

# Neue Erkenntnisse zum Schaltverhalten von Silber-Wolframkarbid Kontaktwerkstoffen

Timo Mützel, Bernd Kempf

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

## Kurzfassung

Silber-Wolframkarbid Kontaktwerkstoffe werden aufgrund ihrer hohen Abbrandfestigkeit unter Lichtbogenwirkung häufig in Schutzschaltern mit hohem Schaltvermögen eingesetzt. Ziel der Untersuchungen ist es, den Einfluss von unterschiedlichen Gefügestrukturen und Sinteradditiven auf das Schaltverhalten zu charakterisieren. Der Schwerpunkt ist zunächst eine detaillierte vergleichende Beschreibung der Struktur durch quantitative Gefügeanalyse. Weiterhin werden die Auswirkungen der Einflussgrößen Feinheit und Additive auf das Ausgangsgefüge durch den Faktor Sinterschrumpfung bewertet.

Die Analyse des Schaltverhaltens erfolgt durch Modellschalterversuche unter reproduzierbaren und definierten Randbedingungen, gefolgt von einer metallographischen Auswertung der entstandenen Schaltgefüge, um Erklärungsansätze für das beobachtete Schaltverhalten abzuleiten. Der Fokus wird hierbei auf die wichtigen Aspekte dynamischer Schweißkräfte beim Einschaltvorgang sowie Lichtbogenabbrand und Kontaktwiderstand nach Ausschaltvorgang gelegt.

Grundlegend ist festzuhalten, dass unter den gewählten Versuchsbedingungen der Einfluss der Sinteradditive auf den Kontaktwiderstand dominiert, während kein Unterschied im Lichtbogenabbrand festzustellen ist. Des Weiteren zeichnet sich ein feineres Ausgangsgefüge durch eine reduzierte Neigung zum dynamischen Verschweißen aus.

## 1 Einleitung

Silber-Wolframkarbid (AgWC) wird als klassischer Kontaktwerkstoff für Lichtbogenkontakte in Leistungsschaltern eingesetzt. In nach IEC approbierten Geräten ist eine asymmetrische Paarung mit Silber-Graphit AgC üblich, während AgWC in Geräten nach UL auch häufig symmetrisch eingesetzt wird [1].

Wie bei anderen Kontaktwerkstoffen sind neben der Zusammensetzung das Herstellverfahren und das Gefüge von Bedeutung für das Schaltverhalten. Einen zusätzlichen Einfluss stellen Additive, welche bei der Herstellung als Sinterhilfsmittel dienen, dar.

Ziel der Untersuchungen ist es, Zusammenhänge zwischen Schaltverhalten und der Gefügestruktur sowie den Einfluss von Zusätzen aufzuzeigen, die als Basis für eine anwendungsspezifische Werkstoffselektion dienen.

## 2 Beschreibung der untersuchten AgWC Kontaktwerkstoffe

Die durchgeführten Untersuchungen konzentrieren sich zunächst auf den Kontaktwerkstoff AgWC40 mit 60 Gewichtsprozent Silber in der Endzusammensetzung. Dies ist für Leistungsschalter nach IEC die klassische Werkstoffzusammensetzung für Lichtbogenkontakte.

Die Herstellung der Proben erfolgte über

- Mischen und Granulieren der Ausgangspulver
- Pressen
- Sintern
- Infiltrieren zur Endzusammensetzung

AgWC Kontaktwerkstoffe werden vor dem Infiltrationsschritt einer Sinterbehandlung unterzogen. Bei ihr kommt es zunächst zu einer Reduktion evtl. vorhandener Wolframoxide auf den WC-Oberflächen. Thermodynamische Modellrechnungen zeigen, dass diese Oxide bei den üblichen Sintertemperaturen nicht mehr gegenüber Wasserstoff stabil sind. Details zum Reduktionsverhalten sind in [2] und [3] beschrieben.

Beim eigentlichen Sintereffekt kommt es zwischen den Wolframkarbidpartikeln zu einer mechanischen Verfestigung des Sintergerüsts. Je größer die Sinterschrumpfung, umso stärker fällt diese Verfestigung aus [4]. Dabei kann der Sintereffekt durch die Zugabe von Additiven wie Co und Ni deutlich verstärkt werden [5, 6, 7]. Die Wirkung solcher Additive auf das Sinterverhalten und die mutmaßlichen Auswirkungen auf das Schaltverhalten sind in zahlreichen Veröffentlichungen beschrieben, unter anderem in [8, 9].

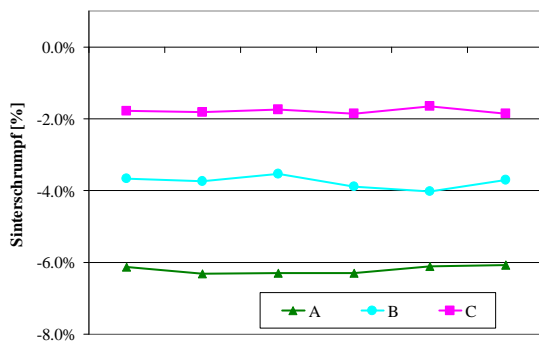
In Tabelle 1 sind die Endzusammensetzungen der drei unterschiedlichen AgWC40 Proben zusammengefasst, deren Eigenschaften im Folgenden näher charakterisiert werden sollen.

Variante/ Kurzbezeichnung	A	B	C
Ag	60	60	60
WC	Rest	Rest	Rest
Fe	1	1	0
Co	0,7	0,7	0
Ni	0,1	0,1	0,1
Härte (HV 1)	142	177	159
Gefüge	fein	grob	sehr fein

**Tabelle 1** AgWC40 Varianten (Endzusammensetzungen nach der Infiltration in Gewichtsprozent)

Das Ausmaß der Sinterschrumpfung wirkt sich direkt auf das Porenvolumen aus, das infiltriert werden muss. Um nach der Infiltration die exakte Endzusammensetzung zu erreichen, muss für eine stabile Prozessführung das Sinterverhalten genau bekannt sein.

Die drei untersuchten Werkstoffe wurden deshalb in einem ersten Schritt auf gleiche Gründichten gepresst und anschließend einer identischen Sinterbehandlung unterzogen. Die Durchmesser von je sechs Proben wurden vor und nach dem Sintern vermessen. In Bild 1 sind die Ergebnisse dargestellt. Die Proben weisen ein deutlich unterschiedliches Schrumpfungsverhalten auf. AgWC Variante A zeigt die stärkste Schrumpfung, Variante C die geringste.



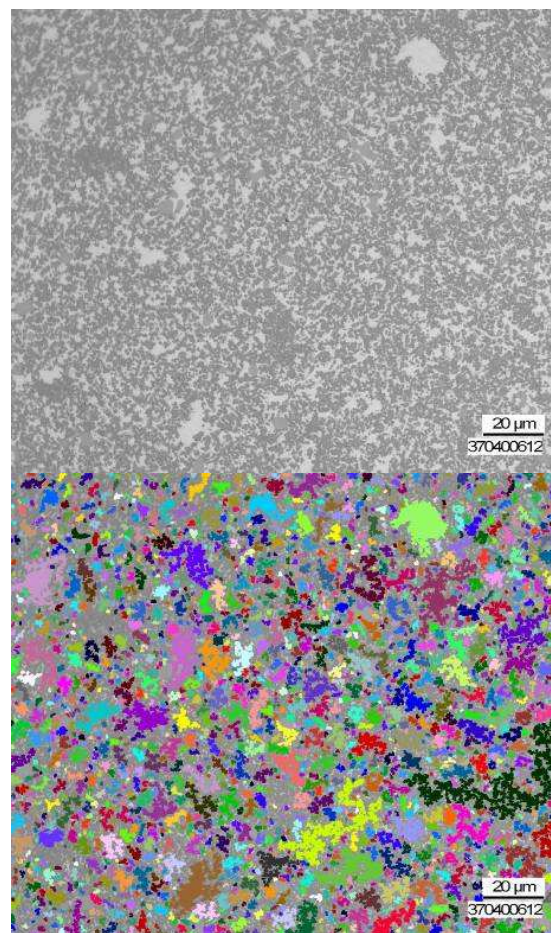
**Bild 1** Sinterverhalten von AgWC Presslingen vor dem Infiltrationsschritt

Weiterhin unterscheiden sich die drei AgWC40 Proben deutlich in ihrer Gefügefeinheit (vgl. Bild 2 bis Bild 4). Zur exakten Beschreibung von Gefügestrukturen werden rechnergestützte, vollautomatische quantitative Gefügeanalysen durchgeführt. Eine

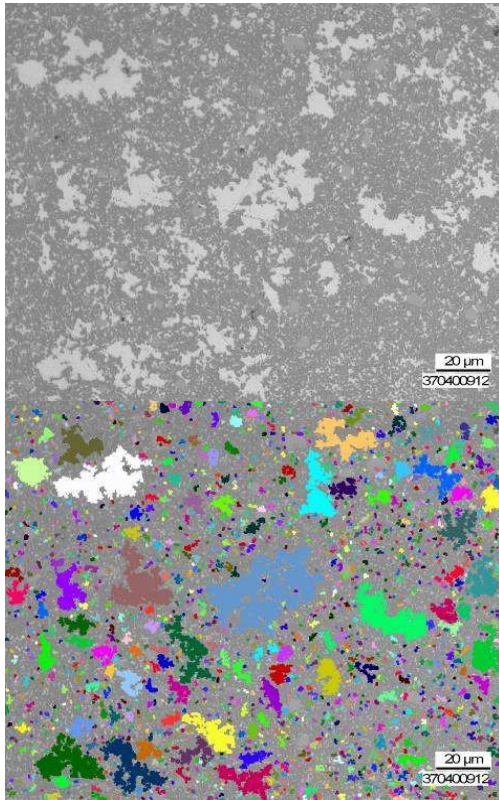
zweifelsfreie Differenzierung der unterschiedlichen Phasen stellt hohe Anforderungen an die Qualität der metallographischen Präparation und an eine gleichmäßige Ausleuchtung des Schliffes [10].

Die Auswertung wurde mit der Software „AxioVision rel. 4.8“ von der Firma Carl Zeiss GmbH durchgeführt. Die Differenzierung der Silber- und Wolframkarbid-Phasen erfolgt dabei über die unterschiedlichen Grauwerte dieser Phasen im lichtmikroskopischen Bild. Details der Auswerterroutinen sind in [11] beschrieben.

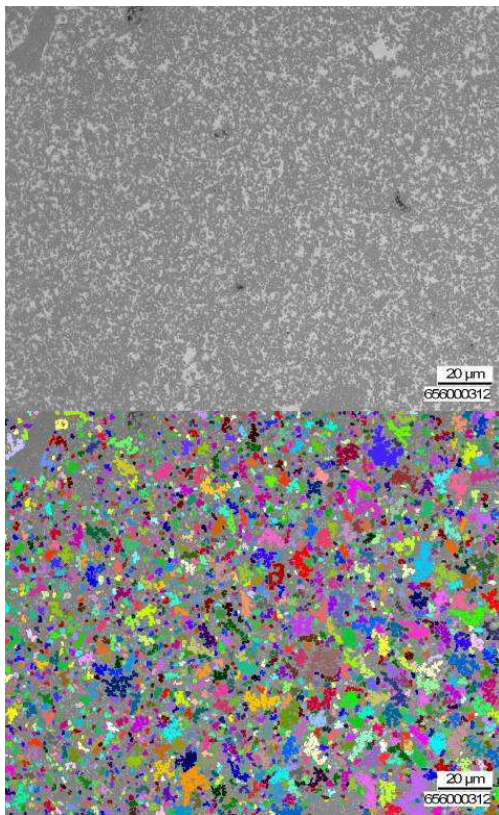
In Bild 2 bis 4 sind jeweils oben Fotos der metallographischen Schliffe dargestellt, die zur Auswertung herangezogen wurden. Direkt darunter befinden sich die Bilder nach der Differenzierung der Grauwerte. Die erkannten Silberpartikel sind dabei farbig gekennzeichnet, während Wolframkarbid weiterhin grau dargestellt ist. Die Auflösung des eingesetzten Verfahrens ist auf  $1 \mu\text{m}^2$  beschränkt, weshalb alle Partikel mit Flächen kleiner  $1 \mu\text{m}^2$  ausgefiltert wurden, um potentielle Artefakte möglichst zu vermeiden.



**Bild 2** Schlibfbild AgWC40 Variante A

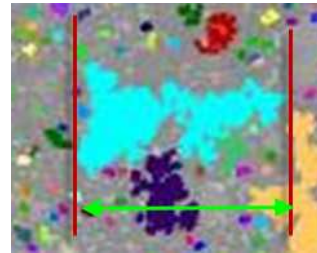


**Bild 3** Schlibfbild AgWC40 Variante B



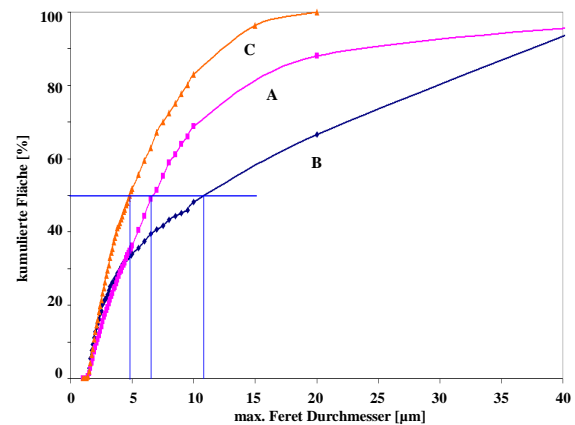
**Bild 4** Schlibfbild AgWC40 Variante C

Nach der Identifizierung der Ag-Partikel erlaubt es die Software, eine ganze Reihe von Parametern zu bestimmen, mit denen das Gefüge der Proben quantitativ zu beschreiben ist. Dies sind unter anderem die Längenausdehnungen, die Partikelfläche und der Partikelumfang. In der Arbeit dargestellt ist die Auswertung nach der jeweils größten Längenausdehnung der Ag-Partikel. Diese wird als maximaler Feret Durchmesser bezeichnet. Die Bestimmungsmethode ist in Bild 5 illustriert.



**Bild 5** Maximaler Feret Durchmesser eines Silberpartikels

In Bild 6 sind als Auswertung die Summenkurven der Silberpartikel-Flächen über dem maximalen Feret Durchmesser dargestellt. Dabei wird jeweils auf 100% der Gesamtfläche der Silberphase normiert. Das feinste Gefüge zeigt damit die steilste Summationskurve und erreicht als erstes den 100%-Wert. Aus dem Diagramm lassen sich geometrisch die 50%-Werte der Ag-Partikelgrößen ermitteln.



**Bild 6** Darstellung der kumulierten Fläche der Ag-Bereiche als Funktion der größten Längenausdehnung der Ag-Partikel

Die verwendete Methode erlaubt eine klare Differenzierung der drei hier untersuchten Werkstoffe bezüglich ihres Gefüges. Es ist allerdings zu beachten, dass die komplette Größenverteilung im Vergleich zum realen Zustand nach größeren Werten hin verschoben ist. Dies liegt zum einen daran, dass alle Partikel mit Flächen kleiner als  $1 \mu\text{m}^2$  pauschal ausgefiltert werden. Zusätzlich gelingt es nicht immer,

eng aneinander liegende Partikel auch wirklich zu trennen. Die zwei ggf. auch mehr Partikel werden dann stattdessen als ein größerer Partikel erfasst und ausgewertet.

Wie sich aus Bild 6 in Übereinstimmung mit den Metallographieaufnahmen (Bild 2 – 4) klar erkennen lässt, stellt das Material B den Werkstoff mit der eindeutig größten Struktur dar. Die AgWC Variante C ist gleichzeitig etwas feiner als Werkstoff A. Vermutlich führt die Zugabe der Additive Co und Fe zu einer leichten Gefügevergrößerung. Hier zeigt sich klar der Vorteil der quantitativen Gefügeanalyse, die in der Lage ist diese optisch kaum erkennbaren Unterschiede im Diagramm noch eindeutig darzustellen.

Betrachtet man das Sinterverhalten (Bild 1) so kann man Rückschlüsse sowohl auf den Einfluss der Zusammensetzung wie auch auf den der Gefügefinesheit ziehen. Material C, das den deutlichen geringeren Additivgehalt hat, zeigt die geringste Sinterschrumpfung von linear ca. 2 %. Material B mit den hohen Zusatzgehalten von Fe und Co hat ca. 4 % Schrumpfung, obwohl das Gefüge deutlich gröber ist. Material A mit hohem Additivzusatz wie auch feinem Gefüge zeigt mit ca. 6 % die größte Sinterschrumpfung. Es führen also sowohl Additivzusatz wie auch die Gefügefinesheit im Pressling zu stärkeren Sinterschrumpfungen, wobei der Einfluss der Zusammensetzung bei den hier gewählten Konzentrationen dominiert.

### 3 Einfluss von Gefügestruktur und Sinteradditiven auf das Schaltverhalten

Um das zu erwartende Schaltverhalten der drei Werkstoffvarianten in Schutzgeräten zu quantifizieren, wurden anwendungsnahe Tests in Modellschaltern mit definierten und stabilen Randbedingungen durchgeführt.

Generell erfolgten alle Schaltversuche mit symmetrischer AgWC Kontaktpaarung, um eventuelle Einflüsse des Gegenkontaktes auf das Schaltverhalten auszuschließen. Die unten dargestellten Versuchsparameter wurden den Randbedingungen eines Schutzschalters unter Überlast nachempfunden.

#### 3.1 Materialabbrand unter Lichtbogeneinfluss und Kontaktwiderstand

Zur Analyse des Ausschaltabbrandes und des Kontaktwiderstandes nach Lichtbogenbelastung wurden

entsprechende Modellschaltversuche (Ausschaltmodellschalter) durchgeführt. Hierbei werden die geschlossenen Kontakte netzsynchron im natürlichen Stromnulldurchgang geöffnet. Der entstehende Schaltlichtbogen brennt dann für eine Halbwelle bis zum nächsten Stromnulldurchgang. Mittels Stromschleifen kann der Lichtbogen durch ein selbstinduziertes Blasfeld (magnet. Blasfeldstärke  $B$ ) zum Kommutieren auf Lichtbogenleitbleche gezwungen werden. Der Einfluss der magnetischen Feldstärke auf das Schaltverhalten wurde am Beispiel von AgW in [12] näher untersucht. Weitere Untersuchungen zum Einfluss des Silbergehaltes auf Schaltverhalten von AgWC Kontaktwerkstoffen sind in [13] dargestellt.

Zur Kontaktwiderstandsmessung werden die Kontakte nach Stromnull stromlos und damit lichtbogenfrei geschlossen. Der Spannungsabfall über den geschlossenen Kontakten wird mit einem Prüfstrom  $I = 10$  A DC und Kleinspannung gemessen. Nach der Widerstandsmessung wird die Netzspannung wieder zugeschaltet und die Steuerung startet einen erneuten Ausschaltvorgang. Die gewählten Testparameter zur Simulation einer Überlastabschaltung eines Leistungsschalters sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Alle Experimente wurden mit alternierender Polarität der Elektroden durchgeführt, um der statistischen Verteilung eines Leistungsschalters bei Schalten von AC Strömen gerecht zu werden und um Einflüsse durch Materialwanderung zu vermeiden.

Parameter	Wert
Spannung $U$	230 V
Strom (Spitzenwert) $\hat{i}$	1300 A
Leistungsfaktor $\cos\varphi$	0,35
magnet. Blasfeld $B$	0 mT/kA
Öffnungsgeschwindigkeit $v$	0,4 m/s
Zahl der Schaltvorgänge $n$	50
Durchmesser $D$ der Kontakte	4,0 mm

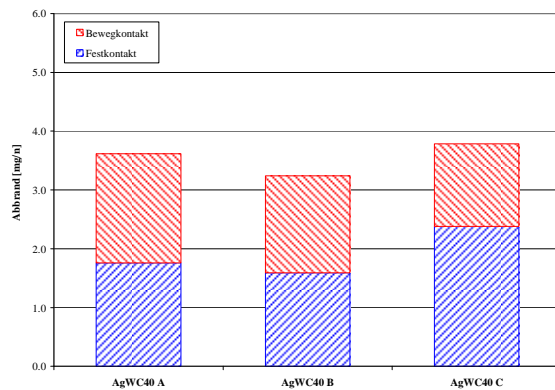
**Tabelle 2** Versuchsparameter Ausschalt-Modellschalter

Die verschiedenen AgWC40 Varianten wurden ohne magnetisches Blasfeld, d.h. ohne Lichtbogenablenkung, geprüft, um die in jeder Schaltung auf den Kontaktwerkstoff einwirkende Lichtbogenfußpunktenergie  $W_A$  konstant zu halten. Diese berechnet sich nach Gleichung 1 durch Multiplikation der Anoden-Kathoden-Fallspannung  $U_{AK}$  mit dem Integral des Stromes  $i(t)$  über der Lichtbogenbrenndauer  $t_{LB}$ .

$$W_A = U_{AK} \int_{t_{LB}} i(t) dt \quad (1)$$

Die mittlere Fußpunktenergie betrug in allen durchgeführten Experimenten  $W_A = 78$  Ws.

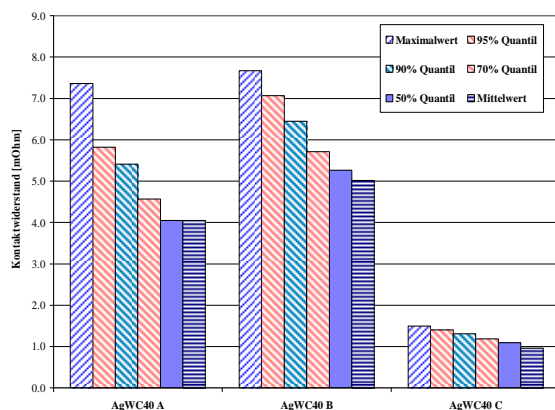
Mittels Wägung der Kontakte vor und nach dem Versuch wurde der absolute Masseverlust ermittelt. Dieser Abbrand ist für die verschiedenen AgWC40 Varianten in Bild 7 dargestellt.



**Bild 7** Abbrandverhalten von AgWC40 bei unterschiedlicher Gefügestruktur und Sinteradditiven

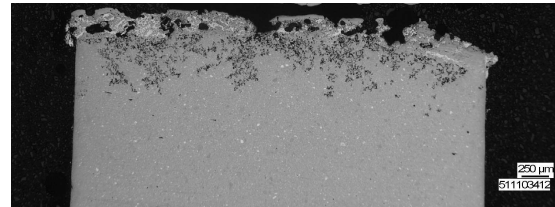
Der Masseverlust der unterschiedlichen AgWC40 Varianten ist vergleichbar, lediglich der Festkontakt von Variante C liegt auf einem leicht höheren Niveau. Im Vergleich zu anderen Werkstoffzusammensetzungen liegen die Werte jedoch alle sehr dicht beisammen. Somit ist unter den betrachteten Bedingungen kein Einfluss der Gefügestruktur oder der verwendeten Sinteradditive auf den Abbrand festzustellen.

Nach jedem Ausschaltvorgang werden, wie bereits erwähnt, die Kontakte stromlos geschlossen und der Kontaktwiderstand gemessen. In Bild 8 sind die verschiedenen Quantile und der Mittelwert der Widerstandsmessungen für die einzelnen AgWC40 Werkstoffe aufgetragen.

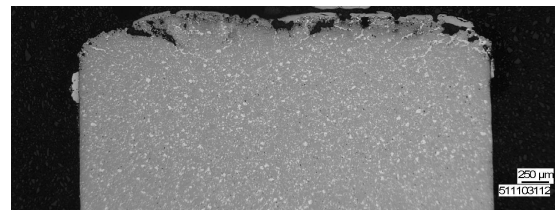


**Bild 8** Kontaktwiderstand von AgWC40 bei unterschiedlicher Gefügestruktur und Sinteradditiven

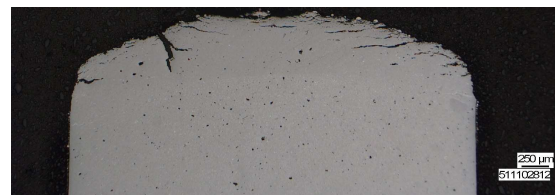
Im Gegensatz zum Abbrandverhalten zeigen sich hier signifikante Unterschiede zwischen den Werkstoffvarianten. Die Varianten A und B – grobes und feines Gefüge bei hohem Anteil an Sinteradditiven – liegen in allen Quantilen auf vergleichbarem Niveau. Einen deutlich niedrigeren Kontaktwiderstand nach Lichtbogenbelastung zeigt dagegen Variante C – geringer Anteil an Sinteradditiven. Zur weiteren Diskussion und Analyse dieser Kontaktwiderstandsergebnisse sind in Bild 9-11 metallographische Schiffe der geschalteten Kontakte dargestellt.



**Bild 9** AgWC40 Variante A nach Ausschaltbelastung



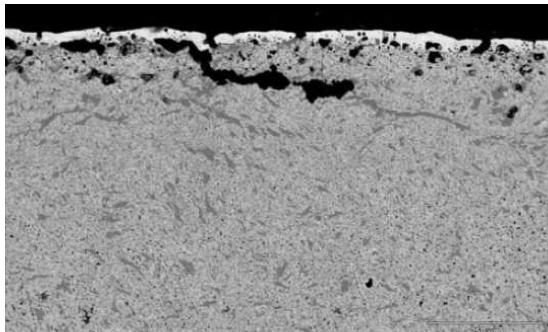
**Bild 10** AgWC40 Variante B nach Ausschaltbelastung



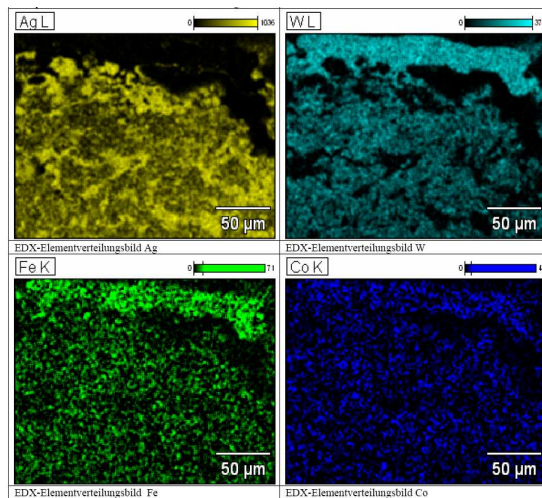
**Bild 11** AgWC40 Variante C nach Ausschaltbelastung

Zunächst fällt das unterschiedliche Abbrandbild zwischen Varianten A und B (Bild 9-10) im Vergleich zu Variante C (Bild 11) auf. Die beiden ersten Varianten brennen deutlich gleichmäßiger und flächiger ab, während bei Variante C der Materialverlust im Randbereich der Kontaktauflage dominiert, wodurch der belastete Kontakt eine ballige Form erhält. Zudem ist das oberflächennahe Schaltgefüge bei Variante C homogener (weniger Materialausbrüche im Oberflächenbereich) mit Spannungsrissen parallel zur Schalteroberfläche.

Vergleicht man Bild 9 bis Bild 11 so erkennt man, dass die Schalteroberflächen der Werkstoffe A und B zusätzlich eine ausgeprägte, tiefer gehende Aufschmelzzone aufweisen, die so bei Material C nicht vorhanden ist. Energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) am Schliff zeigt eine deutliche Aufkonzentration der Additive Fe und Co und auch W (WC) in den Aufschmelzonen der Varianten A und B, bei gleichzeitig deutlich verringerten Ag Anteilen, was in den Bildern 12 und 13 beispielhaft für Variante A wiedergegeben ist. Diese schlecht leitfähige und mechanisch sehr stabile Deckschicht ist die Ursache für den signifikant höheren Kontaktwiderstand dieser beiden Materialien im Vergleich zu Werkstoff C.



**Bild 12** EDX der Deckschicht am Schliff AgWC40 Variante A



**Bild 13** EDX Elementverteilungsanalyse der Deckschicht am Schliff AgWC40 Variante A

Über den zusätzlichen Einfluss der Refraktärmetallkorngröße auf den Abbrand wird am Beispiel von AgW in [13] berichtet, wobei sich demnach mit reduzierter mittlerer Refraktärmetallteilchengröße eine niedrigere Abbrandrate einstellt. Des Weiteren wurde der Einsatz unterschiedlicher Refraktärmetalle (W und Mo), sowie ein Vergleich zu Wolframkarbid in [14] untersucht.

### 3.2 Verschweißneigung

In einem zweiten Schritt wurden die Einflüsse der Gefügestruktur auf das dynamische Einschaltverschweißen anhand von Einschaltmodellschalterversuchen mit den beiden Werkstoffvarianten AgWC40 A und B untersucht. Diese beiden Varianten unterscheiden sich deutlich hinsichtlich der Gefügefinesheit, besitzen aber die gleiche Zusammensetzung.

Bei diesen Modellschalteruntersuchungen werden die Kontakte, wie detailliert in [15] beschrieben, unter Spannung geschlossen. Der nach dem ersten Schließen der Kontakte auftretende Einschaltprelllichtbogen, welcher durch die Mechanik des Modellschalters unabhängig vom eingesetzten Kontaktwerkstoff konstant gehalten wird, führt zu einem dynamischen Verschweißen der Kontakte. Die während des dynamischen Prellvorgangs in den Lichtbogenfußpunkten umgesetzte Energie  $W_E$  lässt sich durch Multiplikation der über den Kontakten gemessenen Anoden- Kathoden-Fallspannung mit dem Integral des Stromes über der Prellzeit  $t_{Prell}$  abschätzen:

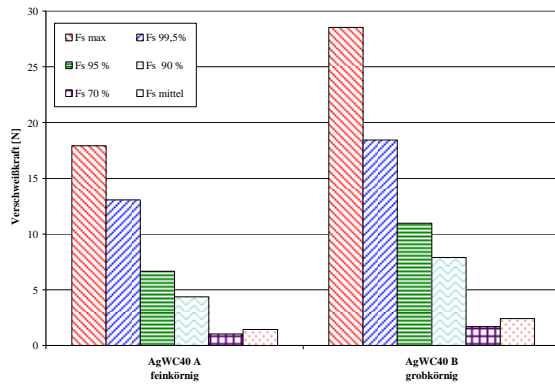
$$W_E = U_{AK} \int_{t_{Prell}} i(t) dt \quad (2)$$

Die mittlere elektrische Prelllichtbogenenergie betrug bei den durchgeführten Versuchen  $W_E = 3,7$  Js. Die verwendeten Versuchsparameter sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

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 3** Versuchsparameter Einschalt-Modellschalter

Über einen piezoelektrischen Kraftsensor können die Öffnungskräfte während der stromlosen, linearen Trennung der verschweißten Kontakte gemessen werden. Die Mittelwerte sowie verschiedene Quantile der Öffnungskräfte aus zwei unabhängigen Versuchen sind in Bild 14 dargestellt.



**Bild 14** Verschweißkräfte AgWC40 unterschiedlicher Mikrostruktur

Die Verschweiß- bzw. Öffnungskräfte der feinkörnigen AgWC40 A Variante liegen in allen Quantilen signifikant unterhalb denen des grobkörnigen AgWC40 B. Dieser Unterschied in der Verschweißneigung lässt sich auf die feiner verteilten WC-Partikel der Variante A, welche das Aufbrechen der verschmolzenen Bereiche erleichtern, zurückführen.

Weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Sinteradditive auf die Verschweißneigung von AgWC Kontaktwerkstoffen stehen noch aus.

## 4 Zusammenfassung

Es wurden Experimente an Kontaktwerkstoffen für Schutzschalteranwendungen auf der Basis von AgWC40 durchgeführt. Ziel war es den Einfluss von Gefügefinesheit und Sinteradditiven auf das Schaltverhalten bei Überlast herauszuarbeiten. Folgende Ergebnisse konnten dabei determiniert werden:

- Quantitative Gefügeanalyse ermöglicht eine exakte Beschreibung des Werkstoffgefüges und ist damit Basis für einen fundierten Vergleich.
- Dotierelemente wie Co, Fe, Ni wirken sich auf das Sinterverhalten von AgWC aus und beeinflussen dieses noch stärker als die Feinheit des Gefüges, was sich über den Sinterschrumpf nachweisen lässt.
- Ein Einfluss der Sinteradditive und der Gefügestruktur auf den Lichtbogenabbrand ist bei den gewählten Versuchsparametern nicht feststellbar.
- Die Verwendung von Sinteradditiven wirkt sich deutlich auf den Kontaktwiderstand nach dem Schalten aus.
- Weiterhin zeigt die Gefügestruktur von AgWC Kontaktwerkstoffen Auswirkungen auf das dynamische Einschaltverschweißen,

wobei Werkstoffe mit feinerem Gefüge zu niedrigeren Öffnungskräften tendieren.

## 5 Literatur

- [1] Slade, P.: High Current Contacts: A Review and Tutorial. 21<sup>st</sup> International Conference on Electrical Contacts (ICEC), Zürich, Schweiz, 2002
- [2] Schwenke, G. K.: Study of the Reduction of Tungsten Trioxide doped with MCI (M=Li, Na, K). Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 73, 3-15, 2003
- [3] Lassner, E.: Tungsten – Properties, Chemistry, Technology of the element, Alloys and Chemical Compounds; New York: Kluwer Academic, 1999
- [4] Althaus, B.; Vinaricky, E.: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Festigkeit pulvermetallurgisch hergestellter Wolframskelette und der Abbrandfestigkeit im elektrischen Lichtbogen der daraus durch Tränken gewonnenen Silber-Wolfram-Verbundwerkstoffe. Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen, Nr. 2028, Köln, 1969
- [5] Eisenkolb, F.; Thümmel, F.: Fortschritte der Pulvermetallurgie. Band II, Akademie-Verlag Berlin, 1963
- [6] Hwang, N. M.; Park, Y. J.; Kim, D.-Y.; Yoon, D. Y.: Activated Sintering of Nickel-doped Tungsten: Approach by Grain Boundary Structural Transition. Scripta Materialia 42, 2000
- [7] Qureshi, A. H.: The effect of cobalt addition on sintering and microstructural behaviour of silver-tungsten (Ag-W) composite. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2010
- [8] Aslanoglu, Z.; Karakas, Y.; Övecoglu, M. L.; Özkal, B.: Effects of nickel addition on properties of Ag-W electrical contact materials. Powder Metallurgy, Vol. 44, No. 1, 2001
- [9] Witter, G. J.: The effect of Nickel additions on the performance of tungsten-silver materials. 11<sup>th</sup> International Conference on Electric Contact Phenomena (ICEC), Berlin, 1982
- [10] Plath, A.; Kempf, B.; Bothe, K.; Paul, J.: Quantitative Untersuchung der Porenschädigung mit Hilfe der automatischen Bildanalyse. Praktische Metallographie 26, 1989
- [11] AxioVision User's Guide November 2009, Carl Zeiss MicroImaging GmbH, 2009

- [12] Mützel, T.; Braumann, P.; Niederreuther, R.: Development of Contact Material Solutions for Low-Voltage Circuit Breaker Applications (1). 25<sup>th</sup> International Conference on Electrical Contacts (ICEC) & 56<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Charleston, SC, USA, 2010
- [13] Vinaricky, E. (Hrsg.): Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Springer-Verlag Berlin, 2002
- [14] Mützel, T.; Niederreuther, R.: Development of Contact Material Solutions for Low-Voltage Circuit Breaker Applications (2). 57<sup>th</sup> IEEE Holm Conference on Electrical Contacts, Minneapolis, MN, USA, 2011
- [15] 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