Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 22 (1931)
Heft: 5

Artikel: Neue Kontakte elektrischer Apparate für grössere Stromstärken
Autor: Kesl, K.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1060499

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: 02.10.2025

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

SCHWEIZERISCHER ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

REDAKTION:
Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechn. Vereins und des Verbandes Schweiz. Elektrizitätswerke, Zürich8, Seefeldstr. 301

VERLAG UND ADMINISTRATION:
Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G., Zürich 4
Stauffacherquai 36/38

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

XXII. Jahrgang | N° 5 | Mittwoch, 4. März 1931

Neue Kontakte elektrischer Apparate für grössere Stromstärken.

Von *K. Kesl*, Ingenieur, Prag.

621.316.5.066.6

Der Autor beschreibt die Entwicklung von neuen Fingerkontakten für grosse Stromstärken. Diese neuen Kontakte können je nach Stromstärke aus einer Reihe gleicher Elemente zusammengesetzt werden. Die «festen» Fingerkontakte sind drehbar gelagert, abgefedert und mit hydraulischer Dämpfung versehen. Besonders eingehend wird die elektrodynamische Kompensation und das «Abspringen» beim Einschalten behandelt. Neben hoher Betriebssicherheit weist dieser Kontakt den Vorteil leichter Serienherstellbarkeit und einfacher Montage auf.

L'auteur décrit le développement de nouveaux contacts à doigts pour grandes intensités. Ces nouveaux contacts sont constitués par un assemblage d'éléments pareils entre eux, dont le nombre varie suivant l'intensité. Les contacts «fixes» sont montés à pivot, munis de ressorts et d'un amortisseur hydraulique. La compensation électrodynamique et l'«effet d'écartement» lors de l'enclenchement sont traités d'une manière très approfondie. A côté d'une grande sécurité de service, ces nouveaux contacts offrent l'avantage de pouvoir être fabriqués facilement en série et montés très simplement.

Im vergangenen Jahrgange des «elektrotechnicky obzor, 1929», habe ich die Berechnungsmethoden und eine charakteristische Beschreibung von Messer-, Bürsten- und Fingerkontakten für kleine Drücke angegeben.

Zu dieser Zeit waren schon einige hundert Oel- sowie Luft- und Trennschalter für grosse Stromstärken in Betrieb, welche mit Kontakten nach einem neuen System ausgerüstet waren und welche ich erst jetzt, nachdem dieselben praktisch erprobt wurden und entsprechende Erfahrungen vorliegen, behandeln will.

Dem Problem der Kontakte grosser Stromstärke wurde in den letzten Jahren eine grosse Sorgfalt zugewandt und man bildete Kontakte aus, die den gestellten Bedingungen voll entsprachen und von welchen der Siemenssche hydraulisch gedämpfte, konzentrische Kontakt und der BBC-Solenoidkontakt besondere Aufmerksamkeit verdienen.

Die Erfahrungen, welche ich bei zahlreichen Versuchen und in der Praxis mit Kontakten verschiedener Konstruktion erwarb, stimmen mit den Resultaten der Erfahrungen Kesselrings [1]) fast vollkommen überein; ich kann daher von der Wiedergabe meiner eigenen Messungen absehen.

Da beim Entwurf von Oelschaltern grosser Normalstromstärken konzentrische Kontakte gewisse konstruktive Schwierigkeiten ergeben und es notwendig ist, diese mit Hauptkontakten anderer Systeme zu kombinieren, war es mein Bestreben, das einheitliche Prinzip der Fingerkontakte für alle normalen Ströme zu wahren; dies wurde auch durch die Anordnung nach Fig. 1 erreicht.

In dem aus gezogenem Kupferprofil hergestellten Bügel A sind ebenfalls aus Kupferprofil bestehende Finger C_1 und C_2 drehbar gelagert, welche entweder durch Spiral- oder Blattfedern B abgefedert werden. Das bewegliche Messer D wird zwischen beide Finger C_1 und C_2 eingeführt. Aus der Disposition ist ohne weiteres klar, dass bei einer genügenden Spannung der Feder B zwischen dem beweglichen Messer D und den Fingern C_1 und C_2 bedeutende Drücke erzielt werden können und dass

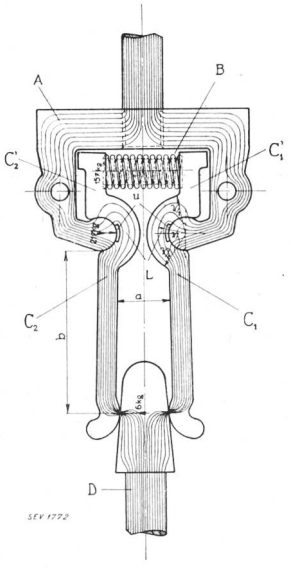

Fig. 1.
Schematische Darstellung eines Oelschalterkontaktes.

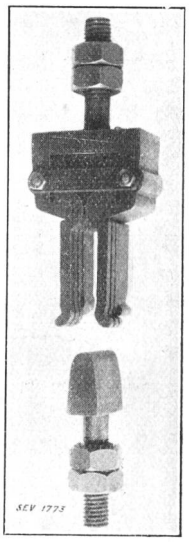

Fig. 2.
Kontakt für Oelschalter. Normalstrom 350 A. Kurzschlusstrom 25000 A.

[1]) E.T.Z. 1929, S. 1009, Heft 2.

der Druck in den Lagern der Finger, welche um die walzenförmig ausgebildeten Enden des Bügels *A* drehbar sind, sehr bedeutend ist, so dass der Uebergangswiderstand im Berührungspunkte, der mit wachsendem Druck asymptotisch abfällt, sehr gering und nicht höher ist, als wenn beide Teile (C_1A, C_2A) durch ein bewegliches Band leitend verbunden wären (Fig. 4).

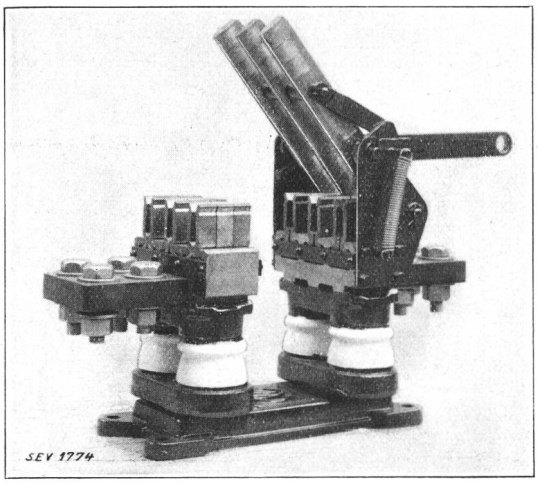

Fig. 3.
Trennschalter für 2000 A, 500 V ausgeführt von Wagner & Co., Olmütz.

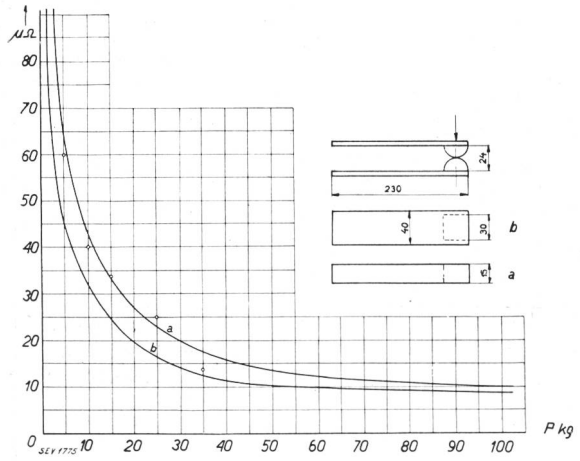

Fig. 4.
Verlauf des Uebergangswiderstandes im Berührungspunkt in $\mu\Omega$, als Funktion des Berührungsdruckes in kg bei Linearkontakten nach *a* und *b*.

Die Feder *B* ist in Teilen gelagert, welche nicht stromdurchflossen sind.

Die beschriebene Kontaktanordnung ermöglicht es auf einfache Weise, durch Unterteilung der Kontaktfinger in viele schmale, selbständig abgefederte Elemente, die repulsiven Kräfte, die beim Kurzschluss das Abheben der Kontakte bewirken, elektrodynamisch zu kompensieren. Ferner gestattet sie bequeme Anordnung von hydraulischen Stossdämpfern zur Beseitigung des mechanischen Abspringens der Kontakte beim Einschalten. Dies sind die Hauptvorteile der neuen Konstruktion.

Elektrodynamische Kompensation.

In der Literatur wurde schon öfters die Möglichkeit einer elektrodynamischen Kompensierung der repulsiven Kräfte, welche zwischen dem beweglichen Messer und den Fingern im Berührungspunkte auftreten, behandelt [2]).

Hiebei wurde vielfach für die rechnerische Behandlung gleichmässige Stromverteilung über den

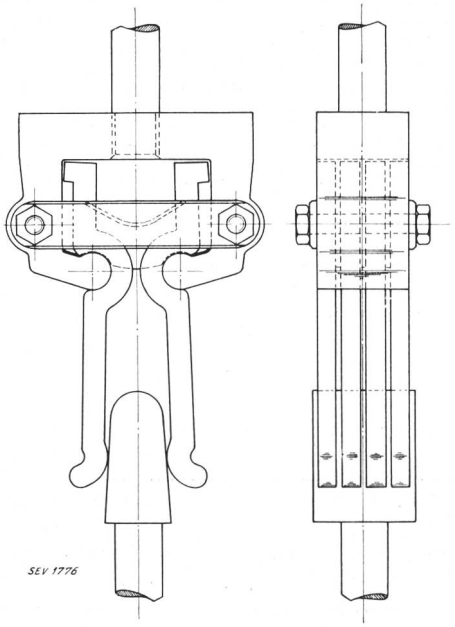

Fig. 5.
Zerlegung der Finger in Elemente.

Fingern eines Kontaktes vorausgesetzt. Den unter dieser Annahme, beispielsweise von Clerk, aufgestellten Gleichungen für die elektrodynamische Kompensation von Fingerkontakten kommt jedoch nur theoretische Bedeutung zu, da eine symmetrische Stromverteilung in Wirklichkeit bei gut ausgeführten Kontakten nur äusserst selten auftreten wird [3]).

Um gleiche Stromverteilung zu erzielen, müssten die Kontakte äusserst sorgfältig, in vollständig symmetrischer Form, aus gleichem Material, mit gleichem Kontaktdruck hergestellt werden. Selbst wenn dies gelänge, würde sich schon nach wenigen Abschaltungen grösserer Stromstärken der unsymmetrische Abbrand bemerkbar machen. Dieser hat zur Folge, dass die beiden Finger eines Kontaktes das bewegliche Messer ungleichzeitig und nicht mehr mit gleichem Druck berühren. Dass insbesondere die ungleichzeitige Berührung, und zwar in Abhängigkeit von der Schaltgeschwindigkeit, weitere unsymmetrische Zerstörungen der Kontaktoberfläche bewirkt, ist klar. Unsere Kontakte verhalten sich in dieser Hinsicht gegenüber anderen noch recht günstig, die Herstellung aus normalisierten, fertiggezogenen kalibrierten Profilen schliesst die Ungenauigkeit der Handarbeit zum voraus

[2]) Siehe Kesselring, E.T.Z. 1929, das Schalten grosser Leistungen, Clerc R.G.E. usw.

[3]) Siehe R.G.E. 18 août 1920.

aus. Die Verwendung von nur einer Feder für ein Kontaktpaar bewirkt einen fast völligen Ausgleich des Kontaktdruckes beider Finger. Es hat sich daher gezeigt, dass auch durch häufiges Schalten stark abgebrannte Kontakte noch immer ziemlich symmetrische Zerstörungen aufwiesen.

Um den Einfluss der unsymmetrischen Stromverteilung zahlenmässig feststellen zu können, setzt man auf Grund der Holmschen Forschungen über den Uebergangswiderstand [4]) folgendes voraus:

1. dass der Kontakt des Fingers mit dem beweglichen Messer durch eine kleine, ringförmige «*a*-Fläche» [4]) vom Durchmesser 2 *r* gebildet wird. Diese Fläche sei als «Berührungspunkt» bezeichnet;
2. dass der Uebergangswiderstand im Kontaktfinger dem Durchmesser des Berührungspunktes verkehrt proportional, die Stromstärke also direkt proportional sei;
3. dass die Summe der Berührungsflächen bei einem Kontaktpaar nach Fig. 6, und zwar zwischen den beiden Fingern C_1, C_2 (Fig. 1) und dem beweglichen Messer B stets konstant bleibt, d. h., dass für die Definition nach Punkt 1: $\pi\ (r_1^2 + r_2^2) = K$ gilt.

Die Annahme 3 trägt den wirklichen Verhältnissen Rechnung, die Gesamtfläche eines resp. mehrerer Berührungspunkte eines Kontaktes ist bei gleichem Material und gleicher Temperatur vom gesamten Kontaktdruck abhängig. Den Einfluss der Temperaturänderung auf die Grösse der Berührungspunkte und auf den spezifischen Widerstand soll vernachlässigt werden.

Zeichnen wir zuerst die Kurven der Anzugskräfte zweier paralleler Zweige, bei unsymmetrischen, partiellen Strömen im Verhältnis I'/I. Wie ersichtlich, wird die Anziehungskraft am grössten sein für $I'/I = 50\ \%$, wobei I die gesamte Stromstärke, I' die partielle Stromstärke des einen Zweiges und $I'' = I - I'$ bedeutet.

In Fig. 6 sind diese Kurven P_p eingezeichnet für das Verhältnis der Entfernung a zur Länge b der Finger von 2,58 und 3,5.

Ferner zeichnen wir die Repulsionskräfte P_r nach Drudes Gleichung mit der Korrektur von Biermanns ein und setzen im ersten Falle voraus, dass der Halbmesser der Kontaktberührungsfläche bei $I'/I = 50\ \%$ 1 mm (P_{r1}), im zweiten Falle 2 mm (P_{r2}), im dritten Falle 4 mm (P_{r4}) ist. Wie vorausgesetzt, ändert sich die Stromstärke in beiden Fällen proportional der Kontaktfläche.

Aus Diagramm Fig. 6 ist ersichtlich, dass eine grössere Stromunsymmetrie bedeutende einseitige Repulsionskräfte hervorrufen kann. Die Ordinaten der zwischen den Kurven P_p und P_r schraffierten Fläche zeigen dies deutlich. Während die Ordinaten der mit + bezeichneten Fläche den Druckzuwachs zwischen den Kontakten darstellen, müssen diejenigen Kräfte, welche den Ordinaten in der mit — bezeichneten Fläche entsprechen, durch die Federkraft gedeckt werden, wenn keine Abhebung der Kontakte eintreten soll.

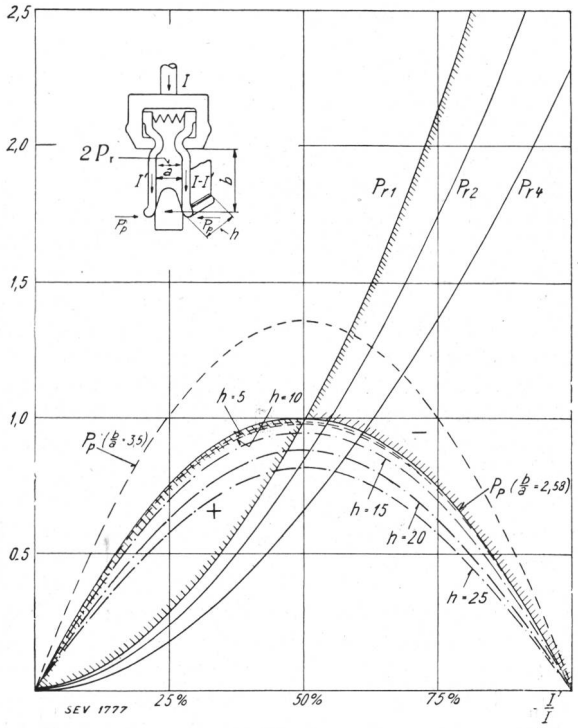

Fig. 6.
Anziehungskräfte P_p und Repulsionskräfte P_r in 100 % in Funktion der Stromunsymmetrie $\frac{I'}{I}$.

Als Sicherheit gegen den Einfluss unsymmetrischer Stromverteilung kann man entweder das Verhältnis b/a vergrössern oder die Zahl der Berührungspunkte durch geeignete Kontaktteilung erhöhen.

Dieses Mittel wurde bei den Kontakten der beschriebenen Bauart angewandt. Ist beispielsweise ein Kontaktpaar mit 15 000 A bei einer Unsymmetrie von 70 % belastet (also ein Finger mit 10 000 A, der andere Finger mit 4500 A), dann ist die Anziehungskraft $P_p = 1{,}34$, während das grössere $P_r = 2{,}94$ kg beträgt. Die Differenz $P_r - P_p = 2{,}94 - 1{,}34 = 1{,}6$ kg, muss daher durch die Vorspannung der Feder gedeckt werden. Sowohl eine genügende Federung als auch die zweckmässige Verteilung der Kontakte lässt sich einfach und zuverlässig durchführen.

Diese Berechnung soll nur zur Orientierung dienen. Die relativen Verhältnisse entsprechen allerdings angenähert der Wirklichkeit.

Bei breiten Fingern kann der Einfluss der Kontaktbreite auf die Anziehungskräfte zweier paralleler Leiter nicht vernachlässigt werden.

Für breite Finger gilt die Gleichung:

$$P_p = 2{,}04\, i^2 \frac{b}{h} \left(2 \operatorname{arc\,tg} \frac{h}{a} - \frac{a}{h} \ln \frac{a^2 + h^2}{a_2}\right) 10^{-8} \text{ kg}$$

[4]) Siehe Holm, Wissenschaftliche Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern (1929). Holm unterteilt die wirkliche Berührungsfläche zweier Kontakte in «*a*-Flächen» mit reinem metallischem Kontakt, in «*b*-Flächen» mit nicht metallischem Kontakt und in «*c*-Flächen» mit metallischer Spitzenberührung. Für den Uebergangswiderstand massgebend ist die Grösse der «*a*-Flächen». Der Uebergangswiderstand ist der Grösse dieser Flächen annähernd umgekehrt proportional.

Hierin bedeutet: a die Entfernung zwischen den Fingern, b die Länge der Finger und h die Breite der Finger in cm.

In Fig. 6 sind die Kräfte P_p bei gegebener Stromstärke und bei den Kontaktbreiten von 5, 10, 15, 20 und 25 mm angegeben.

Aus den eingezeichneten Kurven ist ersichtlich, dass breitere Finger bei gleicher absoluter Belastung kleinere Anziehungskräfte ergeben. Es ist jedoch auch ersichtlich, dass der Einfluss der Kontaktbreite bei Breiten unter 5 mm praktisch vernachlässigt werden kann. Eine Unterteilung der Kontakte unter 5 mm ist daher ohne weiteren Nutzen; dies ist von Bedeutung, da bei schmäleren Kontakten die Federung Schwierigkeiten bereiten würde, während sie schon von etwa 4 bis 5 mm aufwärts einwandfrei ausgeführt werden kann.

Die Unmöglichkeit einer so engen Unterteilung der Finger bei bester Federung ist ein besonderer Vorteil dieser Kontaktkonstruktion.

Gute Beweise für die Richtigkeit der obigen Ueberlegungen und Rechnungsansätze erhielt ich im Anfangsstadium der praktischen Entwicklung und Verwendung der Kontakte. Ursprünglich wurden die Kontakte 20 mm breit mit scharfkantigen, stark abgefederten Fingern ausgeführt (Fig. 7). In dieser Ausführung bewährten sie sich bei allen Schaltern, die nicht sehr häufig und nicht bei grösseren Ueberströmen geschaltet wurden, insbesondere also bei Trennschaltern (mehrere Trennschalter für 2000 A sind mit den ursprünglichen Kontakten schon weit über ein Jahr anstandslos im Betrieb), ferner als Hauptkontakte von Oel- und Luftleistungsschaltern. Bei Oelschaltern von kleinen Schaltintensitäten wurde ein grösserer Abbrand auch dann nicht beobachtet, wenn die Kontakte als Abbrennkontakte eingebaut waren.

Hingegen hat sich die Anwendung dieser Kontakte als Abbrennkontakte bei Oelschaltern für grössere Schaltströme als unzweckmässig erwiesen, und zwar aus folgenden Gründen:

1. An den Abbrennkontakten werden schon, wie vorher gesagt, beim ersten Einschalten grösserer Ströme Metallperlen bzw. Abbrand auftreten, womit die Berührungsstelle der Kontakte trotz der grossen Breite nur auf 1 bis 2 «Punkte» reduziert wird, welche nur mit entsprechend kleinen Strömen belastet werden können.
2. Die Kontaktform bewirkt beim Einschalten ein mechanisches Abstossen der Kontaktfinger, was eine starke Zerstörung der Oberfläche durch Funken zur Folge hat, wie später näher beschrieben wird.
3. Die ungenügend kompensierten repulsiven Kräfte unterstützen ein Ausweichen der Finger.
4. Die scharfen Kanten der Finger wurden infolge des hohen spezifischen Druckes auch rein mechanisch bei häufigem Schalten bald abgeschabt.

Um daher Kontakte für höhere Beanspruchung zu erhalten, mussten die Ursachen der in 1 bis 4 angeführten Fehler beseitigt werden.

Abspringende Kontakte (Fig. 7) wurden mit Rücksicht auf ihre unvorteilhafte Form bei grösseren Stromstärken nicht verwendet. Die Finger wurden so verlängert, dass sich die repulsiven Kräfte gegenseitig aufheben. Die Form der Finger wurde so gewählt, dass das Auflaufen des beweglichen Messers mit einem minimalen Abheben verbunden war; scharfe Kanten wurden vermieden. Der Anfangsdruck der Abbrennkontakte wurde in vorteilhaften Grenzen gehalten. Eine weitere Erhöhung der augenblicklichen zulässigen Belastung von Abbrennkontakten wurde durch geeignete Unterteilung der Finger, und zwar wieder auf Grund von Versuchen, durchgeführt (Fig. 2 und 5).

Bei diesen Versuchen hat sich ergeben, dass die Stromstärke, bei der die Kontakte anzuschweissen beginnen, bei gleicher Schaltgeschwindigkeit, gleichem Gesamtdruck und gleicher Gesamtstärke zwischen 5 bis 30 mm von der Kontaktbreite fast unabhängig ist.

Auch aus diesem Grunde ist es also vorteilhaft, die Breite der Finger auf das zulässige Mindestmass von etwa 5 mm herabzusetzen und den gewonnenen Raum zur Erhöhung der Anzahl der selbständigen Kontaktpaare zu verwenden. Hiedurch wird die Zahl der Kontaktberührungspunkte mit Sicherheit erhöht, die repulsiven Kräfte also verringert.

Die Möglichkeit einer solchen Unterteilung der Kontakte in selbständig abgefederte Finger von nur 4 bis 5 mm Breite wurde bereits als Vorteil aufgezählt.

Auch in bezug auf die Montage besitzt diese Anordnung Vorteile. Es sind weder leitende Verbindungen noch Kontaktschrauben notwendig.

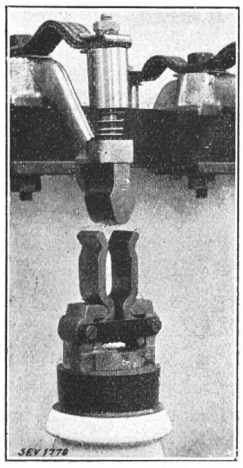

Fig. 7.
Eingebauter Oelschalterkontakt 200 A Normalstrom.

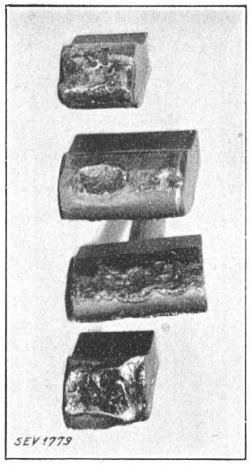

Fig. 8.
Nicht kompensierte Kontakte nach schweren Kurzschlußschaltungen.

Der Einfluss von mechanischen Eigenschaften auf den Kontakt.

Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, bis zu welcher Grenze man aus einem gegebenen Material bei zweckmässiger Wahl des Materials, des Querschnitts, des Druckes und der Disposition kurz-

schlußsichere Kontakte herstellen kann. Es wurde festgestellt, dass auch Kontakte, welche allen angeführten Bedingungen entsprechen, bei Kurzschlußströmen von ca. 30 000 A_{max} einen starken Abbrand aufwiesen.

Dieser ist deutlich sichtbar in Fig. 8, welche einen Kontakt nach 25maliger Einschaltung von etwa 30 000 A zeigt. Der dargestellte Kontakt war allerdings älterer Bauart, also noch mit nicht genügend kompensierten, scharfkantigen Fingern, deren ungünstig gewählte Form eine bedeutende Abhebung beim Einschalten zur Folge hatte. Teilweise war das Abheben auch eine Folge der unrichtigen Profilierung des beweglichen Kontaktmessers, welches, wie aus Fig. 8 ersichtlich ist, in der Einschaltstellung in der Breite abgesetzt ist. Hiermit wurde bezweckt, den lose gelagerten, mit einer Auswurffeder versehenen Abbrennkontakt im ersten Augenblick des Abschaltens im festen Kontakt festzuhalten. Durch die Kompression der Auswurffeder (Fig. 9) erfolgte dann das Abschalten mit erhöhter Anfangsgeschwindigkeit. Von dieser Anordnung wurde bei Kontakten für grössere Kurzschlußströme wieder abgegangen.

Erst Estorff machte als erster darauf aufmerksam, dass ein ebenso wichtiger Faktor für den Abbrand der Kontakte das ausgesprochen mechanische Abspringen derselben bildet, und gab die Anregung, dieses Abspringen entweder durch Anschlags- oder Reibungsdämpfung abzuschwächen. Auch Balke [5]) studierte das Problem des Abspringens an Schützen, welche er teilweise durch ein gegenseitiges Abwälzen der Kontaktflächen aufeinander reduzierte, wobei der Druck zwischen den Kontakten mit wachsender Schaltgeschwindigkeit gesteigert wurde.

Das Ausschwingen der Kontakte verursacht weitere Unannehmlichkeiten. Sobald nur ein unmerkliches Ausschwingen zustande kommt, entsteht zwischen den Kontakten ein Lichtbogen, der Gas und Dämpfe entwickelt, welche sich zwischen den Kontaktflächen ausbreiten. Dadurch entsteht ein bedeutender Druck auf beide Flächen, der sich periodisch mit den durch die Schaltarbeit entwickelten Gasen ändert, der, wie bekannt, nach einer Sinuslinie verläuft. Kesselring stellte bei 1 mm voneinander entfernten Kontakten einen Höchstdruck von 13 kg fest. Dieser Druck wurde innerhalb $3 \cdot 10^{-3}$ erreicht [6]).

Auf Grund der Initiative Estorffs haben die Siemens-Schuckert-Werke unter Leitung Kesselrings die ersten konzentrischen Kontakte mit hydraulischer Dämpfung herausgebracht. Mit diesen Kontakten wurden einwandfrei Stromstärken bis 30 000 A geschaltet. Konzentrische Kontakte eignen sich, mit Rücksicht auf ihre Bauart, nur für kleinere Dauerströme, so dass es bei Schaltern für grössere Normalstromstärken (2000 A und mehr) notwendig erscheint, die Kontakte zu kombinieren, womit die Konstruktion jedenfalls komplizierter wird.

Gleichzeitig, jedoch unabhängig von Kesselring, löste ich dasselbe Problem für linear angeordnete Fingerkontakte, und zwar gleichfalls mit hydraulischer Dämpfung.

Zur theoretischen Behandlung der hydraulischen Dämpfung stellen wir zunächst die Gleichung für Abhebung der Kontakte auf (Fig. 10).

Zu diesem Zwecke benötigen wir folgende Beziehungen:

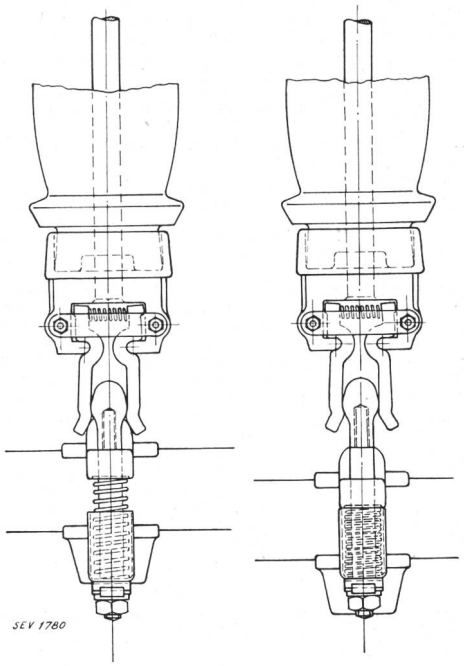

Fig. 9.
Abspringende Abbrennkontakte im Anfang der Abschaltbewegung.

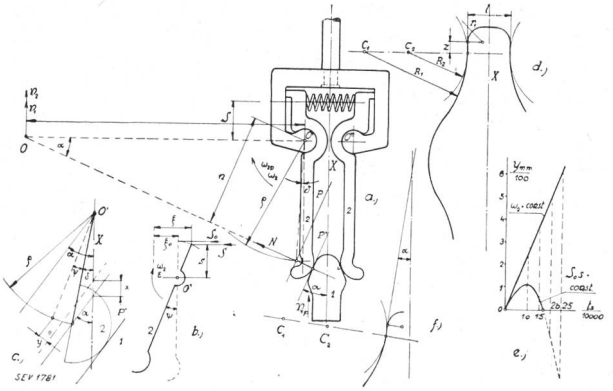

Fig. 10.

a) die Geschwindigkeit der Finger 2 nach dem Stoss;

b) die Abhängigkeit der Stellung des drehbaren Fingers 2 und beweglichen Kontaktes 1 von der Zeit;

c) auf Grund des vorhergehenden die Entfernung der Finger als Funktion der Zeit.

[5]) E.T.Z. 1926, S. 1537.

[6]) Siehe auch die theoretischen Studien von Kesselring, E.T.Z. 1927, S. 92.

Es seien folgende Bezeichnungen eingeführt:

v_{1p} Anfangsgeschwindigkeit des Fingers 1;

v_1 Geschwindigkeit des Fingers 1 während dem Verlauf des Stosses bzw. nach demselben;

N normaler Druck im Kontaktpunkt der Finger beim Auftreffen;

τ die Zeit;

ω_{2p} Anfangsgeschwindigkeit der Finger 2;

ω_2 Winkelgeschwindigkeit der Finger 2 beim Auftreffen;

n, r, d Masse nach Fig. 10;

$2m_1$ Masse des Fingers 1;

Θ Trägheitsmoment der Finger 2 in bezug auf die Achse 0.

Wir vernachlässigen den Druckimpuls auf die Feder und die passiven Widerstände. Wie später gezeigt wird, haben diese Faktoren keinen massgebenden Einfluss auf die Beurteilung der Kontaktverhältnisse.

Da die Kontaktanordnung symmetrisch ist, genügt es, nur eine Hälfte, nämlich den Kontakt des Fingers 1 mit einem der Finger 2 in Betracht zu ziehen.

I.

Die dynamische Gleichung für die Glieder 1 und 2, welche während dem Auftreffen gilt, lautet:

$$\begin{aligned} -N \sin \alpha &= m_1 \frac{d v_1}{d \tau} \\ N_n &= \Theta \frac{d \omega_2}{d \tau} \end{aligned} \qquad (1)$$

Durch Teilung ergibt sich:

$$\frac{\sin \alpha}{n} = -\frac{m_1}{\Theta_2} \frac{d v_1}{d w_2}$$

und nach Ordnen:

$$\frac{\Theta \, d \omega_2 \sin \alpha}{n} + m_1 \, d v_1 = 0. \qquad (2)$$

Führen wir für das Glied 2 die in Punkt 0 reduzierte Masse n_2 nach der Beziehung $\Theta = n_2 r^2$ ein und drücken die Geschwindigkeit von Punkt 0 als Punkt des Gliedes 2 aus:

$$\omega_2 = \frac{v_2}{r}, \qquad (3)$$

so kann geschrieben werden:

$$\frac{n_2 r^2 \sin \alpha}{n r} \, d v_2 + m_1 \, d v_1 = 0$$

Da $\frac{\sin \alpha}{n} = \frac{1}{r}$, erhält der letzte Ausdruck die Form

$$n_2 \, d v_2 + m_1 \, d v_1 = 0$$

und nach Integration in den entsprechenden Grenzen:

$$n_2 (v_2 - v_{2p}) + m_1 (v_1 - v_{1p}) = 0. \qquad (4)$$

Eine weitere Beziehung kann aus dem Gesetze der Erhaltung der Energie abgeleitet werden, nach welchem die Deformationsarbeit A_d durch einen Verlust von Bewegungsenergie gegeben ist:

$$A_d = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} \Theta_2 \omega_2^2 - \frac{1}{2} m_1 v_{1p}^2 - \frac{1}{2} \Theta \omega_{2p}^2.$$

Führen wir wieder die in 0 reduzierte Masse von Glied 2 und die Geschwindigkeit von Punkt 0 ein, so erhalten wir:

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} n_2 v_2^2 - \frac{1}{2} m_1 v_{1p}^2 - \frac{1}{2} n_2 v_{2p}^2 = 2 A_d. \qquad (4a)$$

Durch Lösung beider Gleichungen folgt:

$$v_2 = \frac{m_1 v_{1p} + n_2 v_{2p}}{n_2} = \frac{m_1 v_1}{n_2} \qquad (5)$$

und durch quadrieren:

$$v_2^2 = b^2 - 2 b \frac{m_1}{n_2} v_1 + \left(\frac{m_1}{n_2}\right)^2 v_1^2 \qquad (6)$$

worin $b = \frac{m_1 v_{1p} + n_2 v_{2p}}{n_2}$.

Führen wir Gleichung 5 in 6 ein und multiplizieren wir mit 2, so ergibt sich:

$$m_1 v_1^2 + n_2 b^2 - 2 b m_1 v_1 + \frac{m_1^2}{n_2} v_1^2 - m_1 v_{1p}^2 - n_2 v_{2p}^2 - 2 A_d = 0$$

und nach Ordnen: $v_2 \left(m_1 + \frac{m_1^2}{n_2}\right) - v_1 \, 2 \, b m^1 + b^2 n_2 - m_1 v_{1p}^2 - n_2 v_{2p}^2 - 2 A_d = 0,$

woraus die quadratische Gleichung folgt:

$$v_1^2 e - v_1 d + c = 0$$

und deren Wurzeln: $v_1 = \frac{d}{2e} \pm \frac{1}{2c} \sqrt{d^2 + 4 c e},$

Nach Substitution und Ordnen erhalten wir:

$$v_1 = \frac{m_1 v_{1p} + n_2 v_{2p}}{m_1 + n_2} \pm \frac{n_2}{m_1 + n_2} \sqrt{(v_{1p} - v_{2p}) + 2 \frac{m_1 + n_2}{m_1 n_2} A_d} \qquad (7)$$

und nach Einführung von Gleichung 7 in 5:

$$v_2 = \frac{m_1 v_{1p} + n_2 v_{2p}}{m_1 + n_2} + \frac{m_1}{n_2 + m_1} k (v_{1p} - v_{2p}) \qquad (8)$$

oder:

$$v_2 = \frac{m v_{1p} + n v_{2p}}{m + n} + \frac{m}{m + n} k (v_{1p} - v_{2p}) \qquad (9)$$

Für vollkommen elastische Teile ($A_d = 0$) gilt $k = 1$, für vollkommen plastische (wenn am Ende des Auftreffens $v_1 = v_2$, $A_d = \max$) $k = 0$.

In Wirklichkeit wird k experimentell bestimmt. Für Kupfer ist $k = 0{,}2$ [7])

In unserem Fall ist $v_{2p} = 0$, n_2 mit Rücksicht auf m_1 klein, also $\frac{n_2}{m_1} = 0$ und aus Gleichung (9)

$$v_2 = m_1 v_{1p} \left(\frac{1 + k}{m_1 + n_2}\right) = v_{1p} \frac{1 + k}{1 + \frac{n^2}{m_1}}$$

$$v_2 = v_{1p} (1 + k) \qquad (10)$$

[7]) Siehe Autenrieth-Enslin, Technische Mechanik, S. 532.

Aus Gleichung (5) gilt dann direkt für diesen besonderen Fall:

$$v_{1p} = v_1 = \text{konst.} \qquad (11)$$

Wir setzen voraus, dass der Druckimpuls der Feder vernachlässigt werden kann, denn die Masse m_1 ist überwiegend grösser als die Masse n_2. Der Druckimpuls der Feder sollte keinen Einfluss haben auf die Relativgeschwindigkeit nach dem Auftreffen des Fingers 2 in bezug auf Finger 1. Durch die Vernachlässigung des Fingergewichtes 2 in bezug auf 1 (n_2 in bezug auf m_1) und aus dem gleichen Grunde in bezug auf die Federkraft, ändert sich die Geschwindigkeit des Fingers 1 nicht.

II.

Die Winkelgeschwindigkeit des Gliedes 2 (Endgeschwindigkeit nach dem Stoss und Anfangsgeschwindigkeit der weiteren Bewegung) ist:

$$\omega_2 = \frac{v_2}{r} = \frac{v_{1p}}{r}(1+k).$$

Für die weitere Drehbewegung des Gliedes 2 gilt dann die Gleichung (wieder unter Vernachlässigung des Eigengewichtes und der Bolzenreibung):

$$-Ss = \Theta_2 \varepsilon \qquad (12)$$

worin $S = K\xi$ die Federspannung bedeutet, K die Federkonstante, $\xi = \xi_0 + s\psi$ die Deformation, ξ_0 die Anfangsdeformation (Fig. 10 b und c).

Die Winkelbeschleunigung drücken wir aus durch $\varepsilon = \frac{d_2\psi}{d\tau^2}$ und für das Trägheitsmoment schreiben wir kurz Θ statt Θ_2.

Damit erhält man:

$$S = K\xi = K(\xi_0 + \measuredangle\psi) = S_0 + Ks\psi$$

und durch Einsetzen in Gleichung 12:

$$-Ss - Ks^2\psi = \Theta\frac{d^2\psi}{d\tau^2} \qquad (13)$$

oder

$$\frac{d^2\psi}{d\tau^2} + K\frac{S}{\Theta}\psi + \frac{S_0 s}{\Theta} = 0,$$

also eine Differentialgleichung zweiter Ordnung mit konstantem Koeffizienten von der Art

$$\frac{d^2\psi}{d\tau^2} + a^2\psi + a_0 = 0 \qquad (14)$$

Das allgemeine Integral ist

$$\psi = e\sin(a\tau + \beta) - \frac{a_0}{a^2}$$

oder

$$\psi = e\sin\left(\tau\sqrt{\frac{Ks^2}{\Theta}} + \beta\right) - \frac{S_0}{Ks}$$

$$\frac{d^2\psi}{d\tau^2} = \omega = e\sqrt{\frac{Ks^2}{\Theta}}\cos\left(\tau\sqrt{\frac{Ks^2}{\Theta}} + \beta\right)$$

Die Konstanten e und β bestimmen wir auf folgende Weise; für $\tau = 0$, $\psi = 0$, $\omega = \omega_2$ wird:

$$\sin\beta = \frac{S_0}{eKs} \text{ und } \cos\beta = \frac{\omega_2}{e\sqrt{\frac{Ks^2}{\Theta}}}$$

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{S_0\sqrt{\frac{Ks^2}{\Theta}}}{\omega_2 Ks} = \frac{S_0\sqrt{K}}{\omega_2\sqrt{\Theta K}} \quad \beta = \operatorname{arc\,tg}\frac{S_0}{\omega_2\sqrt{\Theta K}}$$

$$0 = e\sin\operatorname{arc\,tg}\frac{S_0}{\omega_2\sqrt{\Theta K}} - \frac{S_0}{Ks}$$

$$e = \frac{S_0}{Ks\sin\operatorname{arc\,tg}\frac{S_0}{\omega_2\sqrt{\Theta K}}}$$

Setzen wir $\frac{S_0}{\omega_2\sqrt{\Theta K}} = h$, so wird

$$\psi = \frac{S_0}{Ks\sin\operatorname{arc\,tg} h}\sin\left(\tau\sqrt{\frac{Ks^2}{\Theta}} + \operatorname{arc\,tg} h\right) - \frac{S_0}{Ks} = \frac{S_0}{Ks}\left(\frac{\left(\sin s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}}\right)\cos\operatorname{arc\,tg} h}{\sin\operatorname{arc\,tg} h}\right.$$

$$\left. + \frac{\left(\cos s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}}\right)\sin\operatorname{arc\,tg} h}{\sin\operatorname{arc\,tg} h} - \frac{S_0}{Ks} = \frac{S_0}{Ks}\left(\sin s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}}\right)\frac{1}{h}\right.$$

$$+ \frac{S_0}{Ks}\cos s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}} - \frac{S_0}{Ks}$$

Wird für h der Wert eingesetzt, so ergibt sich:

$$\psi = \frac{\omega_2 S_0\sqrt{\Theta K}}{Ks\ S_0}\sin s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}} + \frac{S_0}{Ks}\left(\cos s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}} - 1\right)$$

$$\psi = \frac{\omega_2}{2}\sqrt{\frac{\Theta}{K}}\sin s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}} + \frac{S_0}{Ks}\left(\cos s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}} - 1\right) \qquad (15)$$

Die Veränderlichkeit der Kraft S kann vernachlässigt werden, denn der Winkel, durch welchen die Aenderung der Kraft bedingt ist, ist für die betrachtete Zeit unbedeutend, also der Ausdruck $Ks\psi$ im Vergleich zu S_0 vernachlässigbar. Wir setzen also $K = 0$. In Gleichung (15) stossen wir dadurch auf die unbestimmte Form $0/0$, und müssen deshalb die Werte:

$$\frac{\sin\sqrt{\frac{K}{\Theta}}s\tau}{\sqrt{K}} \text{ und } \frac{\cos\sqrt{\frac{K}{\Theta}}s\tau - 1}{K}$$

durch Limes-Bildung bestimmen:

$$\lim_{K=0}\frac{\sin\left(\sqrt{\frac{K}{\Theta}}s\tau\right)}{\sqrt{K}} = \frac{+s\tau\cos\left(\sqrt{\frac{K}{\Theta}}s\tau\right)2\sqrt{K}}{2\sqrt{\Theta K}} = \frac{s\tau}{\sqrt{\Theta}}$$

$$\lim_{K=0}\frac{\cos\left(\sqrt{\frac{K}{\Theta}}s\tau\right) - 1}{K} = \frac{-s\tau\sin\left(\sqrt{\frac{K}{\Theta}}s\tau\right)}{2\sqrt{\Theta K}} = \frac{0}{0}$$

$$= \frac{-s^2\tau^2 2\sqrt{K}\cos\left(s\tau\sqrt{\frac{K}{\Theta}}\right)}{4\Theta K} = -\frac{s^2\tau^2}{2\Theta}.$$

Nach Einsetzen dieser Werte in (15) ergibt sich:

$$\psi = \frac{\omega_2}{s}\frac{\sqrt{\Theta}s\tau}{\sqrt{\Theta}} - \frac{S_0}{s}\frac{s^2\tau^2}{2\Theta} = \omega_2\tau - \frac{S_0 s\tau^2}{2\Theta}. \qquad (16)$$

III.

Während der Zeit τ durchläuft der Finger 1 den Weg $x = v_{1p}\,\tau$, der Finger 2 dreht sich um den Winkel ψ bestimmt durch die Gleichung 16. Die Entfernung y ist durch die Gleichung gegeben (Fig. 10).

$$y = \varrho \sin(\alpha-\delta) - \varrho \sin(\alpha-\delta\,\psi) - x \sin\alpha.$$

Nach Einsetzen für ψ und x erhalten wir die Abhängigkeit für y von der Zeit.

$$y = \varrho \left\{ \sin(\alpha-\delta) - \varrho \sin\left[\alpha-\delta-\frac{v_{1p}}{r}(1+K)\,\tau + \frac{S_0 s\tau}{2\,\Theta}\right]\right\} - v_{1p}\,\tau \sin\alpha \qquad (17)$$

Zahlenbeispiel für Fig. 11c. Es sei:

$\varrho = 0{,}055$ m
$r = 0{,}1263$ m
$s = 0{,}018$ m
$S = 15{,}0$ kg
$\Theta = 0{,}00000462$ kgms²
$\alpha = 23^0\,30'$ $\sin\alpha = 0{,}39875$
$\delta = 2^0\,30'$ $\alpha-\delta = 21^0$, arc $(\alpha-\delta) = 0{,}36652$
$\sin(\alpha-\delta) = 0{,}35837$, $K = 0{,}2$, $v_{1p} = 3$ m/s

$$y = 0{,}054 \left\{ 0{,}35837 - \sin\left[0{,}36652 - \frac{3\cdot 1{,}2}{0{,}1263}\,\tau + \frac{15\cdot 0{,}0018}{2\cdot 0{,}00000462}\,\tau^2\right]\right\} - 3\cdot 0{,}398752\,\tau$$

$$= 0{,}054 \left\{ 0{,}35837 - \sin\left[0{,}36652 - 28{,}504\,\tau + 29{,}231\,\tau^2\right]\right\} - 1{,}1963\,\tau.$$

Für verschiedene τ erhalten wir die Werte y (in mm):

τ_s =	0,0001	0,00015	0,0002
y_{mm} =	0,0105	0,00361	0,01192

Daraus ersieht man, dass während der Zeit τ = 0,00015—0,0002 eine neuerliche Berührung der Kontaktfinger entsteht. Sie entsteht stossartig, doch ist dieser Stoss bedeutend schwächer als der vorhergehende (angenähert 5mal kleinere Relativgeschwindigkeit), wobei die Relativgeschwindigkeit nach dem Stoss etwa 25mal geringer ist.

Der maximale Ausschlag beim Auftreffen ist ungefähr 1/100 mm. Die dämpfende Wirkung der Feder zeigt sich, wenn wir die Entfernung y für verschiedene τ bei konstantem ω_2 bestimmen. Dann ist:

τ_s =	0,0001	0,00015	0,0002
y_{mm} =	0,0245	0,0365	0,0475

Wie schon erwähnt, wurden die passiven Widerstände nicht berücksichtigt und es wird daher in Wirklichkeit die maximale Entfernung y und die Zeit, in welcher sich die Finger nicht berühren, noch kleiner sein.

Die Abhängigkeit von y und der Zeit wird auch aus dem Diagramm (Fig. 10 e) klar.

Ein Kontakt ohne Stoss könnte dadurch erreicht werden, dass die Kontaktflächen so ausgebildet werden, dass der Finger 2 bei der Endgeschwindigkeit des Fingers 1 im Augenblick der Berührung sich so drehen würde, dass seine Geschwindigkeit unendlich klein wäre. Es müsste daher der Punkt 0 im Unendlichen liegen, also $\alpha = 0$ (Fig. 10 a). Eine derartige theoretische Anordnung ist in Fig. 10 d angedeutet. Es würde dabei genügen, die Feder auf die Ueberwindung eines sehr geringen Momentes und des entsprechenden Momentes elektrodynamischen Ursprunges zu dimensionieren.

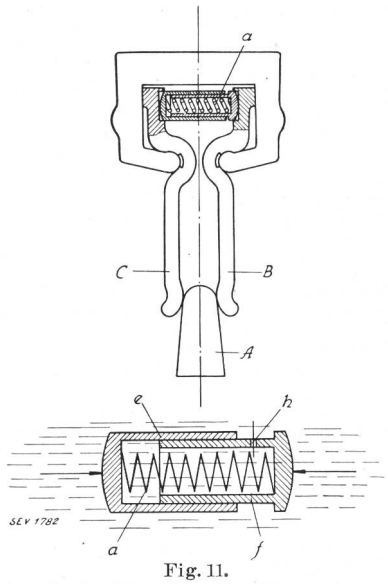

Fig. 11.
Hydraulische Dämpfung der Fingerkontakte.

In der Praxis ist es allerdings aus Gründen der Herstellung sowie mit Rücksicht auf die Abnützung der Finger unmöglich, $\alpha = 0$ zu machen; es entsteht daher stets ein, wenn auch kleiner, Stoss, welcher immerhin bei grossen Stromstärken zu ernsten Störungen Anlass geben kann.

Auf Grund der angeführten experimentellen und theoretischen Untersuchungen wurde zur hydraulischen Dämpfung der Fingerkontakte nach Fig. 11 übergegangen.

Die Feder ist in zwei Hülsen *e* und *f* angeordnet, welche mit Oel gefüllt sind. Beide Hülsen sind ineinander geschoben und können sich gegenseitig verschieben, wobei das Oel langsam herausfliesst, entweder durch Undichtheit der Hülsen bzw. durch die kleine Oeffnung *h*. Wenn das bewegliche Messer *A* zwischen die beiden massiven Finger *C* und *B* gelangt, können dieselben nicht abspringen, weil das Oel nur langsam abfliessen kann; ein kurzer Stoss wird somit vollkommen abgedämpft. Beim Ausschalten entfernt die Feder *a* die Hülsen voneinander und die nötige Oelmenge wird in das Innere der Hülse gesaugt.

Gegenüber der Fabrikation von konzentrischen Kontakten für grosse Dauerströme weist diejenige der beschriebenen Bauart wesentliche Vorteile auf, denn hier genügt das Aneinanderreihen von mehreren Fingern, während bei konzentrischen Kontakten besondere Kombinationen erforderlich sind.

Zweck dieser Darlegungen war, zu zeigen, dass es möglich ist, unter Berücksichtigung aller Erscheinungen elektrischer und mechanischer Natur, Fingerkontakte für hohe Stromstärken zu konstruieren, welche den hohen Ansprüchen an Schalterkontakte genügen.