

MEHRSEITIGE PRÜFUNG ELEKTRISCHER PUNKTKONTAKTE

Von

I. MOLNÁR

Lehrstuhl für Hochspannungstechnik und Apparate

Technische Universität Budapest

(Eingegangen am 3. Januar 1965)

Vorgelegt von Prof. Dr. J. EISLER

I. Überblick

Am häufigsten kommt die einfachste Form des elektrischen Kontaktes, der in einem Punkt Berührung findende punktförmige Kontakt vor. Der vorherrschenden Praxis nach wird der Widerstand derartiger elektrischer Kontakte auf folgende zweierlei Arten berechnet.

a) Anhand der theoretischen Formel

$$R_{sz} = \frac{\varrho}{2a}, \quad (1)$$

die von HOLM [1] publiziert wurde, zuvor jedoch schon von mehreren anderen Autoren [2], [3] berechnet worden war; sie stellt den Widerstand zweier unendlicher Halbkugeln dar, die miteinander über eine Verengung mit dem Radius a und der Länge 0 verbunden sind, wobei ϱ den spezifischen Widerstand des Werkstoffes bezeichnet.

b) Nach der aus Meßergebnissen durch Linearisierung aufgestellten Formel

$$R_{sz} = \frac{C}{Pz}, \quad (2)$$

wobei P die auf den Kontakt wirkende Druckkraft bedeutet, während C und z Konstanten sind. Zu dieser Formel gelangten verschiedene Verfasser [4, 5, 6] anhand ihrer auf gekreuzten Metallstäben, Stab- oder praktischen Kontakten ausgeführten Messungen.

Der Zusammenhang zwischen den Formeln (1) und (2) ergibt sich, wenn die in der Mechanik üblichen Beanspruchungsformeln auf den Radius der Kontaktfläche angewandt werden. Befindet sich die Druckbeanspruchung innerhalb der Elastizitätsgrenze, empfiehlt es sich, nach HERTZ [7] mit der Formel

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right) P \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)^{-1}} \quad (3)$$

zu rechnen. Hier sind E der Youngsche Modul, μ die Poissonsche Konstante und r_1, r_2 die Krümmungshalbmesser der Kontaktglieder.

Verursacht die Beanspruchung eine plastische Formänderung, muß mit der Formel

$$a = \sqrt{\frac{P}{\pi H_K}} \quad (4)$$

gerechnet werden, in der H_K die Härte des Kontaktes bezeichnet. Mit der Formel (3) und nach Zusammenziehung der Stoffkonstanten in die Konstante c_1 nimmt die Gleichung (1) die Form

$$R_{sz} = \frac{c_1}{P^{1/3}}, \quad (5)$$

mit der Formel (4) hingegen die Form

$$R_{sz} = \frac{c_2}{P^{1/2}}, \quad (6)$$

an.

Die Kontaktfläche oxydiert oder es bildet sich an ihr ein Niederschlag infolge Feuchtigkeit oder adsorbierten Gases, eventuell auch ein Ölfilm, deren elektrischer Widerstand zu dem aus (5) oder (6) berechneten Widerstand hinzuzuzählen ist, während Gleichung (2) fallweise den resultierenden Widerstand ergibt. Der aus den Formeln (5) und (6) berechnete Widerstand heißt *Engwiderstand*, während man den Widerstand der auf der Kontaktfläche befindlichen fremden Schicht *Hautwiderstand* nennt. Die Summe der beiden ergibt den *Berührungswiderstand* oder mit anderen Worten den *Übergangswiderstand* [9] der Kontakte.

Der Widerstand der Fremdschicht läßt sich aus der Formel

$$R_h = \frac{\sigma}{a^2 \pi} \quad (7)$$

(1) berechnen, in der σ den Widerstand irgendeiner Haut von der Dicke S und der Oberfläche l bezeichnet (spezifischer Wert des Widerstandes). Wenn die Dicke der Haut 10–30 Å nicht übersteigt, kann man den Wert σ aus dem Tunneleffekt, bei dickerer Haut aus dem Prinzip der Halbleiterleitung bestimmt werden. Die Oberfläche von Edelmetallkontakten ist höchstens von einer 2–5 Å dicken Schicht überbezogen, die kaum einen Widerstand aufweist. An der Oberfläche der Kontakte aus unedlen Metall nimmt die Dicke der Haut und somit auch deren Widerstand mit der Zeit monoton zu. Die Druckkraft des sich zusammendrückenden Kontaktes beschädigt die Haut, deren Widerstand nun auch schon von der Bearbeitung der Kontaktfläche, von der mechanischen Festigkeit des Metalls und der Bean-

sprachung abhängt. Zur Bestimmung des Hautwiderstandes eignen sich praktisch die Ergebnisse MILLIAN—RIEDERS [8] am besten. Ihre Formel für den Kontaktübergangswiderstand lautet

$$R_k = R_e a_e e^{\beta t}, \quad (8)$$

wobei R_e den Engewiderstand, a_e , β Konstanten und t die Zeit in Stunden bezeichnen. Die Werte der Konstanten sind in Tabelle I angegeben.

Tabelle I

Werkstoff	Oberflächenbehandlung	a	$\beta \left[\frac{1}{\text{Stunde}} \right]$
Cu	geschabt, gegläht, el. pol.	10	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	poliert, el. pol. gefettet.	1,5	$1,5 \cdot 10^{-3}$
	gegläht	25	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Ag		10	0
W		2	$0,7 \cdot 10^{-3}$

II. Vergleich der bisher bekannten Ergebnisse, Probleme

Abb. 1 stellt die von mehreren Verfassern gemessene Widerstandsänderung an Kupferkontakten dar. Gestrichelt ist der von Formel (6) berechnete Engewiderstand eingezeichnet (Elektrodenradius $r = 3$ mm, Härte: 55 Brinell), während die übrigen Linien den Durchschnittswert der gemessenen Ergebnisse angeben. Es fällt auf, daß sich jeder Wert der Formel (6) ent-

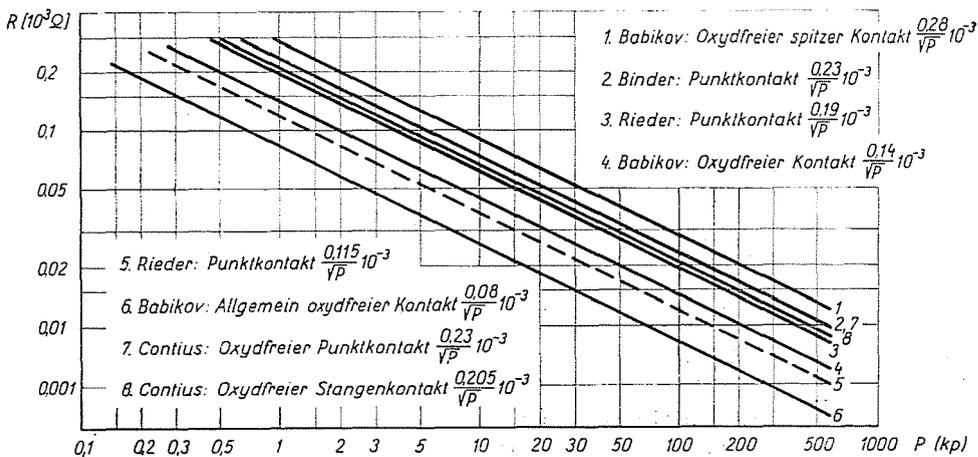


Abb. 1. Empirische Formeln zur Berechnung des Übergangswiderstandes der Punktkontakte

sprechend ändert, obwohl keiner der Autoren erklärt, die Formeln seien nur innerhalb der bleibenden Beanspruchung gültig. Außerdem ist anzunehmen, daß sich praktisch auf jedem Kontakt eine Oxydationshaut befindet, die die Kennlinien unbedingt beeinflussen muß.

Zur Veranschaulichung der Verhältnisse soll ein Kontakt geprüft werden, dessen Oberfläche von einer sehr zähen Fremdschicht bedeckt ist. Bekanntlich ist der Kontakt zwischen Öl und Metalloberfläche besonders stark, eine

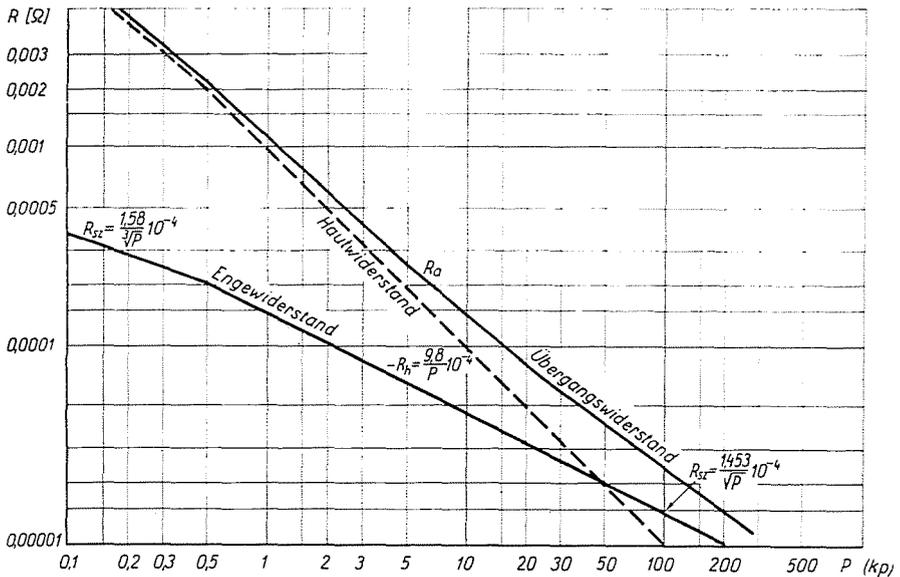


Abb. 2. Berechnete Änderung des Übergangswiderstandes unter Beachtung der theoretischen Angaben

dünne Filmschicht ist also selbst bei hohem Kontaktdruck vorhanden [10]. Abb. 2 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Übergangswiderstand eines mit einem Ölfilm überzogenen Kupferkontaktes einerseits ($H_k = 89$ kp/mm²) und dem Krümmungsradius $r = 3$ mm andererseits dar. Der Engewiderstand wurde aus den Formeln (5) und (6) berechnet, während der Berechnung des Hautwiderstandes (7) ein konstanter Wert von $\sigma = 11 \cdot 10^{-6}$ Ohm mm² zugrunde gelegt wurde. Auf der Abbildung ist der Engewiderstand durch Kurve 1, der Hautwiderstand durch Kurve 2, der resultierende Übergangswiderstand durch Kurve 3 als Funktion der Druckkraft dargestellt. Der resultierende Übergangswiderstand ändert sich wesentlich steiler, als die Funktionen $C/P^{0.5}$ in Abb. 1.

Die Änderung des Übergangswiderstandes nach Abb. 1 wäre nur dann möglich, wenn mit dem Steigen der Druckkraft auch der Wert σ zunehmen würde, was jedoch der Erfahrung widerspricht.

Etwas besser gestaltet sich der Übergangswiderstand eines Kontaktes mit großem Krümmungsradius.

Die üblichen Schwankungen der in der Hertzschen Formel (3) vorkommenden Werte E und μ verursachen nur unwesentliche Änderungen. In Formel (4) weicht die Kontakthärte nach Literaturangaben kaum von der Brinell-Härte ab, was sich ebenfalls nur unwesentlich auf den Übergangswiderstand auswirkt.

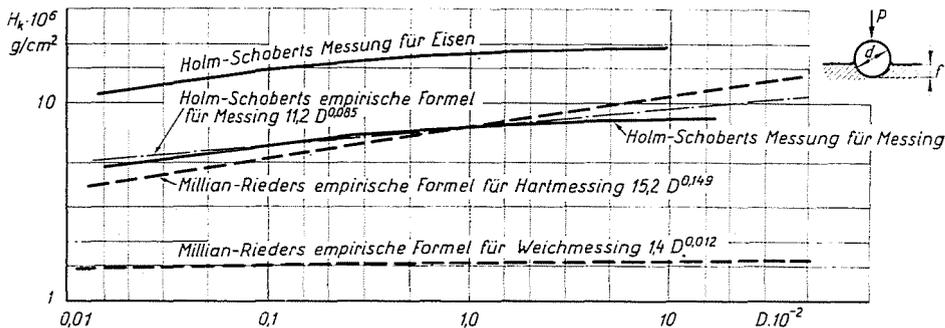


Abb. 3. Bestimmung der Kontakthärte als Funktion der Brinellhärte [D-f(H_B)]

Die Kontakthärte läßt sich anhand der empirischen Formel von HOLM—SCHOBERT [11]

$$H_k = k D^m \quad (9)$$

ermitteln. Das Meßergebnis, die empirische Funktion sowie die ähnlichen Meßergebnisse von MILLIAN—RIEDER [8] gehen aus Abb. 3 hervor. Die Werte k und m in der Formel (9) sind Konstanten, während D in der Form das relative Eindringtiefenverhältnis bezeichnet. Die Bedeutung des Zählers und Nenners ergibt sich aus Abb. 3. Der Wert der Eindringtiefe läßt sich aus den Meßergebnissen anhand der Formel

$$f = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot H_B}$$

bestimmen. Hier bedeuten P die bei der Härtemessung auf die Stahlkugel mit dem Durchmesser d wirkende Kraft und H_B die Brinellhärte des Werkstoffes. Berechnet man den Oberflächenradius des Kontaktes anhand der Formel (4), kann die Oberfläche infolge der durch die Beanspruchung des Werkstoffes erfolgenden Verfestigung nur kleiner sein als die Brinellhärte.

Aus diesen theoretischen Überlegungen ergibt sich, daß die Konstante α der empirischen Formel (2) (der Exponent) vom Zustand der Oberfläche (Bearbeitung, Verunreinigung), die Konstante C hingegen von den Metall-

konstanten (E , μ , H_K) und vom Zustand der Fremdschicht (Altern und Unversehrtheit) bestimmt ist.

Der Vergleich der theoretischen und praktischen Ergebnisse ergab kein homogenes Bild. Die theoretischen und praktischen Formeln des Übergangswiderstandes geben kein auch nur annähernd gleiches Ergebnis. Ebenso ist der Kontakthärte ungeklärt, da sich der weiche Werkstoff durch Druck erhärtet und diese Härte der technisch erreichbaren vermutlich gleich sein muß. Die Angaben bei [8] hingegen sind für weiche und harte Werkstoff verschieden.

Zur Klärung obiger Widersprüche und zur Ableitung genauerer Formeln wurden folgende Messungen beschlossen und ausgeführt.

III. Meßmethode und Auswertung

Auch bisher schon setzten sich mehrere Versuche das Ziel, den Übergangswiderstand von Kontakten aus der Summe der Widerstandskomponenten zu bestimmen. Die günstigste Formel hiezu schreibt sich zu

$$R_k = R_0 + \Delta R_{sz} + R_h, \quad (10)$$

worin R_k der Übergangswiderstand des Kontaktes bezeichnet. Er ergibt sich also aus dem Widerstand R_0 des festen Werkstoffes (dieser stimmt mit jenem Widerstand überein, den man messen würde, wenn der Leiter aus einem zusammenhängenden Stück bestehen würde), ferner aus dem Widerstandzuwachs ΔR_{sz} infolge der Verengung und aus dem Hautwiderstand R_h auf der Kontaktoberfläche. Die bisher erörterten theoretischen Formeln enthalten nur den Wert $R_0 + R_{sz}$ und beziehen sich vor allem auf den Fall einer Halbkugelelektrode unendlicher Ausdehnung oder — mit kleinem Fehler — auf Fälle, in denen die Kontaktoberfläche kleiner ist als $1/30$ der scheinbaren Elektrodenoberfläche. Zur Überbrückung der Schwierigkeiten und genauigkeitshalber wird man zweckmäßig die von Dr. L. C. Roess für Zylinderelektroden berechnete und von KOUWENHOVEN-SACKET [12] durch Messungen nachgeprüfte Formel

$$\Delta R_{sz} = \rho \frac{1}{2a} - \frac{1,409}{2b} + 0,296 \frac{(2a)^2}{(2b)^3} + 0,0525 \frac{(2a)^3}{(2b)^5} + \dots \quad (11)$$

benutzen, in der b den Radius der Zylinderelektrode und a den der Kontaktfläche bezeichnet. Abb. 4 stellt den aus Formel (1) berechneten Wert ΔR_{sz} und den aus Formel (11) berechneten Engewiderstand als Funktion von b/a dar. Zwischen ihnen zeigen sich nur unwesentliche Abweichungen.

Ist der Radius a der Kontaktoberfläche bekannt, kann man den Engewiderstand unmittelbar berechnen. Sind dazu auch R_k und R_0 bekannt,

erhält man sogleich auch den Hautwiderstand. Zunächst ist also der Widerstand R_k , und sodann die Größe der Kontaktoberfläche zu messen bzw. zu bestimmen.

Der Übergangswiderstand läßt sich roh nach der Volt-Ampère-Meßmethode, genau hingegen mit Hilfe eines Kompensators oder einer Meßbrücke messen. Ein genaues Resultat erhält man nur nach Methoden, die auch einen sehr kleinen Spannungsabfall genau messen können. Wenn am Kontakt ein großer Spannungsabfall auftritt, kann damit gerechnet werden, daß der Widerstand der Fremdschicht abbricht (Frittung), so daß ein unter dem tatsächlichen liegender niedrigerer Wert gemessen wird.

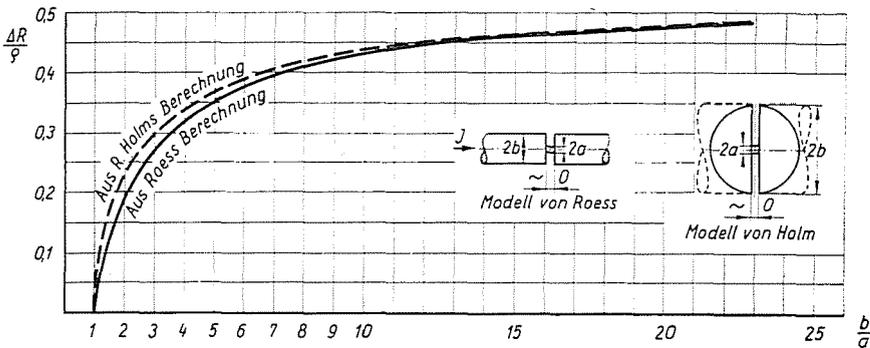


Abb. 4. Änderung des Engewiderstandes ΔR_{sz} nach der genauen (Roessschen) und der annähernden (Holmschen) Berechnung.

In der Literatur wurden schon mehrere Methoden zur Messung der Kontaktoberflächen beschrieben. RABINOVITZ [13] preßte radioaktiv gemachte Kontakte an nichtradioaktive, wobei er an den Berührungspunkten an den letzteren radioaktive Flecke beobachten konnte. Ihre Flächen kopierte er auf Photopapier und integrierte sie. DYSON und HIRST [14] ließen eine Metallschicht auf eine Glasplatte aufdampfen, die der angepreßte Kontakt beschädigte. Die Kontaktoberfläche konnte mit Hilfe eines Mikroskopes unmittelbar beobachtet werden. HÖFT [15] drückte Kontakte an Glasprismen und machte so die Kontaktfläche direkt sichtbar. Die von RABINOVITZ [13] bzw. von DYSON und HIRST [14] beschriebenen Methoden führten wegen der Benützung von Vermittlungsstoffen zu ungenauen Ergebnissen, während das von HÖFT beschriebene Meßverfahren eine befriedigende Genauigkeit aufweist. Auch unsererseits wurde dieses letztere Verfahren gewählt, welches im weiteren in allen Einzelheiten erörtert werden wird.

Nach Durchführung dieser Messung erhält man eine Übersicht über die richtige Anwendung der Formeln (1), (2), (3) und (4), d. h. Anhaltspunkte für die richtige Wahl der Werkstoffe, der mechanischen Belastung und der

Form von Kontakten und somit für die Ausgestaltung von Kontakten mit geringem Übergangswiderstand.

IV. Messung des Übergangswiderstandes

Das Schema des Meßkreises und der Elektroden geht aus Abb. 5 hervor. Jede Elektrode ist 120 mm lang und hat einen Durchmesser von 15 mm. Der Kontaktdruck wurde mit geeichten Kraftmessern der Kaliberfabrik, Budapest, erzeugt. Die Elektroden waren vertikal angeordnet. Die obere

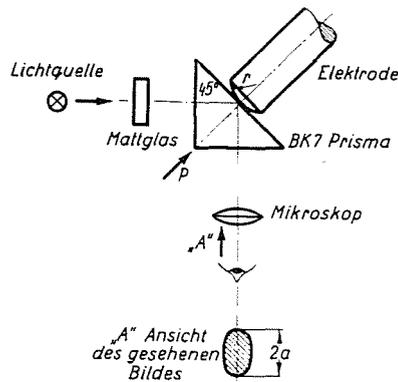


Abb. 5. Schema der gemessenen Elektrode und des Meßstromkreises

Elektrode wurde mit einer Feingewindeschraube an die untere Elektrode gepreßt. Gemessen wurde die auf die untere Elektrode wirkende Druckkraft, während eine Druckfeder das Eigengewicht der oberen Elektrode und Schraube kompensierte. Die Stellung der Elektroden sicherten Bakelitplatten mit glatten Bohrungen. Während des Messens wurde, um Verspannungen zu verhindern, sorgfältig auf die koaxiale Stellung der Elektroden geachtet. Die Druckkraft schwankte bei sämtlichen Elektroden zwischen 0,5 und 120 kp. Die Elektroden hatten Abrundungshalbmesser von 3—10—20—30 mm. Zuvor wurden die Elektroden sechs Monate lang im Zimmer gehalten, damit sich auf ihrer Oberfläche eine verhältnismäßig dicke Schicht bilde.

Die Elektroden wurden mit außerordentlich biegsamen Kabeln an den Strom gelegt. Zwischen den Hauptstrom-Anschlußpunkt und den Berührungspunkt wurden die Meßleitungsanschlüsse angelegt, so daß der gesamte Engewiderstand gemessen wurde, nicht aber der im Umkreis der Anschlüsse entstandene Engewiderstand.

Der den Spannungsabfall hervorrufende Strom schwankte je nach dem spezifischen Widerstand und Kontaktdruck zwischen 0,1 A und 1 A so daß

bei keiner Elektrode eine Überhitzung um mehr als $3-5^{\circ}\text{C}$ auftreten konnte. Der Spannungsabfall wurde mit einem besonders für diesen Zweck adaptierten Feussnerschen Kompensator gemessen. Die Widerstandsmessung erfolgte 15–60 Sekunden nach Auftreten der Druckkraft, sobald der Übergangswiderstand praktisch schon konstant war. Während der Messung wurde die Gleichrichterwirkung der Oxydationsschicht bei der zyklischen Richtungsänderung des Meßstromes beachtet. Zur Erfassung der Streuung des Übergangswiderstandes wurde die Widerstandsmessung bei jedem einzelnen Kontaktdruck fünfmal wiederholt. Nach jeder Messung wurden die Elektroden gehoben, verstellt und danach erneut unter Druck gesetzt.

An den Kupferkontakten wurden außerdem auch Messungen vorgenommen, solange sie im praktisch oxydfreien Zustand waren. Die Befreiung von der Oxydationsschicht erfolgte nach der Bristowschen Methode [16]. Die grobe Verunreinigung wurde mit Schmirgelpapier 0000, Fett und Öl mit einer Sodalösung entfernt. Sie wurden sodann in Wasser abgewaschen, worauf dieses durch Eintauchen in Azeton entfernt wurde. Schließlich wurden die Elektroden in Stickstoffatmosphäre getrocknet. Die Messungen wurden an den in der Stickstoffatmosphäre befindlichen Elektroden vorgenommen.

Um die Messung auswerten zu können, wurde auch der spezifische Widerstand sämtlicher Elektroden gemessen.

V. Messung der Kontaktfläche

Das Schema der Meßvorrichtung ist in Abb. 6 dargestellt. Der Kontakt liegt auf der Hypotenusenfläche des 45° igen Glasprismas auf. Die eine brechende Fläche wurde mit schwachem diffusem Licht bestrahlt, welches von der Basisfläche vollständig reflektiert wird. Wo sich Metall und Glas berühren, wird ein mit der Farbe des Metalls identisches Licht reflektiert, das vom weißen Licht der übrigen Teile abweicht und daher mit dem Meßmikroskop leicht in seiner Größe bestimmt werden kann.

Die Messungen wurden an den bei der Widerstandsmessung benutzten Elektroden ausgeführt, deren Krümmungshalbmesser mit hoher Genauigkeit neu gedreht wurde. Da sich die Oberflächen im Laufe der Widerstandsmessung verfestigten, mußte von jeder Elektrode die etwa 1 mm harte Schicht entfernt werden.

Die Reinigung der Elektrodenoberfläche nach dem Drehen erfolgte mit Schmirgelpapier 0000, danach mit in Filz gebetteter Polierpasta. Die Rauhtiefe der Oberfläche schwankte zwischen 0 und $7\ \mu$. Die gleiche Rauhtiefe hatte die Elektrodenoberfläche auch bei der Widerstandsmessung. Diese Elektroden wurden den bei der Widerstandsmessung angegebenen Druckkräften unterworfen. Für Messungen zwischen 25 und 1000 Pond wurden

kleine Elektroden verwendet, deren Oberfläche nach obigem mit hoher Genauigkeit bearbeitet worden war. An den großen Elektroden wurden je 4, an den kleinen je 8 Messungen vorgenommen.

Bei der Auswertung der Meßergebnisse mußte berücksichtigt werden, daß die Berührungsfläche mit der Glasoberfläche größer ist als die zwischen

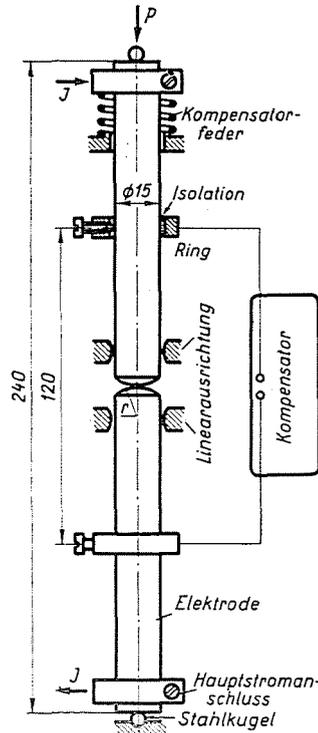


Abb. 6. Schema der Methode der Oberflächenmessung

zwei gekrümmten Metallkontakten. Zur Bildung des Umrechnungsfaktors wurde die Hertzsche Formel

$$a_{GM} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \left(\frac{1 - \mu_G^2}{E_G} + \frac{1 - \mu_M^2}{E_M} \right) P \cdot r_M} \quad (11)$$

für die beim Zusammenpressen der Glasfläche und der abgerundeten Metallelektrode entstehende Kontaktoberfläche sowie die für die Kontaktoberfläche beim Zusammenpressen zweier gleichmäßig abgerundeten Metallelektroden gültige Formel

$$a_{MM} = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{1 - \mu_M^2}{E_M} P \cdot r_M} \quad (12)$$

angewandt. Der Umrechnungsfaktor ist der Quotient dieser beiden Formeln, u. zw.:

$$\xi = \frac{2a GM}{2a_{MM}} = \sqrt[3]{\frac{E_M}{1 - \mu_M^2} \frac{1 - \mu_G^2}{E_G} + 1}, \quad (13)$$

wobei der Index M das Metall, der Index G das Glas betrifft.

Der Umrechnungsfaktor kann auf Grund der Werkstoffkonstanten in Formel (11) berechnet werden. Die Eigenschaften der bei den Messung benutzten Werkstoffe sowie deren Umrechnungsfaktoren sind in Tabelle II zusammengefaßt.

Tabelle II

Werkstoff	$10^3 \frac{g}{mm^3}$	$\frac{E}{kp/mm^2} \cdot 10^{-4}$	μ	HB kp/mm ²	ξ
Cu(Cu—E)	0,0179	1—1,13	0,35	52—82	1,385—1,425
Fe(A. 37. H)	0,1625	2—2,15	0,3	170	1,62—1,165
Sr 58	0,0688	1,25	0,37	150	1,28
BZ 2	0,141	1,16	0,35	166	1,435
GO 2(Kugel)	—	2,2	0,25	650	—
BK 7(Prismenglas)	—	0,715	0,17	—	—

Sobald die Beanspruchung der Kontaktoberfläche die Streckgrenze überschritten hat, verlieren die Werkstoffkonstanten der Tabelle II ihre Gültigkeit. Jenseits der Streckgrenze erhält man vom Verhalten der Werkstoffe nur dann ein richtiges Bild, wenn das Verhalten des Glasprismas genau bekannt ist. Zu diesem Zwecke erwies sich die Bestimmung der Konstante des Prismenglases in der Form

$$K_G = \frac{1 - \mu_G^2}{E_G} = \frac{4}{3} \frac{a^3}{P \cdot r_M} - \frac{1 - \mu_M^2}{E_M} \quad (14)$$

als ausreichend. Die Formel (14) ergab sich aus der Umordnung von Formel (12). Wie ersichtlich, kommen in der Formel (14) die Werkstoffkonstanten des Eichmetalls sowie die Druckkraft und der Radius der Kontaktoberfläche vor. Wird ein Eichmetall gewählt, dessen Härte größer ist als die des Glases, ändert es seine Härteeigenschaft während der Prüfung nicht, doch können die Werte a und P gemessen werden, wodurch wieder die Werkstoffkonstante K_G des Glases bestimmt wird. Die Messung wurde mit gehärteten Chromstahlkugeln $\varnothing 2,5-4,75-6,34$ und 9 mm ausgeführt. Der Berechnung entsprechend ist $K_G = 0,15 \cdot 10^{-3}$, während die Messung folgende Werte ergab:

Tabelle III

Druckkraft (P/kp)	2,5	4,75	6,34	9	Kugeldurchmesser (mm) Glaskonstante
	$10^3 K_G$	$10^3 K_G$	$10^3 K_G$	$10^3 K_G$	
8,5	0,16	0,372	0,2694	0,33	
12,1	0,1514	0,298	0,229		
15,3	0,1518	0,258	0,215		
39	0,161	0,214			
58,2		0,165			
77,5		0,148			

Bei Erhöhung der Druckkraft über den Tabellenwert brach die Oberfläche des Prismenglases muschelartig. Aus der Tabelle geht hervor, daß der berechnete Wert bei der Bruchgrenze des Glases erreicht wurde. Hierzu gehörte ein durchschnittlicher spezifischer Druck von etwa 110—140 kp/mm².

Bei der Prüfung der Elektroden, deren Härte 140 kp/mm² übersteigt (Fe, Sr), wurde Glasbruch nicht festgestellt, u. zw. vermutlich darum nicht, weil die Kontaktoberfläche 3—4mal so groß war wie bei den Stahlkugeln. Dies ermöglichte es, die Eigenschaft des Glases auch bei höherem Druck kennenzulernen. Die Erfahrung zeigte, daß der Wert K_G weiter abnahm. In Tabelle IV sind jene K_G -Werte zusammengefaßt, die bei der Beanspruchung an der Streckgrenze verschiedener Werkstoffe gewonnen wurden.

Tabelle IV

Werkstoff	Abgerundeter Radius (mm)	Druckkraft (kp)	$10^3 K_G$	Bemerkung
Cu—E. 1	3	0,9	—0,021	
Cu—E.k	10	2,2	—0,062	
Sr. 58	10	42	0,0685	
A. 37. H.	3	3,9	0,178	
A. 37. H.	10	40	0,086	
Cu—E.k.	3	4	0,028	Beanspruchung über der Streckgrenze
A. 37. H.	10	100	0,0765	

Aus den Messungen ergab sich der Schluß, daß der Wert des Umrechnungsfaktors K_G nicht als konstant betrachtet werden kann. Der Einfachheit halber sind die Werte für K_G und ξ je nach der Beanspruchung der Elektrode dennoch folgendermaßen gewählt worden:

Im Bereich der elastischen Formänderung: $K_G = 0,15 \cdot 10^{-3}$,

$\xi =$ laut Tabelle II.

Im Bereich der bleibenden Formänderung: $K_G \cong 0$ $\xi = 1$.

VI. Meßergebnisse und deren Besprechung

Die Ergebnisse der Oberflächengrößenmessung bei sämtlichen geprüften Metallen ergaben eine befriedigende Übereinstimmung des Kontaktoberflächenradius a mit den aus den Formeln (3) und (4) berechneten Werten. Von den Ergebnissen der Oberflächengrößenmessung stellen die Abb. 7—8 den für Kupfer kennzeichnenden Fall dar.

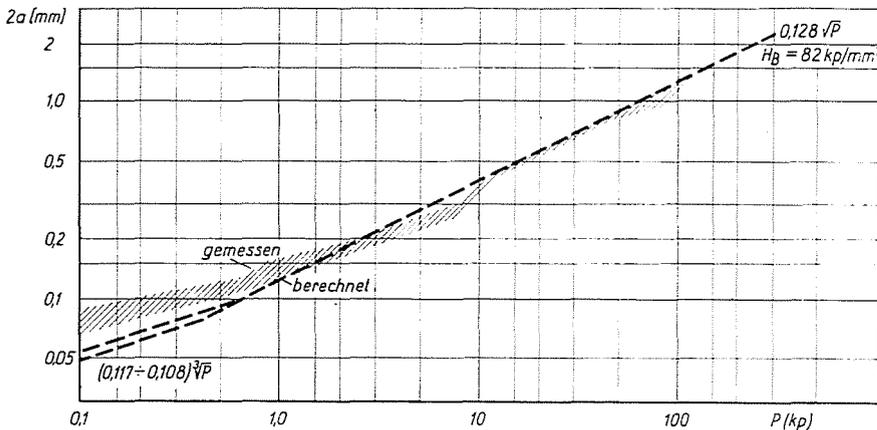


Abb. 7. Gemessene und berechnete Änderung der Oberfläche einer Kupferelektrode als Funktion der Druckkraft

In Abb. 7 sind Meß- und Rechenergebnissen einander gegenübergestellt, während Abb. 8 photographische Aufnahmen der Oberflächenänderung zeigt. Die Abbildungen beziehen sich auf eine Kupferelektrode mit dem Abrundungsradius $r = 3$ mm und der Härte von 82 kp/mm^2 . Die gestrichelte Linie zeigt die aus den Formeln (3) und (4) rechnerisch ermittelten Kontaktoberflächenhalbmesser, der schraffierte Streifen die gemessenen Werte. Bei kleinen Kontaktdrücken ist die gemessene Oberfläche größer als die berechnete. Dies ergibt sich daraus, daß in der Abbildung nicht der äquivalente Durchmesser der tatsächlichen und formlosen Kontaktoberfläche angegeben ist, sondern der Punktmengendurchmesser des Kontaktes. Wo die Formeln (3) und (4) gleiche Werte lieferten, fließen die berechneten und gemessenen Ergebnisse ineinander, was als selbstverständlich anzusehen ist, da sich die Punktmenge

in eine langsam zusammenfließende Oberfläche umwandelt. Dieser Vorgang ist aus Abb. 8 klar ersichtlich.

Wie die Beobachtung zeigt, folgt die Oberfläche im Bereich der plastischen Formänderung im Abschnitt gemäß Formel (4) nicht sofort und ständig den theoretischen Formeln, vielmehr läßt sich nach einem Übergangsabschnitt eine Verfestigung feststellen. Bei den harten Werkstoffen (Fe, Messing, Bronz) war die Verfestigung gering, beim Kupfer größer. Bei

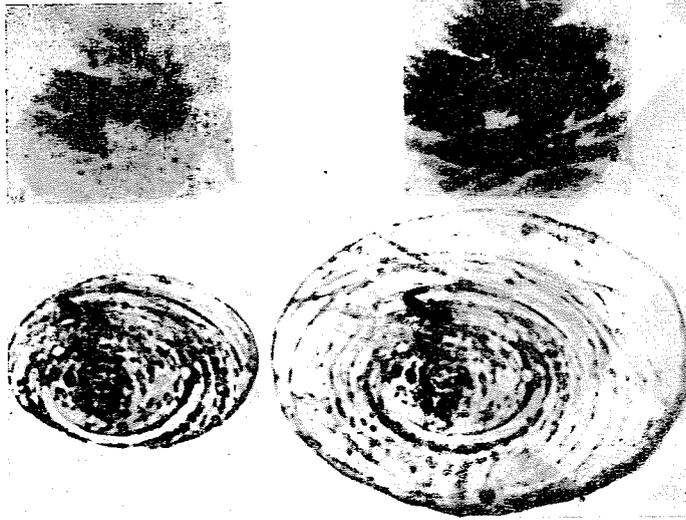


Abb. 8. Photographische Aufnahmen von der Änderung der Kupferelektrodenoberfläche

wachsender Druckkraft ergab die Verfestigung beim Kupfer keinen konstanten Wert, d. h. auf einzelnen Abschnitten konnte eine recht große Härte gemessen werden. Dieses Ergebnis ließ sich bei sämtlichen Kontakten beobachten, u. zw. vermutlich deshalb, weil sich die Kontaktoberfläche und der Werkstoff unter der Oberfläche stufenweise verfestigt. Übersteigt die auf den Kontakt wirkende Druckkraft den Wert in Punkt C_1 , verfestigt sich die Kontaktoberfläche eine Zeit lang, und dies entspricht einer recht großen Härte. Im Falle der Abbildung erreicht die Kontakthärte bei einer Druckkraft von 7,2 kp den Wert von 132 kp/mm². Danach verfestigt sich der Stoff unter der Oberfläche im Sinne der Theorie. Nach Formel (9) mit den Daten Holm-Schoberths ($K = 11,2 \text{ t/cm}^2$, $m = 0,085$) ergibt sich eine Kontakthärte von 86 kp/mm² anhand der Daten von Millian-Rieders ($K = 152 \text{ kp/mm}^2$, $m = 0,149$) eine solche von 93 kp/mm². Der Wert der relativen Eindringtiefe ergab sich zu 0,0378 kp/mm². Aus der Messung ist ersichtlich, daß bei steigender Druckkraft die Holm-Schoebertschen Ergebnisse weit zutreffender sind,

während bei Druckkräften unter 7,2 kp eine noch viel größere Kontakthärte gemessen werden kann.

Bei Weichkupfer ergab sich eine ähnliche Anfangsverfestigung, bei größerem Kontaktdruck wurden jedoch — je nach dem Abrundungsradius der Elektrode — unterschiedlich starke Verfestigungen beobachtet. Bei Elektroden mit keinem Abrundungsradius wuchs die Härte von 52 auf 70 kp/mm^2 , während sie bei größerem Radius ($r = 20$) nur geringfügig zunahm. Tabelle V enthält eine Zusammenfassung der Verfestigung einzelner Werkstoffe.

Tabelle V

Werkstoff	Originalhärte H_B (kp/mm^2)	Maximalhärte H_K (kp/mm^2)	Mittelhärte H_K (kp/mm^2)
Cu—E. k.	82	104—132	82—90
Cu—E. 1.	52	75—79	53—70
A. 37. 11.	144	177	165
Al. 99,5	28	36,5—44,2	29—36

Die Messung des Übergangswiderstandes wurde an Kontakten in oxydiertem und oxydfreiem Zustand ermittelt.

Die gemessenen Werte des Übergangswiderstandes an Kupferkontakten, die sechs Monate lang gelegen hatten, stellt Abb. 9 dar. Im Interesse der

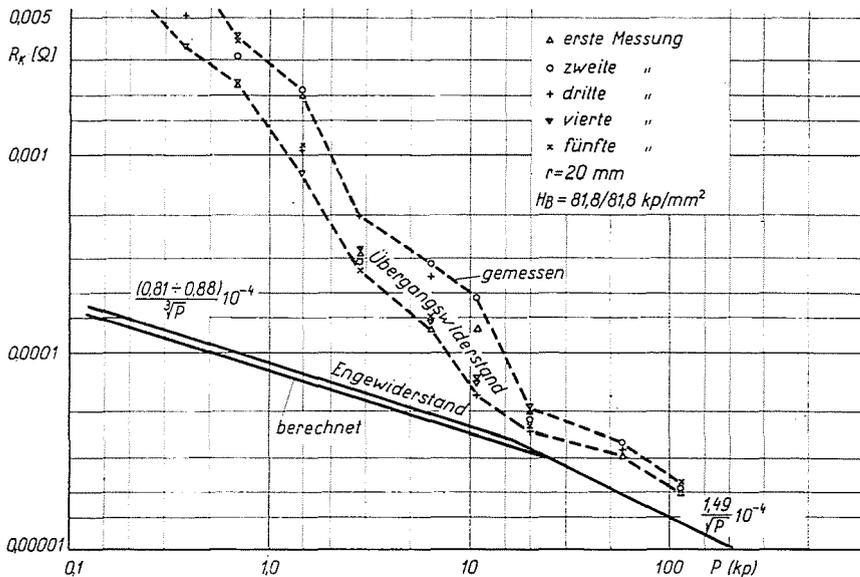


Abb. 9. An Kupferkontakten gemessener Übergangswiderstand

Anschaulichkeit sind auch die berechneten Werte des Engewiderstandes der oxydfreien Kontakte angegeben. Der gemessene Übergangswiderstand war wesentlich größer als der Engewiderstand. Für alle Elektroden war es kennzeichnend, daß die Schicht im Umkreis der Streckgrenze des Werkstoffes, aber mindestens bei der zweifachen zugehörigen Druckkraft bricht und danach der Übergangswiderstand mit wachsendem Drucke langsam abnimmt (gemäß der Potenz 0,45—0,55).

Abb. 10 zeigt die gemessenen und theoretisch berechneten Werte des Übergangswiderstandes bei oxydfreien Kupferkontakten. Innerhalb des Abschnittes der elastischen Formänderung sowie auf einem Abschnitt über

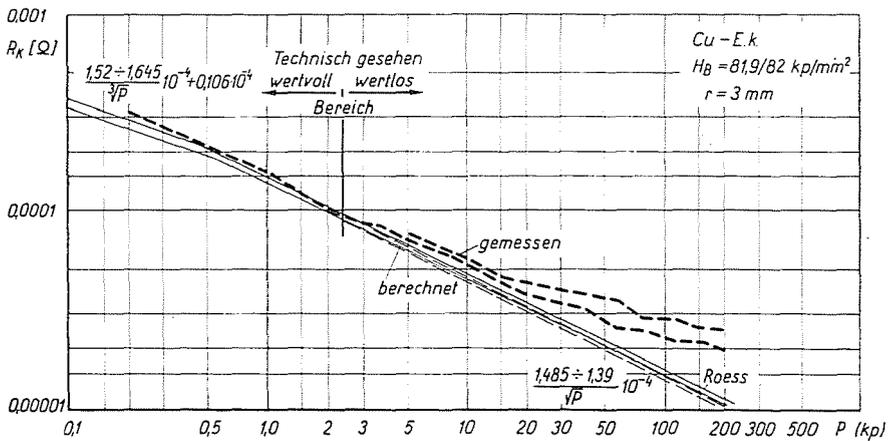


Abb. 10. Im neutralen Medium an oxydfreie Kupferkontakten gemessener Engewiderstand

diesen hinaus stimmen die theoretischen mit den gemessenen Werten gut überein, bei wachsender Druckkraft jedoch wurde ein Widerstand gemessen, der größer war als die theoretischen Werte. Sein Ansteigen ist den Änderungen und Rissen in der Kristallstruktur des Metalles zuzuschreiben. Die Erscheinung konnte bei sämtlichen Hartkupferelektroden beobachtet werden, wenn die Belastung mit dem 2—3fachen der dem Anfangsbereich der bleibenden Verformung zugeordneten Druckkraft erfolgte.

Sind die in Abb. 10 beschriebenen Engewiderstandswerte bekannt, kann an die Auftragung der Übergangswiderstandskurven geschritten werden.

Gemäß Abb. 11 wurde zum Übergangswiderstand des oxydfreien Kontaktes ein Hautwiderstand von $\sigma/\pi a^2$ hinzugerechnet. Als konstanter Wert σ wurde $11,6 \cdot 10^{-6} \Omega \text{ mm}^2$ angenommen.

Bei Bestimmung des Übergangswiderstandes wurden auch die gemessenen Werte der Kontaktfläche in Betracht gezogen. Mit einer Punkt-Strich-Linie ist die Kurve der Engewiderstand- und der Kontaktflächen-

werte dargestellt. Die berechneten Werte des Übergangswiderstandes zeigen eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen.

Die in Abb. 11 dargestellten Rechenergebnisse gelten für den Bereich der bleibenden Formänderung. Messungen an Kontakten, die zuvor geschliffen wurden, lieferten im Bereich der bleibenden Formänderung ähnliche Übergangswiderstandswerte. Bei verschiedenen Werkstoffen wurde aus der Differenz zwischen dem im Bereich der bleibenden Formänderung gemessenen

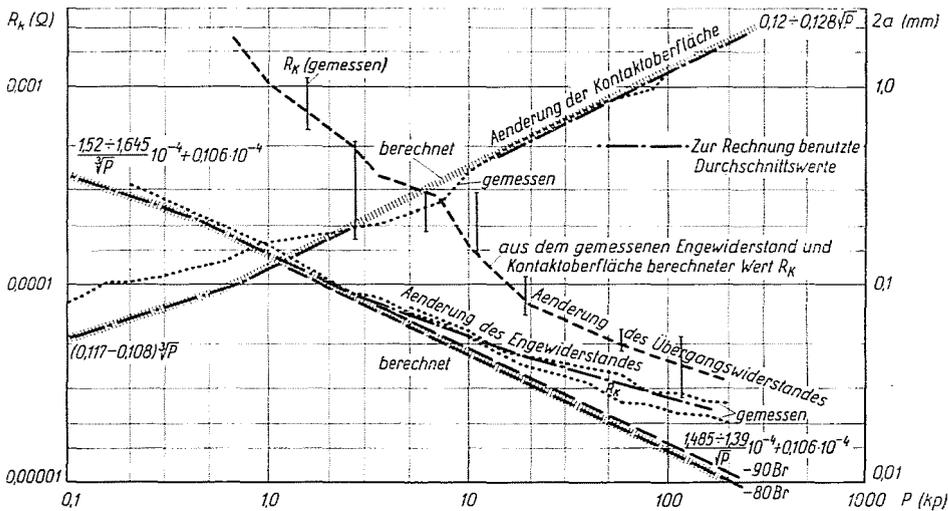


Abb. 11. Der aus dem gemessenen Oberflächenwiderstand, aus der Engwiderstandsänderung und dem konstanten spezifischen Hautwiderstand berechnete Übergangswiderstand

Übergangswiderstand und dem berechneten Engwiderstand der Hautwiderstand und aus diesem der Wert σ berechnet. Die auf diese Weise berechneten σ -Werte sind in Tabelle VI zusammengefaßt.

Tabelle VI

Werkstoff	$\sigma 10^5 \Omega mm^2$
Cu. E	0,5—1,2
Bz 2	10
Sr. 58	2,37—8,65

Die spezifischen Werte des Hautwiderstandes bei der elastischen Formänderung der Elektrode lagen über den Werten der Tabelle VI. Naturgemäß muß dem so sein, weil die unversehrte, mechanisch nicht in Anspruch genom-

mene Schicht einen sehr hohen Widerstand besitzt. Berechnet man den spezifischen Wert des Hautwiderstandes nach HOLM [1. Appendices III. Eq. (III. 19.)], hat man

$$\sigma = \frac{10^{-22}}{2} \frac{A^2}{1 + AB} e^{AB} = 7,38 \cdot 10^{20} \Omega \text{ cm}^2, \quad (15)$$

hier ist

$$A = 7,32 \cdot 10^5 \left(R_2 S - \frac{7,2}{\Phi} \right),$$

$$B = 1,265 \cdot 10^{-6} \sqrt{\Phi - \frac{10}{S}}$$

wobei die Schichtdicke bei Cu_2O [1. s. 124]:

$$S = \sqrt[4]{400 + t 10^{8,2} \frac{1310}{T^2}} = 4,74 \cdot 10^3 \cdot [\text{Å}]. \quad (16)$$

In den Hilfsformeln bezeichnen

Φ die Austrittsarbeit der Elektronen aus dem Metall in die Schicht
($\sim 0,5$ eV)

t die Dauer der Schichtbildung in Stunden (4320 Stunden)

T die Umgebungstemperatur in K° (293 K°)

HOLM—KIRSCHSTEIN [17] haben eine einfachere Formel angegeben, die für eine Cu_2O -Schicht von mehr als 25 Å ein befriedigendes Ergebnis liefert. Sie schreibt sich zu

$$\sigma = \frac{1}{350} \cdot \frac{S}{\sqrt{\Phi}} e^{9,3 \cdot 10^7 S \cdot \sqrt{\Phi}} = 1,31 \cdot 10^{26} \Omega \text{ cm}^2. \quad (17)$$

Hier ist S in Zentimetern einzusetzen. Welchen Wert auch immer man betrachtet, jeder liegt um mehr als 20 Größenordnungen höher als die Werte in Tabelle VI.

Mit steigender Beanspruchung nimmt der Wert σ ab, da die Metallspitzen (Rauhigkeit der Kontaktoberfläche) die dicke Cu_2O -Schicht durchstechen. Mit Annäherung gilt die Feststellung, daß sich der spezifische Wert des Hautwiderstandes im Sinne der Beziehung

$$\sigma = \frac{C}{p^x + \varepsilon} \quad (18)$$

ändert. Hier entspricht C/ε dem Wert der Formel (14). MILLIAN—RIEDER [8] leiteten die Formel (8) auf Grund der Ergebnisse ab, die bei einer Druckkraft von 0,25 kp und bei einem Abrundungsradius von $r = 3$ mm gewonnen wur-

den. Der Hautwiderstand der Kupferelektrode mit der Abrundung $r = 3$ mm machte nach sechs Monaten bei 0,25 kp 0,161 Ohm aus, der spezifische Wert betrug $63 \cdot 10^{-5}$ Ohm mm². Mit diesen Werten ergab sich

$$C = 141 \cdot 10^{25},$$

$$x = 16,8,$$

$$\varepsilon = 19100.$$

Eine plastische Formänderung ergibt sich bei der Beanspruchung mit 82 kp/mm², wobei

$$\sigma = 1 \cdot 10^{-5} \text{ Ohm mm}^2,$$

was mit den gemessenen Werten $0,5-1,2 \cdot 10^{-5}$ Ohm mm² übereinstimmt.

VII. Schlußfolgerungen

Die Meßergebnisse und deren Analyse haben Hinweise auf drei Tatsachen geliefert:

1. auf die zulässige mechanische Belastung des Kontaktes,
2. auf die Bedingung für die Herabsetzung des Übergangswiderstandes des Kontaktes auf ein Minimum,
3. auf die Änderung des Hautwiderstandes in Abhängigkeit von der Zeit und der mechanischen Beanspruchung.

Die zulässige mechanische Belastung (d. h. die Grenzbelastung) ist jene Druckkraft, die der Identität der Gleichungen der elastischen und bleibenden Formänderung zugehört. Ihr Wert ergibt sich aus den Formeln (3) und (4):

$$P_H = 17,35 H_k^3 r^2 \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)^2, \quad (19)$$

in der H_k die Kontakthärte gemäß Formel (9) und $r = r_1 = r_2$ den Abrundungsradius der Elektroden bezeichnet. Ist der Kontakt beim Einschalten einer augenblicklichen Überlastung ausgesetzt, ist höchstens ein Wert von $2 P_H$ zulässig.

Die Größe der Kontaktoberfläche stimmt mit den theoretischen Daten überein, im Bereich der elastischen Formänderung ist jedoch die von der Punktmenge des Kontaktes bedeckte Fläche größer als die gemäß Formel (3) resultierende. Dies verursacht im Engewiderstand eine vernachlässigbare Änderung, doch wird man bei Berechnung der elektrodynamischen Kraft zweckmäßig einen größeren Durchmesser in Betracht ziehen.

Der Kontaktübergangswiderstand ist in der Nähe der Grenzbelastung am kleinsten. Zweckmäßig wird man harte Elektroden anwenden, da sich

deren Form während des Gebrauches kaum ändert und somit die Druckkraft infolge der Beständigkeit der Grenzbelastung immer genügt, um die Schicht zu brechen. Liegt die erforderliche Druckkraft wesentlich unter der Grenzbelastung, ist die Anwendung eines Edelmetallkontaktes (Gold, Silber, usw.) unvermeidlich, weil der Widerstand der auf seiner Oberfläche entstehenden Schicht unbedeutend ist. Auf die zeitliche Änderung des Hautwiderstandes bezieht sich die Formel (8), auf die Änderung infolge mechanischer Beanspruchung die Formel (17). Diese Formeln verlieren ihre Gültigkeit, wenn der am Kontaktpaar auftretende Spannungsabfall 1,0–1,8 V übersteigt, da der Hautwiderstand infolge der Spannung spannungsabhängig wird (Frittung).

Schließlich läßt sich feststellen, daß die empirischen Formeln der Abb. 1 bestenfalls grobe Annäherungswerte liefern. Ihre Gültigkeit ist auf den Umkreis der Grenzbelastung beschränkt. Bei kleiner Belastung kann der Übergangswiderstand der zur Oxydierung neigenden Kontakte anfangs mit dem aus den Formeln der Abb. 1 berechneten übereinstimmen, doch kann sich dieser im Gebrauch infolge der Oxydbildung nur erhöhen.

Zusammenfassung

Verfasser analysiert die Abweichungen zwischen den theoretischen und praktischen Formeln der Übergangswiderstände. Er überprüft durch Messungen die Richtigkeit der theoretischen Formel für die Kontaktfläche und die Engewiderstände sowie die Bedingungen für die Brauchbarkeit der praktischen Formel. Die Formel

$$P_h = 17,35 H_k^2 + 2 \left(\frac{1 - \mu^2}{E} \right)^2$$

gibt die mechanische Grenzlast an, die höchstens bis zum Doppelten ihres Wertes angewendet werden darf. Diese Formel ist nur gültig, wenn die Härte des Kontaktwerkstoffes gleich der größten Härte ist, die sich mit dem jeweiligen Material erreichen läßt. Wenn die Materialhärte kleiner ist, wächst die Größe und Härte der Berührungfläche dauernd an, die zuvor wirksame Kraft wird also kleiner sein als die neue Grenzlast. Liegt die auf den Kontakt wirkende Druckkraft wesentlich unter der Grenzlast, steigt der Übergangswiderstand wesentlich an. Bei einer Kontaktdruckkraft, die kleiner ist als P_h , ist es ratsam, Kontakte aus Edelmetall zu verwenden.

Literatur

1. HOLM, R.: *Electric Contacts*. Springer Verlag, Göttingen—Heidelberg 1958.
2. WINDRED: *Electrical Contacts*. Macmillan and Co. 1940.
3. LEWELLYN, L. J.: *The Physics of Electrical Contacts*. Clarendon Press, Oxford 1957.
4. BINDER, L.: *Der Widerstand von Kontakten*. *Elektrotechn. und Maschinenbau* S. 781. 1912.
5. BABIKOV, M. A.: *Villamos készülékek*. Nehézipari Könyvkiadó, Budapest 1953.
6. CONTIUS, E.: *Der Einfluß der Größe des Druckes und der Fläche auf dem Kontaktwiderstand*. Dissertation. Dresden 1929.
7. HERTZ, H.: *Gesammelte Werke*. I. Verlag Barth, Leipzig 1895.
8. MILLAN, K.—RIEDER, W.: *Kontaktwiderstand und Kontaktoberfläche*. *Z. angew. Physik*, **8**, 28 (1956).
9. MOLNÁR, I.: *Elektromos nyugvóerintkezők fizikájáról*. BME Évkönyve, 1962.

10. RABINOVICZ, E.—TABOR, D.: Metallic transfer between sliding metals. An autoradiographic study. Proc. Roy. Soc. London. A. **208**, 455 (1951).
11. HOLM, E.—HOLM, R.—SCHOBERT, E. I.: Theory of hardness and measurement applicable to contact problems. Journal App. Physics **20**, 319 (1949).
12. KOUWENHOVEN, W. B.—SACKETT, W. T.: Contact Resistance — The contribution of nonuniform current flow. Electrical Engineering, **71**, 264 (1952).
13. RABINOWICZ, E.: Metal transfer during static loading and impacting. Proc. Phys. Soc. B. **65**, 630 (1952).
14. DYSON, J.—HIRST, W.: The true contact area between solids. Proc. Phys. Soc. London, B. **47**, 630 (1954).
15. HÖFT, H.: Physikalische Untersuchungen an elektrischen Kontakten. Wissenschaftliche Z. der HfE. Ilmenau, **9**, 207, 1963.
16. BRISTOW, J. R.: Kinetic boundary friction. Proc. Roy. Soc. London A. **189**, 88 (1947).
17. HOLM, R.—KIRSCHSTEIN, B.: Über den Widerstand dünnster Fremdschichten in Metallkontakten. Zeitschrift techn. Phys. **16**, 488 (1935).

István MOLNÁR, Budapest XI., Egry József u. 18—20. Ungarn.