

# Spannungsrelaxation an Kontaktelementen in Steckverbindungen der Elektroenergietechnik

Blumenroth, F. (1); Löbl, H. (1); Großmann, S. (1); Kudoke, M. (2)

*Gasisolierte Schaltanlagen (GIS) werden in der Elektroenergietechnik eingesetzt, um elektrische Energie verlustarm sowie platzsparend übertragen und verteilen zu können. Zum Verbinden der stromführenden Leiter in GIS werden für ruhende Steckverbindungen Schraubenfedern aus den Materialien CuCo2Be bzw. CuCr1Zr als Kontaktelemente eingesetzt. Die für einen kleinen Verbindungswiderstand notwendige Verbindungskraft wird z.B. durch die Schraubenfedern erzeugt. Durch Spannungsrelaxation in der Feder verringert sich die Kraft in der Verbindung abhängig von der Zeit und der Temperatur. Der Widerstand der Verbindung kann dadurch größer werden. Das kann bis zum Ausfall der Verbindung und damit der gesamten Schaltanlage führen. Der Einfluss der Spannungsrelaxation auf das Langzeitverhalten der Steckverbindung mit Schraubenfeder muss deshalb untersucht werden. (Der Artikel ist dazu eine Fortführung des Beitrags [1] zum 3. Hochschul-Kupfersymposiums in Dresden.)*

Steckverbindungen mit Schraubenfedern aus den Materialien CuCo2Be bzw. CuCr1Zr als Kontaktelemente werden in GIS bei der ABB Schweiz AG eingesetzt, um ruhende Leiter miteinander zu verbinden (Bild 1) [1]. Die Vorteile dieser Steckverbindung sind das ökonomische Design und die leichte Montage Vor-Ort. Die erwartete Lebensdauer der GIS beträgt heute mehr als 40 Jahre. Der Wartungsaufwand in diesen Anlagen muss dabei niedrig sein, um Kosten zu sparen und eine hohe Verfügbarkeit der Anlagen und damit des Energieversorgungssystems zu erreichen.

Die für einen niedrigen Verbindungswiderstand ( $\mu\Omega$  - Bereich) notwendige hohe Verbindungskraft wird in den schräg gewickelten Windungen der Schraubenfeder erzeugt, wenn die Feder zwischen dem Leiterrohr und dem Kontaktträger eingefedert wird (Bild 1a). Dabei sitzt die Feder

in der V-förmigen Nut des Kontaktträgers. Für diese Steckverbindung setzt sich der Verbindungswiderstand  $R_V$  aus dem Materialwiderstand der Schraubenfeder  $R_M$  und den Kontaktwiderständen  $R_K$  zwischen der Feder und dem Leiterrohr, sowie dem Kontaktträger, zusammen (Bild 1b). Der Widerstand  $R_M$  hängt dabei von der elektrischen Leitfähigkeit des Federmaterials (Tabelle 1) und der Anzahl der parallel geschalteten Windungen ab. Der Widerstand  $R_K$  hängt dagegen sowohl von der Anzahl der parallelen Kontakte ( $\sim$  Anzahl der Windungen) als auch entscheidend von der Größe der Kontaktkraft pro Windung ab. Je größer die Kontaktkraft ist, desto geringer ist der Widerstand der Verbindung. Aus der Summe der einzelnen Kontaktkräfte pro Windung ergibt sich die Verbindungskraft der Steckverbindung. Da die Nut im Kontaktträger V-förmig gestaltet ist,

ergeben sich dort zwei Kontaktstellen pro Windung mit der Feder. Dadurch ist die Kraft pro Kontakt nur halb so groß, wie die Kraft zwischen der Feder und dem Leiterrohr (Bild 1b). Um einen möglichst kleinen Verbindungswiderstand zu erhalten und um die Verbindung vor Oxidschichtbildung zu schützen, werden alle Kontaktflächen versilbert. Silber als Edelmetall besitzt mit  $\kappa_{Ag} \leq 63 \text{ m}/\Omega\text{mm}^2$  eine sehr hohe elektrische Leitfähigkeit.

Trotz der guten mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Materialien der Schraubenfedern altert die Steckverbindung abhängig von der mechanischen Beanspruchung im Material und an den Kontaktflächen, von der Temperatur, vom Strom und von der Zeit [1].

Es ist bekannt, dass Spannungsrelaxation bzw. Kriechen im Leitermaterial die Alterung elektrischer Verbindungen entscheidend bestimmt [4]. Spannungsrelaxation in der Schraubenfeder führt zum Abbau der Kontaktkraft in der Steckverbindung. Eine hohe Betriebstemperatur beschleunigt die Relaxationsprozesse im Material (Bewegung und Auslöschung von Versetzungen) [5]. Die maximal zulässige Betriebstemperatur für versilberte Verbindungen in Elektroenergieanlagen der Hochspan-

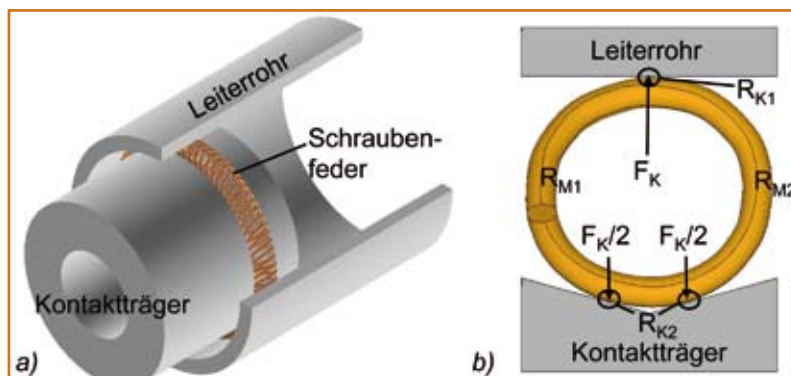
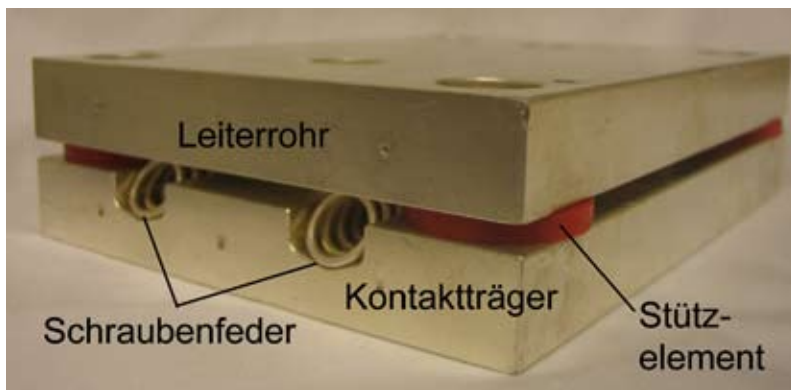


Bild 1: a) Steckverbindung mit Schraubenfeder  
b) Längsschnitt der Steckverbindung (1 Windung)



**Bild 2: Modellanordnung für Steckverbindungen mit Schraubenfedern**

nungstechnik beträgt  $\vartheta_{\max} = 105 \text{ °C}$  (IEC62271-1: 2007).

Der Einfluss des Kraftabbaus auf das Langzeitverhalten bzw. auf den Verbindungswiderstand der Steckverbindung wird deshalb an einer Modellanordnung der Verbindung (Bild 2) bei  $\vartheta_{\max}$  in Langzeitversuchen bis zu 32.000 Stunden untersucht. Um Aussagen zur Abnahme der Kontaktkraft abhängig von der Betriebszeit der Anlage von bis zu 40 Jahren machen zu können, wurde ein FE-Modell der Schraubenfeder erstellt, mit dem die Spannungsrelaxation in der Schraubenfeder berechnet werden kann.

### Experimentelle Untersuchungen zum Langzeitverhalten

Die Kontaktkraft in der Verbindung ändert sich abhängig von der Temperatur, der mechanischen Spannung und dem Strom. Um den Einfluss des Abbaus der Kontaktkraft auf den Verbindungswiderstand untersuchen zu können, wurde eine Modellanordnung, bestehend aus zwei parallelen Aluminiumplatten, aufgebaut, an der der Kraftabbau im Langzeitversuch gemessen werden konnte (Bild 2) [1, 6]. Die Aluminiumplatten waren, analog zur originalen Steckverbindung, versilbert. In die untere Platte wurde eine Nut eingefräst, die äquivalent der Nut am Kontaktträger ist (Bilder 1 und 2). Die Schraubenfeder wurde über elektrisch isolierende Stützelemente (GFK) über die Dauer des Langzeitversuchs konstant eingefedert.

Da die Spannungsrelaxation außer von der mechanischen Spannung und der Temperatur auch vom Strom abhängig sein kann, wurden sechs Modellanordnungen mit CuCo2Be-Schraubenfedern so mit Wechselstrom (AC) belastet, dass sich die maximal zulässige Betriebstemperatur dieser Verbindung von  $\vartheta_{\max} = 105 \text{ °C}$  einstellte. Die Stromdichte betrug dabei in der Feder  $S \approx 7,3 \text{ A/mm}^2$ . In [8] und [9] wurde für Kupfer und Aluminium dazu der Einfluss des Stromes (Wechsel- und Gleichstrom) auf die Spannungsrelaxation bereits bei Stromdichten  $S \geq 1,6 \text{ A/mm}^2$  festgestellt. Der Einfluss des Stromes auf die Spannungsrelaxation wird als „electroplastic effect“ bezeichnet. Der Strom beschleunigt die Prozesse im Material, die zur

Spannungsrelaxation führen. Weitere sechs Modellanordnungen mit CuCo2Be-Schraubenfedern wurden stromlos im Wärmeschrank bei  $\vartheta_{\max}$  gelagert, um eventuelle Unterschiede in der Spannungsrelaxation zu den stromdurchflossenen Federn feststellen zu können. Der Kraftabbau in den CuCr1Zr-Schraubenfedern wurde an sechs stromdurchflossenen Modellanordnungen untersucht.

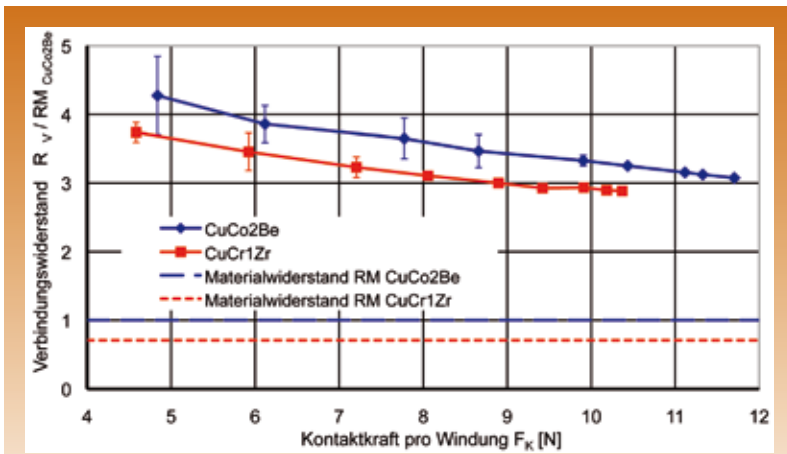
Um den Einfluss der Kontaktkraft auf den Verbindungswiderstand ermitteln zu können, wurde der Verbindungswiderstand der Modellanordnung abhängig von der Kontaktkraft gemessen (Bild 3). Die Schraubenfedern und Aluminiumplatten wurden vor der Montage mit Spiritus gereinigt und anschließend mit Kontaktfett dünn eingefettet. Kontaktfett wird in Steckverbindungen deshalb eingesetzt, um den Gleitverschleiß an den Kontaktflächen zu minimieren. Ein hoher Gleitverschleiß kann den Verbindungswiderstand stark beeinflussen [7].

Der Verbindungswiderstand an der Modellanordnung mit CuCr1Zr-Schraubenfedern ist bei gleicher Kontaktkraft geringer als mit CuCo2Be-Schraubenfedern (Bild 3). Der Grund dafür ist die höhere elektrische Leitfähigkeit von CuCr1Zr gegenüber CuCo2Be (Tabelle 1). Trotz des um ca. 25 % kleineren Materialwiderstandes

		$\rho$ [m/Ωmm <sup>2</sup> ]	R <sub>p0.2</sub> [MPa]	E [GPa]	E <sub>T</sub> [GPa]	$\nu$ <sup>3)</sup>
CuCo2Be	Norm/Literatur	≤ 26	500-850	130-138	-	0,33
	3 Versuche <sup>1)</sup> [20 °C]	≤ 38 <sup>2)</sup>	580-590	139-149	11	-
	3 Versuche <sup>1)</sup> [105 °C]	-	570-580	138-143	6	-
CuCr1Zr	Norm/Literatur	≤ 43	400-440	110-130	-	0,33
	3 Versuche <sup>1)</sup> [20 °C]	≤ 50 <sup>2)</sup>	480-500	107-120	1,3-1,7	-
	3 Versuche <sup>1)</sup> [105 °C]	-	460-490	103-131	0,4-1,1	-

<sup>1)</sup> Siempelkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft, Dresden  
<sup>2)</sup> TU Dresden – Institut für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
<sup>3)</sup> repräsentative Querkontraktionszahl  $\nu$  für Kupferlegierungen in ASM International Specialty Handbook „Copper and Copper alloys“ (2001)

**Tabelle 1: Materialeigenschaften für CuCo2Be und CuCr1Zr**



**Bild 3: Verbindungswiderstand abhängig von der Kontaktkraft-Modellanordnung**

von CuCr1Zr gegenüber CuCo2Be ist der Verbindungswiderstand aber nach der Einfederung der Steckverbindungen auf  $s_{\text{ruhend}}$  bei CuCr1Zr nur ca. 5 % kleiner als bei CuCo2Be. Da die mechanische Festigkeit von CuCr1Zr gegenüber CuCo2Be etwas geringer ist (Tabelle 1), ist auch die Kontaktkraft pro Windung bei gleicher Federgeometrie und gleicher Einfederung geringer (Bild 4). Die Differenz zwischen dem Materialwiderstand und dem Verbindungswiderstand entspricht dem von der Kraft abhängigen Kontaktwiderstand der Verbindung.

### Berechnung der Spannungsrelaxation

Die Berechnung der Spannungsrelaxation in der Schraubenfeder und damit des Kraftabbaus in der Verbindung (Modellanordnung) über bis zu 40 Jahren erfolgte mit dem FEM-Programm ANSYS, basierend auf der phänomenologischen Kriechgleichung (Gl.1) für stationäres Kriechen [1].

$$\dot{\epsilon}_{cr}(\sigma, T) = C \sigma^n e^{-\frac{Q_C}{RT}} \quad (1)$$

Die stationäre Kriechgeschwindigkeit ist dabei eine Funktion der mechanische Spannung  $\sigma$  und der Temperatur  $T$  (Gl.(1)).  $Q_C$  ist die Aktivierungsenergie,  $n$  der Spannungsexponent und  $R$  die universelle Gaskonstante (8,314 J/Kmol).  $C$  beschreibt als Proportionalitätsfaktor den Werkstoffzustand, der von der Bearbeitung des Materials (z.B. Verformung und Wärmebe-

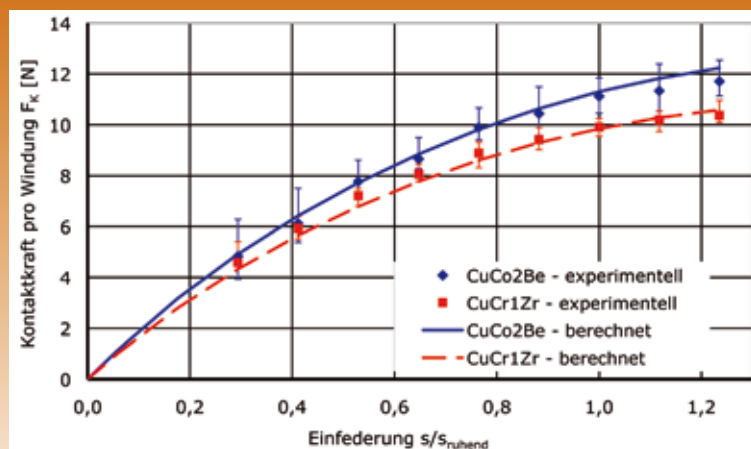
handlung) abhängt. Die Pseudorelaxation bzw. das primäre Kriechen, das einen relativ großen Kraftabbau in der Schraubenfeder in den ersten Stunden ( $t < 65$  h) verursacht, kann experimentell im Langzeitversuch bestimmt werden.

Für die Berechnung des stationären Kraftabbaus wurde ein FE-Modell für die CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfeder erarbeitet (Bild 5), das zum einen die geometrische Form und zum anderen die charakteristischen Materialparameter (Elastizitätsmodul  $E$ , Dehngrenze  $R_{p0,2}$ , Verfestigungskoeffizient  $E_T$  und Querkontraktionszahl  $\nu$ ) enthält. Da diese Materialparameter für die hier untersuchten Legierungen stark von der chemischen Zusammensetzung und von der Wärmebehand-

lung (Temperatur und Zeit) während des Ausscheidungshärtens abhängen, wurden diese Parameter experimentell in Zugversuchen bei Raumtemperatur  $\vartheta_0 = 20$  °C und  $\vartheta_{\text{max}}$  bestimmt (Tabelle 1). Die Zugversuche wurden an geraden Drahtproben durchgeführt, die äquivalent der Schraubenfeder wärmebehandelt wurden (Ausscheidungshärtung).

Die erstellten FE-Modelle der Schraubenfedern für die Modellanordnung wurden mit Hilfe des Vergleichs zwischen experimentell und berechneten Federcharakteristiken verifiziert (Bild 4).

Zur Berechnung der Spannungsrelaxation im stationären Bereich ( $t > 65$  h) werden die Kriechparameter ( $n$ ,  $Q_C$  und  $C$ ) benötigt. In der Literatur wurden zu diesen Parametern für CuCo2Be und CuCr1Zr keine Angaben gefunden, so dass diese mit Hilfe von Temperatur- und Lastwechselversuchen bestimmt werden mussten (Siempekkamp Prüf- und Gutachter-Gesellschaft, Dresden). Die Bestimmung der Kriechparameter für CuCo2Be wurde bereits in [1] vorgestellt. Für CuCr1Zr wurde ebenfalls eine Versuchsmatrix mit verschiedenen hohen, praxisrelevanten mechanischen Spannungen ( $0,75 R_{p0,2} \leq \sigma \leq 0,92 R_{p0,2}$ ) und Temperaturen ( $105$  °C  $\leq T \leq 160$  °C) aufgestellt. Die Kriechversuche wurden bis zu einer Zeit von 280 Stunden durchgeführt. Die Versuchsproben waren auch hier gerade CuCr1Zr Drahtproben, die äquivalent der Schraubenfe-



**Bild 4: Federcharakteristik für CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfedern-Modellanordnung**



**Bild 5: FE-Modell der Schraubenfedern – Modellordnung**

der wärmebehandelt waren. Die für die Bestimmung der Kriechparameter notwendigen stationären Kriechgeschwindigkeiten wurden aus den Anstiegen der Kriechkurven in dem Zeitbereich von 100 h bis ca. 280 h bestimmt. Werden diese Kriechgeschwindigkeiten über dem Logarithmus der mechanischen Spannung  $\sigma$  aufgetragen, erhält man aus dem Anstieg der Geraden den Spannungsexponenten  $n$  (Bild 6). Aus der Darstellung der Kriechgeschwindigkeit über den reziproken Wert der Temperatur  $1/T$  erhält man aus dem Anstieg der Geraden, multipliziert mit der universellen Gaskonstante  $R$ , die Aktivierungsenergien  $Q_C$  für CuCr1Zr (Bild 7).

Die Geraden zur Bestimmung des Spannungsexponenten (Bild 6) und die Geraden zur Bestimmung der Aktivierungsenergie (Bild 7) liegen jeweils parallel zueinander. Es kann deshalb davon ausgegangen werden, dass sich der Kriechmechanismus während der Versuche nicht ändert.

Um auch den Proportionalitätsfaktor für CuCr1Zr ermitteln zu können, wurden die drei Kriechparameter mit der „Methode der kleinsten Quadrate“ (Gaußsche Minimumbedingung) bestimmt (Tabelle 2). Für das stationäre Kriechen gibt es eine Näherungsfunktion (Gl. 1) mit den drei Parameter  $n$ ,  $Q_C$  und  $C$ .

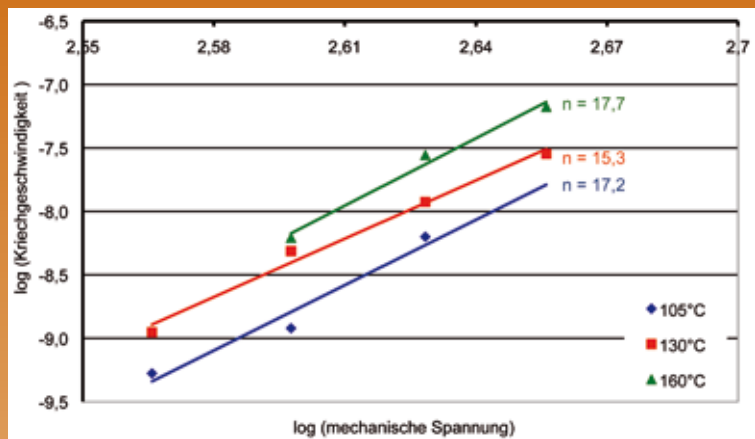
Berechnet man nach (Gl.1) mit den Kriechparametern für CuCr1Zr (Tabelle 2) die stationäre Kriechgeschwindigkeit abhängig von der mechanischen Spannung für die maximale Betriebstemperatur der Verbindung von  $\vartheta_{max} = 105\text{ °C}$  und vergleicht diese mit den gemessenen Kriechgeschwindigkeiten, so ergibt sich eine gute Übereinstimmung (Bild 8).

**Untersuchungsergebnisse**

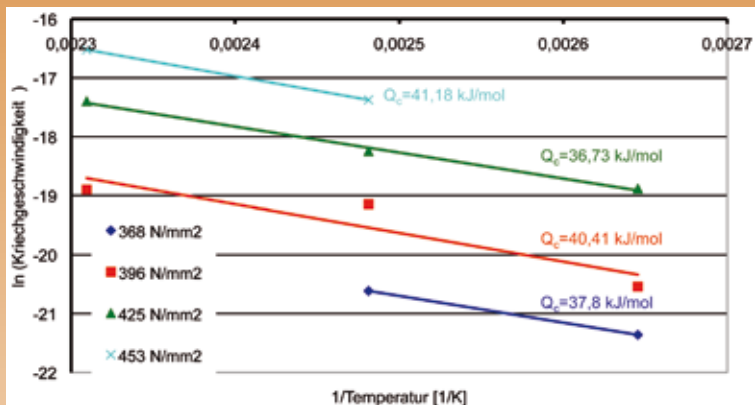
Mit den experimentell ermittelten Kriechparametern für CuCo2Be

und CuCr1Zr kann die Spannungsrelaxation und der Kraftabbau in der Verbindung bei  $\vartheta_{max} = 105\text{ °C}$  berechnet werden. Der berechnete und gemessene Kraftabbau stimmt für beide Materialien bis zu einer Zeit von 32.000 h für CuCo2Be und bis zu 19.500 h für CuCr1Zr gut überein (Bild 9). Die Pseudorelaxation

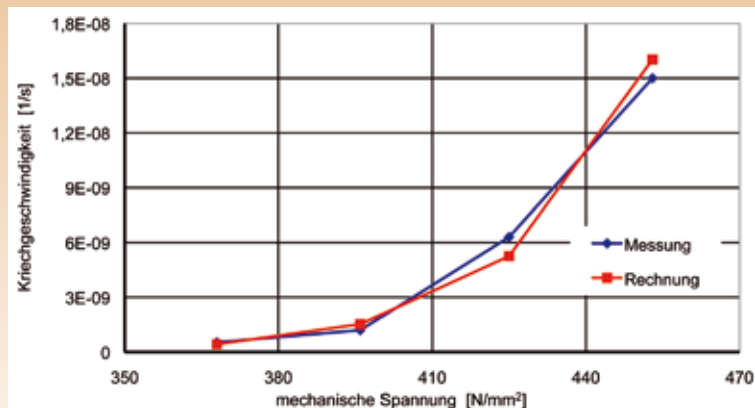
in den ersten Stunden wurde in beiden Fällen bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Deshalb wurde beim berechneten Abbau der Kontaktkraft im stationären Bereich ( $t > 65\text{ h}$ ) von einer kleineren als der Montagekraft für ruhende Steckverbindungen bei  $t = 0\text{ h}$  ausgegangen. Diese Kraft wurde bei der Berechnung durch eine



**Bild 6: Bestimmung des Spannungsexponent  $n$  für CuCr1Zr**



**Bild 7: Bestimmung der Aktivierungsenergie für CuCr1Zr**



**Bild 8: gemessene und berechnete stationäre Kriechgeschwindigkeit für CuCr1Zr bei  $\vartheta = 105\text{ °C}$**



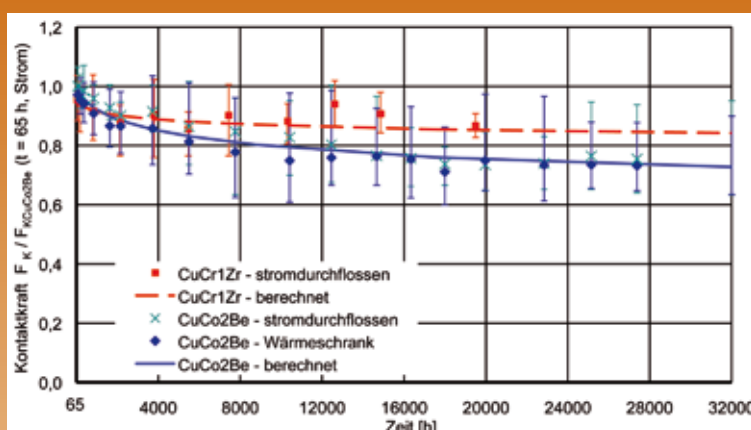
	n	QC [kJ/mol]	C [(N/mm <sup>2</sup> ) <sup>n</sup> (1/s)]
CuCo2Be	8,3	46,6	5*10-25
CuCr1Zr	17,5	37,6	1*10-49

**Tabelle 2: Experimentell ermittelte Kriechparameter (Spannungsexponent n, Aktivierungsenergie QC und Proportionalitätsfaktor C)**

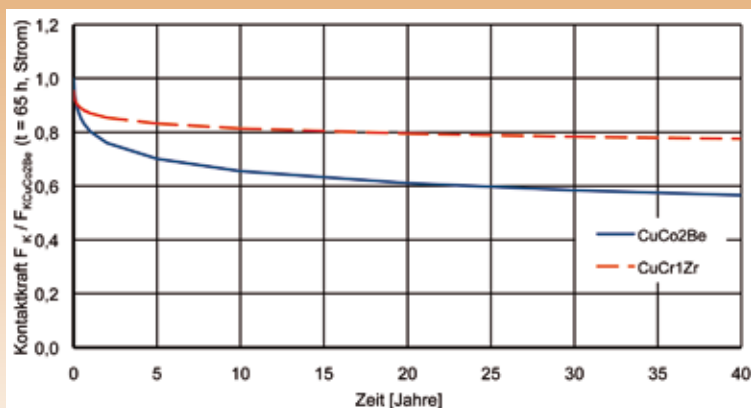
geringere Einfederung der Schraubenfeder realisiert und entspricht der Anfangskraft  $F_K$  ( $t = 65$  h) für den stationären Bereich des Kraftabbaus. Die Ergebnisse der Langzeitversuche mit CuCo2Be-Schraubenfedern zeigen, dass es quasi keinen Unterschied im Abbau der Kontaktkraft zwischen den stromdurchflossenen und den Proben im Wärmeschrank gibt (Bild 9). Der „electroplastic effect“ [8], der die Spannungsrelaxation beschleunigen kann, ist für diese ausscheidungsgehärtete CuCo2Be-Legierung scheinbar vernachlässigbar gering. Da CuCr1Zr vom selben Legierungstyp wie CuCo2Be ist und ähnlich wärmebehandelt wurde, wurde der Kraftabbau mit diesen Federn nur im stromdurchflossenen Langzeitversuch ermittelt. Der Abbau der Kraft zeigt deutlich, dass CuCr1Zr einen höheren Widerstand gegen Spannungsrelaxation besitzt als CuCo2Be. Die Kontaktkraft der CuCo2Be-Schraubenfedern beträgt im Mittel nach ca. 17.500 h (2 Jahre) nur noch ca. 75 % der Anfangskontaktkraft  $F_K$  ( $t = 65$  h) und für CuCr1Zr-Schraubenfedern noch ca. 90 %. Berechnet man den Kraftabbau der Schraubenfedern in der Modellanordnung für 40 Jahre, so beträgt für CuCo2Be die Kontaktkraft noch 57 % und für CuCr1Zr noch 78 % der Anfangskontaktkraft  $F_K$  ( $t = 65$  h) (Bild 10). Der deutliche Unterschied zwischen den beiden Legierungen im Relaxationsverhalten konnte auch durch lichtmikroskopische Gefügeuntersuchungen bestätigt werden. Es wurden polierte Querschliffe der Schraubenfedern angefertigt (Bild 11). In diesen konnten die Ausscheidungen, die für das Relaxationsverhalten eines Materials entscheidend sind, sichtbar gemacht werden. Qualitativ zeigte sich, dass die Ausscheidungen in der CuCr1Zr-Legierung deutlich kleiner

und fein verteilter im Grundmaterial vorliegen als bei der CuCo2Be-Legierung (Bild 12). Aus der Literatur ist bekannt, dass kleinere, fein verteilte Partikel, die im Grundmaterial ausgeschieden werden, einen größeren Widerstand gegen Spannungsrelaxation ergeben [5]. Das Auslösen von Versetzungen im Material wird durch das Umgehen (Orowanmechanismus) und das Schneiden der Ausscheidung stark behindert. Zusätzlich zum Kraftabbau in den Modellanordnungen wurden die Ver-

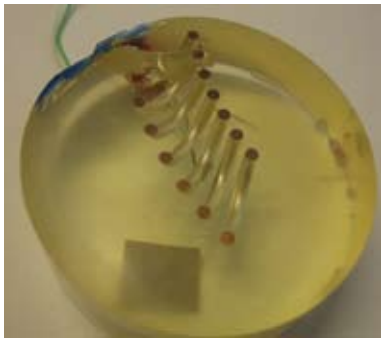
bindungswiderstände bei Raumtemperatur  $\vartheta = 20$  °C gemessen. Damit konnte der Einfluss des Kraftabbaus auf den Verbindungswiderstand ermittelt werden. Obwohl sich die Kontaktkraft im Langzeitversuch für CuCo2Be um bis zu 25 % und für CuCr1Zr um bis zu 12 % gegenüber der Ausgangskontaktkraft  $F_K$  ( $t = 65$  h) verringert hat, bleiben die Verbindungswiderstände quasi konstant (Bild 13). Der konstante Verbindungswiderstand kann durch die plastische Verformung der Silberschicht an den wahren Kontaktflächen erklärt werden [1]. Es wird erwartet, dass der Einfluss der Spannungsrelaxation auf das Langzeitverhalten der Steckverbindungen mit CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfedern bis zu 40 Jahren gering ist, da der Abbau der Kontaktkraft in der Verbindung über die verbleibenden 36,5 Lebensjahre für CuCo2Be nur 14 % und für CuCr1Zr sogar nur 6 %



**Bild 9: Gemessener und berechneter Kraftabbau an den Modellanordnungen bei  $\vartheta = 105$  °C**



**Bild 10: Berechneter Kraftabbau an den CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfedern bei  $\vartheta = 105$  °C**



**Bild 11: Querschnitt einer Schraubenfeder für lichtmikroskopische Gefügeuntersuchungen**

beträgt. Aufgrund der höheren elektrischen Leitfähigkeit und der höheren Relaxationsbeständigkeit von CuCr1Zr gegenüber CuCo2Be können beide Materialien als gleichwertig betrachtet werden.

**Zusammenfassung**

Der Einfluss von Spannungsrelaxation auf das Langzeitverhalten von Steckverbindungen mit CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfedern als Kontaktelemente wurde experimentell und theoretisch untersucht.

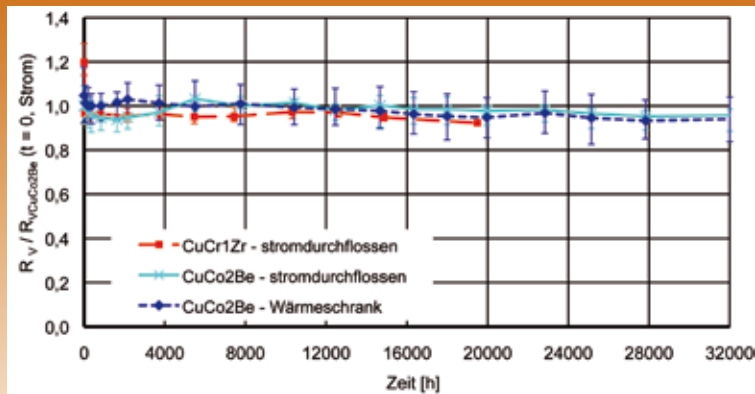
- Es wurden Langzeitversuche mit CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfedern in einer Modellanordnung bis zu 32.000 h durchgeführt. Obwohl die Kontaktkraft kleiner wird, bleibt der Verbindungswiderstand quasi konstant.
- Der Kraftabbau in den Verbindungen bis zu 40 Jahren wurde mit einem FE-Modell der Schraubenfeder mit dem Programm ANSYS berechnet. Die dazu notwendigen Material- und

Kriechparameter wurden für beide Materialien experimentell bestimmt.

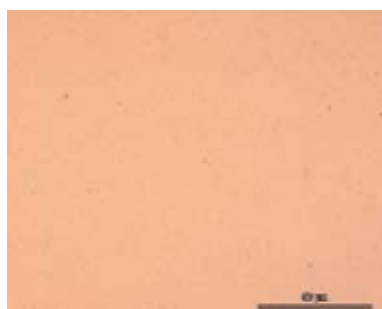
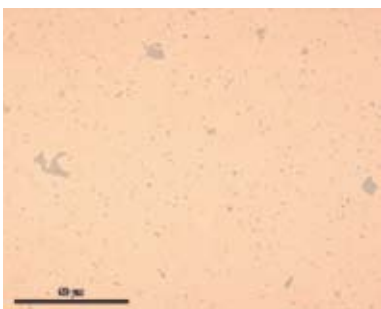
- CuCr1Zr weist gegenüber CuCo2Be einen deutlich größeren Widerstand gegen Spannungsrelaxation auf. Das konnte mittels lichtmikroskopischen Untersuchungen der Ausscheidungen (Größe und Verteilung) im Grundmaterial bestätigt werden.
- Basierend auf den bisherigen Ergebnissen wird davon ausgegangen, dass der Einfluss der Spannungsrelaxation auf das Langzeitverhalten der Steckverbindungen mit CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfedern bis zu 40 Jahren gering ist.
- Aufgrund der höheren elektrischen Leitfähigkeit und der höheren Relaxationsbeständigkeit von CuCr1Zr gegenüber CuCo2Be können beide Materialien als gleichwertig betrachtet werden.

**Literatur**

[1] Blumenroth, F, Löbl, H. Großmann S., Kudoke, M.: Zum Langzeitverhalten von Kontaktelementen aus CuCo2Be in Anlagen der Elektroenergie-technik, METALL, 60. Jahrgang, 2006, S. 718-722  
 [2] Keil, A., Merl, W., Vinaricky, E. (Editors): Elektrische Kontakte und ihre Werkstoffe, Berlin: Springer Verlag, 1984  
 [3] Keppler, M., Theobald, S., Kuhn, H.-A., Bögel, A.: Neue Kupferwerkstoffe für Elektronik und Elektrotechnik, METALL, 57. Jahrgang, 2003, S. 460-465  
 [4] Slade, P.G. (Editor): Electrical Contacts, New York, Basel, Marcel Dekker Inc., 1999  
 [5] Bürgle, R.: Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik, Grundlagen, Werkstoffbeanspruchung, Hochtemperaturlegierungen, Verlag Vieweg Technik, 1998  
 [6] Blumenroth, F, Löbl, H. Großmann S., Kudoke, M.: Long time behaviour of static high current plug-in connectors with CuCo2Be helical spring, 23th Conference on Electrical Contacts 2006, Sendai, pp. 251-256  
 [7] Blumenroth, F, Löbl, H. Großmann S., Kudoke, M.: Influence of Stress Relaxation and Sliding on Long Time Behaviour of Plug-In Power Connectors with Helical Springs, 24th Conference on Electrical Contacts 2008, Saint Malo, pp. 368-373  
 [8] Silveira, VLA: Electroplastic effect in copper subjected to low density electric current, Scripta Metall 15: 1981



**Bild 13: Verbindungswiderstand  $R_V$  der Modellanordnung mit CuCo2Be- und CuCr1Zr-Schraubenfedern abhängig von der Zeit bei  $\vartheta = 20 \text{ }^\circ\text{C}$**



**Bild 12: Ausscheidungen im Grundmaterial a) CuCo2Be und b) CuCr1Zr bei 500-facher Vergrößerung unter einem Lichtmikroskop (Proben poliert) – Institut für Werkstoffwissenschaften TU Dresden**

[9] Braunovic, M.: The effect of an electric current on the stress relaxation of aluminium wire conductors, International Conference on Strength of Metals, Oxford: Pergamon Press, 1985

(1) Falk Blumenroth, Helmut Löbl, Steffen Großmann, Technische Universität Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik  
 (2) Matthias Kudoke, ABB Schweiz AG, Zürich, Gasisolierte Schaltsysteme, Schweiz