Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 47 (1956)

Heft: 26

Artikel: Kontaktprobleme an schnellen Schaltsystemen

Autor: Hämmerli, S.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060127

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: 15.12.2025

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

Kontaktprobleme an schnellen Schaltsystemen [1])

Von *S. Hämmerli*, Oberengstringen (ZH)

621.314.62

Nach Erläuterung der speziellen Kontaktprobleme bei schnellen Hochstrom-Schaltgeräten wird über Versuche und Erfahrungen mit Kontakten für elektromagnetisch gesteuerte Gleichrichter berichtet. Neben allgemeinen Bemessungshinweisen werden Massnahmen zur Verringerung des mechanischen und elektrischen Kontaktverschleisses angegeben.

Les appareils commutateurs à haute intensité posent de nombreux problèmes qui leur sont particuliers. Des expériences et des essais sur des redresseurs à contacts et à commande électromagnétique permettent d'indiquer des méthodes pour les résoudre. Cette étude expose, pour terminer, quelques règles générales de dimensionnement et quelques précautions à prendre pour diminuer l'usure mécanique et électrique des contacts.

Einleitung

Die Leistungsfähigkeit elektrischer Schaltgeräte wird in vielen Fällen massgebend beeinflusst durch die physikalischen und chemischen Vorgänge an den Kontaktstellen. Die Ergebnisse der theoretischen und experimentellen Forschung, sowie die vielfältigen Untersuchungen und Beobachtungen der Praxis vermitteln heute ein gutes Verständnis der Kontaktphänomene. Auf Grund dieser Erkenntnisse lassen sich mit neuzeitlichen Kontaktwerkstoffen und angepassten Bearbeitsmethoden Aufgaben lösen, die noch vor wenigen Jahren unüberwindliche Schwierigkeiten bereitet hätten.

In diesem Aufsatz wird unter Bezugnahme auf Schaltsysteme für elektromagnetisch gesteuerte Gleichrichter [1][2]) gezeigt, welche Forderungen an die Kontakte zu stellen sind, welche Mittel zur Lösung der Aufgaben zur Verfügung stehen, und wie sich deren Anwendung auswirkt. Dabei werden vorwiegend diejenigen Probleme behandelt, die bei unseren Entwicklungsarbeiten im Vordergrund standen und zu denen eigene Versuche und Schlussfolgerungen vorliegen.

Gleichrichter-Kontaktanordnungen müssen für grosse Schalthäufigkeit geeignet sein (180 000 Schaltungen pro h). Im Interesse der Wirtschaftlichkeit der Gesamtanlage sollen die Schaltzeiten höchstens einige Zehntel Millisekunden betragen. Die Kontakte führen im geschlossenen Zustand trapezförmige Ströme (Stromflussdauer ca. 120 ° el.) bis zu einem Scheitelwert von 4000 A. Nach den Ausführungen von *W. Baer* [2] ist durch äussere Massnahmen dafür gesorgt, dass der Strom beim Ein- und Ausschaltvorgang 300 mA nicht übersteigt. Die Konstruktion der Schaltsysteme ist von *R. Stulz* [3] bereits eingehend beschrieben worden.

I. Teil

A. Kontakte für grosse Schalthäufigkeit

Die praktische Eignung eines Kontaktsystems für grosse Schalthäufigkeit ist in erster Linie durch sein Verhalten gegenüber mechanischem und elektrischem Kontaktverschleiss gegeben. Diese Erscheinungen begrenzen in der Regel die Betriebsdauer.

1. Mechanischer Kontaktverschleiss

An jedem häufig betätigten Schaltsystem für grössere Leistungen werden bei Verwendung fester Kontaktwerkstoffe im Laufe des Betriebes mechanisch bedingte Veränderungen an den Kontaktflächen auftreten. Allgemein bekannt ist die Bildung von Metallstaub (Abrieb), sowie das Auftreten von Riefen, Schuppen oder Gräten. Solche Veränderungen können die Schaltpräzision, die Stromtragfähigkeit und die Spannungsfestigkeit der Kontakte in hohem Masse verschlechtern. Der Grad der mechanischen Veränderung einer beanspruchten Kontaktfläche hängt von der Art und Grösse der mechanischen Beanspruchung, dem Kontaktwerkstoff und dem Zustand der Berührungsflächen ab.

a) Die Art der mechanischen Beanspruchung

Kontakte mit erheblicher Gleitbewegung

Wenn nicht durch konstruktive Mittel für eine sehr genaue Kontaktführung gesorgt wird, beschreiben Abwälz- und Abhebekontakte nach vollzogener metallischer Berührung *Reibbewegungen* gegeneinander. Die Amplituden dieser Verschiebungen sind in der Regel gross gegenüber den Abmessungen der Werkstoff-Kristallite. Je nach den geometrischen Verhältnissen und der spezifischen Materialbeanspruchung in den Berührungsstellen bzw. in deren unmittelbarer Umgebung werden die Werkstoffe der Kontaktglieder bei dieser reibenden Beanspruchung elastisch oder plastisch verformt, durch Scherkräfte zerspant oder verschweisst.

Eine *plastische Deformation* führt anfänglich zu einem durchaus erwünschten Anwachsen der wirklichen Berührungsfläche. Dabei nimmt die spezifische Beanspruchung laufend ab; es ergibt sich eine gewisse Einarbeitung und Politur der Kontakte. An Werkstoffen, die zur Bildung schlecht leitender, mechanisch resistenter Oberflächenschichten neigen, kann bei entsprechenden atmosphärischen Bedingungen eine schädliche Vergrösserung des Kontaktwiderstandes eintreten, sofern bei fortschreitender Einarbeitung der Metallflächen die spezifische Beanspruchung nicht mehr zum Durchbrechen der Oberflächenschicht ausreicht.

Eine starke *Abriebbildung* (Zerspanen des Werkstoffes durch Scherkräfte in der Umgebung der Berührungsstellen) zeigen polykristalline Werkstoffe, bei denen die Materialfestigkeit an den Korngrenzen durch Fremdstoffe reduziert ist. Weiter kann die Kontaktfläche durch die Bearbeitung in einer Weise verändert sein, dass sich bei der mechanischen Beanspruchung Partikel leicht ablösen. So zeigen, im Gegensatz zu geprägten oder polierten Flächen, gefeilte oder geschmirgelte Kontakte eine starke Tendenz zur Abriebbildung.

Ein mässiger Abrieb schadet bei reibenden Kontakten meistens wenig. Starker Abrieb hingegen

[1]) siehe auch Bull. SEV Bd. 47(1956), Nr. 16, S. 709, und S. 710...720, und Nr. 25, S. 1141...1150.

[2]) siehe Literaturverzeichnis am Schluss des Aufsatzes.

führt zur Störung des mechanischen Vorganges, Herabsetzung der Spannungsfestigkeit oder verschlechterten Berührung der Metallflächen. Die Gefahr einer schädlichen Vergrösserung des Kontaktwiderstandes besteht besonders bei Werkstoffen, die schlecht leitende chemische Verbindungen (Oxyde, Sulfide, Nitrate usw.) bilden. Die meist sehr feinen Abriebpartikel unterliegen rasch der chemischen Einwirkung und werden im Laufe des Betriebes als schlecht leitende Schicht auf der Kontaktfläche angesammelt. Solche Erscheinungen sind speziell bei Wolfram, Nickellegierungen und auch bei Kupfer zu beobachten.

Ein *Verschweissen* ist an drei Voraussetzungen gebunden: Einmal muss an den Berührungsstellen eine zur Entfestigung des Werkstoffes ausreichende Energiemenge anfallen. Diese Energie kann in Form von Schlag- oder Reibarbeit vorhanden sein [1]. Ferner ist eine innige Metallberührung notwendig; schützende Oberflächenschichten müssen zerstört und deren Überreste beseitigt werden können. Schliesslich ist eine gewisse Ähnlichkeit der physikalischen Eigenschaften der sich berührenden Werkstoffe notwendig [4]. Solche «Kaltschweissvorgänge» verursachen bei der Kontakttrennung ein Aufreissen der Flächen. Es können im Mikroskop Partikel festgestellt werden, die in flüssiger Form entstanden sind. Kaltschweissen führt durch Formänderung, Behinderung der Kontaktbewegung oder übermässigen Anfall loser Partikel meist in kurzer Zeit zum Versagen des Systems.

Kontakte mit behinderter Gleitbewegung

Durch geeignete Kontaktführung [3] kann die Relativbewegung der geschlossenen Kontakte gegeneinander auf etwa $\pm$ 1 µm begrenzt werden. Dieser Wert ist zwar immer noch erheblich gegenüber den Kristallit-Abmessungen der meisten Werkstoffe.

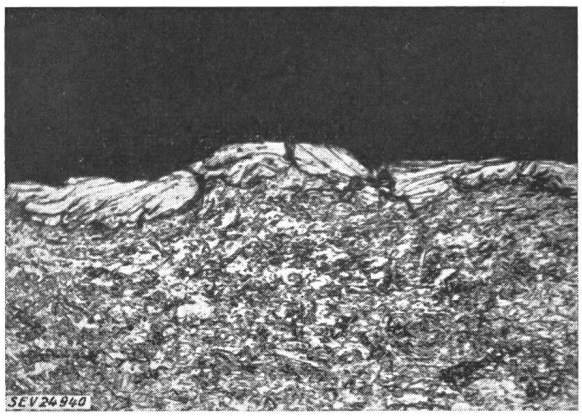

Fig. 1
Gefüge des Werkstoffes an der Kontaktoberfläche nach örtlicher Kaltverformung
(Schliff und Aufnahme: EMPA)

Immerhin lässt sich die Abriebbildung durch eine genaue Führung auf einen Bruchteil reduzieren (verminderte Reibenergie durch Verkleinern des Gleitweges, geringere Häufigkeit von ungünstigen Kraftwirkungen, die zum Ablösen von Werkstoffpartikeln führen). Auch das Polieren der Kontakte im Betrieb mit dem Effekt der Kontaktwiderstandserhöhung ist erschwert, weil die notwendige Gleitbewegung fehlt.

Die Gefahr der Verschweissung besteht weiter. Der Vorgang ist jedoch behindert, weil die innige Metallberührung an die Beseitigung der Überreste einer fremden Oberflächenschicht und damit an gewisse Schiebebewegungen gebunden ist. Ausserdem ist bei gleicher Kontaktlast die entwickelte Energie kleiner als bei grossem Gleitweg, verteilt sich allerdings, mindestens zu Beginn des Betriebes, auch auf weniger Berührungspunkte.

An gleitfreien Kontakten gewinnen Umkristallisationsvorgänge erhöhte Bedeutung. Durch die dauernde Beanspruchung der immer gleichen Kontaktpartien erleidet das Material an diesen Stellen eine erhebliche Kaltverformung. Diese führt meist zu einer Veränderung des Werkstoffgefüges. Es kann u. U. eine Ablösung des verformten Materials in Form von Schuppen und dgl. eintreten (Fig. 1).

Mechanische Materialwanderung

Bei den eigenen Versuchen an gut geführten, auf grosser Fläche tragenden Feinsilberkontakten wurde eine besondere Veränderung der Berührungsflächen festgestellt. Es bildeten sich kegel- und pyramidenförmige Erhebungen auf der einen und dazu passende Vertiefungen in der anderen Fläche; die Erscheinung hatte also äusserlich eine gewisse Ähnlichkeit mit der elektrischen Materialwanderung. Form und Ausdehnung der Veränderungen waren jedoch im stromlosen Betrieb der Kontakte nahezu gleich wie unter Vollast; die Vorgänge wurden also nicht durch elektrische Einwirkung ausgelöst. Die Erhebungen erreichten in einigen hundert Betriebsstunden eine Höhe von mehreren Zehntelmillimetern. Nach dem gegenwärtigen Stand der Versuche glauben wir, folgende Erklärung des Vorganges geben zu können:

Zu Beginn des Betriebes gibt die Kontaktfläche staubförmige Partikel ab, wofür noch vorhandene Gleitbeanspruchungen, Kaltverformung oder Kaltschweissung in einzelnen Berührungspunkten verantwortlich sein können. Da die Endbearbeitung der Flächen mit pulverförmigen Schleifmitteln erfolgt, wird durch das Aufkratzen der Fläche und die Möglichkeit der Einlagerung von Schleifmittelkörnern in das Metall eine Ablösung von Partikeln im Betrieb begünstigt. Die Luftbewegung bei der Kontakttrennung (Saugwirkung) bewirkt ein Anhäufen des staubförmigen Materials an bevorzugten Stellen, das durch die Kontaktkraft bei den nachfolgenden Schliessvorgängen zu einer zusammenhängenden Masse verquetscht wird. Die so gebildeten Körper kleben an einer Elektrodenfläche fest. Diese Anlagerung verursacht eine Überbeanspruchung des benachbarten, vorher am Vorgang unbeteiligten Kontaktmetalls, die zu starker Kaltverformung und damit zur Ablösung grösserer Kristallit-Gruppen infolge örtlicher Ermüdung des Werkstoffes führt. Auch dieses Material haftet an derselben Elektrode wie das zuerst angehäufte. Der Mechanismus des Haftens ist noch nicht sicher geklärt. Es scheint, dass neben den physikalischen

Eigenschaften der Kontaktwerkstoffe auch der Zustand der Oberflächenschichten (Oxyd- oder Feuchtigkeitshaut, Schmierstoffilm) von Bedeutung ist, und insbesondere die Auswahl der Elektrode für das Ansetzen des Materials bestimmt. Die Mitwirkung von Kaltschweissvorgängen in mikroskopischen Bezirken ist nicht ausgeschlossen. In der angegebenen Weise wächst die Erhöhung. Die Kontaktkraft konzentriert sich zunehmend auf die veränderte Stelle, weil die in der Gegenfläche entstandene Vertiefung als «Sammler» für im weiteren Verlauf des Betriebes abgelöste Partikel dient. Ausserdem liegen die angelagerten Kristallit-Gruppen mit unvollkommen ausgefüllten Zwischenräumen aufeinander und beanspruchen dadurch mehr Platz als im festen Material. Fig. 2 zeigt einen

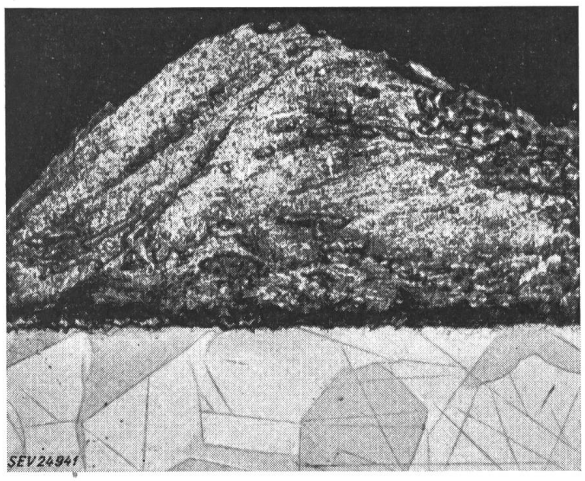

Fig. 2
Querschnitt einer durch mechanische Materialwanderung entstandenen Erhöhung
(Schliff und Aufnahme: EMPA)

Schliff durch eine solche Erhöhung. Vorwiegend längs der Basis der Pyramide sind die zuerst angehäuften feinen Teilchen zu erkennen (dunkle Stellen). Die hellen Partien entsprechen den später übertragenen gröberen Körpern. Eine gleichzeitig mit der mechanischen Beanspruchung vorhandene elektrische Einwirkung (Stromwärme, elektrolytische Wirkung, elektrische Vorgänge bei der Kontakttrennung) ändert am Charakter und Ausmass der mechanischen Materialwanderung wenig, hingegen wird die Richtung des Vorganges, also die Wahl der Elektrode für den Ansatz der Erhebung beeinflusst. Der Auftrag entsteht meistens an der Kathode; bei Stromumkehr fällt das angelagerte Material gelegentlich ab.

Statische und dynamische Kontaktkräfte

Der Kontaktwiderstand einer Schaltanordnung ist weitgehend abhängig von der Grösse der Kontaktlast. Im Bestreben, die Wärmeentwicklung an der Übergangsstelle in zulässigen Grenzen zu halten, muss man schon bei Kontaktströmen von wenigen hundert Ampère eine Kontaktlast anwenden, die eine erhebliche mechanische Beanspruchung des Materials zur Folge hat. Zu dieser statisch wirkenden Kraft addiert sich beim Schliessvorgang die aus der Abbremsung der bewegten Massen resultierende Kraft F_d. Diese ist abhängig von der Grösse der abgebremsten Masse m_1, der Auftreffgeschwindigkeit v und dem Abbremsweg s. Es gilt:

$$\int_0^s F_d \, ds = \frac{m_1 v^2}{2}$$

In Näherung ist:

$$F_{d\,max} = 2 \int_0^s \frac{F\,ds}{s}$$

oder

$$F_{d\,max} = \frac{m_1 v^2}{s} \qquad (1)$$

Die Grösse der bewegten Masse ist durch die Nennstrombelastung sowie durch die Konstruktion der Schalteinheit (Art des Kontaktantriebes, der Kontaktführung, der Stromzuführungen usw.) gegeben. Die Schliessgeschwindigkeit steht in erster Linie im Zusammenhang mit dem nötigen Kontaktweg (Sperrspannung) und der geforderten Einschaltzeit [1; 3].

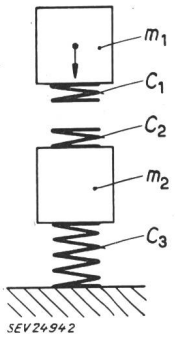

Fig. 3
Prinzipielle Darstellung der beim elastischen Stoss zwischen Kontakten wirksamen Grössen

m_1	Masse des bewegten Kontaktes
m_2	Masse des ruhenden Kontaktes, einschliesslich allfälliger Federmassen
C_1, C_2	Eigenfederkonstanten der Kontaktglieder
C_3	äussere Federkonstante der Abstützung des ruhenden Kontaktes

Der *Abbremsweg* hängt ab von den Federkonstanten der mit den bewegten Massen verbundenen elastischen Glieder. Aus Fig. 3 ist ersichtlich, dass der Bremsweg der Masse m_1 mit abnehmenden Federkonstanten C_1, C_2, C_3 und kleinerer Masse m_2 zunimmt. Die Eigenfederkonstanten der Kontaktglieder C_1 und C_2 sind für massive Schaltstücke abhängig von den Elastizitätseigenschaften des Kontaktmaterials, sowie von der Form und Bearbeitung der Kontaktflächen. m_2 und C_3 hängen von der Konstruktion ab; sie sind in vielen Fällen für einen gegebenen Wert von m_1 und v durch die Forderung nach prellfreier Kontaktgabe bestimmt. Nach *F. Kesselring* und *M. Belamin* [1] gilt dafür die Beziehung:

$$C_3 \leqq \frac{m_2 \bar{F}_s}{h\,m_1}\left(1 + \frac{m_2}{2\,m_1}\right) \qquad (2)$$

Hierin bedeuten: h Beschleunigungsweg des beweglichen Kontaktes und $\bar{F}_s$ mittlere Kontaktschliesskraft. Ein grosser Abbremsweg steht bei gewissen Kontaktkonstruktionen (z. B. einseitig eingespannten Federn) der Forderung nach verhinderter Gleitbewegung entgegen.

b) Der Einfluss des Kontaktwerkstoffes

Bei der Auswahl des Kontaktmaterials sind fast immer Kompromisse zu treffen. Nur in seltenen Fällen wird ein und derselbe Kontaktwerkstoff alle zu stellenden Anforderungen erfüllen. So steht dem Wunsch nach mechanischer Dauerfestigkeit häufig die Notwendigkeit eines kleinen Kontaktwiderstandes gegenüber.

Die mechanische Dauerfestigkeit eines bestimmten Werkstoffes hängt nach den bisherigen Ausführungen weitgehend von der Art der Beanspruchung ab.

Bei vorwiegend *reibender Beanspruchung* dürfte in der Regel ein Werkstoff mit grosser Schubfestigkeit und grosser Härte vorteilhaft sein. Anderseits sind erfolgreiche Anwendungen von Werkstoffen bekannt, die bei geringer Schubfestigkeit die Eigenschaft haben, schmierende Oberflächenschichten zu bilden. Dabei steht allerdings die Frage des Kontaktwiderstandes nicht zur Diskussion. Die für die Beurteilung eines Kontaktwerkstoffes geeignete Methode der Härtemessung ist umstritten. So ist neben der Geometrie der Messmittel die Eindrucktiefe und der Grad der im Laufe der Messung erreichten zusätzlichen Kaltverformung von Einfluss. Nach mündlicher Mitteilung von *R. Holm* ist der Mittelwert der Materialhärte innerhalb jeder Berührungsfläche unter der gerade vorliegenden Beanspruchung massgebend, also eine messtechnisch kaum erfassbare Grösse. Vermutlich würde eine Angabe der Ritzhärte (z. B. nach *Mohs)* einen Werkstoff in bezug auf Verschleissfestigkeit am besten kennzeichnen.

An Kontakten mit *behinderter Gleitbewegung* wird sich ein Werkstoff bewähren, der bei mässiger Härte eine gute plastische Verformbarkeit besitzt. Die plastische Verformung soll keine Umkristallisationsvorgänge hervorrufen, in deren Verlauf eine Lockerung und Ablösung von Metallsplittern oder -schuppen auftritt. Ein kleiner Wert des Elastizitätsmoduls dürfte bei allen Beanspruchungen wegen der besseren Verteilung der Kontaktkraft (Nachgiebigkeit) günstig sein. Sehr nachteilig ist eine Neigung zum *Kaltschweissen.*

Die erwähnten Eigenschaften sollen bei erhöhter Temperatur und elektrischer Einwirkung (Ein- und Ausschaltvorgänge) erhalten bleiben. Tabelle I enthält einige Angaben über Elastizitätsmodul und Härte verschiedener Werkstoffe.

Mit Rücksicht auf die *mechanische Verschleissfestigkeit* allein kann ungefähr folgende Ordnung der Kontaktwerkstoffe angegeben werden, wobei reibende Beanspruchung vorausgesetzt sein soll.

a) *Metalle der Platin-Gruppe:* Sehr grosse Härte und Verschleissfestigkeit haben die Legierungen von Platin mit Iridium und Ruthenium, sowie galvanisch aufgebrachte Rhodiumschichten, die jedoch nur bei mässigen Kontaktkräften anwendbar sind. Nützlich ist die chemische Beständigkeit, nachteilig der hohe Preis. Kostenmässig günstigere Werkstoffe mit guter mechanischer Beständigkeit sind die Legierungen der Platinmetalle (speziell von Palladium) mit Silber oder Kupfer.

b) *Wolfram-Sintermetalle:* Mit Kupfer oder Silber gefüllte poröse Wolfram-Sinterkörper haben bei guter elektrischer und thermischer Leitfähigkeit eine sehr grosse mechanische Festigkeit. Von Bedeutung ist vor allem ihre hohe Abbrandfestigkeit. Reines Wolfram ist bei hoher Schalthäufigkeit für Starkstromkontakte kaum brauchbar. Es bildet rasch staubförmige Partikel, die nach der Oxydation an der Luft als isolierende Fremdkörper die Kontaktgabe untragbar verschlechtern.

c) *Kupfer und Kupferlegierungen:* Die sehr gute thermische und elektrische Leitfähigkeit, verhältnismässig hohe mechanische Festigkeit, leichte Verformbarkeit und der geringe Preis machen Kupfer zum klassischen Kontaktmaterial bei mässigen Ansprüchen. Leitfähigkeit und Übergangswiderstand, sowie in gewissem Umfange auch die mechanische Festigkeit lassen sich durch Legieren mit Silber verbessern. Eine erhebliche Steigerung der Härte und Formbeständigkeit ist durch Kaltverformen zu erreichen. Härte und Verschleissfestigkeit können bei mässigem Verlust an Leitfähigkeit durch Legierung mit Beryllium oder Chrom verbessert werden. Gegenüber einer Lichtbogeneinwirkung verhält sich insbesondere Reinkupfer wegen der Bildung gasgefüllter Schmelzperlen schlecht.

d) *Silber und Silberlegierungen:* Feinsilber ist wegen seiner geringen Härte, sowie der Neigung zum Kaltschweissen nicht für grosse mechanische Beanspruchungen geeignet. Wohl lässt sich die Härte durch Kaltverformung erhöhen; aber die schon bei Temperaturen unter 100 °C ablaufenden Rekristallisationsvorgänge heben die Wirkung dieser Behandlung in vielen Fällen auf. Nachteilig ist die verhältnismässig tiefe Schmelzspannung (Tab. I) und damit die Neigung zur Schmelzbrücken-Wanderung. Anderseits ist Feinsilber dasjenige Kontaktmaterial, das bei mittleren Kontaktlasten die kleinsten Kontaktwiderstände erreichen lässt. Wenn eine mässige Erhöhung der Kontaktwiderstände in Kauf genommen werden kann, lassen sich die mechanischen Eigenschaften von Silber durch Legierung mit Kupfer, Nickel und Kobalt sowie durch gewisse Zusätze an Nichtmetallen verbessern. Diese sog. Hart-Silbersorten weisen je nach Art ihrer Legierung erhöhte Härte, Verschleissfestigkeit und Rekristallisationstemperatur sowie verbesserte Dauerstandfestigkeit (Kontaktfedern) auf. Die Neigung zum Kaltschweissen ist vermindert. Die Vertreter dieser Legierungsgruppe finden in weitem Umfange Anwendung als Kontaktmaterial für erhebliche mechanische Beanspruchung bei grossen Ansprüchen an die elektrische Kontaktgüte. Die Legierungen von Silber mit Kadmium oder Zink, sowie der Sinterwerkstoff Silber-Kadmiumoxyd haben vor allem in Wechselstromkreisen eine starke lichtbogenlöschende Wirkung. Für Gleitbeanspruchung kann der Sinterwerkstoff Silber-Graphit Vorteile bieten.

e) *Gold und Goldlegierungen:* Reines Gold wird infolge seines hohen Preises und seiner schlechten mechanischen Eigenschaften nur für kleine und schwach belastete Kontakte verwendet. In diesen Fällen ist die chemische Beständigkeit von grossem Vorteil wegen der damit gegebenen Konstanz des Kontaktwiderstandes. Eine gewisse Härtesteigerung ist durch Legierung mit Kupfer, Nickel oder Silber möglich.

Eine umfassende Orientierung über die Eigenschaften moderner Kontaktwerkstoffe ist an Hand der einschlägigen Literatur [5] möglich.

c) Der Einfluss des Oberflächenzustandes

Neben der elastischen und plastischen Verformbarkeit des Werkstoffes bestimmt auch die Güte der Passung der Berührungsflächen die Verteilung der Kontaktkraft. Wie im zweiten Teil gezeigt wird, kann die tatsächlich tragende Fläche durch eine geeignete Nachbehandlung über das durch übliche spanabhebende Bearbeitungsmethoden erreichbare Mass hinaus vergrössert werden. Damit sinkt die spezifische Flächenpressung; Kaltschweissneigung und Abriebbildung sind vermindert.

Durch spanabhebende Bearbeitung mit Schnittwerkzeugen wird die Metalloberfläche kalt verformt. Sie erscheint somit in der Regel härter als das Material unter der Oberfläche. Kontakte, die relativ zur Dicke der verdichteten Schicht nicht zu feine Drehrillen aufweisen, zeigen recht günstige mechanische Eigenschaften. Die oberste Material-

schicht ist verhältnismässig verschleissfest; infolge der Rillung lässt sich jedoch die Fläche plastisch deformieren und somit zur guten Passung bringen. Im Gegensatz dazu sind polierte Flächen für Kontaktzwecke kaum geeignet; die Kaltverfestigung des Werkstoffes erschwert die plastische Verformung, die nötige Flächenpassung ist meist nicht vorhanden. Solche Kontakte neigen besonders zu Kaltschweisserscheinungen oder zur Ablösung von Materialschuppen als Folge übermässiger örtlicher Beanspruchung.

Der Einfluss von Fremdschichten

Fast alle Kontaktwerkstoffe bilden in Raumatmosphäre feste chemische Verbindungen an der Oberfläche. R. Holm beschreibt [6] die sog. einmolekulare Fremdschicht, die mit sehr grossen Bindekräften (Van-der-Waal-Kräfte) an das Metall gebunden und deren Festigkeit gegenüber mechanischer Beanspruchung bei den meisten Metallen mit der Materialfestigkeit vergleichbar ist. Im Unterschied dazu erwähnt er stärkere Fremdschichten, die aus vielen übereinandergelagerten Molekülen bestehen. Die Bindekräfte der weiter vom Metall entfernten Moleküle sind in der Regel gering, so dass diese Partien der Fremdschicht gegenüber der mechanischen Beanspruchung nur eine geringe Resistenz aufweisen.

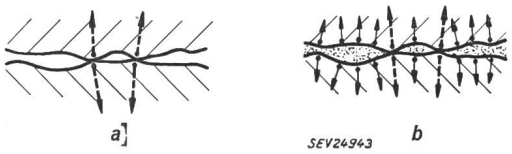

Fig. 4
Verminderung der spezifischen Flächenpressung durch eingeschlossene Flüssigkeit
a trockener Zustand: nur Kräfte zwischen festen Körpern
b feuchter Zustand: Verteilung der Kontaktlast durch zusätzliche hydrostatische Kräfte

In feuchter Luft lagert sich an den Metalloberflächen auch eine Wasserhaut aus der Raumluft an, wodurch die Kontaktkraft in erheblich günstigerer Weise auf die Flächenelemente verteilt wird (Fig. 4). Daneben scheint die Feuchtigkeit eine merkliche Schmierwirkung zu haben. R. Holm erwähnt [6] eine unerwartet grosse Abhängigkeit des Abriebes von der Luftfeuchtigkeit an gleitenden Stahlkontakten. Ähnliche Erscheinungen stellen andere Verfasser an Telephon-Wählerkontakten [7] und Kohlebürsten auf Kupferkollektoren [8] fest.

Allgemein bekannt ist die Wirkung aufgebrachter Schmieröle oder -fette. Hiedurch wird die Kraftverteilung in besonders günstiger Weise beeinflusst. An gleitenden Kontakten ist die Verbesserung auffallend gut feststellbar. Einige Versuche an geführten, gut passenden Feinsilberkontakten ergeben eine deutliche Verminderung der Kaltschweissneigung. Ebenso ist die mechanische Materialwanderung durch Schmiermittel wirksam zu behindern. Besonders günstig sind chemisch inaktive Schmierstoffe (Petrol, Paraffinöl, Seifenfette). Schmierstoffe mit erheblicher chemischer Aktivität zu Feinsilber (Öle mit Zusätzen von Fettsäuren oder anderen «Haft-Verbesserern») haben sich gegenüber mechanischen Wirkungen nicht besser verhalten als Vertreter der ersten Gruppe; sie erhöhen aber alle den Kontaktwiderstand, während Schmierstoffe mit geringer chemischer Aktivität bei Feinsilberkontakten (Kontaktlast 5,5 kg statisch, Kontaktfläche ca. 0,4 cm²) keine nennenswerte Vergrösserung des Übergangswiderstandes zur Folge hatten. Es ist allerdings denkbar, dass durch übermässige mechanische Beanspruchung aus hochmolekularen Kohlenwasserstoffen feste oder flüssige Spaltprodukte entstehen, die durch Verschlechterung der Kontaktberührung oder chemische Wirkung den Stromübergang zu behindern vermögen. Bei unseren Versuchen hat sich nur eine geringe Zunahme (max. 30 %) des Widerstandes im Betrieb (50 Hz, durch mehrere Wochen) gezeigt.

In diesem Zusammenhang ist noch die Wirkung fester Fremdkörper (Staub aus der Atmosphäre, Metallspäne, Abfälle von Isolierteilen, Bearbeitungsrückstände) zu erwähnen. Sie können je nach ihrer Beschaffenheit die Kontaktfläche aufkratzen oder sich untereinander zu grösseren Fremdkörpern vereinigen. An Kontakten mit kleinem Öffnungsweg wird die Beseitigung leitender Fremdkörper zum dominierenden Problem.

2. Elektrischer Kontaktverschleiss

Zu den mechanisch bedingten Veränderungen der Kontaktflächen gesellen sich beim Schalten unter Strom Zerstörungen durch elektrische Wirkungen. Auf die Frage des Kontaktabbrandes soll im Rahmen dieses Aufsatzes nicht eingegangen werden, denn bei den Kontaktsystemen für Gleichrichter ist dieses Problem im normalen Betrieb ohne Bedeutung; es liegen deshalb auch nur wenig eigene Versuche hierüber vor. Zudem ist in der Fachliteratur eine grosse Zahl von Arbeiten auf diesem Gebiet erschienen [9].

a) Elektrische Materialwanderung

Unter elektrischer Materialwanderung wird die Bildung von Spitzen, Kegeln oder flachen Buckeln auf einer Elektrode und dazu passenden Vertiefungen in der andern Elektrode durch elektrische Einwirkung beim Schaltvorgang verstanden.

Die Vorgänge bei der Kontakttrennung

Nach heutiger Auffassung kann für den Mechanismus der elektrischen Materialwanderung folgende vereinfachte und zusammenfassende Darstellung gegeben werden [10, 12]:

Im Verlaufe des Kontakt-Trennvorganges ergibt sich wegen der elastischen Deformation des Werkstoffes ein Zustand, bei dem der ganze Kontaktstrom in einem sehr kleinen Flächenteil von einer Elektrode zur andern übertritt. In dieser letzten Berührungsstelle wird durch thermische Stromwirkung das Kontaktmaterial geschmolzen und im weiteren Verlauf der Bewegung zu einer «flüssigen Brücke» ausgezogen. Diese Brücke wird schliesslich zerrissen, das flüssige Metall legt sich unter

dem Einfluss der Oberflächenkräfte an die einzelnen Elektroden an. Die Schmelzbrücke reisst erfahrungsgemäss nicht symmetrisch, sondern in Anodennähe ab. Dadurch erhält die Kathode einen Materialgewinn auf Kosten der Anode. Der Grund für diese Unsymmetrie wird in thermoelektrischen Effekten vermutet; die genaue Erklärung ist noch umstritten [11].

Beim Abreissen der Brücke kann bei geeigneten Verhältnissen ein sog. «plasmaloser Bogen» entstehen, d. h. eine Entladung, die wegen ihrer geringen Länge keine Möglichkeit für die Bildung von Gasionen besitzt. Die an der Trennstelle noch heisse Kathode emittiert Elektronen, die im vorhandenen Feld beschleunigt werden. Ihre Energie fällt an der Anode an und bewirkt dort ein Verdampfen von Elektrodenmaterial. Dieser Werkstoff schlägt sich bei der Abkühlung etwa zu gleichen Teilen an beiden Kontaktflächen nieder, so dass auch bei diesem Vorgang die Kathode einen Materialgewinn aufweist.

Bei weiterer Vergrösserung der Trennstrecke geht der plasmalose Bogen in einen vollständigen Lichtbogen über. Die einsetzende Ionenbildung ermöglicht eine starke Aufheizung der Kathode durch das Abbremsen der positiven Ladungsträger. Damit wird die Verdampfung von Elektrodenmaterial an der Kathode dominierend, die Richtung der Materialwanderung kehrt um.

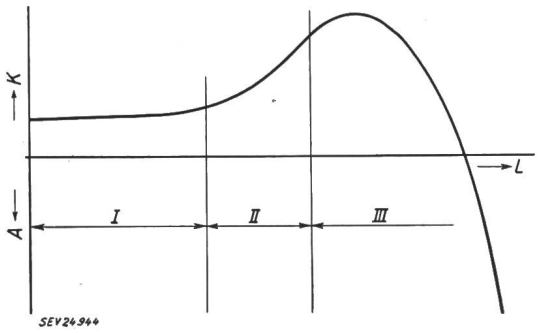

Fig. 5
Prinzipieller Verlauf der elektrischen Materialwanderung
I Schmelzbrückenwanderung
II Materialtransport durch plasmalosen Bogen
III Materialtransport durch Lichtbogen
A Materialwanderung zur Anode
K Materialwanderung zur Kathode

Grösse und Richtung des Materialtransportes sind also bestimmt durch die zeitliche Dauer der einzelnen Stufen des Vorganges, sowie durch die Grösse und den zeitlichen Verlauf des Kontaktstromes. Für gegebene mechanische und elektrische Trennbedingungen kann eine Übersicht über die Vorgänge gewonnen werden, wenn die übertragene Werkstoffmenge in Funktion der Schaltkreisinduktivität dargestellt wird. Nach *E.* und *R. Holm* [10] ergibt sich z. B. für Feinsilberkontakte das in Fig. 5 dargestellte Verhalten. Nachstehende Beziehung aus [10] lässt mindestens eine qualitative Übersicht über die Vorgänge zu:

$$V = k\ I^2 + \gamma_s\, Q_s - \gamma_p\, Q_p \qquad (3)$$

Hierin bedeuten: V pro Schaltung transportiertes Werkstoffvolumen; I Kontaktstrom im Zeitpunkt des Abreissens der Schmelzbrücke; Index s Plasmaloser Bogen (short arc); Index p Vollständiger Bogen (Plasmabogen); k, γ_s, γ_p Materialkonstanten; Q Während der entsprechenden Stufe des Vorganges durchgeflossene elektrische Ladung.

Bestimmend für den quantitativen Wert der Materialwanderung ist neben Trenngeschwindigkeit und Kontaktstrom der Werkstoff der Kontaktglieder. R. Holm gibt für Feinsilberkontakte bei Kontaktströmen über 2 A für k einen Wert von $(2...4) \cdot 10^{-13}$ cm³/A² pro Schaltvorgang an. Für Werte unterhalb von 2 A nimmt k etwa proportional mit dem Strom zu. In der Arbeit von E. und R. Holm [10] sind auch Werte für γ_s, das nach diesen Ausführungen stromabhängig ist, angegeben. γ_p ist vom Strom und von der Öffnungsgeschwindigkeit abhängig. Die Arbeiten verschiedener Autoren [10, 12, 13] lassen jede für sich einen Vergleich der behandelten Werkstoffe zu. Die Übersicht ist jedoch vorläufig noch stark erschwert, weil bei den einzelnen Autoren verschiedene Versuchseinrichtungen benützt wurden. In gewissen Fällen ergibt die Kombination zweier verschiedener Werkstoffe zu einem Kontaktpaar eine erhebliche Reduktion der Materialwanderung. Eigene Versuche zeigten z. B. günstige Verhältnisse für eine Kupferanode und eine Feinsilber-Kathode. Selbstverständlich ist die Eignung solcher Kombinationen auch wieder abhängig vom zeitlichen Verlauf des Trennvorganges. Besonders interessante Eigenschaften in bezug auf Materialwanderung haben Gold-Nickel-Legierungen. Dazu veröffentlicht *W. Merl* [12] zahlenmässige Angaben, aus denen auch hervorgeht, wie Legierung und Schaltkreisinduktivität die Erscheinungsform der Material-Ablagerungen beeinflussen. (Spitzen, Kegel, flache Buckel.) Die Form der Veränderungen ist von grosser Wichtigkeit, weil die mechanische Kontaktfunktion und die Spannungsfestigkeit weitgehend davon abhängen.

Materialwanderung beim Einschalten

Beim Auftreten von Kontaktprellungen ergibt sich infolge der damit verbundenen Trennvorgänge eine scheinbare Einschalt-Materialwanderung, die nach den angeführten Gesetzmässigkeiten verläuft. *L. H. Germer* und *F. E. Haworth* [14] haben jedoch gezeigt, dass auch bei idealer Kontaktgabe ein Materialtransport möglich ist, da bei sehr kleinen Kontaktabständen, ausreichender Spannung und genügend kleiner Schaltkreisinduktivität durch Feldemission eine Bogenentladung entstehen kann. Die Zündung dieses Bogens hängt ab vom Elektrodenmaterial und vom Zustand der Kathodenoberfläche. Isolierende Partikel, Kohlenwasserstoff-Schichten und dgl. begünstigen die Zündung. Je nach den gegebenen Voraussetzungen liegt die Zündfeldstärke im Bereich von $(0{,}6...2) \cdot 10^6$ V/cm, während die Brennspannung der Entladung etwa 15 V beträgt. Die Bogenenergie ist bestimmt durch die Grösse der Schaltkreiskapazität und fällt wegen der geringen Länge des Bogens vorzugsweise an der Anode an; sie führt dort zum örtlichen Schmelzen und Verdampfen des Werkstoffes. Durch Kondensation von verdampftem Anodenmaterial erfährt die Kathode einen Volumenzuwachs. Für die übertragene

Werkstoffmenge geben L. H. Germer und F. E. Haworth einen Wert von etwa $4 \cdot 10^{-7}$ cm³/Ws an.

b) Entfestigungs- und Schmelzspannungen

R. Holm zeigt [6] den zwangsläufigen Zusammenhang zwischen der Temperatur der Berührungsstellen und der Spannung am geschlossenen Kontakt. Er unterscheidet zwei Spannungswerte, die mit Veränderungen der Materialstruktur an den Stromübergangsstellen zusammenhängen, nämlich die Entfestigungsspannung und die Schmelzspannung. Beim Erreichen der Entfestigungsspannung erweicht das Material; die unter dem Einfluss von Kaltverformung erreichte zusätzliche Härte verschwindet. Sofern in diesem Moment eine Kontaktkraft wirkt, tritt eine Ausbreitung der Berührungsfläche auf. Beim Erreichen der Schmelzspannung geht der Werkstoff an den Berührungsstellen in flüssige Form über. Tabelle I [6] gibt Entfestigungs- und Schmelzspannungen für verschiedene Metalle an.

Entfestigungs- und Schmelzspannungen verschiedener Metalle

Tabelle I

Metall	Elastizitätsmodul	Härte[3])	Entfestigung		Schmelzen	
			Temperatur	Spannung	Temperatur	Spannung
	10^3 kg/mm²	kg/mm²	° C	V	° C	V
Aluminium	7	15...80	150	0,10	658	0,30
Chrom	—	130	—	—	1800	—
Eisen, rein	20	60	500	0,21	1530	0,60
Nickel	20	70...220	520	0,22	1455	0,65
Kupfer	11	35...50	190	0,12	1083	0,43
Molybdän	30	120...250	900	(0,30)	2800	0,90
Silber	7	26...60[1])	150[2])	0,09	960	0,35
Zinn	5	4,5...6	100	0,07	232	0,13
Wolfram	38	125...370	1000	0,40	3400	1,00
Platin	13	50...80	540	0,25	1773	0,70
Gold	8	13...75	100	0,08	1063	0,45
Platin mit 8% Nickel	—	160	—	—	1700	0,70
Platin mit 20 % Iridium	—	200	—	—	1850	—

[1]) Nach eigenen Messungen bei handelsüblichen, walzharten Blechen bis 80.
[2]) Nach Ansicht anderer Verfasser < 100 °C.
[3]) Gemäss Definition nach R. Holm [6]; der Wert entspricht ungefähr der Brinellhärte.

Wenn es gelingt, die Kontaktspannung während des Schaltvorganges dauernd unterhalb der Schmelzspannung des Kontaktwerkstoffes zu halten, ist nach [6] eine Schmelzbrückenbildung ausgeschlossen. Eine hohe Schmelzspannung des Elektrodenwerkstoffes erleichtert demnach die Behinderung der Materialwanderung. Von besonderem Einfluss auf den Materialtransport ist die Kontaktführung. Sie begünstigt im Prinzip den Vorgang, weil die Berührungsstellen nur selten wechseln. Dagegen ist zu beachten, dass eine mässige Materialwanderung weniger schadet dort als an ungeführten Kontakten, weil die Spannungsfestigkeit durch die Veränderungen nicht in gleichem Masse vermindert wird. Zur Vermeidung der Zündung eines plasmalosen Bogens muss die Spannung am schaltenden Kontakt auf 15 V begrenzt werden; diese Bedingung ist naturgemäss viel leichter zu erfüllen.

B. Kontakte für hohe Strombelastung

Die zulässige Strombelastung eines Kontaktsystems ist bestimmt durch die Temperaturempfindlichkeit der Werkstoffe, die Wärmeerzeugung und die Wärmeabfuhr.

a) Die zulässige Erwärmung

Die zulässige Temperatur der Kontaktglieder ist bestimmt durch den Eintritt einer Schädigung der erwärmten Werkstoffe. Das Kontaktmaterial kann durch Rekristallisations- oder Erweichungsvorgänge seine Widerstandsfähigkeit gegenüber der mechanischen Beanspruchung verlieren. Diese Vorgänge laufen nach einzelnen Autoren bei Feinsilber schon unterhalb 100 °C ab; bei legierten Silbersorten liegen die Grenzen höher. Nach mündlicher Angabe von *C. L. Meyer* ist besonders die Legierung Ag-Ni: 99,5 + 0,5 weitgehend rekristallisationsfest. Feinsilber kann also nur dann erfolgreich verwendet werden, wenn die Erweichung des Materials die mechanische Eignung nicht stört. Bei zu hoher Kontakttemperatur ist meist eine Schmierung ausgeschlossen. (Silicon-Schmierstoffe sind als Kontaktschutz unbrauchbar). Das Auftreten von Schäden an denjenigen Teilen des Schaltsystems, die mit dem wärmeerzeugenden Kontakt in Wärmeaustausch stehen, ist in gewissem Umfange durch konstruktive Massnahmen oder durch passende Materialwahl zu vermeiden. Immerhin ist die Strombelastbarkeit einer Schalteinheit vielfach durch solche Erscheinungen (Deformation von Metall- oder Isolierteilen, Veränderung von Federeigenschaften, Begünstigung chemischer Angriffe) begrenzt.

b) Die Wärmeerzeugung

Wärmeerzeugung im festen Material

Die im festen Leitermaterial erzeugte Joulesche Wärme kann nach den allgemein üblichen Methoden berechnet werden. Dabei ist jedoch die durch die geometrische Form der Kontakte und eine gegebenenfalls vorhandene Parallelschaltung von Kontaktstellen bestimmte Stromverteilung nicht immer leicht zu übersehen. Bei grosser Stromsteilheit ist die Stromverdrängung mit zu berücksichtigen. Gegebenenfalls sind auch die Eisenverluste im Magnetmaterial sowie die durch mechanische Arbeit erzeugte Wärme in Betracht zu ziehen.

Wärmeerzeugung an der Stromübergangsstelle

Der für den Wärmeanfall massgebende Kontaktwiderstand hängt ab vom Kontaktmaterial, der Kontaktlast und dem Oberflächenzustand. Unter Vernachlässigung des Einflusses des Oberflächenzustandes kann nach F. Kesselring [15] der Kontaktwiderstand R_K bei punktförmiger Berührung mit Hilfe nachstehender Beziehung in Näherung ermittelt werden:

$$R_K = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \varrho \sqrt{\frac{H}{F}} \qquad (4)$$

Hierin bedeuten: ϱ den spezifischen Widerstand des Kontaktwerkstoffes in Ωcm, F die Kontaktlast in kg und H die Materialhärte in kg/cm².

Aus Gl. (4) geht hervor, dass eine geringe Materialhärte und ein niedriger spezifischer Widerstand die unumgänglichen Voraussetzungen für einen kleinen Wert des Kontaktwiderstandes sind. R. Holm erläutert [6] in ausführlicher Weise die Zusammenhänge und unterscheidet insbesondere zwischen Ausbreitungswiderstand (entsprechend Gl. (4), Stromleitung zu und von der Übergangsstelle) und Übergangswiderstand (Oberflächenschicht).

Aus den theoretischen Überlegungen erklärt sich die praktische Erfahrung, dass nur schwach legierte Silbersorten oder Feinsilber als Kontaktwerkstoff für schnelle Schaltsysteme mit einigen hundert Ampère Nennstrom oder mehr mit Erfolg verwendet werden können. Die experimentelle Erfahrung zeigt auch bei diesen Materialien ein etwa der Beziehung in Gl. (4) entsprechendes Ansteigen des Kontaktwiderstandes mit der Materialhärte. Es muss im einzelnen Anwendungsfall der experimentellen Arbeit vorbehalten bleiben, den Werkstoff mit dem günstigsten mechanischen Verhalten bei gleichzeitig gerade noch erträglichem Kontaktwiderstand zu bestimmen.

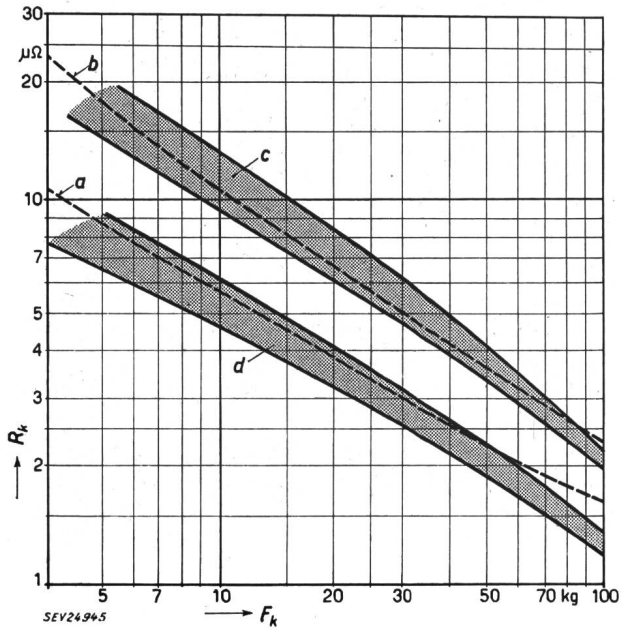

Fig. 6
Kontaktwiderstand R_k in Funktion der Kontaktlast F_k
Angaben von R. Holm [6] für Kupferplatten-Kontakte, im Vakuum (*a*) und mit einmolekularer Fremdschicht (*b*); eigene Messungen an spanabhebend bearbeiteten (*c*) und an eingeschliffenen Feinsilberkontakten in Luft (*d*), (Streubereich der Einzelmessungen)

Aus Gl. (4) geht auch der Einfluss der Kontaktlast hervor. Die diesbezüglichen Angaben von R. Holm für Plattenkontakte [6], sowie unsere eigenen Messungen an Feinsilber-Flächenkontakten sind in Fig. 6 zusammengestellt. Für unsere Messungen diente die Einrichtung nach Fig. 7. Die totale Kontaktfläche war 110 mm², die Brinellhärte des Silbers ca. 80 kg/mm²; der Meßstrom hatte durchwegs einen Wert von 300 A.

Erklärung der Bearbeitungsmethoden

Spanabhebend bearbeitet: Kontaktflächen auf der Drehbank mit üblicher Sorgfalt plan gedreht. Ohne wesentlichen Einfluss sind leichtes Abziehen mit Schmirgelleinen (Korn 220), erhebliche Verschmutzung durch Anfassen mit öligen Fingern (ähnlich einer Behandlung in der Werkstatt), sowie Reinigen mit Perchloräthylen oder Äthylalkohol.

Eingeschliffen: Jede einzelne Kontaktfläche wird nach dem Plandrehen mit Korundpulver unter Verwendung eines Stahl-Schleifklotzes eben geschliffen. Das Schleifmittel hat eine Korngrösse von 18 μm; als Suspensionsflüssigkeit dient Olivenöl. Der Schleifvorgang bringt eine gewisse Verunreinigung der Silberfläche mit Schleifmittelrückständen und Stahl-Abrieb mit sich. Nach dem Schleifen werden die Teile in Perchloräthylen gewaschen. Ohne wesentlichen Einfluss sind Waschen mit Äthylalkohol und der Auftrag chemisch inaktiver Schmierstoffe.

Der Streubereich umfasst Messungen an frisch gereinigten sowie stark verölten Flächen. Die Kontakte wurden nach der Fertigbearbeitung nicht länger als 18 h bei Raumtemperatur aufbewahrt.

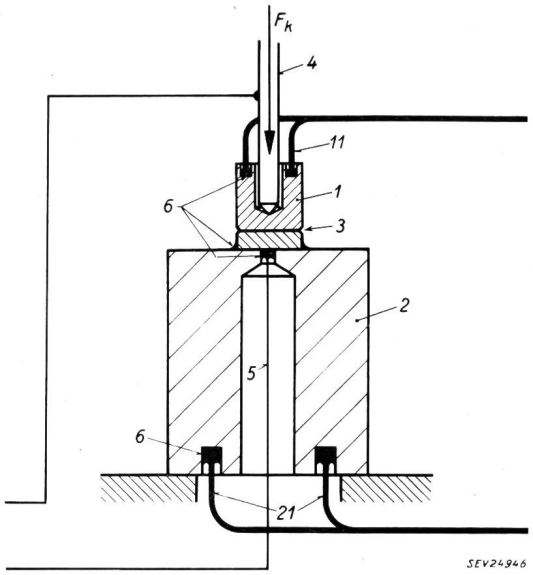

Fig. 7
Einrichtung zur Messung des Kontaktwiderstandes
1 obere Elektrode mit *6* am Umfang verteilten Stromzuführungen *11*; *2* untere Elektrode, zwei Stromzuführungen *21* diametral gegenüber; *3* Kontaktstelle; *4* Stahlstift zur Übertragung der Kontaktlast F_k, gleichzeitig Anschluss für die Messung des Spannungsabfalls am Kontakt; *5* zweiter Messanschluss; *6* Weichlötstellen

Aus Fig. 6 ist ersichtlich, wie der Kontaktwiderstand bei einer bestimmten Kontaktlast durch künstliche Vergrösserung der Berührungsfläche vermindert werden kann.

Einen wesentlichen Einfluss auf den Übergangswiderstand haben *Fremdschichten* [6]. Der elektrische Widerstand solcher Überzüge ist durch die chemische Natur, die Dicke der Schicht und die Temperatur der Berührungsstellen gegeben. Alle Fremdschichten zeigen einen erheblichen Widerstandsabfall beim Erreichen der sog. Frittspannung am Kontakt. Für Starkstromkontakte wird, abgesehen von Sonderfällen, diese Spannung ($< 0{,}5$ V bei Edelmetallkontakten) im Betrieb immer überschritten, so dass die Wirkung der Fremdschicht

nicht in dem Masse störend in Erscheinung tritt, wie etwa an schwach belasteten Kontakten der Messgeräte- oder Nachrichtentechnik. Unedle Metalle, oder auch Silbersorten mit starkem Gehalt an Nichtedelmetallen neigen wegen des steten Dikkenwachstums der Fremdschichten zur fortschreitenden Erhöhung des Kontaktwiderstandes im Betrieb. Der Einfluss der Fremdschichten gewinnt in chemisch aggressiver Atmosphäre erhöhte Bedeutung. In bezug auf die Bildung von schlecht leitenden Fremdschichten verhalten sich Kontakte aus Gold oder schwachen Goldlegierungen, Platinkontakte oder Kontakte mit Rhodiumüberzügen besonders gut; doch stehen entweder Preis und Härte des Materials oder aber der absolute Wert des Kontaktwiderstandes einer Anwendung für Starkstromschalter entgegen.

Abschliessend soll noch auf den Begriff des Klebestromes (Schweissgrenze) hingewiesen werden. Wie bereits erwähnt, wird bei Erreichen der Schmelzspannung der Werkstoff an den Berührungsstellen flüssig, womit die Voraussetzung für ein Verschweissen der Kontaktglieder in diesen Punkten gegeben ist. Damit wird in der Regel die Funktionsfähigkeit der Kontakte hinfällig; bei grosser Öffnungskraft tritt zumindest eine schwere Aufrauhung der Fläche auf. Bei ruhenden Kontakten bestimmt die Schweissgrenze die Stoss-Überlastbarkeit, die meist weit über der Nennbelastung liegt. Durch mechanische Schwingungen der Kontakte nach dem Einschaltvorgang kann eine kurzzeitige Kontaktentlastung und wegen der damit verbundenen Erhöhung des Kontaktwiderstandes eine gefährliche Senkung der Schweissgrenze auftreten. Für ruhende Kontakte lässt sich auf Grund von Gl. (4) eine Abschätzung des Schweißstromes durchführen.

$$U_s = I_s \; R_k = I_s \frac{\sqrt{\pi}}{2} \varrho \sqrt{\frac{H}{F}}$$

$$I_s = \frac{2\, U_s}{\sqrt{\pi} \cdot \varrho \sqrt{\frac{H}{F}}} \qquad (5)$$

Darin bedeuten: I_s Schweißstrom, U_s Schmelzspannung, R_k Kontaktwiderstand, ϱ Spezifischer Widerstand, H Härte; F Kontaktlast.

c) Die Wärmeabfuhr

Das Problem der Wärmeabfuhr ist bei Hochstromkontakten von entscheidender Bedeutung. Eine grosse Erschwerung ergibt sich, wenn aus Gründen der mechanischen Festigkeit, der geforderten Schaltzeiten oder der Vermeidung von Einschaltprellungen die beweglichen Teile klein und leicht gemacht werden sollen, da dann bei offenem Kontakt für die Wärmeabfuhr aus diesen Organen nur die Wärmeleitung über die Führungselemente (Federn etc.) zur Verfügung steht. Die Kühlung durch Strahlung und Konvektion ist wegen der Kleinheit der Oberflächen nur von geringem Einfluss. Der grösste Teil der im beweglichen Element erzeugten Wärme muss im geschlossenen Zustand der Kontakte über die festen Glieder abgeleitet werden und belastet somit die Kontaktstelle selbst.

Aus den Erwärmungsverhältnissen ergeben sich die folgenden *Konstruktionsrichtlinien* für schnelle Hochstromschalter:

a) Bewegliches System mit möglichst geringer Wärmeempfindlichkeit (Deformation, Werkstoffveränderungen).

b) Kontaktwerkstoffe mit hoher elektrischer und thermischer Leitfähigkeit und kleinem Kontaktwiderstand, grosse Kontaktkraft.

c) Erleichterung der Wärmeabfuhr durch Leitung, z. B. mittels Führungsfedern aus Kupferlegierungen.

d) Grosse Flächen für den Wärmeübergang (Kontakt- und Anschlagflächen).

e) Kleine Stromdichte in den festen Zuleitungsschienen.

f) Schienen so nahe wie möglich an die Kontaktstelle herangezogen.

C. Kontakte für kurze Schaltzeiten

Aus den Grundgesetzen der Mechanik folgt unmittelbar, dass Kontaktsysteme für kurze Schaltzeiten mit geringer Masse der bewegten Teile, grosser Antriebskraft und kleinem Schaltweg auszuführen sind. Der Konstrukteur kann die Gewichtsersparnis an den bewegten Teilen ins Extreme treiben, wenn er die durch die Kontaktphysik gegebenen Grenzen genau kennt. Dies gilt insbesondere in bezug auf die Ausnützung des Kontaktwerkstoffes.

Die Stromdichte in der Kontaktfläche kann an sich so hoch gewählt werden, dass die Spannung an der Übergangsstelle die Grösse der Schmelzspannung erreicht. Man wird jedoch mit Vorteil auf tieferen Werten bleiben, weil sonst das Problem der Wärmeabfuhr nicht mehr lösbar wird und keine Überlastfähigkeit mehr vorhanden ist. Eigene Versuche ergaben, dass ein im Betrieb erreichter Scheitelwert der Kontaktspannung von $^1/_{10}$ der Schmelzspannung noch sinnvoll ist (Gleichrichterkontakte aus Feinsilber). Dabei spielen die Kontaktabmessungen bzw. der Nennstrom der Einheit unter Beachtung der nachstehend angegebenen Regeln keine wesentliche Rolle. Selbstverständlich muss bei so hoher Ausnützung eine Widerstandserhöhung im Betrieb unbedingt vermieden werden.

Die Grösse der geometrischen Kontaktfläche (nicht der wirklichen Berührungsfläche) sollte etwa 40 mm² pro kA (Effektivwert) nicht unterschreiten. Der Wert ergab sich aus Versuchen an magnetisch angetriebenen Gleichrichterkontakten aus Feinsilber und gilt für Brückenkontakte und einigermassen gut passende Flächen. Eingeschliffene Flächen, insbesondere ruhende Kontakte, können nach bisherigen Erfahrungen noch etwas höher belastet werden. Die spezifische Belastung des Leitermaterials der beweglichen Kontaktstücke richtet sich nach der Grösse dieser Teile und nach der Art der Wärmeabfuhr. Die Belastung des Magnetmaterials muss so hoch getrieben werden, wie es die Streuflussverhältnisse in unmittelbarer Umgebung des Arbeitsluftspaltes gestatten. Der Scheitelwert der Induktion im Ankereisen sollte etwa 18 kGs erreichen; im Arbeitsluftspalt wird man kaum über 15 kGs kommen. Diese Art der Dimensionierung ergibt wegen der Streuung verhältnismässig grosse Erregermagnete und im

Vergleich dazu ungewöhnlich kleine Ankerabmessungen. Der Bedarf an Erregerleistung ist hoch gegenüber den üblichen Werten für langsame Schaltsysteme. Dies folgt auch aus der Forderung nach grosser Kontaktlast. Da die Schliesskraft und damit der Erregerstrom schnell ansteigen sollen, muss die Zeitkonstante des Steuerkreises klein und die Steuerspannung gross sein.

Der Schaltweg der Kontakte kann aus Gründen der Sicherheit gegen Spannungsdurchschläge und der Unempfindlichkeit gegen mechanische und elektrische Zerstörung (Abrieb, Formänderung, Materialwanderung) nicht unter einen bestimmten Wert reduziert werden. Für Sperrspannungsamplituden bis etwa 300 V kann ein System mit einem unter allen Bedingungen (mechanische Schwingungen des beweglichen Systems, Abnützung, Materialwanderung) gewährleisteten Abstand von etwa 0,3 mm als betriebsfähig angesehen werden. Dabei ist jedoch bereits ein grosser Aufwand zur Beseitigung und Fernhaltung von leitenden Partikeln (Bearbeitungsrückstände, Metallspäne an den Kanten der Teile usw.) nötig. Auf keinen Fall können solche Kontakte mit behelfsmässigen Mitteln überholt werden. Für eine robuste Ausführung ist ein Minimalabstand von etwa 1 mm erforderlich. Die Angaben gelten für lichtbogenfreie Kontakttrennung.

An schnellen Schaltsystemen spielt auch die Öffnungsbeschleunigung eine wesentliche Rolle. Dabei besteht die Möglichkeit, einen Teil der Öffnungsarbeit in Form von Federenergie der festen Kontaktglieder zu speichern. Die entsprechende Kraft steht dann als Kontaktlast zur Verfügung [3]. Diese Energie muss vom Schliessmagneten aufgebracht werden, doch ergibt sich infolge der Nachgiebigkeit der feststehenden Kontakte u. U. eine bezüglich mechanischer Beanspruchung günstige Anordnung.

II. Teil

A) Kontaktsystem für elektromagnetisch gesteuerte Gleichrichter

F. Kesselring [1] und R. Stulz [3] beschreiben Gleichrichter-Schaltsysteme für 300 und 4000 A Gleichstrom in Dreiphasen-Einwegschaltung. Die bei der grösseren Einheit vorhandenen Kontaktprobleme sind wesentlich vielseitiger und waren schwieriger zu lösen als bei dem kleineren Typ, so dass hier nur das System für 4000 A besprochen werden soll. Die wesentlichen Forderungen lauten:

Nennstrom: Trapezstrom (120° el.) Scheitelwert 4000 A
Zulässiger Strom beim Ein- und Ausschalten $\leqq$ 300 mA
Schalthäufigkeit: 50 s^{-1}
Ein- und Ausschaltzeit: $\leqq$ 0,5 ms
Antrieb: Magnetisch

Auf Grund von prinzipiellen Überlegungen wurden schon zu Beginn der Entwicklung folgende Entscheidungen getroffen:

Kontaktsystem als Brückenkontakt ausgebildet;
Parallelschalten zweier Kontaktsysteme für je die halbe Nennstromstärke;
Antrieb durch Zugmagnete, beweglicher Kontakt gleichzeitig Magnetanker.

a) Verminderung des mechanischen Kontaktverschleisses

Da das System für grosse Schalthäufigkeit und hohen Nennstrom geeignet sein soll, war das Problem des mechanischen Verschleisses nicht einfach zu lösen. Die ersten Versuche wurden an Modellen angestellt, bei denen die beweglichen Brückenkontakte (Anker) sich entweder innerhalb einer festen Führung frei bewegten oder durch einfache Biegefedern geführt waren. Die festen Gegenkontakte waren dabei starr mit ihrer Unterlage verschraubt. Als Kontaktwerkstoff wurde Feinsilber verwendet, das im bewegten Teil aus fabrikatorischen Gründen stets weichgeglüht war, während die feststehenden Kontakte aus walzhartem Material bestanden. Diese Anordnungen ergaben alle einen zu grossen mechanischen Verschleiss.

Versuche mit Hartsilbersorten, Feinkornsilber, Silber-Graphit-Sinterlegierungen, Palladium-Kupfer sowie Wolfram-Silber- und Wolfram-Kupfer-Sinterkontakten ergaben zwar teilweise eine grössere Dauerfestigkeit, der durchwegs erheblich höhere Kontaktwiderstand hätte jedoch eine Vergrösserung der bewegten Massen verlangt. Damit wäre eine längere Schaltzeit zu erwarten gewesen, oder man hätte durch Erhöhung der Betätigungskräfte den Vorteil der besseren Verschleissresistenz des Werkstoffes mindestens teilweise wieder zunichte gemacht.

Es zeigte sich bald, dass nur durch eine *genaue Führung* des beweglichen Kontaktes eine prinzipielle Verbesserung der Verhältnisse erreichbar ist. Die Versuche führten schliesslich zu der von R. Stulz [3] beschriebenen Bauart des bewegten Systems, bei dem zwei beidseitig eingespannte Biegefedern, deren Längsachsen senkrecht zueinander stehen, die rein translatorische Bewegung des Ankers gewährleisten. Bei dieser verbesserten Ausführung war die stroboskopische Ausmessung der unerwünschten Verschiebung bzw. Verdrehung des Ankers beim Aufsetzen auf die anschliessend beschriebenen gefederten Gegenkontakte wegen Unterschreitung der Messgenauigkeit unserer Einrichtung ($\pm$ 2 μm) nicht mehr möglich. Nach Schätzung dürften die fehlerhaften Bewegungen kleiner als $\pm$ 1 μm sein.

Mit einer derart genauen Ankerführung sind starre Gegenkontakte unverträglich; die gleichmässige Aufteilung der Kontaktkraft auf die beiden Trennstellen wäre nur durch extreme Präzision bei der Herstellung erreichbar. Aus diesem Grunde wurden die festen Kontakte als Federn ausgebildet, die durch ihre Nachgiebigkeit auch eine erwünschte Verminderung der dynamischen Kontaktkraft ergaben. Wie R. Stulz [3] begründet, war es zur Gewährleistung der Prellfreiheit [vgl. Gl. (2)] nötig, die Kontaktfedern in ihrem vorderen Teil in drei Finger zu unterteilen, die gegeneinander verschränkt sind und voneinander verschiedene Eigenfrequenzen aufweisen.

Trotz der günstigen mechanischen Beanspruchung war das System vorerst nicht verschleissfest. Neben einer gewissen Abriebbildung trat im Betrieb Kaltschweissung der Kontakte auf, wodurch die mechanische Funktion gestört und die Span-

nungsfestigkeit der offenen Kontakte vermindert waren. Zur Abhilfe wurde versuchsweise das Feinsilber durch Kontaktwerkstoffe mit verminderter Kaltschweissneigung ersetzt (Hartsilbersorten, Silber-Nickellegierungen, Silber-Graphit- und Silber-Kadmiumoxyd-Sinterwerkstoffe). Dabei wurden einerseits gleichartige Stoffe und anderseits Metalle mit möglichst verschiedenen Kristall-Eigenschaften zu einem Kontaktpaar kombiniert. Die erhoffte Verbesserung konnte nicht erreicht werden, weil die kaltschweissresistenten Werkstoffe durchwegs zu hohe und unstabile Kontaktwiderstände aufwiesen. Die Versuche wurden abgebrochen, als durch andere Experimente nachgewiesen werden konnte, dass eine *Verbesserung der Flächenpassung* auch an Feinsilberkontakten die Kaltschweissung zum Verschwinden bringt.

Die für diese Verbesserung notwendige Ausdehnung der tragenden Fläche war weder durch eine spanabhebende Bearbeitung mit Schnittwerkzeugen, noch durch maschinelles Schleifen erreichbar, weil die gegenseitige Lage der Kontaktflächen nicht mit wünschbarer Genauigkeit vor dem endgültigen Zusammenbau bestimmt werden konnte. Die Ausbildung der nötigen Flächenpassung durch einen Einlaufprozess mit langsam steigender Beanspruchung war umständlich und unsicher. Die gewünschte Vergrösserung der Berührungsfläche der spanabhebend vorbereiteten Kontakte wurde im vorliegenden Fall durch *Einschleifen* mit Karborundumpulver erreicht. Wegen der Nachgiebigkeit der Kontaktfedern musste diese Bearbeitung beim betriebsmässigen Wert der Kontaktlast (5,5 kg pro Kontaktstelle) durchgeführt werden. Aus diesem Grunde konnte wegen der Gefahr des Anfressens der Kontakte bei der Schleifbewegung nur mit verhältnismässig groben Schleifmitteln wirtschaftlich gearbeitet werden (Korn 500). Trotz zahlreichen Versuchen zur Ermittlung einer geeigneten Suspensionsflüssigkeit für das Karborundumpulver konnte kein Mittel mit erheblich besserer Eignung als die üblicherweise für solche Zwecke gebräuchlichen Öle gefunden werden. Beim Ansatz der Schleifpasta war auch darauf zu achten, dass sich die vom Einschleifprozess herrührenden Rückstände durch Auswaschen der Kontaktgegend restlos entfernen liessen. Chemisch aktive oder schwer lösliche Schmierstoffe durften daher nicht verwendet werden.

Nach Überwindung der angeführten Schwierigkeiten war das Verfahren verhältnismässig einfach und mit einem Zeitaufwand von wenigen Minuten durchführbar. Die mechanische Verschleissresistenz erwies sich als wesentlich grösser. Eine Kaltschweissung trat an eingeschliffenen Kontakten auch bei einer die normalen Betriebswerte weit übersteigenden mechanischen Beanspruchung nicht mehr auf. Die Bildung von staubförmigem Abrieb war dagegen kaum vermindert, weil die durch das verhältnismässig grobe Schleifmittel aufgekratzte Kontaktfläche trotz der geringeren spezifischen Beanspruchung leicht Metallpartikel freigab. Die fertige Kontaktfläche war nicht ganz frei von eingeschlossenen Karborundumkörnern. Versuche mit feineren Schleifmitteln ergaben etwas verminderte Abriebbildung; die Bearbeitung war jedoch zu umständlich.

Zur Verminderung der spezifischen Flächenpressung wurde neben dem Einschleifen eine *Rillung der Kontaktflächen* vorgeschlagen. Entsprechende Versuche an spanabhebend vorbearbeiteten Kontakten sind in der Weise durchgeführt worden, dass eine der beiden Kontaktflächen mittels eines Gravierstichels von Hand mit einem Rillenprofil versehen wurde. Tatsächlich war diese Fläche in der Lage, Unebenheiten der Gegenelektrode durch plastische Deformation der einzelnen «Wälle» auszugleichen, ohne dass die zur Kaltschweissung nötige Energiekonzentration auftrat. Fig. 8 illustriert diese Verhältnisse. Bei maschineller Herstellung des Rillenprofils wäre der Zeitaufwand für die Behandlung voraussichtlich nicht allzu gross, nachteilig bleibt die mit der Rillung verbundene Erhöhung des Kontaktwiderstandes (Ausbreitungswiderstand).

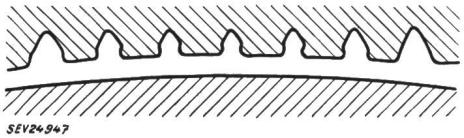

Fig. 8
Rillung der Kontaktfläche
Schematischer Querschnitt einer Flächenpartie nach dem Einlaufen

Eine Verbesserung der Flächenpassung wäre auch durch *Zusammenprägen* der Elektroden möglich. Durch geeignete Schmierstoffe liesse sich eine Kaltschweissung beim Prägevorgang vermeiden. Das Prägen ist aber nur bei entsprechender konstruktiver Ausbildung der Schaltstücke ausführbar; im vorliegenden Fall kam eine solche Behandlung nicht in Betracht. Ein Vorteil der Prägung ist die Verdichtung des Kontaktwerkstoffes an der Oberfläche, da sich hiedurch bei gewährleisteter Flächenpassung die mechanische Verschleissresistenz erhöht. Die Prägung dürfte nur bei einer sehr genauen Kontaktführung den erhofften Nutzen bringen.

Nach Beseitigung der Kaltschweissung waren die Kontaktsysteme für den vorgesehenen Betrieb geeignet. Aus den Messungen ergab sich, dass durch das Einschleifen die Kontaktwiderstände im Mittel etwa auf die Hälfte reduziert waren. Bei den ersten Dauerversuchen wurde nun die unseres Wissens bis dahin unbekannte *mechanische Materialwanderung* beobachtet. Die Kontaktfläche war infolge dieser Vorgänge nach etwa 20 Millionen Schaltungen derart beschädigt, dass die Betriebssicherheit nicht mehr genügte. Man glaubte anfänglich, die Erscheinung als eine besondere Art Kaltschweissung deuten zu können; diesbezügliche Experimente ergaben jedoch stark widersprechende Ergebnisse. Zahlreiche Beobachtungen von Kontakten im Betrieb sowie Strukturuntersuchungen am unverletzten und am veränderten Material führten schliesslich zu der im I. Teil angegebenen Erklärung des Vorganges.

Fortsetzung des allgemeinen Teils auf Seite 1217
Es folgen «Die Seiten des VSE»

Fortsetzung von Seite 1204

Kontaktprobleme an schnellen Schaltsystemen
(Fortsetzung)

Leider waren alle Bemühungen fruchtlos, die Ablösung von Metallpartikeln im Betrieb zu vermeiden und damit die mechanische Materialwanderung zu unterbinden. Ein Ersatz des Einschleifens durch eine die Freigabe loser Körper weniger begünstigende Bearbeitung war nicht ohne grundsätzliche Änderung der Konstruktion oder grossen Arbeitsaufwand möglich; an gerillten Flächen entstanden ebenfalls erhebliche Abriebmengen. Die Verwendung legierter Silbersorten, sowie von Gold als Kontaktwerkstoffe ergab keine Verlängerung der zulässigen Betriebszeit.

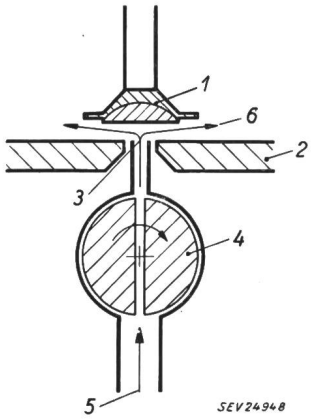

Fig. 9
Einrichtung zur forcierten Beblasung der Kontaktflächen

1 beweglicher Kontakt
2 feste Kontakte
3 Düse
4 synchron umlaufender Drehschieber
5 Lufteintritt
6 Luftaustritt

Einen besseren Erfolg zeigten die Versuche zur Beseitigung der losgelösten Partikel. Zu diesem Zweck wurde bei jedem Schaltvorgang kurz nach der Trennung der Kontakte ein Pressluftstrahl zwischen den Kontaktflächen durchgeblasen. Die benützte Einrichtung ist in Fig. 9 schematisch dargestellt. Damit gelang es, die mechanische Materialwanderung, wie Versuche über mehrere hundert Stunden zeigten, ganz zu beseitigen. Die wirkliche Berührungsfläche vergrösserte sich zudem in einem vorher nicht beobachteten Masse und konnte nach dem visuellen Eindruck im Mikroskop auf $^3/_4 ... ^4/_5$ der ganzen vom Schleifmittel erfassten Kontaktfläche geschätzt werden. Der Kontaktwiderstand fiel während eines Dauerversuches von 8 auf 3,5 μΩ pro Kontaktstelle bei 5,5 kg Kontaktlast. Die Kontaktfläche war feucht; es bildete sich sehr viel Abrieb, der durch die Luftströmung entfernt wurde.

Wenn die benützte Pressluft durch Abkühlung auf —80 °C praktisch öl- und wasserfrei gemacht wurde, trat wieder eine Zerstörung der Kontaktflächen auf. Eine starke Austrocknung der Metalloberfläche begünstigt jedoch alle mechanischen Verschleissvorgänge, so dass das Ergebnis dieses Versuches nur eine beschränkte Gültigkeit hat. Ein Versuchsbetrieb bei vermindertem Luftdruck (20 mm Hg, 20 °C) zeigte keine mechanische Materialwanderung, womit indirekt der Einfluss der Saugwirkung bei der Kontaktöffnung in normaler Atmosphäre bestätigt wird.

Aus technischen Gründen (Umbau der Gleichrichter-Anlage) konnten die guten Ergebnisse der Versuche nicht im praktischen Betrieb erhärtet werden. Man suchte in diesem Fall die Lebensdauer der Kontakte durch eine Behandlung mit Schmiermitteln zu verbessern. Diese sollten vor allem das Zusammenbacken und Anhaften der losgelösten Partikel behindern. Mit diesen Methoden war eine gewisse Verbesserung möglich, indem die Betriebsfähigkeit der Kontakte von ca. 100 h auf mindestens 600 h verlängert werden konnte. Alle Schmiermittel büssten im Laufe des Betriebes wegen ungenügender Erneuerung der Schmierschicht ihre Wirkung ein. Mit dieser Einschränkung haben sich chemisch inaktive Schmierstoffe, z. B. Petrol, Seifenfette, Paraffinöl bewährt.

b) Vermeidung des elektrischen Kontaktverschleisses

Das Problem der Veränderung der Kontaktflächen durch elektrische Materialwanderung konnte bei der Gleichrichteranlage für 8000 A vollständig gelöst werden. W. Baer beschreibt [2] die in dieser Anlage verwendeten Schaltdrosselspulen sowie deren Vormagnetisierung. Seinen Ausführungen liegt die Forderung zu Grunde, den vom einzelnen Kontakt im Dauerbetrieb geschalteten Strom auf 300 mA zu begrenzen. Dieser Wert ist durch die beschriebene Vormagnetisierung der Schaltdrosselspulen bei tragbarem Aufwand erreichbar. Das Problem wird dadurch erleichtert, dass die Kontakttrennung bei einem elektromagnetisch gesteuerten Schaltsystem im Normalbetrieb immer mit der gleichen Verzögerung (Schaltzeit des Kontaktes) gegenüber dem elektrischen Kommutationsvorgang der Gleichrichteranode verläuft [2].

Zur Verminderung der elektrischen Materialwanderung sind neben den Massnahmen zur Kleinhaltung des zu schaltenden Stromes sog. Nebenwege bekannt. Unter diesem Begriff versteht man dem Kontakt parallel geschaltete Anordnungen elektrischer Schaltelemente, die im Idealfall den Kontaktstrom beim Trennvorgang ohne Ohmsche und induktive Gegenspannung verzögerungsfrei über-

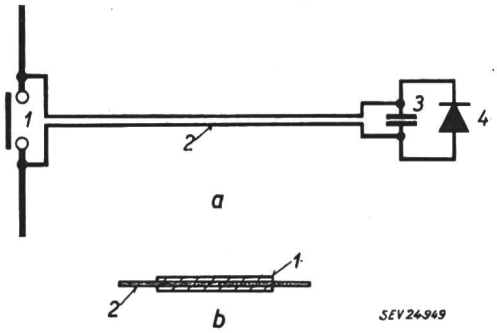

Fig. 10
Nebenweg für Gleichrichterkontakte

a Schaltschema
1 Kontaktstelle; *2* Folienleitung; *3* 0,3-μF-Kondensator in niederinduktiver Ausführung; *4* Germaniumdiode, über Koaxialleitung mit *3* verbunden
b Folienleitung, Querschnitt
1 Leiter (Cu-Band 6 × 0,25); *2* Isolierfolie (0,1 mm dick)

nehmen. Die bekannten Nebenwege enthalten meist Gasentladungs- oder Halbleiterventile, welche bei niederinduktivem Anschluss an die Unterbrechungsstelle sowohl die Zündung eines Lichtbogens, als auch die Existenz eines plasmalosen Bogens ver-

hindern. Soll auch die Schmelzbrückenwanderung vermieden werden, so ist dafür zu sorgen, dass während der Zeit, in der zwischen den sich trennenden Elektroden eine flüssige Brücke gebildet werden könnte, die Kontaktspannung unterhalb der Schmelzspannung des Elektrodenmetalls bleibt. Die Erfüllung dieser Forderung war bei den in unserem Fall vorhandenen kleinen Schaltströmen möglich. Es wurde zu diesem Zweck der in Fig. 10 dargestellte Nebenweg vorgeschlagen. Mittels einer sog. Folienleitung ist ein Kondensator (0,3 μF) in niederinduktiver Ausführung den Unterbrechungsstellen parallelgeschaltet. Die Germaniumdiode (2 Zellen 1 N 158 parallel) vermeidet einen unzulässigen Spannungsanstieg im späteren Verlauf des Vorganges und gewährleistet zudem die Ummagnetisierung der Schaltdrosselspule. Sie begrenzt ferner die beim Einschalten schädliche, im Kondensator gespeicherte Ladung entsprechend ihrem geringen Vorwärtsspannungsabfall. Durch die Kontaktsteuerung ist dafür gesorgt, dass die Schaltvorgänge im Normalbetrieb nur im Gebiet positiver Spannung am Kontakt ablaufen; die Germaniumdiode führt demnach beim Schalten immer Vorwärtsstrom. Messung und Näherungsrechnung ergeben für die resultierende Induktivität des angeführten Nebenweges einen Wert von $\approx 1 \cdot 10^{-8}$ H. Die damit geschützten Kontakte haben im Betrieb keine gegenüber der mechanisch verursachten Veränderung feststellbare elektrische Materialwanderung aufgewiesen.

c) Strombelastbarkeit, Erwärmung, Verhalten des Kontaktwiderstandes im Betrieb

Die Temperaturverteilung, die sich an den geschlossenen Kontakten des Systems bei Belastung durch Gleichstrom einstellt, ist bei bekanntem Kontaktwiderstand der klassischen Berechnungsweise zugänglich. Eine Belastung der Kontakte mit sinusförmigem Wechselstrom (50 Hz) ergab eine um etwa 30 % höhere Temperatur des Ankers (Anker ruhend, Schliessmagnet gleichstromerregt). Im Gleichrichterbetrieb ist die Wärmeabfuhr über die festen Kontakte auf die Zeit beschränkt, während der der Anker auf den Gegenkontakten aufliegt. Daraus resultiert eine Anker-Übertemperatur, die etwa doppelt so hoch ist wie bei Belastung mit Gleichstrom im dauernd geschlossenen Zustand. Eine theoretische Arbeit von *J. Patry* gestattet, auch diese Erscheinungen rechnerisch zu erfassen. Bei einer Belastung des Systems mit einem Strom von effektiv 2300 A (im Gleichrichterbetrieb mit 120 °-el.-Trapezstrom von 4000 A Scheitelwert) wurden Übertemperaturen gegen die Anschlußschienen gemäss Tab. II gemessen:

Gemessene Übertemperaturen in °C Tabelle II

	Gleichstrom	Wechselstrom	Gleichrichterbetrieb
Anker	36	44	70
Kontaktfedern	21	23	—

Der Kontaktwiderstand betrug bei diesen Messungen pro Übergangsstelle im Mittel 8 μΩ bei 5,5 kg Kontaktlast. J. Patry hat auch gezeigt, dass der Ersatz der Stahlführungsfedern am beweglichen System (vgl. [3]) durch solche aus Kupferlegierungen (Berylliumbronze) eine wesentliche Verminderung der Anker-Übertemperatur im Gleichrichterbetrieb bringt. (Die gemessenen Werte gelten für Stahlfedern.)

Dem Nennbetrieb der Gleichrichteranlage entsprechen folgende Effektivwerte der Stromdichte:

Beweglicher Kontakt (bezogen auf den gesamten Querschnitt der Silbereinlage): 42 A/mm².
Kontaktfedern (bezogen auf den Gesamtquerschnitt der federnden Finger): 29 A/mm².
Kontaktfläche (bezogen auf die ganze Überdeckungsfläche der Kontakte): 25 A/mm².
Anschlußschienen der Schalteinheit: 1,3 A/mm².

Der Kontaktwiderstand wies je nach der erreichten Güte der Flächenpassung vor der Inbetriebnahme der Schaltsysteme Werte zwischen 6 und 11 μΩ (pro Kontaktstelle) auf. Bei Verwendung von Schmierstoffen mit bedeutender chemischer Aktivität stiegen diese Werte im Betrieb rasch an. Auf Grund der praktischen Erfahrungen wurde als Kontakt-Schmiermittel schliesslich mit Petrol versetztes Mineralölfett auf Lithium-Kalk-Seifenbasis verwendet. Diese Mischung blieb im Laufe des Betriebes trotz der verhältnismässig hohen Temperatur schmierfähig; es bildeten sich ausserdem keine chemisch aktiven Rückstände oder grössere isolierende Schichten. Nach längerer Betriebszeit war eine Erhöhung des Kontaktwiderstandes wegen der Verschlechterung der Kraftverteilung durch die mechanische Materialwanderung feststellbar. Im ungünstigsten Fall wurde in ca. 400 h eine Zunahme um 30 % gemessen. Die Erwärmung im Betrieb ergab keine Verschlechterung der mechanischen Verschleissresistenz des Kontaktwerkstoffes. Auch die elastischen Eigenschaften der Kontaktfedern blieben erhalten.

Die Stoss-Überlastbarkeit der Kontakte kann rechnerisch wie folgt abgeschätzt werden:

Kontaktwiderstand im extremen Fall (Bearbeitungsfehler, Verschlechterung im Betrieb) 14 μΩ. Nennstromscheitelwert pro Schaltsystem 4000 A. Die ungünstigsten Verhältnisse ergeben sich, wenn beide parallel arbeitenden Kontakte eines Systems denselben extrem schlechten Kontaktwiderstand von 14 μΩ aufweisen. Die Spannung am geschlossenen Kontakt bei Belastung mit Nennstrom wird:

$$U_{kn} = \frac{4000}{2} \, 14 \cdot 10^{-6} = 28 \text{ mV}$$

Damit ergäbe sich eine Sicherheit gegenüber der Schweissgrenze von

$$S = \frac{U_s}{U_{kn}} = \frac{370}{28} = 13$$

(U_s Schmelzspannung des Kontaktwerkstoffes)

Diese Sicherheit ist vermindert durch die Tatsache, dass die wirksame Kontaktkraft (5,5 kg) durch die auftretenden dynamischen Stromkräfte herabgesetzt wird. Richtversuche ergaben eine Schweissgrenze von mindestens 10 000 A, also eine Sicherheit von $S = 5$.

d) Methoden zur Prüfung der Kontakteigenschaften

Kontaktwiderstandsmessung

Die Messung des Kontaktwiderstandes erfolgte in ruhendem Zustand des Systems, normalerweise bei gesättigtem Magnetanker durch Ermittlung des

Spannungsabfalles an den Kontakten bei Belastung mit Gleichstrom (300 A).

Spannungsfestigkeit

Zur Bestimmung der Spannungsfestigkeit wurde bei betriebsmässigen Antriebsstromimpulsen 0,5 ms nach jedem Nullwerden der Erregung im Haltemagneten ein Spannungsstoss mit annähernd senkrechtem Anstieg an jede Trennstelle gelegt. Die durch eine Thyratronschaltung erzeugte Prüfspannung hatte den in Fig. 11 gezeigten zeitlichen Verlauf.

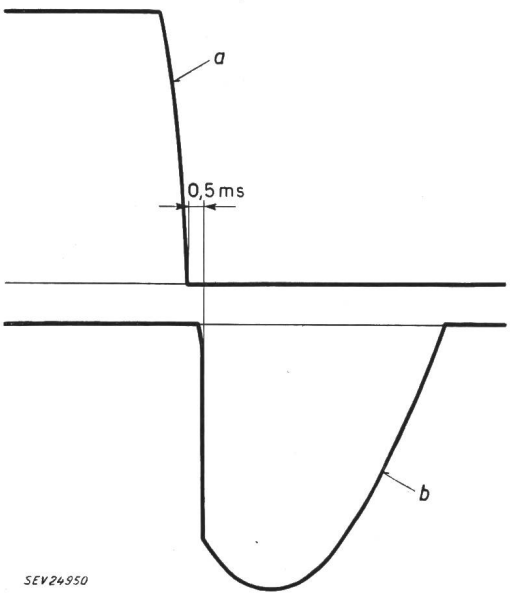

Fig. 11
Kontrolle der Spannungsfestigkeit bei betriebsmässiger Funktion der Kontakte
a zeitlicher Verlauf des Stromes im Haltemagneten
b zeitlicher Verlauf der Prüfspannung (Scheitelwert 500 V)

Vor Inbetriebnahme wurden alle Schaltsysteme während zwei Stunden dieser mit Netzfrequenz wiederholten Spannungsbeanspruchung ausgesetzt. Trat dabei ein Durchschlag über eine der Trennstrecken auf, so wurde das Kontaktsystem überholt. Mit diesem Verfahren liessen sich Montagefehler oder leitende Fremdkörper in der Kontaktgegend mit grosser Sicherheit feststellen. Ebenso war eine Kontrolle der Schaltzeit und Schaltpräzision möglich. Im Mittel wurden bei betriebsmässigen Antriebsimpulsen folgende Werte festgestellt:

a) Einschaltzeit bei einer Anstiegssteilheit der Erregerdurchflutung von ca. 800 AW/ms: ca. 0,5 ms, gemessen vom Beginn des Impulsanstieges.

b) Ausschaltzeit bei einer Abfallsteilheit des Hauptstromes von 3000 AW/ms mit dem von W. Baer [2] beschriebenen *RC*-Kreis zur Dämpfung der Öffnungsbewegung: ca. 0,1 ms, gemessen vom Zeitpunkt des Nullwerdens des Stromes.

Schlussbemerkungen

Aus den Angaben ist ersichtlich, dass bei der Entwicklung der Kontakte für elektromagnetisch gesteuerte Gleichrichter sowohl die Erwärmungsverhältnisse als auch das Problem des elektrischen Kontaktverschleisses sicher beherrscht werden konnten. Ebenso war es möglich, die geforderten Schaltzeiten einzuhalten sowie Schaltpräzision und Prellfreiheit zu gewährleisten. In der praktisch ausgeführten Grossanlage erwies sich die mechanische Dauerfestigkeit des Kontaktwerkstoffes noch nicht als befriedigend, indem die mechanische Materialwanderung nach einer Betriebszeit von 600...1000 h eine Überholung der Schaltsysteme erforderte. Erst die Ergebnisse der späteren Versuche mit Beblasung der Kontakte lassen annehmen, dass auch dieses Problem lösbar ist.

Es ist anzunehmen, dass die bei diesen Kontaktsystemen angewandten konstruktiven und fabrikatorischen Massnahmen, insbesondere die genaue Ankerführung, die Federung der festen Kontakte, sowie das Einschleifen der Flächen und die forcierte Beblasung der Kontakte auch bei der Lösung anders gearteter Aufgaben von Nutzen sein werden.

Literatur

[1] *Kesselring, F.:* Erfahrungen mit elektromagnetisch gesteuerten Grossgleichrichtern. Sci. electr. Bd. 2(1956), Nr. 2, S. 140...159.

[2] *Baer, W. J.:* Elektromagnetische Steuerung von Gleichrichterkontakten. Bull. SEV Bd. 47(1956), Nr. 16, S. 710...720.

[3] *Stulz, R.:* Konstruktive Probleme bei magnetisch gesteuerten Kontaktsystemen grosser Stromstärke. Bull. SEV Bd. 47 (1956), Nr. 25, S. 1141...1150.

[4] *Umstätter, H.:* Schmierprobleme in der Feinwerktechnik. Feinwerktechn. Bd. 59(1955), Nr. 1, S. 15...20.

[5] *Bibliography and Abstracts on Electrical Contacts 1835...1951.* Subject Index: Contact Materials. Philadelphia: American Society for Testing Materials 1952.

Hunt, L. B.: Electrical Contacts. London: Johnson, Matthey 1946.

Keil, A.: Elektrische Kontakte aus Edelmetallen. Metall Bd. 8(1954), Nr. 15/16, S. 611...614.

[6] *Holm, R.:* Electric Contacts. Stockholm: Gebers 1946.

[7] *Langer, M.:* Geräusche in den Verbindungen der Fernsprechämter und ihre Beseitigung. Halle: Marhold 1948.

[8] *Dobson, J. V.:* The Effect of Humidity on Brush Operation. Electr. J. Bd. 32(1935), Nr. 12, S. 527...528.

Sims, R. F.: The Wear of Carbon Brushes at High Altitudes. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 100(1953), Part 1, Nr. 124, S. 183...188.

[9] *Bibliography and Abstracts on Electrical Contacts 1835...1951.* Subject Index: Electric Arc Theory applied to Contacts. Philadelphia: American Society for Testing Materials 1952.

[10] *Holm, E.* und *R. Holm:* Die Stoffwanderung an Abhebekontakten aus Silber und Platin. Z. angew. Phys. Bd. 6(1954), Nr. 8, S. 352...361.

[11] *Paetow, H.:* Kontaktschmelzbrücken und Feinwanderung. ETZ Bd. 70(1949), Nr. 7, S. 227...232.

Ekkers, G. J., A. Farner und *R. Kläui:* Der Thomson-Koeffizient einiger Metalle bei hohen Temperaturen. Helv. phys. Acta Bd. 21(1948), Nr. 3/4, S. 218...220.

Lander, J. J.: Measurements of Thomson Coefficients for Metals at High Temperatures and of Peltier Coefficients for Solid-Liquid Interfaces of Metals. Phys. Rev. Bd. 74 (1948), Nr. 4, S. 479...488.

Davidson, P. M.: The Theory of the Thomson Effect in Electrical Contacts. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 96(1949), Part 1, Nr. 102, S. 293...295.

[12] *Merl, W.:* Stoffwanderung an Gold- und Gold-Nickel-Kontaktstücken. ETZ-A Bd. 77(1956), Nr. 7, S. 201...205.

[13] *Warham, J.:* The Effect of Inductance on Fine Transfer between Platinum Contacts. Proc. Instn. Electr. Engrs. Bd. 100(1953), Part 1, Nr. 124, S. 163...168.

Lander, J. J. und *L. H. Germer:* The Bridge Erosion of Electrical Contacts. J. appl. Phys. Bd. 19(1948), Nr. 10, S. 910...928.

Meyer, C. L.: Prüfmethoden und Werkstoff-Fragen bei funkenfreien Schaltvorgängen an Abhebekontakten. Schweiz. Arch. angew. Wiss. Techn. Bd. 19(1953), Nr. 5, S. 148...153.

[14] *Germer, L. H.* und *F. E. Haworth:* Erosion of Electrical Contacts on Make. J. appl. Phys. Bd. 20(1949)), Nr. 11, S. 1085...1109.

Germer, L. H.: Arcing at Electrical Contacts on Closure. Part 1: Dependence upon Surface Conditions and Circuit Parameters. J. appl. Phys. Bd. 22(1951), Nr. 7, S. 955...964. Part 2: The Initiation of an Arc. Nr. 9, S. 1133...1139.

[15] *Kesselring, F.:* Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltgeräte. Sammlung Göschen Bd. 711. Berlin: de Gruyter 1943.

Adresse des Autors:
S. Hämmerli, Dipl. Elektrotechniker, Zürcherstrasse 87, Oberengstringen (ZH).