrand der Kontaktstücke insbesondere Wert auf die Sicherheit gegenüber Verschweißungen gelegt. Daher werden in einer Vielzahl der Anwendungen unsymmetrische Kontaktpaarungen mit einem Silbergraphit (AgC) Festkontakt eingesetzt.

Im Gegensatz zu den im vorherigen Kapitel dargestellten Ergebnissen, sind bei diesen Kombinationen die Verschweißkräfte allgemein durch den AgC Kontakt sowie im Detail durch dessen Zusammensetzung und Herstellparameter dominiert. Tabelle 4 zeigt die Dichtewerte von diversen stranggepressten AgC Zusammensetzungen bei vergleichbarem Umformgrad.

Die zur Beurteilung der Verschweißneigung gewählten Versuchsbedingungen entsprechen denen in Tabelle 2. Als Bewegkontakt wurde in den Versuchen Ag/SnO₂ 88/12 SPW4 (Wirkzusatz WO₃) eingesetzt. Die Kombination dieser Ag/SnO₂ Variante mit AgC

ist in Leitungsschutzschaltern mittlerer Baugröße weit verbreitet.

| Kontaktwerkstoff | Dichte [g/cm ³] |
|------------------|-----------------------------|
| AgC3 | 9,4 |
| AgC4 | 8,9 |
| AgC5 | 8,7 |
| AgC6 | 8,4 |

Tabelle 4 Dichte verschiedener AgC Werkstoffe

In Bild 10 ist die Abhängigkeit der dynamischen Verschweißkraft vom Graphitgehalt des AgC Kontaktes (fasersenkrechte Struktur) dargestellt. Mit steigendem Graphitgehalt nimmt die Höhe der Verschweißkraft in allen Quantilen ab und bestätigt die in [7] dargestellten Erkenntnisse. Eine Verdoppelung des Graphitgehaltes von drei auf sechs Masseprozent verringert die dynamischen Schweißkräfte ungefähr um den Faktor drei.

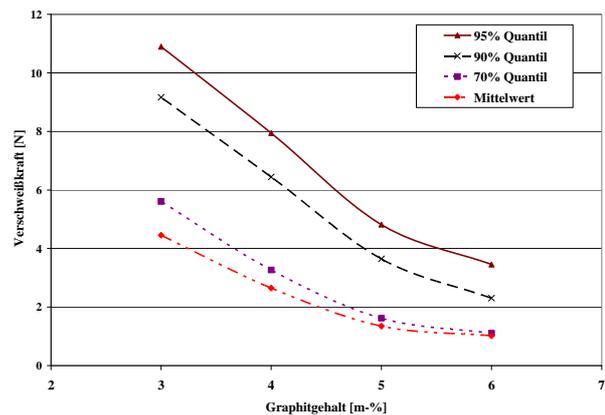


Bild 10 Verschweißkräfte in Abhängigkeit vom Graphit-Gehalt (fasersenkrecht)

Die Ursache für diese deutliche Abhängigkeit kann im Schaltgefüge des AgC Kontaktes gefunden werden. Während des Einschaltvorganges verbrennt der Prelllichtbogen an seinem Fußpunkt oberflächennahes Graphit des AgC Kontaktes. Hierdurch entsteht ein Schaltgefüge aus Feinsilber, welches aufgrund des eingeschlossenen Gases sehr spröde ist. Der Gasgehalt und die damit verbundene Sprödigkeit nehmen mit der Menge des im Basiswerkstoff enthaltenen Graphits zu.

In einer weiteren Versuchserie wurde unter gleichen Schaltbedingungen der Einfluss der Graphitfaserrichtung bei stranggepressten AgC Werkstoffen auf die dynamische Verschweißneigung untersucht. Unterschieden wird hierbei zwischen Werkstoffen mit einer Faserrichtung senkrecht (⊥) und parallel zur

Schaltoberfläche (//). Der Umformgrad wurde bei den beiden untersuchten Varianten konstant, aber auf geringerem Niveau als bei den vorangegangenen Versuchen, gehalten. Die sich aus den Einschaltuntersuchungen ergebenden Schweißkraftquantile sind in Bild 11 gezeigt. Dargestellt sind die Quantile aus jeweils mindestens zwei unabhängigen Versuchen.

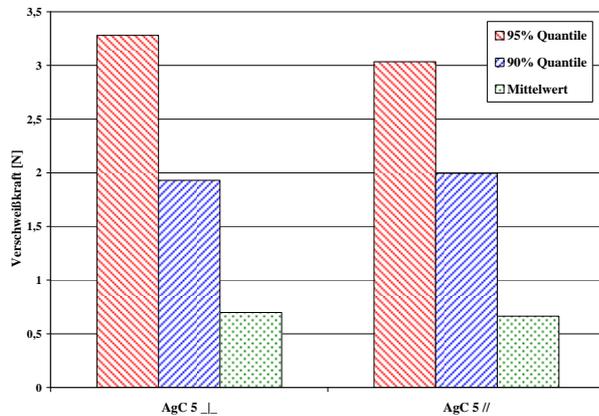


Bild 11 Verschweißkräfte von AgC5 bei unterschiedlicher Faserrichtung

Die erzielten Ergebnisse zeigen keine Abhängigkeit zwischen Faserrichtung und dynamischer Verschweißkraft, im Gegensatz zu in der Literatur dargestellten Zusammenhängen bei AgC5 [8]. In der Praxis konnte dieses Resultat durch Experimente in Leitungsschutzschaltern bestätigt werden. Der etwas geringere Wert des 95% Quantils bei faserparalleler Struktur liegt im Bereich der Streuwerte der Einzelversuche. Durch den geringeren Umformgrad beim Strangpressen liegen die Schweißkraftquantile der AgC5 fasersenkrecht Variante aus Bild 11 deutlich niedriger als in Bild 10. Der Einfluss von Herstellparametern und Werkstoffzusammensetzung von AgC auf Abbrand und Lichtbogenlauf ist detailliert in [4] dargestellt.

Die in Abschnitt 3 dargestellten Versuchsergebnisse zeigen eine deutliche Abhängigkeit der dynamischen Schweißneigung von AgC Kontaktwerkstoffen und deren Herstellparameter (insbesondere Umformgrad) und Materialzusammensetzung. Diese Zusammenhänge sind sowohl für die Kontaktwerkstoffauswahl als auch bei Material- oder Prozessänderungen zu berücksichtigen.

4 Zusammenfassung

Das aktuelle Umfeld elektromechanischer Schaltgeräte und somit auch elektrischer Kontakte der Energietechnik ist charakterisierbar durch einen steigenden Bedarf an elektrischer Energie, rasanten

Entwicklungen in den Bereichen „Regenerative Energien“ und „Elektrifizierung der Automobile“, sowie technologischen Trends auf dem Gerätesektor wie Geräteminiaturisierung und wachsende Leistungsdichten in den Schaltern. Weiterhin zwingt der kontinuierliche Anstieg der Edelmetallpreise Schalterhersteller zur Edelmetalleinsparung bei Kontaktwerkstoffen.

In energietechnischen Anlagen sind Schütze für Schalt- und Steuerungsaufgaben weit verbreitet. Typische Kontaktwerkstoffe sind in Abhängigkeit von der Schütznennleistung Silber-Nickel bzw. Silbermetalloxide.

Schützversuche unter Schwerlast konnten den stark ausgeprägten exponentiellen Zusammenhang zwischen Ausschaltenergie und Abbrand aufzeigen, welcher bei der Auswahl des geeigneten Kontaktvolumens eine entscheidende Rolle spielt. Weiterhin verdeutlicht diese Abhängigkeit die Auswirkungen auf den Materialverlust bei Erhöhung der Leistungsdichten in existierenden Baugrößen.

Generell konnte der positive Einfluss von höheren Metalloxidgehalten auf das Abbrandverhalten von Silber-Zinnoxid Kontaktwerkstoffen gezeigt werden. Der geringere Abbrand bei gleichzeitig moderat höheren Temperaturanstiegen im Nennbetrieb ermöglichen sowohl Maßnahmen zur Leistungssteigerung als auch zur Edelmetalleinsparung.

Als weitere wichtige Eigenschaft von Kontaktwerkstoffen wurden die Sicherheit gegen dynamische Verschweißungen bei Schütz- und Schutzschalterwerkstoffen betrachtet. Insbesondere beim Einsatz unsymmetrischer Kontaktpaarungen aus Silbernickel und Silber-Metalloxid ist bezüglich der Schweißneigung Vorsicht geboten. Eine Kombination von Ag/SnO₂ mit AgNi zeigte zwar einen deutlichen Anstieg in den Schweißkräften, jedoch auf einem Niveau welches sich deutlich unter dem eines symmetrischen AgNi Werkstoffeinsatzes befindet. Beim Einsatz eines Ag/ZnO mit AgNi jedoch liegen die Schweißkraftwerte auf dem Level von AgNi. Dieses Verhalten kann durch die Sprödigkeit des Schaltgefüges nach dem Verschweißen erklärt werden.

Bei Schutzschaltern ist ein Festkontakt basierend auf AgC zur Sicherheit gegen Verschweißungen weit verbreitet. Zu erwartende Verschweißkräfte können hier im Wesentlichen durch den Graphitgehalt im Kontaktwerkstoff beeinflusst werden. Mit steigendem Graphitgehalt steigt die Sicherheit gegen dynamische Verschweißungen. Bei konstanten Fertigungsbedingungen zeigte die Faserrichtung stranggepressten

Silber-Graphits keine signifikante Auswirkung auf die Schweißneigung.

Die im Beitrag vorgestellten experimentellen Ergebnisse zum Einfluss der Kontaktwerkstoffe auf das Schaltverhalten können Ansätze für Schaltgerätlösungen in Hochleistungsanwendungen, die aktuellen Entwicklungen auf dem Energiesektor gerecht werden, aufzeigen.

5 Literatur

- [1] EIA –International Energy Outlook 2010, Report DOE/EIA-0484, 2010
- [2] Braumann, P.; Koffler, A.: Optimierung des Zusammenspiels von Kontaktwerkstoff und Schaltgerät durch Analyse des Ausschaltvorgangs. 14. Kontaktseminar an der Universität Karlsruhe 1997, VDE-Fachbericht 51, S. 139-147
- [3] Schröder, K.-H.: Kontaktverhalten und Schalten in der elektrischen Energietechnik. 12. Kontaktseminar an der Universität Karlsruhe 1993, VDE-Fachbericht 44, S. 21
- [4] Mützel, T.; Braumann, P.; Niederreuther, R.: Development of Contact Material Solutions for Low-Voltage Circuit Breaker Applications (1). 25th International Conference on Electrical Contacts (ICEC) & 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, ICEC, Charleston, SC, USA, 2010
- [5] Krätzschar, A.; Herbst, R.; Nothnagel, F.; Berger, F.: Kontaktschwebungen als limitierendes Phänomen beim Ein- und Ausschaltverhalten von Schützen. 14. Kontaktseminar an der Universität Karlsruhe 2007, VDE-Fachbericht 63, S. 141-149
- [6] Mützel, T.; Braumann, P.; Niederreuther, R.: Experimental Investigations on Material Influences of Silver-Metal-Oxide Contact Materials for Contactor Applications. 54. Internationales Wissenschaftliches Kolloquium (IWK), Ilmenau, 2009
- [7] Schröder, K.-H.; Schulz, E.-D.: On the Influence of the Production Method on the Erosion and Welding of Contact Materials for Power Engineering. 7th International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Paris, France, 1974
- [8] Vinaricky, E.: Das Abbrand- und Schweißverhalten verschiedener Silber-Graphit-Kontaktwerkstoffe in unterschiedlichen Atmosphären, Dissertation, TU Wien, 1994