

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 33 (1942)
Heft: 2

Artikel: Kontakt-Probleme
Autor: Hausner, Heinz H.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1061631>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 14.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:

Sekretariat des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Zürich 8, Seefeldstrasse 301

ADMINISTRATION:

Zürich, Stauffacherquai 36 ♦ Telefon 5 17 42
Postcheck-Konto VIII 8481

Nachdruck von Text oder Figuren ist nur mit Zustimmung der Redaktion und nur mit Quellenangabe gestattet

XXXIII. Jahrgang

N^o 2

Mittwoch, 28. Januar 1942

Kontakt-Probleme

Von Heinz H. Hausner, New York.

621.316.5.066.6

Der für elektrische Kontakte charakteristische Begriff «Grenzstrom» wird erläutert, und für einige Kontaktstoffe, insbesondere Metalle, werden numerische Werte der Grenzstromstärke angegeben. Weiterhin wird die elektrische Leitfähigkeit und ihr physikalischer Zusammenhang mit der Wärmeleitfähigkeit behandelt. Auch die rechnerischen Beziehungen zwischen den verschiedenen physikalischen Grössen, durch welche die praktisch wichtige Erscheinung der Metallwanderung bedingt ist, werden behandelt. Die für den Kontaktbau günstigsten Eigenschaften grosser Härte und guter elektrischer Leitfähigkeit sind bei den reinen Metallen nicht zugleich vorhanden. Die neueste Technik der Metallkeramik, durch welche Metallkörper aus Metallpulver durch Pressung und Sinterung hergestellt werden, erlaubt, bei diesen sog. Verbundmetallen weit günstigere Eigenschaften zu erzielen, als die reinen Metalle oder deren Legierungen aufweisen; diese Metalle eignen sich deshalb in besonderem Masse als Kontaktbaustoffe.

L'auteur précise la notion de «courant-limite» qui caractérise les contacts électriques, et donne quelques chiffres concernant les intensités du courant-limite pour quelques matériaux utilisés pour les contacts, en particulier des métaux. Il s'occupe ensuite de la conductivité électrique et de sa relation physique avec la conductivité thermique, de même que des relations entre les diverses grandeurs physiques qui provoquent un transport de métal, phénomène qui joue un grand rôle en pratique. Dans le cas des métaux purs, les propriétés les plus favorables pour la construction des contacts, telles qu'une grande dureté et une bonne conductivité électrique, ne se présentent jamais ensemble. Les plus récents procédés de la céramique des métaux, qui consiste à fabriquer des corps métalliques à l'aide de poudres métalliques par compression et concrétion, permet d'obtenir de bien meilleurs résultats qu'avec les métaux purs ou leurs alliages; ces métaux comprimés sont donc particulièrement appropriés à la fabrication des contacts.

Die Probleme der elektrischen Kontakte sind bis vor wenigen Jahren theoretisch nur selten behandelt worden. Erst die grossen Fortschritte im Schalterbau, die erhöhten Ansprüche, welche an Schalterkontakte gestellt wurden, und nicht zuletzt das Aufkommen neuer Kontaktmetalle mit besonderen physikalischen Eigenschaften haben zu einer eingehenderen Behandlung der Kontaktprobleme geführt. Zahlreiche metallurgische Fragen, welche die Kontaktmetalle betreffen, konnten erst durch die elektronentheoretischen Forschungen der letzten Jahre geklärt werden.

Die Beanspruchung der Kontakte kann bei dauerndem Stromdurchgang durch Erwärmung, beim Ein- und Ausschalten durch Funkenbildung und bei schleifender Beanspruchung auf mechanischem Wege erfolgen.

Kontakte, welche längere Zeit in Benützung stehen, zeigen, dass eine Art von Materialwanderung von einem Kontaktteil auf den anderen stattfindet. Diese Materialwanderung ist durch den Kontaktfunken hervorgerufen. Der Kontaktfunken kann in drei verschiedenen Formen auftreten:

1. Als Lichtbogen: Beobachtungen zeigen, dass zur Hervorrufung eines Lichtbogens eine Gleichspannung von mindestens 10...20 V und eine Stromstärke von mindestens 0,2...2 A nötig sind.

2. Als Glimmstrom: dieser kann schon bei kleineren Strömen entstehen, doch ist dazu eine Spannung von mehr als 300 V (Gleichstrom) erforderlich.

3. Als kalter Elektronenstrom: dieser kann auftreten, wenn die Kontaktöffnung sehr klein und die Feldstärke sehr gross ist.

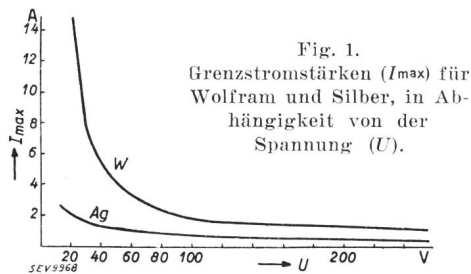
Da der Glimmstrom und der kalte Elektronenstrom im Vergleich zum Lichtbogen nur ganz geringfügige Materialveränderungen und Materialverschiebungen hervorrufen, werden sie im folgenden auch nicht weiter behandelt.

Grenzstrom

Es wurde erwähnt, dass bei Ein- und Ausschaltungen ein Lichtbogen erst bei einer Spannung von mindestens 10...20 V und bei einer Stromstärke von mindestens 0,2...2 A auftreten kann. Tatsächlich kann man ohne weiteres Stromabschaltungen beobachten, bei welchen die Kontakte ohne Lichtbogenbildung unterbrechen. Natürlich ist die Lichtbogenbildung abhängig vom Dielektrikum zwischen den Kontakten; die erwähnten Werte gelten für Luft als Dielektrikum. Wird an einer bestimmten Kontaktart eine Schaltung in Luft von bestimmter Temperatur und bestimmter Feuchtigkeit vorgenommen, dann ist die Frage, ob Funkenbildung beim Unterbrechen des Stromes auftritt oder nicht, vor allem eine Frage der Stromstärke. Es gibt für jede Spannung eine bestimmte Stromstärke, die Grenzstromstärke, bei welcher sich der Strom gerade noch unterbrechen lässt, ohne dass sich ein Lichtbogen bildet.

Dieser Grenzstrom ist in einem hohen Masse abhängig vom Kontaktmaterial, von der Kontakt-

temperatur und von der Oberflächenbeschaffenheit der Kontakte. Fig. 1 zeigt Grenzstromkurven für zwei verschiedenartige Kontaktmaterialien: für das gut leitende Silber und für das harte Wolfram-



metall. Tabelle I gibt einen Ueberblick über die Grenzstromstärken für Graphit und verschiedene Metalle.

Grenzstromstärken (in Ampères).

Volt	Graphit	Cu	Mo	Ni	Pb	Ag	W	Messing
25	—	—	18	—	7,5	1,7	12,5	—
50	5	1,3	3	1,2	3	1	4	0,7
110	0,7	0,9	2	1	0,85	0,6	1,8	0,4
220	0,1	0,5	1	0,7	0,7	0,45	1,4	0,3

Aus Tabelle I ist zu ersehen, dass sich der Lichtbogen zwischen Wolfram-Kontakten bei einer Spannung von ca. 50 V erst bei einer Stromstärke bildet, die ca. viermal so gross ist als jene Stromstärke, die bei gleicher Spannung zu einer Funkenbildung zwischen Silberkontakten führt.

Höhere Temperatur der Kontakte setzt die Grenzstromwerte für ein bestimmtes Material herab, da die Elektronenemissionsfähigkeit des Materials sich bei höherer Temperatur erhöht und die Lichtbogenbildung dadurch begünstigt wird. Auch Oxydschichten erleichtern aus diesem Grunde die Funkenbildung und setzen die Grenzstromwerte herab.

Leitfähigkeit

Die Verringerung der Kontakterwärmung ist vor allem durch richtige Dimensionierung der Kontakte, sowie durch die Verwendung eines geeigneten Kontaktmaterials möglichst hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit zu erzielen.

Die Leitfähigkeit eines Materials ist von der Zahl seiner freien Elektronen abhängig. (Das Vorhandensein freier Elektronen ist das charakteristische Merkmal der Metalle gegenüber den Nichtmetallen.) Es dürfte an dieser Stelle interessieren, dass man Elektronen auch durch äussere Energiezufuhr, z. B. durch UV-Strahlung, freimachen kann. So ist es auch durch eine UV-Strahlung von Diamanten und Zinkblenden gelungen, diese Nichtleiter leitend zu machen.

Die elektrische Leitfähigkeit γ eines Materials lässt sich aus den charakteristischen Daten seiner Elektronen, aus Zahl, Ladung, Masse und Geschwindigkeit der Elektronen wie folgt berechnen:

$$\gamma = \frac{e^2}{2m v} \cdot n_{\text{eff}} \cdot l \quad (1)$$

Darin bedeuten:

- e die Ladung der Elektronen,
- m die Masse der Elektronen,
- v die mittlere Geschwindigkeit der Elektronen,
- l die freie Weglänge der Elektronen,
- n_{eff} die effektive Elektronenzahl.

Die freie Weglänge l der Elektronen in einem Metall wird auf wellenmechanischer Grundlage berechnet. Sie ist eine Funktion der Temperatur (thermische Bewegung im Atomgitter), des Bearbeitungsgrades (Deformation der Kristalle) und natürlich auch der Reinheit des betreffenden Metalls (im Gitter aufgenommene Atome fremder Substanzen).

Seit der Mitte des vorigen Jahrhunderts ist bekannt, dass zwischen dem Wärmeleitvermögen und dem elektrischen Leitvermögen eines Metalls ein inniger Zusammenhang besteht.

$$L = \frac{\lambda}{\gamma \cdot T} \quad (2)$$

Darin bedeuten:

- L die Wiedemann-Franzsche Konstante,
- γ die elektrische Leitfähigkeit,
- λ das Wärmeleitvermögen,
- T die absolute Temperatur.

Auch die Wärmeleitfähigkeit λ , die bei Kontaktmetallen eine sehr wichtige Rolle spielt, lässt sich aus den charakteristischen Daten der Elektronen berechnen.

$$\lambda = \frac{\pi^2 k^2 T}{6 m v} \cdot n_{\text{eff}} \cdot l \quad (3)$$

Darin bedeuten:

- k die Boltzmannsche Konstante (Gaskonstante),
- $T, m, v, n_{\text{eff}}, l \dots$ siehe oben.

Nach Einsetzung der Gleichungen (1) und (3) in den Ausdruck (2) für die Wiedemann-Franzsche Konstante ergibt sich:

$$L = \frac{\lambda}{\gamma \cdot T} = \frac{\pi^2}{3} \cdot \left(\frac{k}{e} \right)^2 \quad (4)$$

Damit ist der Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Wärmeleitfähigkeit gegeben. Während der Faktor L bei den reinen Metallen jeweils einen ziemlich ähnlichen Wert aufweist, sind bei Legierungen starke Abweichungen vorhanden. Bei den später geschilderten Verbundmetallen, welche in der allerletzten Zeit auf metallkeramischer Grundlage entwickelt wurden, ist das Verhältnis zwischen der elektrischen Leitfähigkeit und der Wärmeleitfähigkeit besonders günstig und die Wärmeleitfähigkeit verhältnismässig hoch, so dass auch die Konstante L bei den Verbundmetallen einen entsprechend höheren Wert aufweist.

Materialwanderung

Der dauernden Erwärmungsbelastung der Kontakte im eingeschalteten Zustand des Schalters, steht die kurzzeitige, aber starke Beanspruchung durch Funkenbildung beim Ein- und Ausschalten gegen-

über. Wie oben erwähnt, tritt bei Funkenbildung eine Materialwanderung von einem Kontaktteil zum andern ein. Es wurde festgestellt, dass ein kurzer Kontaktfunke, bei welchem die schnelleren primären Elektronen die Anode erreichen, eine stärkere Verdampfung an der Anode hervorruft. Hingegen verursacht ein verhältnismässig langer Lichtbogen mit reichlicher Ionisation im Gase eine stärkere Verdampfung an der Kathode. Es hängt demnach von der Dauer des Lichtbogens im Verhältnis zur Abhebegeschwindigkeit der Kontakte ab, ob der Stoffverlust anodisch oder kathodisch ist. Die Materialwanderung ist einerseits von den elektrischen Verhältnissen des Lichtbogens abhängig, andererseits ist sie in hohem Masse eine Funktion der physikalischen Eigenschaften des Kontaktbaustoffes. Die Ursachen, die zur Materialwanderung führen, werden am besten durch die folgenden Ausdrücke (5), (6) und (7) dargestellt. Der Vorgang der Materialwanderung kann am besten durch Gl. (5) charakterisiert werden mit:

$$G = q \cdot I \quad (5)$$

Darin bedeuten:

G die durch die Kontaktgebung, bzw. -lösung wandernde Metallmenge,

q die durch den Funken fliessende Elektrizitätsmenge,

I den Gewichtsverlust in mg pro Coulomb.

Der Faktor I hängt zwar auch von der Kontaktform ab; er ist jedoch vor allem eine charakteristische Grösse des Kontaktbaustoffes. Versuche zeigten, dass der Gewichtsverlust I mit zunehmendem Atomvolumen des Kontaktmetalles ebenfalls zunimmt, dass er jedoch abnimmt, wenn die Härte des Kontaktmaterials zunimmt. Das Kontaktmaterial soll daher nicht nur eine möglichst grosse Härte aufweisen, um den mechanischen Beanspruchungen zu genügen, sondern auch, um die Materialwanderung der Stoffe während der Funkenbildung zu verringern. Eine ausreichend genaue, empirisch gefundene Formel (6) für den Gewichtsverlust I (mg/C) zeigt diese Zusammenhänge.

$$I = K_1 \frac{U_0}{\sqrt{A}} V_A^2 \quad (6)$$

Darin bedeuten:

U_0 die charakteristische Spannung am Lichtbogen,

V_A das Atomvolumen = $\frac{A}{\text{Dichte}}$

A das Atomgewicht,

A die Härte in Brinelleinheiten,

K_1 eine Konstante, welche u. a. auch die Kontaktform charakterisiert.

Die in Ausdruck (5) genannte Elektrizitätsmenge q , welche während der Funkendauer transportiert wird, lässt sich berechnen nach

$$q = K_2 \frac{E I_0}{v} \quad (7)$$

Darin bedeuten:

E EMK in V, im gesamten Stromkreis des Kontaktes,

I_0 Lichtbogenstromstärke in A,

v Trennungsgeschwindigkeit der Kontakte in cm/s,

K_2 eine Konstante.

Die Lichtbogenstromstärke I_0 , welche für die Materialwanderung massgebend ist, ist abhängig von der charakteristischen Spannung am Lichtbogen, die ihrerseits eine Funktion der physikalischen Eigenschaften des Kontaktmaterials ist. Bei rein ohmscher Belastung im Stromkreis ergibt sich der Lichtbogenstrom I_0 aus dem Strom bei geschlossenem Kontakt (I) zu

$$I_0 = I \frac{E - U_0}{E} \quad (8)$$

Tabelle II gibt einen Ueberblick über die charakteristische Spannung im Lichtbogen, sowie über den Gewichtsverlust für verschiedene Kontaktbaustoffe.

Lichtbogenspannung und Gewichtsverlust.

Tabelle II.

Material	Charakteristische Lichtbogen-spannung U_0 V	Spez. Gewichtsverlust I' mg/C
Kohle . . .	18	0,0013
Aluminium .	14	0,014
Nickel . . .	14	0,02
Kupfer . . .	12,3	0,045
Molybdän .	17	0,01
Silber . . .	11,5	0,17
Wolfram . .	16	0,07
Platin . . .	16	0,13

Da man bestrebt ist, die Stoffwanderung zwischen den Kontakten möglichst gering zu halten, trifft man im Schalterbau alle jene Massnahmen, welche geeignet erscheinen, um den Lichtbogen und die Lichtbogenstromstärke möglichst klein zu halten. Man wird in manchen Fällen zur Verringerung von Lichtbogenspannung und Strom parallel zum Schalter Löschkondensatoren anbringen, in andern Fällen wird man im Schalter Funkenlöschvorrichtungen verwenden (Druckluft, Oel, magnetische usw.), um den Lichtbogen zu verringern. Man wird jedoch in allen Fällen stets bestrebt sein, den durch seine physikalischen Eigenschaften am besten geeigneten Kontaktbaustoff zu verwenden, um die Betriebssicherheit und die Lebensdauer des Schalters möglichst zu erhöhen.

Kontaktmetalle

An die Kontaktbaustoffe werden hohe Anforderungen gestellt. Es werden verschiedene physikalische Eigenschaften verlangt, deren gleichzeitiges Vorhandensein bei reinen Metallen nicht zutrifft. Neben einer hohen Abbrandfestigkeit werden vor allem eine hohe Härte [s. Gl. (6)] und eine gute elektrische Leitfähigkeit verlangt.

Wenn man von jenen Kontakten, die für Sondierzwecke, zur Verhinderung jeglicher Oxydation, aus Platin, bzw. Platin-Iridium hergestellt werden, absieht, dann verbleiben der Hauptsache nach zwei Gruppen von Metallen, die zur Kontaktherstellung in Frage kommen: Die Gruppe der Hartmetalle (typische Vertreter Wolfram und Molybdän) und die Gruppe der guten Leiter (typische Vertreter Kupfer und Silber). Tabelle III gibt einen Ueber-

blick über die für die elektrischen Kontakte wesentlichsten Eigenschaften dieser vier charakteristischen Metalle.

Physikalische Eigenschaften einiger reiner Metalle.
Tabelle III.

	Wolfram	Molybdän	Kupfer	Silber
Spez. Gewicht (g/cm^3)	19,1	10,2	8,9	10,5
Spez. elektr. Leitfähigkeit ($\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$)	18	17,5	58	61,5
Spez. elektr. Widerstand ($10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$)	5,51	5,7	1,724	1,62
Wärmeleitvermögen ($\text{cal}/^\circ\text{C} \cdot \text{cm} \cdot \text{s}$)	0,38	0,35	0,92	0,97
Brinellhärte (kg/mm^2)	290	147	32	30
Schmelzpunkt $^\circ\text{C}$	3380	2620	1083	960

Tabelle III zeigt, dass man bei Verwendung der reinen Metalle nur die Wahl zwischen grosser Härte und guter elektrischer Leitfähigkeit hat. Es gibt jedoch für die praktische Verwendung kein reines Metall, das diese beiden Eigenschaften in ausreichendem Masse vereinigen würde. Metallverbindungen, die zwischen einzelnen der erwähnten vier charakteristischen Metalle übrigens gar nicht möglich sind, haben die Eigenschaft, dass ihre Leitfähigkeit, und zwar sowohl die elektrische, als auch die thermische keineswegs linear zwischen der Leitfähigkeit des besseren und des schlechteren Leiters verläuft, sondern in der Verbindung ganz wesentlich absinkt.

vereinigt werden. Verschiedene Zusammensetzungen, sowie verschiedene Press- und Wärmebehandlungen gestatten, eine ganze Skala von physikalischen Eigenschaften zu erzielen, welche man bis in die jüngste Gegenwart nicht vereinigen konnte. Fig. 2 zeigt den Zusammenhang zwischen der Brinellhärte und der elektrischen Leitfähigkeit bei Wolfram-Silber-Verbundmetallen. Die elektrische Leitfähigkeit ist darin in % der Leitfähigkeit von

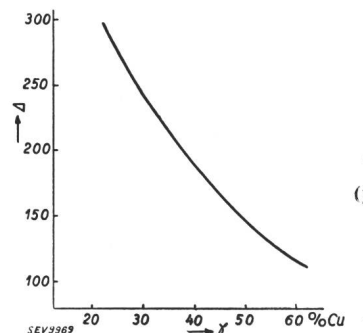


Fig. 2.
Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit (γ in % γ_{Cu}) und Härte (Δ) für Wolfram-Silber-Verbundmetalle.

Standardkupfer angegeben. An dieser Stelle sei ausdrücklich hervorgehoben, dass diese verschiedenen Leitfähigkeiten und Härten, sowie die verschiedenen Dichten der Verbundmetalle keineswegs nur durch das Mischungsverhältnis zwischen den zwei oder mehreren Grundmetallen hervorgerufen sind. Alle diese physikalischen Eigenschaften werden in hohem Masse bestimmt durch die Art der ursprünglichen Pressung, durch die verschiedenen Wärmebehandlungen (Bestimmung von Sintertem-

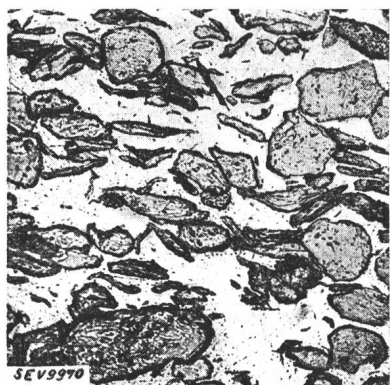


Fig. 3.
Molybdän-Silber-Verbundmetall.
Mikrostruktur, Vergr. 200fach.

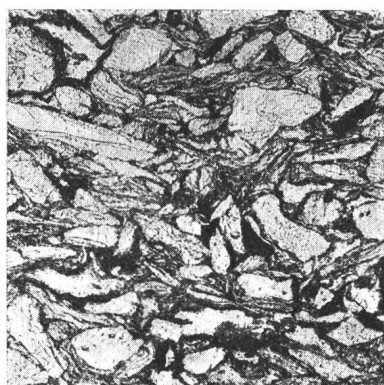


Fig. 4.
Wolfram-Silber-Verbundmetall.
Mikrostruktur, Vergr. 200fach.

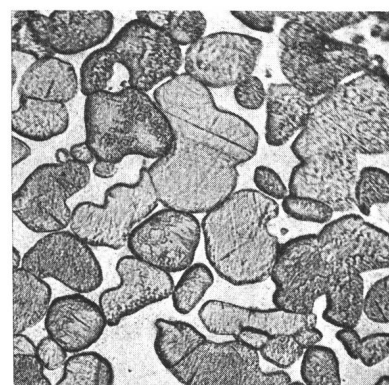


Fig. 5.
Wolfram-Kupfer-Verbundmetall.
Mikrostruktur, Vergr. 200fach.

Erst die Metallkeramik, die Erzeugung von Metallkörpern aus Metallpulvern, gestattete, Metallverbundstoffe herzustellen, welche eine Vereinigung der beiden grundlegenden Kontaktforderungen, der Leitfähigkeit und der Härte, ermöglichten. Die jüngste Weiterentwicklung dieser Verbundmetalle in den Vereinigten Staaten¹⁾ ist überaus vielversprechend.

Diese Verbundmetalle bestehen aus Wolfram, Molybdän oder ähnlichen harten Metallpulvern, welche durch Pressung und Sinterung mit Kupfer, Silber oder ähnlichen gutleitenden Metallpulvern

peratur und Sinterzeit) sowie durch die Art der mechanischen Nachbehandlung. Alle die genannten Faktoren beeinflussen wesentlich den Aufbau der Kristallstruktur, der Korngrösse und Korngestalt; und gerade der strukturelle Aufbau ist für die Eignung des Verbundmetalles als Kontaktbaustoff massgebend. Die Fig. 3, 4 und 5 sollen ein Bild der Mikrostrukturen verschiedener Verbundmetalle, die zur Herstellung elektrischer Kontakte geeignet sind, vermitteln. Fig. 3 zeigt ein typisches Molybdän-Silber-Material, Fig. 4 ein Wolfram-Silber-Material und Fig. 5 eine Wolfram-Kupfer-Kombination, deren Struktur die Abschaltung von Strömen bis zu 100 000 A gestattet, ohne darunter

¹⁾ USA-Patent Nr. 2 030 229.
USA-Patent Nr. 2 096 924 usw.

zu leiden. Gerade das in Fig. 5 dargestellte Verbundmetall ist in mancher Hinsicht bemerkenswert. Dieses Material weist eine derartig hohe Dichte (ca. 17 g/cm³) auf, dass es für sämtliche Strahlungen des Radiums vollständig undurchlässig ist. Trotz seiner hohen Dichte und seiner grossen Härte ist dieses Verbundmetall jedoch leicht bearbeitbar. Und obwohl dieses Material durch Pressung von Metallpulvern entstanden ist, besitzt es eine Zerreiissfestigkeit von ca. 9000 kg/cm².

Die guten mechanischen Eigenschaften, vor allem aber die grosse Härte einzelner Verbundmetalle gestatten die Anwendung eines hohen Pressdruckes, ohne dass die Oberfläche der Kontakte darunter leidet. Durch die Möglichkeit eines hohen Pressdruckes wird eine wesentliche Verringerung des Kontaktwiderstandes und damit der Kontakterwärmung bewirkt. Die Beziehungen zwischen dem Kontaktdruck und dem Kontaktwiderstand sind durch folgenden Ausdruck gegeben:

$$R \cdot F^n = C \quad (9)$$

Darin bedeuten:

- R den Kontaktwiderstand,
- F den Kontaktpressdruck,
- n einen Exponenten,
- C eine Konstante.

Der Exponent n hängt nur zum geringen Teil vom Material, zum grösseren Teil vom Materialzustand, vor allem jedoch von der Form der Kontakte ab. Windred hat Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Pressdruck und Kontaktwiderstand angestellt und gefunden, dass der Exponent n Werte zwischen 0,5...2 annehmen kann und macht in seiner Arbeit²⁾ auch Angaben über den Wert der Konstanten C .

Das Verhalten der Verbundmetalle im Hinblick auf den vorerwähnten Grenzstrom ist ähnlich wie das bei reinen Metallen. Versuche haben gezeigt, dass die Grenzstromstärke bei Kontakten aus Mo-

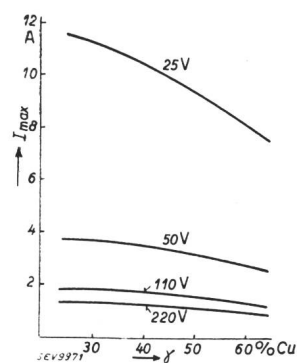


Fig. 6.
Grenzstromstärken (I_{\max}) für
Wolfram-Silber-Verbund-
metalle in Abhängigkeit von
der elektrischen Leitfähigkeit
(γ in % γ_{Cu}).

lybdän-Silber-Verbundmetallen sich durchaus innerhalb der Werte bewegen, welche in Tabelle I für Molybdän, bzw. Silber angegeben sind. Die Grenzstromkurven für Kontakte aus Wolfram-Silber-Verbundmetallen sind in Fig. 6, und zwar in Abhängigkeit von der elektrischen Leitfähigkeit des betreffenden Verbundmetalles und für verschiedene Spannungen gezeigt. Die entsprechende Ab-

²⁾ G. Windred, «Switchgear Contacts». The Engineer (London) 1940, p. 558.

hängigkeit der Grenzstromstärke von der Härte des Verbundmetalles kann mit Hilfe der graphischen Darstellung in Fig. 2 leicht bestimmt werden. Aus Fig. 6 ist zu ersehen, dass bei der Verwendung von Wolfram-Silber-Verbundmetallen selbst in jenen Fällen noch kein Kontaktfunkte auftritt, in welchen nach Tabelle I bei Silber- und Kupferkontakten schon längst eine Funkenbildung vorhanden ist.

Der Temperaturanstieg in metallkeramisch hergestellten Kontakten folgt den gleichen Gesetzen wie Kontakte aus reinen Metallen. Eine von J. Slepian angegebene Näherungsformel über den Temperaturanstieg T_x für im Verhältnis zu den Zuleitungen kleine Kontakte charakterisiert die Zusammenhänge angenähert mit:

$$T_x = \frac{U^2}{33,5 \cdot \rho \cdot \lambda} \quad (10)$$

Darin bedeuten:

- U die an die Kontakte angelegte Spannung,
- ρ der elektrische Widerstand,
- λ thermische Leitfähigkeit.

Aus Ausdruck (10) geht hervor, dass der Temperaturanstieg sowohl von der elektrischen, wie auch von der thermischen Leitfähigkeit des Materials abhängig ist. Unter Berücksichtigung der Gleichungen (1) und (3) ist zu ersehen, dass auch der Temperaturanstieg eine Funktion der physikalischen Eigenschaften der Elektronen des Verbundmetalles ist.

Die Erwärmung, die Abbrandfestigkeit, die Materialwanderung durch den Kontaktfunkte, sowie die Härte des Kontaktmaterials bestimmen auch die Lebensdauer der Kontakte. Die Lebensdauer von Kontakten aus Verbundmetallen wurde von Windred und früher auch von Meyer untersucht. Fig. 7 zeigt den Unterschied in der Lebensdauer eines Kontaktes aus Wolfram-Kupfer-Verbundmaterial gegenüber einem Kontakt aus reinem Kupfer. Beide Kontakte waren bei den Versuchen in Oelschaltern gleicher Konstruktion eingebaut und waren vollständig gleichen Bedingungen ausgesetzt.

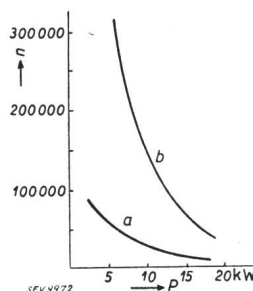


Fig. 7.
Lebensdauer von Kontakten in
Oelschaltern.
 a Kupferkontakte. b Kontakte aus
Wolfram-Kupfer-Verbundmetallen.
 n Zahl der Schaltungen.
 P Belastung.

Aus Fig. 7 ist zu ersehen, dass die Lebensdauer des Verbundmaterials ca. viermal so lang ist als die Lebensdauer des Kupferkontakts. Diese Tatsache hängt mit der geringen mechanischen Abnutzung des Verbundmaterials infolge seiner hohen Härte und schliesslich mit der ausgezeichneten Wärmeleitfähigkeit derartiger Materialien zusammen. Ferner spielt die geringe Verdampfungsgeschwindigkeit des Wolframs gegenüber dem Kupfer in diesem Falle noch eine grosse Rolle.

Physikalische Eigenschaften einiger Verbundmetalle.

Tabelle IV.

	Verbundmetalle aus				
	Molybdän-Silber	Wolfram-Silber		Wolfram-Kupfer	
Dichte g/cm ³	10	13,2	15,2	16,4	17,2
Elektr. Leitfähigkeit in % γ_{Cu}	50	59	38	25	20
Brinellhärte	125...135	110	180	190...205	245...300

Die in Tabelle IV angeführten Typen von Kontakt-Verbundmetallen sind bloss als Beispiele zu betrachten. Tatsächlich gelingt es auf metallkeramischer Grundlage unter Verwendung von Hartmetallpulvern und Pulvern aus gutleitenden Metallen, Verbundmetalle herzustellen, deren Dichten von 9,5 bis 17,2 g/cm³ variieren, deren Härte jeden gewünschten Wert von 60...300 Brinelleinheiten annehmen kann und deren elektrische Leitfähigkeit bis zu 75 % der Leitfähigkeit des Standardkupfers beträgt. Diese physikalischen Eigenschaften erklären ohne weiteres die gute Verwendbarkeit der genannten Verbundmetalle als Baustoffe für elektrische Kontakte.

Literatur-Uebersicht

1. W. Betteridge and J. A. Laird: «Wear of Electr. Contact Points.» J. Inst. Electr. Eng. Vol. 82 (1938), p. 625.
2. W. Burstyn: «Elektrische Kontakte.» Berlin, J. Springer 1937.
3. R. Holm: «Ueber metallische Kontaktwiderstände.» Wiss. Veröffentl. Siemens Konz. 1929, VII/2.
4. R. Holm: «Ueber elektrische Kontakte.» ETZ Bd. 59 (1935), S. 537.
5. R. Holm, F. Güldenpfennig und R. Störmer: «Materialwanderung in elektrischen Abhebekontakten.» Wiss. Veröffentl. Siemens Konz. 1935, Bd. 14.
6. L. B. Hunt: «Heavy Duty Contacts», Electrical Rev. 1939, p. 459.
7. B. W. Jones and O. R. Schurig: «Performance of Contactors as Circuit Interruption Devices.» Gen. Electr. Rev. V. 39 (1936), p. 78.
8. K. Meier: «Schaltstücke mit Sonderaufgabe für Oelschütze.» ETZ Bd. 57 (1936), S. 493.
9. «Metallkeramisch hergestellte Kontaktbaustoffe.» Z. f. techn. Phys. Bd. 21 (1940), S. 35.
10. J. Slepian: «Temperature of a Contact and related Current-Interruption Problems.» J. Amer. Inst. Electr. Engrs. Vol. 45 (1926), p. 930.
11. G. Windred: «Compound Metals for Electrical Contacts.» Electr. Eng., London, 1937.
12. G. Windred: «Switchgear Contacts.» The Engineer, 1940, p. 558.

Es ist hier auch auf das neue Buch von R. Holm, «Die technische Physik der elektrischen Kontakte», Verlag J. Springer, Berlin (1941), hinzuweisen. (Die Red.)

Forschungslaboratorien für Hochspannung und Hochleistung der Maschinenfabrik Oerlikon

Von H. Puppikofer, Zürich

621.317.2 : 621.3.027.7(494)

Es werden Bau und Einrichtung von Forschungslaboratorien für Hochspannung und Hochleistung beschrieben; von den wichtigsten der zugehörigen Maschinen und Apparate wird das Grundsätzliche über deren Konstruktion und Leistungsfähigkeit mitgeteilt.

L'auteur décrit la construction et les installations de laboratoires de recherche pour haute tension et grande puissance et indique le principe de la construction et du fonctionnement, ainsi que la puissance des machines et des appareils les plus importants qui en font partie.

I. Einleitung

Die beiden Hauptprobleme, mit denen sich die Hersteller von Hochspannungsmaterial zu befassen haben, sind das *Isolationsproblem* und das *Schaltproblem*. Die Maschinenfabrik Oerlikon hat, seitdem sie elektrisches Material herstellt, *Hochspannungslaboratorien* unterhalten, um die Fragen der Isolation abzuklären. Bereits an der Schweizerischen Landesausstellung 1914 in Bern wurde ein Prüftransformator für 500 kV, 500 kVA, im Betrieb vorgeführt. Im Jahr 1932 hat sie auch eine *Hochleistungsanlage* gebaut, in der sämtliche Probleme, welche das Schalten und die Lichtbogenlöschung betreffen, untersucht und die fertigen Schalter mit hoher Kurzschlussleistung geprüft werden können.

Mit der Zunahme der Kraftwerksleistungen und der damit verbundenen wachsenden Ausdehnung und Vermaschung der mit immer höhern Spannungen betriebenen Netze waren neue Aufgaben zu lösen. Die Beherrschung der höhern Betriebsspannungen ist eine Aufgabe der Elektrostatik, die verhältnismässig leicht zu lösen war. Die Isolation eines Hochspannungsnetzes muss — wie eine Brücke — gegenüber der normalen Beanspruchung eine bestimmte Sicherheit aufweisen. Aus dieser Erkennt-

nis heraus ergaben sich die von den massgebenden Verbänden der verschiedenen Länder aufgestellten Prüfvorschriften, die leider noch stark voneinander abweichen. Für die Ausführung dieser Kontrollen wird eine entsprechende Spannungsquelle von 50 Hz benötigt.

Zu der normalen oder auch akzidentellen Beanspruchung der Hochspannungsnetze durch die *Spannungen von Betriebsfrequenz* kommt noch die Beanspruchung durch die *atmosphärischen Ueberspannungen*. Ueber die Höhe und den zeitlichen Verlauf dieser Ueberspannungen besitzt die Elektrotechnik heute dank der vielseitigen Forschungsarbeit, die u. a. in der Schweiz seit ca. 10 Jahren durch die Forschungskommission des SEV und VSE für Hochspannungsfragen geleistet wird, wertvolle Aufschlüsse. Die atmosphärischen Ueberspannungen haben den Charakter eines elektrischen Stosses, der durch die gedämpfte Entladung eines Kondensators — eines Stossgenerators — nachgeahmt werden kann.

Die Maschinenfabrik Oerlikon, welche seit Jahrzehnten Versuche mit Stosskondensatoren durchführt, stellte im Jahre 1938 einen *Stossgenerator* von 1250 kV und 7,8 kW's Energieinhalt auf, mit