

# BERECHNUNG DER ELEKTRODYNAMISCHEN REPULSIONSKRÄFTE BEI ASYMMETRISCHEN ELEKTRISCHEN KONTAKTEN

Von

I. MOLNÁR

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Apparate, Technische Universität, Budapest

(Eingegangen am 3. Januar 1965)  
Vorgelegt von Prof. Dr. J. EISLER

## I. Überblick

Als Wechselwirkung zwischen dem das elektrische Kontaktsystem durchfließenden Strom und dem umgebenden Magnetfeld entsteht eine Kraft, die das Kontaktsystem aus seiner ursprünglichen Lage zu verschieben trachtet. Diese Kraft entsteht einerseits längs der Kontaktbrücke, andererseits im Umkreis des Kontaktes. In der vorliegenden Arbeit wird nur die im Umkreis des Kontaktes entstehende Kraft behandelt.

Der elektrische Kontakt zwischen zwei Metallstücken entsteht nie auf der gesamten Berührungsfläche, sondern über Punkte oder Punktmengen. Infolgedessen verengen sich die einzelnen Stromfäden, wie aus Abb. 1 ersichtlich, und wirken im verengten Teil mit einer Abstoßungskraft aufeinander und somit auch auf das Metallstück. Bei den meisten Schaltgeräten kommt es darauf an, die auf diese Weise entstehende elektrodynamische Kraft zu kennen und zu bestimmen, da sich die Kontaktdruckabnahme und die Trennung und Schweißneigung der Kontakte durch Kompensation dieser sowie der auf der Brücke entstehenden Kraft vermeiden läßt.

Die europäische Fachliteratur kennt mehrere Formeln für die im Umkreis des Kontaktes auftretenden Abstoßungskräfte (im weiteren Kontaktkräfte). Eine Gegenüberstellung dieser Formeln ist aus Abb. 2 ersichtlich. Es handelt sich um exakte oder Näherungsformeln ausschließlich für die einfachste — und zugleich prinzipielle — Kontaktform, d. h. für Stabkontakte mit Punktberührung. Die bekanntesten unter ihnen sind die Näherungsformeln von HOLM [1], KESSELRING [2], RZIHA [3], HÜTTE [4] und ZAJIC [5]. Weniger bekannt ist die aus den Besselschen Funktionen mit einigen unwesentlichen Vereinfachungen abgeleitete Funktion OLLENDORFS. BIERMANN'S [7], CLERC [8] bestimmten die Kontaktkraft auf Grund von Messungen, während ROTH [9] und STETTNER [10] ihre Zusammenhänge aus Messungen rechnerisch ableiteten.

Die Angaben über die Kontaktkraft zeigen ziemliche Abweichungen voneinander und betreffen im allgemeinen die vereinfachte Kontaktform. Die Ergebnisse der Publikationen [1], [3], [4], [5], [6] und [10] informieren nur über die elektrodynamische Kraft im Umkreis der Berührungsstelle,

während die Ergebnisse der Publikationen [2], [7], [8] und [9] die am Gesamtkontakt auftretenden elektrodynamischen Kräfte behandeln. Anhand dieser Formeln läßt sich nur die auf den Punktkontakt wirkende Kraft berechnen, während sie Linienkontakte oder die auf mehreren Berührungspunkten anlie-

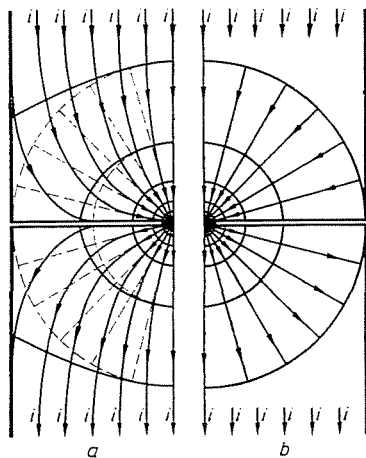
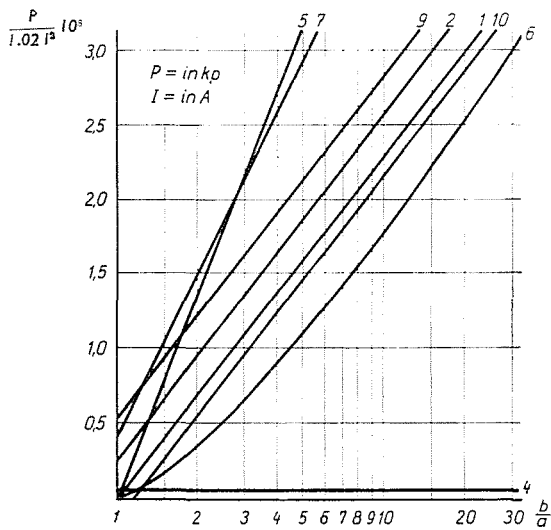


Abb. 1. Strom- und Potentialverteilung der Stromverengung  
 a) effektive Verteilung  
 b) idealisierte Verteilung



Lit. Daten	Verfasser	Elektrodynamische Kraft (kp)	Kontakt form
1.	R. Holm	$P = 1,02 I^2 10^{-8} \ln \frac{b}{a}$	
2.	F. Kesselring	$P = 1,02 I^2 10^{-8} (\ln \frac{b}{a} + 0,25)$	
3.	R. Rziha	$P = \left(\frac{I}{10000}\right)^2 5$	
4.	Hütte IVa	$P = 0,05 I^2$	
5.	V. Zajic	$P = 2,04 I^2 10^{-8} \ln \frac{b}{a} [p]$	
6.	F. Ollendorf	$P = 1,02 I^2 10^{-8} f\left(\frac{b}{a}\right)$	
7.	J. Biermans	$P = 1,6 I^2 10^{-8} (\ln \frac{b}{a} + 0,25)$	
8.	A. Clerc	$P = 1,6 I^2 10^{-8} \log \frac{60}{a}$	
9.	A. Roth	$P = 1,02 I^2 10^{-8} (\ln \frac{b}{a} + 0,5)$	
10.	H. Stettner	$P = I^2 (1,02 \ln \frac{b}{a} - 0,139) 10^{-8}$	

a = Kontaktpunkt oder Radius der Zuleitung  
 b = Radius des Kontaktausmasses  
 c = Hälfte der Entfernung zwischen zwei Kontaktpunkten des Brückenkontaktes

Abb. 2. Vergleich von Funktionen, die von verschiedenen Verfassern stammen

genden Kontakte nicht erfassen. Die modernen Konstruktionsmethoden erfordern eine genauere und allgemeinere Kenntnis der Kontaktkraft, und aus diesem Grunde setzt sich die vorliegende Arbeit das Ziel, eine annähernde, jedoch ziemlich genaue Methode zur Berechnung und Messung der auf Einwirkung des Mehrpunktkontaktes entstehenden Kontaktkraft auszuarbeiten.

## II. Berechnung der elektrodynamischen Kraft

Im Umkreis um einen Primärstrom ( $I_p$ ) wird ein durch das Vektorpotential  $A_p$  gekennzeichnetes Magnetfeld erzeugt, das sich zu

$$A_p = \frac{\mu}{4\pi} \int_V \frac{J_p}{r} dV \quad (1)$$

schreibt, wenn

$\mu$  die Permeabilität des Mediums,

$dV$  das Elementarvolumen und

$J_p$  die im Elementarvolumen herrschende Stromdichte bezeichnet.

Wenn in diesem Magnetfeld auch noch ein Sekundärstrom  $I_s$  fließt, gilt für die magnetische Energie des Systems

$$W_{mpt} = I_s (A_p dl), \quad (2)$$

worin

$dl$  die in Richtung des Sekundärstromes meßbare Leitungslänge bedeutet.

Bekannt ist noch die für die magnetische Induktion und das Vektorpotential gültige Beziehung

$$B_p = \text{rot } A_p, \quad (3)$$

die — nach dem Stockesschen Satz umgeformt —, in Gleichung (2) eingesetzt werden kann, die damit die Form

$$W_{mpt} = I_s \int_F (B_p dF) \quad (4)$$

annimmt, wobei  $F$  die in die magnetischen Induktionslinien fallende und hier geprüfte Fläche und  $dF$  deren Elementarteil bezeichnet.

Die Kraft, die auf einen vom Strom  $I_s$  durchfloßenen Leiter ( $l_s$ ) mit der Einheitslänge wirkt, erhält man durch Ableitung Gleichung (4) nach der Verschiebungsrichtung zu

$$p_{wps} = I_s (l_s B_p) = A (j_s B_p), \quad (5)$$

worin

$A$  den vom Strom  $I_s$  durchfloßenen Querschnitt und  $j_s B_p$  die auf die Volumeinheit wirkende Kraft bedeutet.

Es soll nun der vereinfachte Kontakt gemäß Abb. 3 geprüft werden, dessen Mittellinie in die Achse  $z$  eines durch die Koordinaten  $r, \varphi, z$  bestimmten Systems zu liegen kommt. Die in die Richtung der Koordinaten weisenden Vektoreinheiten seien der Reihe nach  $1_r, 1_\varphi$  und  $1_z$ . Zur Vereinfachung der Berechnung wird angenommen,

1. daß der Ein- und Austrittspunkt des Stromes vom Kontaktpunkt entfernt liegt und

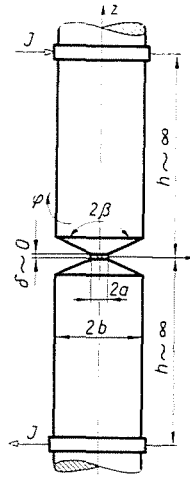


Abb. 3. Kennwerte der geprüften Kontaktform

2. daß die Stromverteilung, die auf Abb. 1 auf Seite  $a$  in der Verengung angegeben ist, in der auf Seite  $b$  dargestellten Weise ersetzt wird.

Im oberen Kontaktstück fließt der Primärstrom, der die magnetische Induktion  $B_p$  nicht nur längs des oberen, sondern auch längs des unteren Kontaktes erzeugt. Ihr Wert errechnet sich anhand der umgeformten Gleichung (3) zu

$$\overline{dB'_p} = \frac{\mu_0}{4\pi} dI' \frac{\overline{dR_1} \times r^0}{r^2} \quad (6)$$

was dem Biot—Savartschen Gesetz entspricht.

In Abb. 4 wird ein elementarer Stromkanal des vereinfachten Kontaktes gemäß Abb. 3 geprüft, der im Abstand  $r$  eine Induktion  $dB$  erzeugt. Es sei angenommen, daß der Strom  $I_p$  in einem Kugelausschnitt mit dem Spitzenwinkel  $2\beta_1$  und der Erzeugenden  $R_1$  eintritt, wo er gleichmäßig verteilt ist. Verfasser hat nachgewiesen [11], daß die sich verengenden Stromfäden und

der gerade Leiter gemäß Abb. 5 praktisch gleiche Felder erzeugen, wenn in ihnen der Strom  $I_p$  fließt. An der bezeichneten Stelle beträgt daher die Induktion

$$-1_{\varphi} dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I_p \frac{\sin \alpha \, d\alpha}{R_2 \sin \gamma_2}. \quad (7)$$

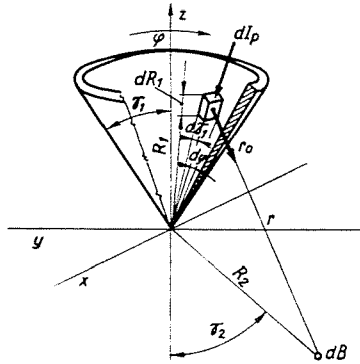


Abb. 4. Das durch die Elementarstücke des Stromleiter-Kegelschalenkanals erzeugte Magnetfeld

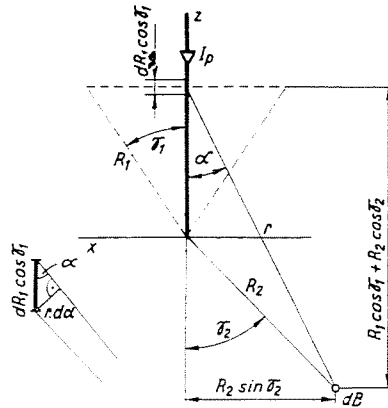


Abb. 5. Das durch den — den Kegelschalenkanal ersetzenden — Stromfaden erzeugte Magnetfeld

Die durch den oberen Kontakt in seiner gesamten Länge erzeugte Induktion ergibt sich durch Integration zwischen den Grenzen  $\alpha_1 = 0$  und  $\alpha_2 = \gamma_2$ , und man hat

$$|B(\gamma_2 R_2)| = \frac{\mu_0}{4\pi} I_p \frac{1 - \cos \gamma_2}{R_2 \sin \gamma_2} = \frac{\mu_0}{4\pi} I_p \frac{\text{tg } \gamma_2/2}{R_2}. \quad (8)$$

In Abb. 6 ist das Feld  $B_p$  dargestellt, in dem der Strom  $dI_s$  in einem Elementarkanal fließt. Laut Gleichung (5) beträgt die auf eine Einheitslängestrecke des Kanals wirkende Kraft

$$p_{ps} = dA(j_s B_p) = (dI_s B_p), \quad (9)$$

und die auf der Strecke  $\overline{dR}_2 = (l_r \sin \gamma_2 - l_z \cos \gamma_2) dR_2$  wirkende Kraft

$$dP_s = dI_s(dR_2 B_p) \quad (10)$$

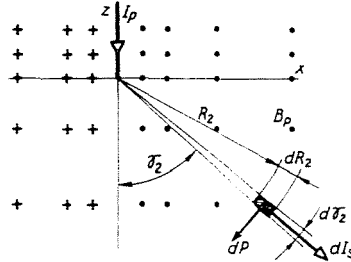


Abb. 6. Elementarstücke des primären Magnetfeldes und des sekundären Stromkanals

Da der Elementarstrom eine ähnliche Form hat, wie durch (8) beschrieben, läßt sich schreiben

$$\begin{aligned} \overline{dP}_s &= \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \frac{\sin \gamma_2 d\gamma_2}{1 - \cos \beta_2} \frac{d\varphi}{2\pi} \begin{vmatrix} l_r & l_\varphi & l_z \\ \sin \gamma_2 & 0 & -\cos \gamma_2 \\ 0 & -\operatorname{tg} \frac{\gamma_2}{2} & 0 \end{vmatrix} \frac{dR_2}{R_2} = \\ &= \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \frac{\sin \gamma_2 d\gamma_2}{1 - \cos \beta_2} \frac{d\varphi}{2\pi} \frac{dR_2}{R_2} \left( -l_r \operatorname{tg} \frac{\gamma_2}{2} \cos \gamma_2 - l_z \operatorname{tg} \frac{\gamma_2}{2} \sin \gamma_2 \right), \quad (11) \end{aligned}$$

wobei  $I^2 = I_p I_s$ . Eine Verschiebung ist nur in der Richtung  $l_z$  möglich, darum genügt es, bloß diese Komponente in Betracht zu ziehen. Das negative Vorzeichen weist darauf hin, daß der untere Kontakt bemüht ist, sich nach unten zu bewegen. Die Integrationsgrenzen sind die folgenden:

$$R_{21} = a' \quad R_{22} = b' \quad \gamma_{21} = 0 \quad \gamma_{22} = \beta_2, \quad \varphi_1 = 0, \quad \varphi_2 = 2\pi.$$

Damit gilt für die Kontaktkraft

$$P_s = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 \int_{a'}^{b'} \frac{dR_2}{R_2} \int_0^{\beta_2} \sin \gamma_2 d\gamma_2 \int_0^{2\pi} \frac{d\varphi}{2\pi} = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 (1 - \cos \beta_2) \ln \frac{b'}{a'}. \quad (12)$$

Mit den Bezeichnungen der Abb. 3 ist

$$b' = \frac{b}{\sin \beta_2} \quad \text{und} \quad a' = \frac{a}{\sin \beta_2},$$

und die Kontaktkraft

$$P_s = \frac{\mu_0}{4\pi} I^2 (1 - \cos \beta_2) \ln \frac{b}{a}. \quad (13)$$

Dies bezieht sich auf den unteren Kontakt mit dem Kegelwinkel  $2\beta_2$ , während die auf den oberen Kontakt wirkende Kraft verhältnismäßig mit  $(1 - \cos \beta_1)$  sein wird, wenn die Größen  $a$  und  $b$  mit den Abmessungen des unteren Kontaktes identisch sind. Wie ersichtlich, wird der Wert der Kontaktkraft auch vom Kegelwinkel oder vom Abrundungsradius beeinflusst. Auch ist bei einem asymmetrischen Kontaktsystem die Kontaktkraft bei jedem Glied verschieden.

Ähnlich läßt sich die Kontaktkraft auch für den Linienkontakt bestimmen.

Zur Berechnung der Kontaktkräfte hat Verfasser — in Anpassung der Ergebnisse seiner annähernden Berechnungen an die Meßergebnisse — folgende Beziehungen veröffentlicht [11]:

Beim *Punktkontakt*

$$P_s = 1,02 I^2 \left(1 - \frac{b}{3R}\right) 10^{-8} \ln \left(\frac{4b}{7a} + \frac{3}{7}\right) \quad [\text{kp}], \quad (14)$$

wenn  $a$  den Radius der Kontaktstelle,  $b$  den Radius des Kontaktstückes und  $R$  den Abrundungsradius der Kontaktfläche bezeichnet. Die Stromstärke  $I$  ist in Ampere einzusetzen.

Beim *Linienkontakt*

$$P_s = 1,02 I^2 \left(2 + \frac{0,75}{1+l}\right) \left(1 - \frac{b}{4R}\right) 10^{-8} \ln \frac{1 + l/40\pi}{\frac{a}{b} + l/40\pi} \quad [\text{kp}], \quad (15)$$

worin  $a$  die halbe Breite der Kontaktstelle,  $b$  die halbe Breite des Kontaktstückes, und  $R$  den Abrundungsradius der Kontaktfläche bedeutet. Die Kontaktlänge beträgt  $l$  und ist in Millimetern einzusetzen.

### III. Angenäherte Berechnung der elektrodynamischen Kraft bei Kontakten mit komplizierter Anordnung

Unter II wurde darauf hingewiesen, daß Leiter mit sich verengenden Stromfäden und Leiter, deren Querschnitt mit dem engsten Querschnitt (Kontaktfläche) übereinstimmt, im Feld des verschiebbaren Kontaktstückes

praktisch identische Magnetfelder erzeugt. Auf dieser Grundlage läßt sich noch annehmen, daß der das Magnetfeld erregende Teil eines Kontaktes mit mehreren Kontaktstellen für Zwecke der Messung und Berechnung durch einen Langleiter ersetzt werden kann, dessen Querschnitt mit der Kontaktfläche übereinstimmt. Bei der Berechnung des Magnetfeldes können zwei Annäherungen gemacht werden:

- a) wenn die Kontaktstellen nahe nebeneinander liegen, spannt sich fast das gesamte Feld um die Kontaktstellen;
- b) wenn die Kontaktstellen fern voneinander liegen, erregt jeder einzelne Stromfaden um sich selbst das Feld.

Im ersten Falle läßt sich der Radius der resultierenden Kontaktfläche aus der Entfernung der um die drei Punkte gezogenen Schnur » $k$ « bestimmen, die aus der Beziehung

$$a_k = \frac{k}{2\tau} \quad (16)$$

berechnet werden kann. Im zweiten Falle muß der Radius  $a_1, a_2 \dots a_n$ , je einer Kontaktfläche in Rechnung gestellt werden.

Ist das Magnetfeld bekannt, kann die Kontaktkraft schrittweise bestimmt werden. Das verschiebbare Kontaktstück wird durch die aus der Mittellinie der Kontaktfläche ausgehende Ebene in mehrere Abschnitte geteilt und der Strom in die Symmetrieebene dieser Abschnitte verlegt gedacht. Bei  $n$  voneinander entfernter liegenden Punkten beträgt im Sinne der Gleichung (5) entsprechend der Gleichung (14) die Kontaktkraft

$$P = n \left[ 1,02 \frac{I}{n} \sum_i \Delta_i \ln \left( \frac{4b_i}{7a_n} + \frac{3}{7} \right) \right] 10^{-8} \text{ [kp]}, \quad (17)$$

wenn  $b_i$  den Radius der Mittelebene des  $i$ -ten Abschnittelementes, und  $\Delta_i$  seinen Strom bezeichnet, der der Stirnfläche des Abschnittelementes proportional ist. Wenn die Kontaktflächen nahe nebeneinander liegen, kann die Gleichung (14) unmittelbar angewendet werden.

Abb. 7 stellt die Änderung der Kontaktkraft des Kontaktes mit drei Berührungspunkten dar. Kurve 1 ist nach Gleichung (14) berechnet, in die der resultierende Radius laut Gleichung (16) eingesetzt wurde. Die Kurve 2 ist die graphische Darstellung der Gleichung (17).

Die Meßwerte zeigen eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten, und wenn  $r/b < 0,65$ , dann ergibt Gleichung (14), bei  $r/b > 0,65$  hingegen Gl. (17) das entsprechende Resultat.

In Schaltgeräten finden sich oft parallel geschaltete Kontakte. Die Verteilung des magnetischen Feldes ist komplizierter als im obigen Fall, wes-



halb sich für solche Fälle nach obiger Rechenmethode das gewünschte Ergebnis nicht erzielen läßt. In Abb. 8 ist die Feld- und Stromverteilung eines Zweipunktkontaktes dargestellt, aus der ersichtlich ist, wie kompliziert die Beziehung zwischen Stromfäden und Feld zwischen den beiden Punkten ist. Es wurde angenommen, daß dieser Zusammenhang dem beim Linienkontakt entstehenden

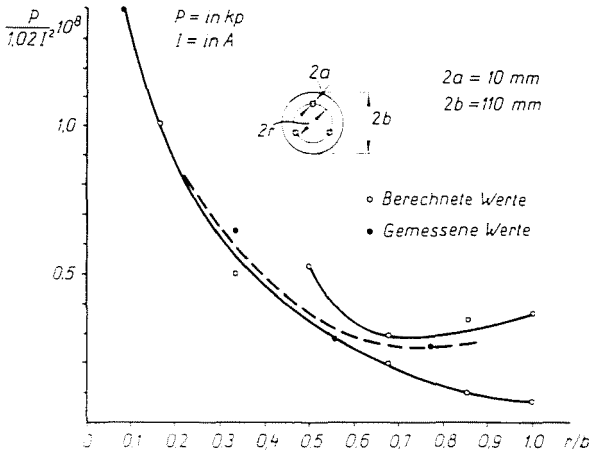


Abb. 7. Formfaktor des an drei Punkten aufsitzenden Kontaktes

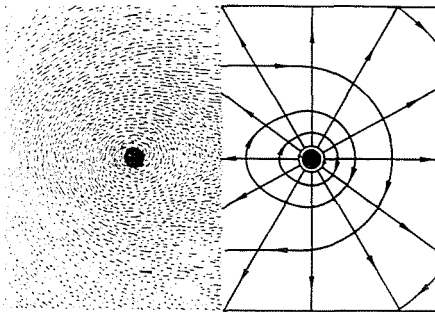


Abb. 8. Längs eines Zweipunktkontaktes auftretendes Magnet- und Strömungsfeld

den Zusammenhang zwischen Magnetfeld und Stromverteilung näher steht als dem beim Punktkontakt. An der Außenfläche der Kontaktstelle ist der Zusammenhang so eindeutig, daß er laut Gleichung (17) berechnet werden kann.

Diesen Überlegungen entsprechend wurden die in den Abb. 9 und 10 aufgetragenen Funktionen berechnet. Die Berechnung erfolgte nach der Formel

$$P = 1,02 \cdot 10^{-8} \left\{ I \cdot \Delta_p \cdot f \left( \frac{b}{a} \right)_v + 2 \left[ \frac{I}{2} \sum_i \Delta_p \cdot f \left( \frac{b}{a} \right)_p \right] \right\} \quad [\text{kp}], \quad (18)$$

in der  $a$  und  $b$  die Halbmesser der Kontaktstellen und die halben Breiten der Kontakte bezeichnen, während der Index  $v$  die Berechnung innerhalb der beiden Kontaktstellen und der Index  $p$  die Berechnung der Strecke außer-

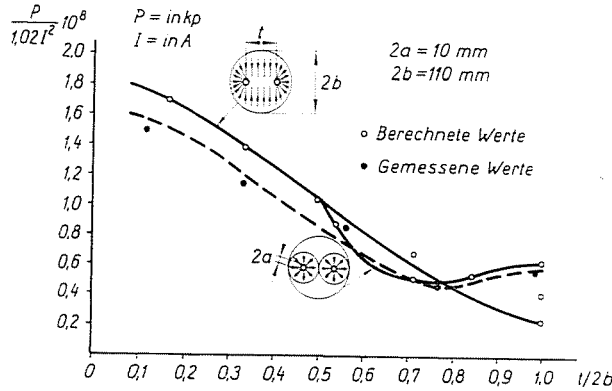


Abb. 9. Formfaktor des an zwei Punkten aufsitzenden Kontaktes

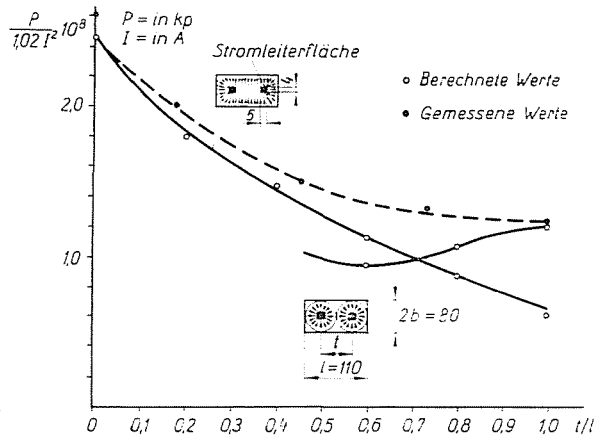


Abb. 10. Formfaktor des an zwei Punkten aufsitzenden Kontaktes

halb der Kontaktstellen betrifft. Der im verschiebbaren Kontakt fließende Strom ( $I$ ) wurde als proportional der Stirnfläche des Kontaktgliedes angenommen. In Formel (18) bezeichnet

$$f\left(\frac{b}{a}\right)_r = \left(2 + \frac{0,75}{1+l}\right) \ln \frac{1 + l/40\pi}{\frac{a}{b} + l/40\pi} \tag{19}$$

den Formfaktor des Linienkontaktes,

$$f\left(\frac{b}{a}\right)_p = \ln\left(\frac{4b_i}{7a} + \frac{3}{7}\right) \tag{20}$$

dagegen den des Punktkontaktes. Die berechneten Werte stimmen mit den gemessenen Werte in befriedigendem Maße überein, und für  $t/l < 0,7 \div 0,85$

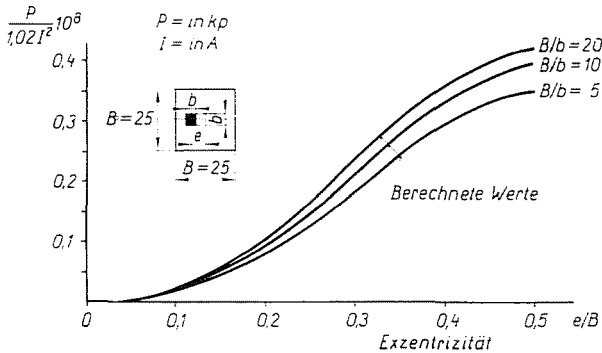


Abb. 11. Der durch die mehrstufige Rechenmethode berechnete Formfaktor des Kontaktes mit exzentrischer Berührungsfläche. Die berechneten Werte stellen das Zweifache des Meßresultates (10) dar

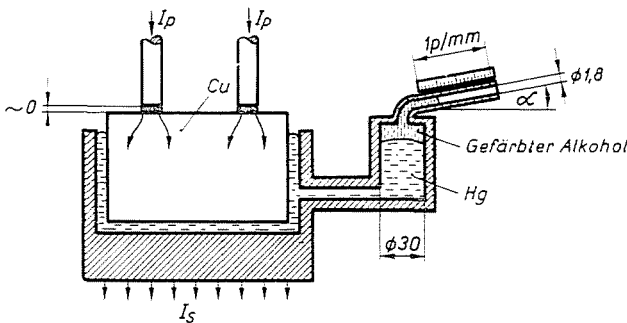


Abb. 12. Schema der Kontaktkraft—Meßvorrichtung

ergab die Gleichung (18), bei  $t/l > 0,7 \div 0,85$  die Gleichung (17) das günstigere Ergebnis.

In Abb. 11 sind die rechnerisch ermittelten Werte des durch die Exzentrizität bedingten Kontaktkraftzuwachses aufgetragen. Aus der Abbildung geht hervor, daß der Zuwachs im Extremfall 35 ÷ 45% beträgt. Bei starren Linienkontakten, bei denen eine asymmetrische Berührung vorkommen kann, darf diese Wirkung nicht vernachlässigt werden.

#### IV. Meßvorrichtung

Zur Messung wurde die aus Abb. 12 ersichtliche Hydraulik angewandt. Die Struktur, Abmessung und Funktion der Hydraulik stimmte mit der in der Publikation [11] beschriebenen überein. Eine wesentliche Abweichung zeigte sich bloß insofern, als hier die durch die Quecksilberschicht erzeugte Äquipotentialfläche als Ebene angenommen wurde. Diese Potentialfläche bildet sich zwangläufig, weil der spezifische Widerstand des Kupfers rund 1/50 desjenigen des Quecksilbers beträgt. Sein Störeffekt konnte dadurch vermindert werden, daß der Schwimmer ziemlich dick gewählt wurde.

Eichung, Messung und Wertung erfolgt genau wie unter [11] beschrieben.

#### V. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden allgemeine Formeln aufgestellt, die bei Messung und Berechnung praktisch anwendbar sind. Die Größe der Kontaktkraft wird in folgender allgemeiner Gleichung ausgedrückt:

$$P_n = 1.02 \cdot 10^{-8} I_n \sum_i \Delta_i f \left( \frac{b}{a}, l, R \right) \quad [\text{kp}]. \quad (21)$$

Diese Formeln liefern nur dann richtige Ergebnisse, wenn sich der das Magnetfeld erzeugende Stromfaden auf einer langen Strecke mit der Symmetrielinie des Kontaktes (die senkrecht auf die Kontaktfläche verläuft sowie mit der Symmetrielinie deckt, die den sekundären Stromfäden zugehört).

Beim Stromübergang in mehreren Punkte ändert sich die Kontaktkraft je nach der Lage der Stromübergangsstellen. Beim Dreipunktkontakt entspricht im allgemeinen der resultierenden Kontaktfläche jener Kreisdurchmesser, der aus dem Umfang des Dreiecks um die Kontaktpunkte berechnet werden kann, und diese ist auch bei der Berechnung der Kontaktkraft in Betracht zu ziehen. Beim Zweipunktkontakt läßt sich die resultierende Kontaktkraft annähernd berechnen. Die Kraft, die auf die Strecke zwischen den Kontaktpunkte entfällt, wird anhand der Linienkontaktgleichung, jene Kraft hingegen, die auf die äußere Strecke entfällt, anhand der Punktkontaktformel berechnet. Liegen die Stromübergangsstellen weiter voneinander entfernt und ist auch die Symmetrie des primären Magnetfeldes im großen und ganzen gesichert, wird man die Kontaktkräfte einzeln berechnen und addieren. Von den auf diese zwei Arten ermittelten Werten ist immer der höhere Wert zu nehmen.

#### Literatur

1. HOLM, R.: Electric Contacts Handbook. 3. Aufl. Berlin 1958, Springer Verlag, S. 525.
2. KESSELRING, F.: Theoretische Grundlagen zur Berechnung der Schaltgeräte. Berlin 1943. Walter de Gruyter Verlag, S. 98.
3. RZIHÁ, R.: Starkstromtechnik, Bd. 2. S. 155.
4. HÜTTE IV. A.: Des Ingenieurs Taschenbuch. Berlin 1957. Verlag Wilhelm Ernst und Sohn. S. 469.
5. ZAJIC, V.: High Voltage Circuit Breakers. Prag 1957. Verlag Artia, S. 163.
6. OLENDORF, F.: Berechnung magnetischer Felder. Wien 1952. Springer Verlag, S. 398.
7. BIERMANN, J.: Überströme in Hochspannungsanlagen. Berlin 1926. Springer Verlag, S. 368.
8. CLERC, A.: Rev. Gen. de l'Electr. **24**, 217, 255 (1928).
9. ROTH, A.: Hochspannungstechnik. Wien 1950. Springer Verlag, S. 444.
10. STETTNER, H.: Die Beanspruchung ruhender Kontakte durch elektrodynamische Kräfte. Dissertation, 1962, Darmstadt.
11. MOLNÁR, I.: Über die statischen elektrodynamischen Kräfte an Kontakten. IX. Internationales Kolloquium. (12.–16. Oktober 1964. T. H. Ilmenau).

István MOLNÁR, Budapest XI. Egri József utca 18–20, Ungarn.