

# **Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

Die Reibung von Dynamobürsten

[urn:nbn:de:bsz:31-285100](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-285100)

# Die Reibung von Dynamobürsten.

Von Dr.-Ing. J. Liska.

## I. Einleitung.

Im Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule zu Karlsruhe wurden in den letzten Jahren eingehende Untersuchungen an Dynamobürsten ausgeführt; es fehlte aber bisher in dieser Versuchsreihe die genaue Ermittlung der Reibungsverhältnisse. Zweck der nachfolgenden Untersuchungen ist es nun, die Faktoren, welche die Bürstenreibung beeinflussen, zu finden, sowie die Gesetze dieser Beeinflussung zahlenmäßig festzustellen.

Es sei

- $W_r$  = Bürstenreibungseffekt in Watt,
- $\varrho$  = Reibungskoeffizient zwischen Bürste und Schleiffläche,
- $F_b$  = Auflagefläche aller Bürsten in  $\text{cm}^2$ ,
- $g$  = spezifischer Bürstendruck in  $\text{kg/cm}^2$ ,
- $s_u$  = Stromdichte unter der Bürste in  $\text{Amp./cm}^2$ ,
- $v_k$  = Kommutator bzw. Ringgeschwindigkeit in  $\text{m/sec}$ ,
- $P$  = Klemmenspannung der Maschine in Volt,
- $J_a$  = Gesamtstrom der Maschine in Amp.,
- $\Delta P$  = Übergangsspannung an der Bürste in Volt.

Dann ist bekanntlich:

$$W_r = 9,81 \cdot \varrho \cdot g \cdot F_b \cdot v_k$$

oder, wenn wir für Gleichstrommaschinen, welche naturgemäß in erster Linie in Betracht kommen,

$$F_b = \frac{2J_a}{s_u}$$

einführen,

$$W_r = 9,81 \cdot \varrho \cdot g \cdot \frac{2J_a}{s_u} \cdot v_k.$$

Nehmen wir  $\varrho$  als Mittelwert für Kohlebürsten zu 0,25 an, ferner  $g = 0,15$  und  $s_u = 6$ , so wird

$$\begin{aligned} W_r &= 9,81 \cdot 0,25 \cdot 0,15 \cdot \frac{2}{6} \cdot J_a \cdot v_k \\ &= 0,147 \cdot J_a \cdot v_k \end{aligned}$$

und in Prozenten der abgegebenen bzw. aufgenommenen Maschinenleistung:

$$W_r\% = \frac{W_r}{P \cdot J_a} \cdot 100 = 12,25 \cdot \frac{v_k}{P}.$$

Wir sehen hieraus, daß  $W_r\%$  für Gleichstrommaschinen verschiedener Leistung, aber gleicher Spannung und Kommutatorgeschwindigkeit denselben Wert besitzt. Für einen bestimmten Wert von  $v_k$  erhalten wir zwischen  $W_r\%$  und  $P$  die Beziehung:

$$W_r\% \cdot P = \text{konst.},$$

also die Gleichung einer gleichseitigen Hyperbel. Unter Annahme der Kommutatorgeschwindigkeiten  $v_k = 10, 20, 30, 40$  und  $50$  sind

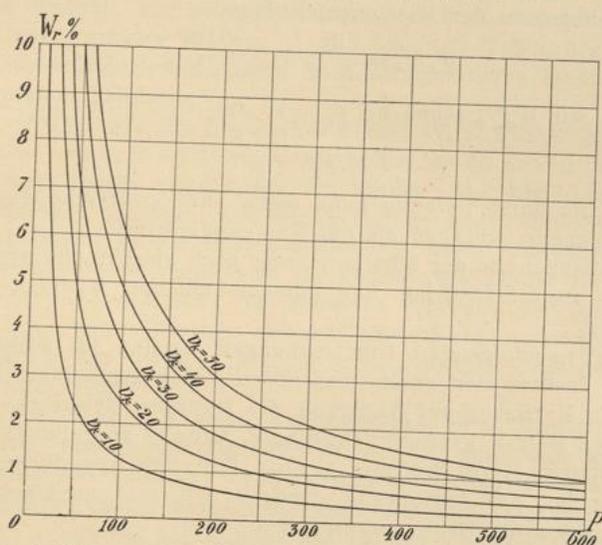


Fig. 1. Der prozentuale Bürstenreibungsverlust bei Gleichstrommaschinen als Funktion der Klemmenspannung.

nun in Fig. 1 diese Hyperbeln für Spannungen bis 600 Volt gezeichnet. Man ersieht, daß  $W_r\%$  bei hohen Kommutatorgeschwindigkeiten und kleinen Spannungen beträchtliche Werte annehmen kann.

Die Verluste durch Bürstenreibung verdienen aber nicht nur wegen ihres Einflusses auf den Wirkungsgrad, sondern auch wegen der Erwärmung des Kommutators Beachtung. Aus den Versuchen von Dr.-Ing. E. Arnold und E. Pfiffner<sup>1)</sup> geht hervor, daß die

<sup>1)</sup> „Die Übergangsspannung von Kohlebürsten in Abhängigkeit von der Temperatur.“ ETZ 1907, S. 263.

Arnold, Arbeiten. I.

Bürstenübergangsspannung im allgemeinen bei steigender Temperatur stark fällt, wodurch die bei der kalten Maschine vielleicht tadellose Kommutation mit eintretender Erwärmung gefährdet wird. Die Erwärmung des Kommutators rührt aber hauptsächlich von den Übergangs- und den Reibungsverlusten der Bürsten her. Nimmt man zur Orientierung über das Größenverhältnis der beiden Verluste bei erwärmtem Kommutator eine Übergangsspannung  $\Delta P = 0,5$  Volt an, so wird der Verlust durch den Stromübergang zwischen Bürste und Kommutator, gleichmäßige Stromverteilung unter der Bürste vorausgesetzt,:

$$W_u = 2 \cdot J_a \cdot \Delta P = J_a$$

und in Prozenten der Maschinenleistung:

$$W_u \% = \frac{J_a}{J_a \cdot P} \cdot 100 = \frac{100}{P},$$

während wir  $W_r \%$  schon bei  $v_k = 10$  zu

$$W_r \% = \frac{122,5}{P}$$

finden. Die Bürstenreibung kann daher zur Erwärmung des Kommutators mehr beitragen als die Übergangsverluste.

Schließlich ist der Bürstenreibung noch als Ursache der Kommutator- resp. Schleifring- und Bürstenabnutzung Wichtigkeit beizumessen.

Die nachfolgenden Untersuchungen wurden im Elektrotechnischen Institut der großh. bad. Technischen Hochschule Fridericiana zu Karlsruhe auf Anregung des Direktors desselben, Herrn Geheimen Hofrat, Professor Dr.-Ing. E. Arnold ausgeführt. Es sei mir gestattet, Herrn Professor Arnold für seine freundliche Unterstützung bei der Ausführung dieser Arbeit auch an dieser Stelle meinen wärmsten Dank auszusprechen.

## II. Literaturübersicht.

Die erste bekannt gewordene Arbeit, welche sich mit diesem Gegenstand beschäftigt, sind die von E. V. Cox und H. W. Buck im Laboratorium des Columbia College, New York, ausgeführten Untersuchungen.<sup>1)</sup> Sie ergeben als Resultat, daß  $q$  vom Druck unabhängig ist, sich aber mit zunehmender Geschwindigkeit vermindert, und zwar so, daß — nach Wiener —  $q$  bei der Geschwindigkeit  $v_k$  durch die Funktion

<sup>1)</sup> „The relation between pressure, electrical resistance and friction in brush contact.“ The Electrical Engineer 1895, Bd. XX, S. 125, ferner ETZ 1896, S. 693. (Auszug einer Bearbeitung derselben Versuche von Wiener.)

$$\rho = \rho_5 \left( 1 - \frac{v_k - 5}{40} \right)$$

gegeben ist, wo  $\rho_5$  der Wert des Reibungskoeffizienten bei  $v_k = 5$  bedeutet.  $\rho_5$  wird für radial gestellte Kohle- und tangential gestellte Kupferbürsten bzw. zu 1,0 und 1,13 bei trockenem, zu 0,32 und 0,3 bei geöltem Kupferkommutator gefunden. Bei den Versuchen wurde der Druck und der tangentialer Zug durch Federwagen gemessen.

Cox und Buck waren auch gleichzeitig die ersten, die sich mit Dynamobürsten überhaupt beschäftigt haben. Der Teil ihrer Untersuchungen, welcher sich auf Feststellung des Übergangswiderstandes bezieht, hat seine Fortsetzung in den erschöpfenden Arbeiten von Professor E. Arnold und Dr.-Ing. M. Kahn gefunden, die späteren Veröffentlichungen über Bürstenreibung hingegen sind sehr spärlich geblieben.

R. B. Tibbals, L. Lowenberg und W. G. Burns haben die Versuche von Cox und Buck fortgesetzt<sup>1)</sup> und fanden ebenfalls, daß  $\rho$  vom Druck unabhängig ist, ferner, daß die Reibung bei Kupferbürsten im Falle von Stromführung zu-, bei Kohlebürsten aber abnimmt. Öl vermehrt die Reibung, wenn kein Strom durch die Bürste geht.  $\rho$  ergibt sich für geblättern Kupfer zu 0,3, für Kupfergewebe zu 0,272, für Kohle zu 0,25 und für Graphit zu 0,21. Diese Werte beziehen sich auf einen Kupferkommutator; die Bestimmung des Druckes geschah durch Gewichte, die des Zuges durch eine Federwage.

G. Dettmar traf seine diesbezügliche Versuchsanordnung in der Weise, daß er eine 33 KW-Maschine mit geeichtem Motor antrieb, und zwar mit und ohne Bürsten an der 33 KW-Maschine.<sup>2)</sup> Der Druck wurde durch eine Federwage bestimmt. Dettmar findet, daß sich  $\rho$  sowohl bei Kupfer- als bei Kohlebürsten mit der Geschwindigkeit und dem Druck nur unerheblich ändert, und für Kupferbürsten 0,3, für Kohle 0,175—0,227 beträgt. Der Wert 0,175 ergab sich zu Anfang des Versuches, 0,227 nach mehrstündigem Betrieb der Maschine. Diese Erhöhung der Reibung wird der Temperaturänderung zugeschrieben.

In den Lehrbüchern wird meistens für Kupferbürsten  $\rho = 0,25$  bis 0,3, für Kohlebürsten  $\rho = 0,2—0,3$  gesetzt.

In letzterer Zeit wurden im Laboratoire Central d'Électricité in Paris auf Veranlassung des französischen Marine-Ministeriums

<sup>1)</sup> „The electrical and mechanical resistance of dynamo brushes.“ The Electrical World and Engineer 1899, S. 417.

<sup>2)</sup> „Die Reibungsverluste in elektrischen Maschinen.“ ETZ 1899, S. 399.

Versuche an Kohlebürsten angestellt, unter anderem auch bezüglich der Reibung.<sup>1)</sup> Die Probestücke wurden auf eine rotierende Kupferscheibe aufgelegt, der Druck direkt durch Gewichtsbelastung bestimmt und die Differenz der Wattaufnahme des Antriebmotors mit und ohne Bürste abgelesen. Rechnet man hieraus  $\varrho$ , so findet man bei der gewählten Geschwindigkeit von  $v_k = 12,5$  und dem spezifischen Druck von  $g = 0,6$ , Werte von  $\varrho$ , welche zwischen 0,24 und 1,63 liegen.

Es wurde beobachtet, daß sich der Reibungskoeffizient mit der Geschwindigkeit zu ändern scheint, ferner, daß er bei stromführenden Bürsten auch von der Richtung des Stromes abhängt. Im allgemeinen war die Reibung für die Stromrichtung: Ring-Bürste merklich kleiner als bei der umgekehrten Richtung. In der zitierten Veröffentlichung sind die Qualitäten der untersuchten Kohlen nicht angegeben, der Zustand der Bürstenkontaktfläche entsprach auch nicht den normalen Verhältnissen, indem diese nur geschmirgelt, aber nicht eingelaufen war, so daß diese Resultate zur Bestimmung der Bürstenreibung einer Maschine nicht verwendet werden können.

Wie aus obigem ersichtlich, sind die bisher gefundenen Werte für  $\varrho$  sehr verschieden, die aufgestellten Gesetzmäßigkeiten aber widersprechen sich sogar in mehreren Fällen.

### III. Beschreibung der Versuchsanordnung.

Der leitende Gedanke bei der Ausbildung der im folgenden erläuterten Methode war, den Reibungskoeffizienten in möglichst direkter Weise zu bestimmen, um dadurch fremde Fehlerquellen zu vermeiden. Da der Reibungskoeffizient, wenn wir den Druck mit  $G$ , die Reibungskraft mit  $R$  bezeichnen, durch die Gleichung

$$\varrho = \frac{R}{G}$$

definiert ist, reduziert sich die Aufgabe im einfachsten Fall darauf, zwei Kräfte nach der gestellten Bedingung auf unmittelbarstem Wege, d. h. durch Vergleich mit Gewichten zu messen.

Die Form des Materials, auf welchem die Reibung der Bürste bestimmt werden soll, ergibt sich — sobald wir die Messungen bei verschiedenen Geschwindigkeiten vornehmen wollen — am natürlichsten zu der eines um seine Achse drehbaren Zylinders, auf dessen Mantelfläche die Bürste schleift. Diese Form entspricht auch der

<sup>1)</sup> „Essais ayant pour but l'identification des balais de charbon pour dynamos.“ Bulletins de la Société Internationale des Electriciens 1907, Bd. VII, S. 433.

häufigsten Verwendung bei Dynamomaschinen am besten. Setzen wir die Form des Kommutator- bzw. Ringmaterials in dieser Weise fest, so folgt unmittelbar, daß die Bürste, deren Auf-  
 lagedruck nach obigem durch Gewichtsbelastung bestimmt werden soll, auf den höchsten Punkt des Zylinders angeordnet werden muß. Die zweite zu messende Kraft  $R$  wirkt dann in horizontaler Richtung; um auch diese mit einem Gewicht vergleichen zu können, haben wir auf irgend eine Weise, möglichst unter Vermeidung von Reibung, eine Übersetzung in die vertikale Richtung herzustellen. Im vorliegenden Falle ist dies durch eine Rolle geschehen.

Für den Teil der Versuche, welcher die Bestimmung der Reibung auf Schleifringen zum Zweck hatte, wurde der von Prof. E. Arnold entworfene Bürstenuntersuchungs-Apparat benützt<sup>1)</sup>. Dieser besteht — wie aus Fig. 2 ersichtlich — aus einem in zwei Ringschmierlagern drehbaren Bronzering ( $R$ ) von 320 mm Durchmesser und 110 mm Breite. Unter der Lauffläche sind zwei Nickelband-Spiralen angeordnet, welche zu den Schleifringen  $G$  und  $F$  führen, und zur Heizung dienen. Mit einem Heizstrom von ungefähr 20 Amp. lassen sich leicht Temperaturen bis 100° C

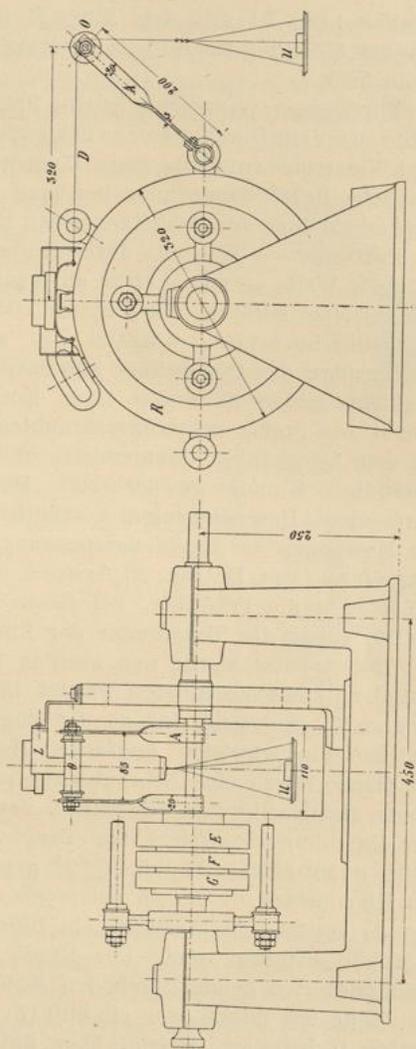


Fig. 2. Bürstenuntersuchungsapparat v. Dr.-Ing. E. Arnold, ausgerüstet zur Messung d. Reibungskoeffizienten.

<sup>1)</sup> s. Dr.-Ing. E. Arnold und E. Pfiffner a. a. O.

erreichen, und es konnte so das Verhalten des Reibungskoeffizienten auch nach dieser Richtung untersucht werden. Ein dritter Schleifring ( $E$ ) ist mit dem Ringe  $R$  in direkter Verbindung und dient zur Ableitung des Stromes, welcher durch die zu untersuchende Bürste fließt.

Zur Temperaturmessung ist eine Prüfspule aus isoliertem Kupferdraht von 0,2 mm Durchmesser zu beiden Seiten des Ringes  $R$  eingebettet, deren Widerstandserhöhung gegen Zimmertemperatur durch eine Wheatstone'sche Brückenordnung bestimmt werden kann. Um die Unannehmlichkeiten von Schleitkontakten zu vermeiden, sind die Enden der Prüfspule — einerseits durch Körperschluß, andererseits durch die hohle Welle — zu je einer an jedem Wellenende angebrachten Kontaktspitze geführt. Diese Spitze bildet die eine Elektrode eines Quecksilberkontaktes, während die andere als festangebrachte Messingröhre das Quecksilber aufnimmt. Der Abschluß der Röhre geschieht beiderseits durch einen Korkpfropf. Die Kontaktspitze besteht aus Stahl, mit aufgeschraubtem Kupferende, welches sich mit dem Quecksilber amalgamiert, und einen sehr guten, absolut beständigen Kontakt gewährleistet. Der Kontakt hat sich auch im Laufe dieser Untersuchungen vorzüglich bewährt. — Wie schon bei den Messungen der Übergangsspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur von Dr.-Ing. E. Arnold und E. Pfiffner konstatiert wurde, gibt die Prüfspule, bei einem Temperaturkoeffizienten von 0,0040, genau die Temperatur der Ringfläche.

Der Apparat wurde nun noch in folgender Weise ausgerüstet. Radial zu stellende Bürsten wurden in ein Klemmstück ( $K$  in den Figuren 3) eingesetzt, sodann der Bügel  $B$  und die zur Aufnahme der Belastungsgewichte bestimmte Holzscheibe  $H$  aufgelegt, und das Ganze durch eine Schraube zusammengehalten. Die Schraube diente gleichzeitig zum Festpressen der Bürste in dem Klemmstück. Für Metallbürsten, welche zur Tangierungsebene an der Auflagestelle unter einem Winkel  $< 90^\circ$  gestellt werden mußten, wurde das Klemmstück durch ein entsprechend gebogenes Blech ( $J$  in der Fig. 4) ersetzt, an welchem ein Stück der Bürste mittels einer Schraube befestigt war. Der Druck ging somit für beide Einspannungsarten genau durch den Mittelpunkt der Auflagefläche. — Am Ende des Bügels war ein Stift ( $T$ ) angelötet, hieran die beiden Drähte  $D$  befestigt, welche über die Rolle  $O$  zu einer Gewichtschale  $U$  führten (Fig. 2). Das die Reibungskraft ausbalancierende Gewicht wirkte auf diese Weise genau tangential zum höchsten Punkt des Schleifringes, wodurch kippende Drehmomente, welche sonst auf die Bürste wirken würden, vermieden wurden. Die Rolle — eine Fahrradnabe mit Kugellagern — war durch zwei, an einem

der vier Bürstenstifte des Apparates befestigte Arme gehalten (*A* in Fig. 2) und konnte durch Drehung des Stiftes in der Höhenrichtung verstellt werden.

Da es jedoch nicht möglich ist, dermaßen konstante Verhältnisse zu erzielen, daß ein Gleichgewicht längere Zeit hindurch bestehen könnte, mußte für eine Dämpfung gesorgt werden. Es wurde deshalb der Rahmen *L* mit den Haken *C* an der Bürstenbrille befestigt, und so je ein fixer Punkt rechts und links von der Bürste geschaffen, an welchen der Bügel *B* mittels dünner Gummibänder elastisch befestigt werden konnte. Auch der Zug der Gummibänder

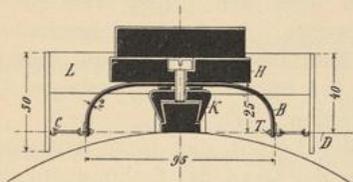


Fig. 3a.

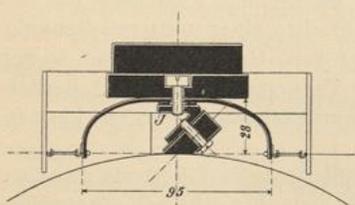


Fig. 4.

Einspannvorrichtung für Kohle- und Metallbürsten.

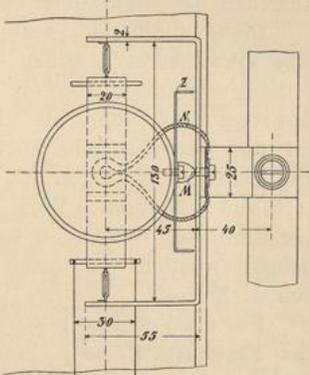
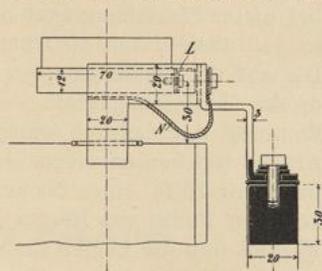


Fig. 3b und c.

wirkt in der Richtung der Reibungskraft. Zur Konstatierung einer eventuellen Verdrehung der Bürste waren an der Holzscheibe die Zeiger *Z* (Fig. 3) befestigt, welche bei richtiger Stellung der Bürste, vom Rahmen gleichen Abstand haben mußten. Sowohl an der Holzscheibe, wie am festen Rahmen war eine Marke (*M*) angebracht, deren Einspielen den Gleichgewichtszustand anzeigte.

Um aber sicher zu sein, daß in diesem Falle nicht der vielleicht einseitige Zug der Gummibänder mitgemessen werde, und um auch gleichzeitig den höchsten Punkt des Ringes zu ermitteln,

mußte vor Beginn jeder Versuchsreihe wie folgt verfahren werden. Es wurde die Stelle, auf welcher die Bürste aufgesetzt werden sollte, durch eine Wasserwage bestimmt, der Apparat vollständig zusammengestellt, und sodann die Bürste samt Bügel und Gewichtsscheibe, in genau vertikaler Richtung, ein wenig gehoben. Die Gummibänder wurden nun je nach Bedarf nachgelassen oder fester angezogen, bis die Marken einander gegenüberstanden. Es wurde bei dieser Einstellung auch die Gewichtsschale an die Drähte gehängt, so daß diese durch die Gummibänder gewissermaßen austariert war. Die auf die Schale gelegten Gewichte gaben also bei den Messungen direkt die Reibungskraft. — Das obenerwähnte Heben in vertikaler Richtung war dadurch ermöglicht, daß das hakenförmige Ende eines Armes, welcher an einem der Bürstenstifte des Apparates befestigt war, mit Hilfe eines Senkels genau über den vorher ermittelten höchsten Punkt des Ringes gestellt wurde. An der Gewichtsscheibe wurden nun die beiden Enden eines Bindfadens befestigt und dieser um den Haken gelegt. Das Heben der Bürste konnte dann durch Anziehen des Bindfadens erreicht werden.

Die Gummibänder hatten noch den Vorteil, daß durch stärkeres oder schwächeres Spannen derselben der Grad der Empfindlichkeit beliebig verändert werden konnte. Im allgemeinen hat sich eine derartige Einstellung als die günstigste gezeigt, bei welcher 5 g auf der Gewichtsschale noch einen merklichen Ausschlag des beweglichen Teiles zeigte. Es entspricht dies einer mittleren Genauigkeit von ungefähr 5 Proz. Eine größere Genauigkeit hat wegen der Einflüsse, welche im Laufe der Untersuchungen nicht berücksichtigt wurden und auch nicht berücksichtigt werden können, keinen Zweck.

Für die Versuche mit stromdurchflossener Bürste wurde zwischen das Klemmstück, resp. Befestigungsblech für die schiefgestellten Bürsten, und den Bügel eine flexible Litze (*N* in Fig. 3) eingeklemmt, welche zu der am Rahmen befestigten Schraube und dann zu einem Pol der Stromquelle führte. Der Rahmen mußte natürlich von der Bürstenbrille des Apparates isoliert werden.

#### IV. Durchführung der Versuche.

Von den Faktoren, welche die Bürstenreibung beeinflussen, wurden die folgenden — als die zugänglichsten — berücksichtigt und ihre Wirkung auf  $\varrho$  untersucht:

1. Auflagedruck,
2. Geschwindigkeit,
3. Temperatur,

4. Stromdichte, Stromrichtung und Stromart,
5. Material und Beschaffenheit der Lauffläche und zwar
  - a) glatter Bronzering oder Kupferkommutator,
  - b) Lauffläche trocken oder geölt.

Bei den Versuchen wurden die folgenden Bürstensorten verwendet:

Kohle- und Graphitbürsten:

- I. Conradty „W“,
- II. Morganite „Glied 1“,
- III. Morganite „Glied 2“,
- IV. Ringsdorff „K IV“,
- V. Le Carbone „Z“,
- VI. Le Carbone „BB 5“,

ferner:

VII. Endrueit Kupfer-Kohlebürste (Kohlebürste mit dünnen Kupfereinlagen),

VIII. Bronskol „W“, — endlich:

IX. Endrueit Metallbürste, bestehend aus dünnen unter hohem Druck zusammengepressten Kupferblättern mit Graphitzwischenlagen,

X. eine gleichfalls aus dünnem Kupferblech und Graphiteinlagen hergestellte, aber nur leicht zusammengehaltene Metallbürste der Firma Ringsdorff,

XI. Boudreauxbürste aus Tombakblech ohne Graphiteinlagen,

XII. Kupfergazebürste von Boudreaux mit Graphitzwischenlagen<sup>1)</sup>.

Bezüglich sämtlicher Versuche ist noch folgendes zu bemerken. Die Laufflächen der Bürsten wurden vor Beginn der Versuche in bekannter Weise geschmirgelt, dann während mehrerer Tage auf derselben Oberfläche, auf welcher die Versuche auszuführen waren, vollständig eingeschliffen. Der Ring bzw. Kommutator wurde immer in blankem Zustande gehalten, jedoch wurde er während einer Versuchsreihe unberührt gelassen. Es zeigte sich, daß ein Abwischen mit trockener Putzwolle die Verhältnisse ändert, und zwar meist in dem Sinne, daß die Reibung vermindert wird; die früheren Verhältnisse stellen sich nach kurzer Zeit wieder ein. — Kohle- und Graphitbürsten wurden radial auf die Lauffläche gestellt, während die Achsen der Metallbürsten mit der Horizontalebene einen Winkel von 45° bildeten.

Die Einflüsse der Faktoren 1 bis 4 wurden bei sämtlichen Bürsten untersucht, die Versuche bezüglich 5 wurden nur mit den Bürsten IV, VII, VIII und IX ausgeführt.

<sup>1)</sup> Die angegebene Numerierung der Bürsten ist im folgenden durchweg beibehalten.

## 1. Einfluß des spezifischen Druckes.

Die Umfangsgeschwindigkeit war bei diesen Versuchen  $v_k = 7,5$  m/sec = konstant, die Temperatur  $T \approx 15^\circ$  C, die Stromdichte  $s_u = 0$ . Material und Beschaffenheit der Lauffläche: trockener Bronzering des beschriebenen Bürstenuntersuchungs-Apparates. Der

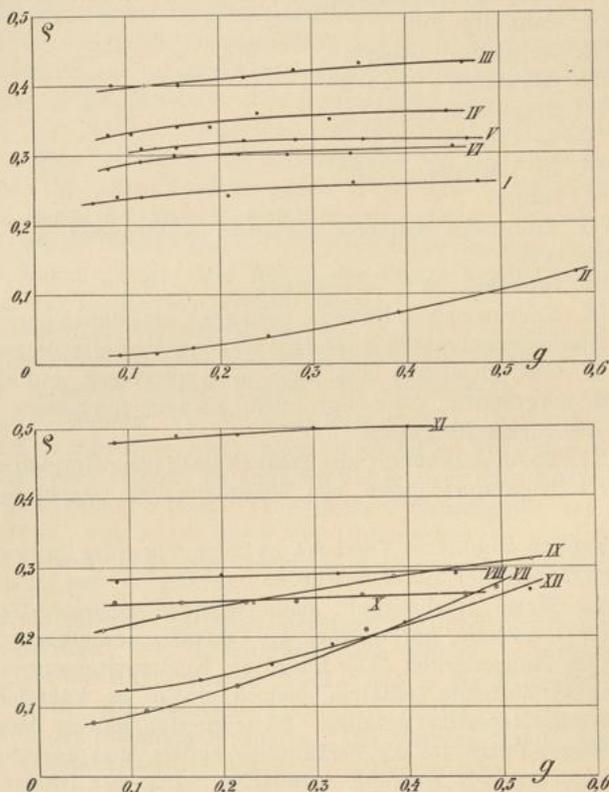


Fig. 5 und 6. Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom spezifischen Druck.

Druck wurde, wie erwähnt, durch Aufsetzen von verschiedenen Gewichten auf die Scheibe des Apparates verändert, und zwar geschah dies in den ungefähren Grenzen von  $g = 0,06$  bis  $0,5$  kg/cm<sup>2</sup>.

Die erhaltenen Resultate sind in den Kurven der Fig. 5 und 6, sowie in der Tabelle 1 zusammengestellt. Man ersieht, daß  $\varrho$  mit

Tabelle 1.

Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom spezifischen Auflagedruck auf glattem Bronzering.

$G'$  = Aufgelegte Gewichte;  $p$  = Eigengewicht der Bürste + Halter in kg;  $G = G' + p$ .

I. Conradty „W“;  $p = 0,135$ ;  
 $F = 3,75$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,788	0,477	0,46	0,26
1,15	1,288	0,344	0,335	0,26
0,65	0,788	0,21	0,19	0,24
0,3	0,438	0,117	0,105	0,24
0,2	0,338	0,0902	0,08	0,24
0,1	0,238	0,0635	0,055	0,23

II. Morganite „1“;  $p = 0,13$ ;  
 $F = 2,5$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,32	1,45	0,58	0,19	0,13
0,85	0,98	0,392	0,07	0,072
0,5	0,63	0,252	0,025	0,04
0,3	0,43	0,172	0,01	0,023
0,2	0,33	0,132	0,005	0,015
0,1	0,23	0,092	0,003	0,013

III. Morganite „2“;  $p = 0,135$ ;  
 $F = 2,8$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,15	1,285	0,46	0,55	0,43
0,85	0,985	0,35	0,41	0,43
0,65	0,785	0,28	0,33	0,42
0,5	0,635	0,227	0,26	0,41
0,3	0,435	0,155	0,175	0,40
0,2	0,335	0,12	0,135	0,40
0,1	0,235	0,084	0,095	0,40

IV. Ringsdorf „KIV“;  
 $p = 0,120$ ;  $F = 4$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,77	0,444	0,63	0,36
1,15	1,27	0,318	0,45	0,35
0,85	0,97	0,242	0,35	0,36
0,65	0,77	0,192	0,265	0,34
0,5	0,62	0,155	0,21	0,34
0,3	0,42	0,105	0,14	0,33
0,2	0,32	0,08	0,105	0,33

V. Le Carbone „Z“;  
 $p = 0,12$ ;  $F = 2,73$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,15	1,27	0,466	0,41	0,32
0,85	0,97	0,355	0,31	0,32
0,65	0,77	0,282	0,25	0,32
0,5	0,62	0,227	0,2	0,32
0,3	0,42	0,154	0,13	0,31
0,2	0,32	0,117	0,1	0,31

VI. Le Carbone „B B 5“;  
 $p = 0,128$ ;  $F = 2,85$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,15	1,278	0,45	0,4	0,31
0,85	0,978	0,342	0,3	0,3
0,65	0,778	0,278	0,23	0,3
0,5	0,628	0,221	0,19	0,3
0,3	0,428	0,151	0,13	0,3
0,2	0,328	0,115	0,095	0,29
0,1	0,228	0,08	0,065	0,28

Tabelle 1 (Fortsetzung).

VII. Endruweit „Kupfer-Kohle“.  
 $p = 0,122$ ;  $F = 3,6$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$q$
1,65	1,772	0,494	0,48	0,27
1,15	1,272	0,354	0,27	0,21
0,65	0,772	0,214	0,1	0,13
0,3	0,422	0,117	0,04	0,095
0,1	0,222	0,0616	0,025	0,078

VIII. Bronskol „W“.  
 $p = 0,142$ ;  $F = 4$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$q$
1,65	1,792	0,45	0,52	0,29
1,15	1,292	0,324	0,37	0,29
0,65	0,792	0,198	0,23	0,29
0,2	0,342	0,0855	0,095	0,28

IX. Endruweit „Metall“.  
 $p = 0,186$ ;  $F = 3,36$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$q$
1,65	1,786	0,532	0,55	0,31
1,15	1,286	0,384	0,37	0,29
0,65	0,786	0,234	0,2	0,25
0,3	0,436	0,13	0,1	0,23
0,1	0,236	0,07	0,05	0,21

X. Ringsdorff „Metall“.  
 $p = 0,133$ ;  $F = 2,8$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$q$
1,15	1,283	0,46	0,34	0,26
0,85	0,983	0,35	0,26	0,26
0,65	0,783	0,28	0,2	0,25
0,5	0,633	0,226	0,16	0,25
0,3	0,433	0,155	0,11	0,25
0,1	0,233	0,083	0,06	0,25

XI. Boudreaux „Tombak“.  
 $p = 0,153$ ;  $F = 3$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$q$
1,15	1,203	0,4	0,6	0,5
0,85	0,903	0,3	0,45	0,5
0,5	0,653	0,218	0,32	0,49
0,3	0,453	0,151	0,22	0,49
0,1	0,253	0,0845	0,12	0,48

XII. Boudreaux „Kupfergewebe“.  
 $p = 0,14$ ;  $F = 2,5$ .

$G'$	$G$	$g$	$R$	$q$
1,15	1,29	0,53	0,39	0,3
0,85	0,99	0,395	0,22	0,22
0,65	0,79	0,315	0,15	0,19
0,5	0,64	0,256	0,1	0,16
0,3	0,44	0,176	0,06	0,14
0,1	0,24	0,096	0,03	0,125

steigendem Druck ebenfalls größer wird, ferner, daß zwei charakteristische Formen der Funktion  $\varrho = f(g)$  gefunden wurden.

a)  $\varrho$  steigt langsamer als proportional  $g$ ,

b)  $\varrho$  „ schneller „ „ „ „

Die erste Form ist die öfter vorkommende, die zweite zeigte sich bei den Bürsten, welche relativ die kleinste Reibung hatten. (Morganite „1.“ und Endruweit „Kupfer-Kohle.“) Man wird deshalb solche Bürsten vorteilhaft mit kleinem Auflagedruck verwenden.

Ein charakteristischer Unterschied zwischen harten und weichen Kohlebürsten, sowie Metallbürsten, wie er sich bei Messung der Übergangsspannung ergibt, konnte nicht festgestellt werden.

## 2. Einfluß der Geschwindigkeit.

Die Umfangsgeschwindigkeit konnte mit Hilfe des Antriebsmotors von 0 bis  $\sim 25$  m/sec geändert werden. Bei höheren Werten von  $v_k$  war es mit der gewählten Versuchseinrichtung nicht mehr möglich, sicher zu messen, da die Bürste in Vibration geriet. Der Druck war während einer Versuchsreihe konstant, bei den einzelnen Bürsten aber je nach der Auflagefläche verschieden. Die Versuche wurden auf nicht geöltem Bronzering bei einer Temperatur von ungefähr  $15^\circ\text{C}$  und stromlosen Bürsten ausgeführt.

Als Resultat erhalten wir — siehe die Fig. 7 und 8 sowie Tabelle 2 — drei verschiedene Formen der Kurven, welche  $\varrho$  als Funktion von  $v_k$  darstellen:

a) Unabhängigkeit von  $v_k$ ,

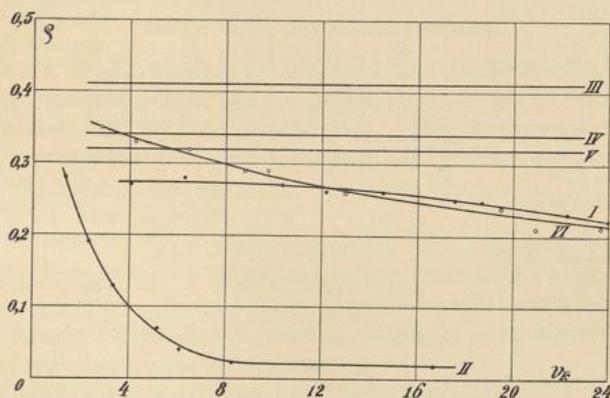


Fig. 7. Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Geschwindigkeit.



b) Ziemlich gleichmäßige Abnahme von  $\rho$  mit wachsendem  $v_k$  auch über 20 m/sec hinaus,

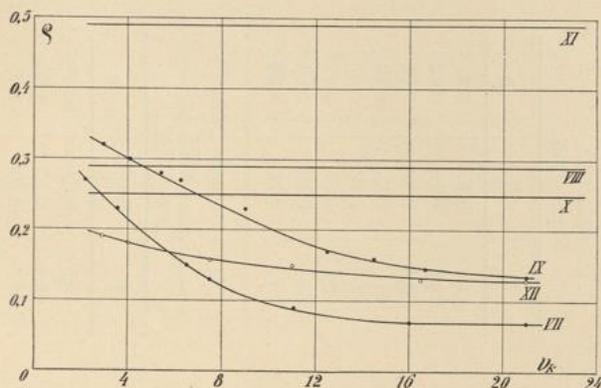


Fig. 8. Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Geschwindigkeit.

c) Sehr steile Abnahme mit zunehmendem  $v_k$  bei kleinen Geschwindigkeiten auf einen weiter nicht mehr veränderlichen Wert. Der erste Fall ist der häufigste, der dritte wurde nur bei den Bürsten gefunden, welche bei den Untersuchungen der Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom Druck die schnell aufsteigenden Kurven ergaben. (Morganite „1“ und „Kupfer-Kohle“.) Auch hier unterscheiden sich weiche und harte, Kohle- und Metallbürsten nicht charakteristisch.

### 3. Einfluß der Temperatur.

Es wurde die Lauffläche mit Hilfe der beschriebenen Heizvorrichtung auf Temperaturen bis gegen  $100^{\circ}\text{C}$  gebracht und die Änderungen der Reibung beobachtet. Die Ringgeschwindigkeit betrug durchweg 7,5 m/sec, der Druck war jeweils der gleiche wie bei Untersuchung der Einflusses der Geschwindigkeit. Die Bürsten waren auch hier stromlos.

Während die Beeinflussungsgesetze der unabhängigen Veränderlichen bei den vorhergehenden Versuchsreihen — Druck und Geschwindigkeit — je nach dem Bürstenmaterial zwar verschieden, jedoch von gleichem Sinne waren, zeigte es sich hier, daß die Reibung mit steigender Temperatur

- bei einzelnen Bürsten unveränderlich bleibt,
- bei anderen wächst,
- bei manchen wieder eine bedeutende Abnahme erfährt.

Tabelle 3.

## Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Temperatur.

I. Conradty „W“.

 $G = 0,788$  $g = 0,21$ .

$T$	$R$	$\rho$
15	0,19	0,24
33,6	0,19	0,24
46	0,19	0,24
58	0,19	0,24
70,5	0,19	0,24
83	0,19	0,24
95	0,19	0,24

II. Morganite „I“.

 $G = 0,43$  $g = 0,72$ .

$T$	$R$	$\rho$
15	0,01	0,023
33,6	0,01	0,023
46	0,01	0,023
58	0,01	0,023
70,5	0,01	0,023
83	0,01	0,023
95	0,01	0,023

III. Morganite „2“.

Nicht untersucht.

IV. Ringsdorff „K IV“.

 $G = 0,77$  $g = 0,192$ .

$T$	$R$	$\rho$
12	0,26	0,33
21,3	0,26	0,33
33,6	0,26	0,33
43	0,25	0,32
48	0,24	0,31
52,5	0,23	0,3
58	0,195	0,25
63	0,17	0,22
69	0,15	0,19
73	0,13	0,18
79	0,12	0,15
83	0,11	0,14

V. Le Carbone „Z“.

 $G = 0,62$  $g = 0,227$ .

$T$	$R$	$\rho$
11	0,2	0,32
21,3	0,2	0,32
33,6	0,19	0,31
46	0,18	0,29
58	0,17	0,27
70,5	0,17	0,27
83	0,165	0,26
95	0,16	0,26

VI. Le Carbone „BB5“.

 $G = 0,778$  $g = 0,273$ .

$T$	$R$	$\rho$
16,5	0,23	0,3
33,6	0,22	0,28
46	0,205	0,26
58	0,19	0,25
70,5	0,185	0,24
83	0,19	0,25

Tabelle 3 (Fortsetzung).

## VIII. Bronskol „W“.

 $G = 0,792$   
 $g = 0,198.$ 

T	R	e
16,5	0,23	0,29
33,6	0,23	0,29
46	0,25	0,32
58	0,27	0,34
70,5	0,3	0,38
83	0,3	0,38
96	0,3	0,38

## X. Ringsdorff „Metall“.

 $G = 0,633$   
 $g = 0,226.$ 

T	R	e
15	0,225	0,25
33,6	0,225	0,25
46	0,245	0,27
58	0,235	0,26
70,5	0,27	0,3
83	0,27	0,3
96	0,28	0,3

## VII. Endruweit „Kupfer-Kohle“.

 $G = 0,772$   
 $g = 0,214.$ 

T	R	e
13	0,1	0,13
21,3	0,1	0,13
33,6	0,1	0,13
46	0,1	0,13
58	0,1	0,13
70,5	0,095	0,12
83	0,085	0,11
96	0,08	0,1

## IX. Endruweit „Metall“.

 $G = 0,786$   
 $g = 0,234.$ 

T	R	e
21,3	0,21	0,27
33,6	0,21	0,27
46	0,2	0,25
58	0,2	0,25
70,5	0,2	0,25
83	0,205	0,26
96	0,21	0,27

## XII. Boudreaux „Kupfer-gewebe“.

 $G = 0,653$   
 $g = 0,218.$ 

T	R	e
15	0,1	0,16
21,3	0,1	0,16
33,6	0,1	0,16
46	0,095	0,15
58	0,095	0,15
70,5	0,095	0,15
83	0,1	0,16
96	0,1	0,16

Die erhaltenen Resultate sind in den Figuren 9 und 10, sowie Tabelle 3 graphisch und zahlenmäßig zusammengestellt.

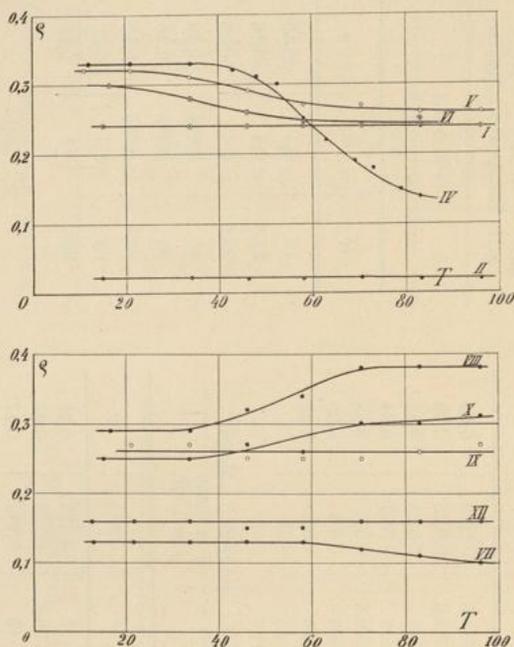


Fig. 9 und 10. Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Temperatur.

#### 4. Einfluß der Stromdichte.

Die Versuche wurden hierbei nach drei Richtungen hin ausgeführt:

- a) mit der Stromrichtung Ring-Bürste,
- b) „ „ „ Bürste-Ring,
- c) mit Wechselstrom,

und jeweils die Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Stromdichte gesucht.

Die Bürsten waren auf dem trockenen Bronzeringe aufgesetzt, der Druck war bei jeder Bürste der gleiche wie in den beiden vorhergehenden Versuchsreihen 2 und 3. Die Umfangsgeschwindigkeit betrug in allen Fällen 7,5 m/sec, die Temperatur  $\sim 15^{\circ}$  C.

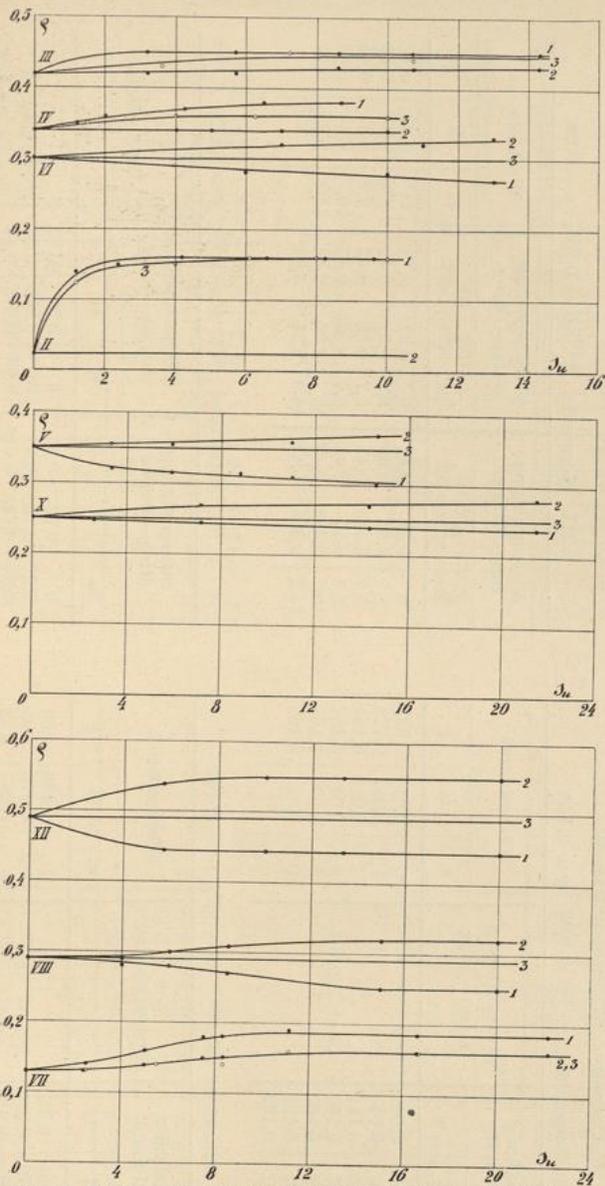


Fig. 11, 12 und 13. Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Stromdichte.

- 1 . . . Stromrichtung: Ring-Bürste,  
 2 . . . " Bürste-Ring,  
 3 . . . Wechselstrom.

Tabelle 4.  
Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Stromdichte und Stromrichtung.

I. Conradty „W“ nicht untersucht.

II. Morganite „1“.  $G = 0,43$ ;  $g = 0,172$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom	
$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$
0	0,01	0,023	0,023	0	0,01
1,2	0,06	0,14	0,128	1,2	0,055
2,4	0,065	0,151	0,151	4	0,065
4,2	0,07	0,162	0,162	6,1	0,07
6,6	0,07	0,162	0,162	8	0,07
8,25	0,07	0,162	0,162	10	0,07
9,6	0,07	0,162	0,162		

III. Morganite „2“.  $G = 0,785$ ;  $g = 0,28$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom	
$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$
0	0,33	0	0,33	0	0,33
3,2	0,35	3,2	0,33	3,6	0,34
5,7	0,355	5,7	0,33	7,2	0,35
8,6	0,35	8,6	0,335	10,7	0,34
10,7	0,355	10,7	0,34	14,3	0,35
14,3	0,355	14,3	0,34		

IV. Ringsdorf „K IV“.  $G = 0,77$ ;  $g = 0,192$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom	
$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$
0	0,265	0,34	0,34	0	0,265
1,25	0,275	0,35	0,35	1,5	0,275
2	0,28	0,36	0,36	4	0,285
4,25	0,29	0,37	0,36	6,25	0,28
6,5	0,3	0,38	0,36	10	0,28
8,75	0,3	0,38	0,38		

V. Le Carbone „Z“.  $G = 0,77$ ;  $g = 0,282$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom	
$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$	$s_u$	$\rho$
0	0,27	6	0,27	0	0,35
3,3	0,25	3,5	0,275	3,6	0,36
5,88	0,245	5,88	0,275	7,2	0,36
8,8	0,245	11	0,28	10,7	0,365
11	0,24	14,6	0,285	14,3	0,37
14,6	0,235	0,3			

Ohne Einfluß

Tabelle 4 (Fortsetzung).

VI. Le Carbone „BB 5“.  $G = 0,778$ ;  $g = 0,273$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom
$s_u$	$\varrho$	$s_u$	$\varrho$	
0	0,23	0	0,23	Ohne Einfluß
6	0,22	7	0,245	
10	0,22	11	0,25	
13	0,21	13	0,26	

VII. Endruweit „Kupfer-Kohle“.  $G = 0,772$ ;  $g = 0,214$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom	
$s_u$	$\varrho$	$s_u$	$\varrho$	$s_u$	$\varrho$
0	0,1	0	0,13	0	0,13
2,5	0,1	2,5	0,14	2,5	0,1
5	0,11	5	0,12	5,5	0,11
7,5	0,115	7,5	0,14	8,35	0,11
8,35	0,115	8,35	0,18	11,1	0,12
11,1	0,12	11,1	0,15	16,6	0,12

IX. Endruweit „Metall“.  $G = 0,786$ ;  $g = 0,234$ .  
Einfüsse sehr gering.VIII. Bronskol „W“.  $G = 0,792$ ;  $g = 0,198$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom
$s_u$	$\varrho$	$s_u$	$\varrho$	
0	0,23	0	0,23	Ohne Einfluß
4	0,225	4	0,23	
6	0,22	6	0,24	
7,5	0,21	7,5	0,245	
10	0,2	10	0,25	

X. Ringsdorf „Metall“.  $G = 0,633$ ;  $g = 0,226$ .

Stromrichtung Ring—Bürste		Stromrichtung Bürste—Ring		Wechselstrom	
$s_u$	$\varrho$	$s_u$	$\varrho$	$s_u$	$\varrho$
0	0,16	0	0,16	0	0,25
3,6	0,16	3,6	0,16	3,6	0,25
7,15	0,155	7,15	0,17	7,15	0,27
14,3	0,15	14,3	0,17	14,3	0,27
21,45	0,15	21,45	0,18	21,45	0,28
28,6	0,15	28,6	0,18	28,6	0,28

Ohne Einfluß

Tabelle 4 (Fortsetzung).

XI. Boudreaux „Tombak“.  $G = 0,653$ ;  $g = 0,218$ .

Stromrichtung Ring—Bürste			Stromrichtung Bürste—Ring			Wechselstrom
$s_u$	$R$	$\rho$	$s_u$	$R$	$\rho$	
0	0,32	0,49	0	0,32	0,49	Ohne Einfluß
5,68	0,29	0,145	5,68	0,35	0,54	
10	0,29	0,445	10	0,36	0,55	
13,3	0,29	0,445	13,3	0,36	0,55	
20	0,29	0,445	20	0,36	0,55	

XII. Boudreaux „Kupfergewebe“.  $G = 0,64$ ;  $g = 0,256$ .  
Einflüsse sehr gering.

Auch hier ergab sich eine Beeinflussung des Reibungskoeffizienten in verschiedenem Sinne. Bei beiden Stromrichtungen zeigte sich — wie aus den Figuren 11, 12 und 13 sowie Tabelle 4 ersichtlich ist — teils Unveränderlichkeit, teils Vergrößerung, teils Verminderung von  $\rho$ . In allen Fällen aber ergaben sich bei gleicher Stromdichte und verschiedenen Richtungen verschiedene Reibungen. Der Einfluß von Wechselstrom nahm im allgemeinen die Mittelstelle zwischen denen der beiden Gleichstromrichtungen ein. Eine bestimmte Gesetzmäßigkeit, der zufolge sich  $\rho$  für eine gewisse Stromrichtung bei der einen Bürste vergrößert, bei einer anderen verkleinert, wie sie z. B. Tibbals, Lowenberg und Burns angeben, konnte nicht festgestellt werden. — Hingegen zeigte sich, in Übereinstimmung mit den Resultaten des Laboratoire Central d'Electricité, daß  $\rho$  für die Stromrichtung Ring-Bürste meistens kleiner ist als für die umgekehrte Richtung.

Prozentual und auch absolut war der Einfluß der Stromdichte und der Stromrichtung bei der Bürste Morganite 1 am größten — übrigens eine Ausnahme der eben erwähnten Regel —, bei welcher der Strom in der Richtung Bürste-Ring keine Änderung der Reibung hervorruft, während der entgegengesetzt gerichtete Strom die Reibung versiebenfacht.

Die verschieden große Reibung der positiven und negativen Bürste hat naturgemäß auch eine verschieden große Abnutzung der Bürsten und des Metalles zur Folge, wodurch sich der verschiedene Verschleiß der positiven und negativen Bürsten und Ringe, wie er besonders bei den Erregerstrom-Schleifringen von Wechselstrom-Turbodynamos beobachtet wurde, teilweise erklären läßt.

### 5. Einfluß des Materiales und der Beschaffenheit der Lauffläche.

Es wurde die gesamte Ausrüstung, mit welcher der Bürstenuntersuchungsapparat zur Ausführung der Reibungsmessungen versehen war, nun auf einen Kommutator gebracht, wie dies aus der

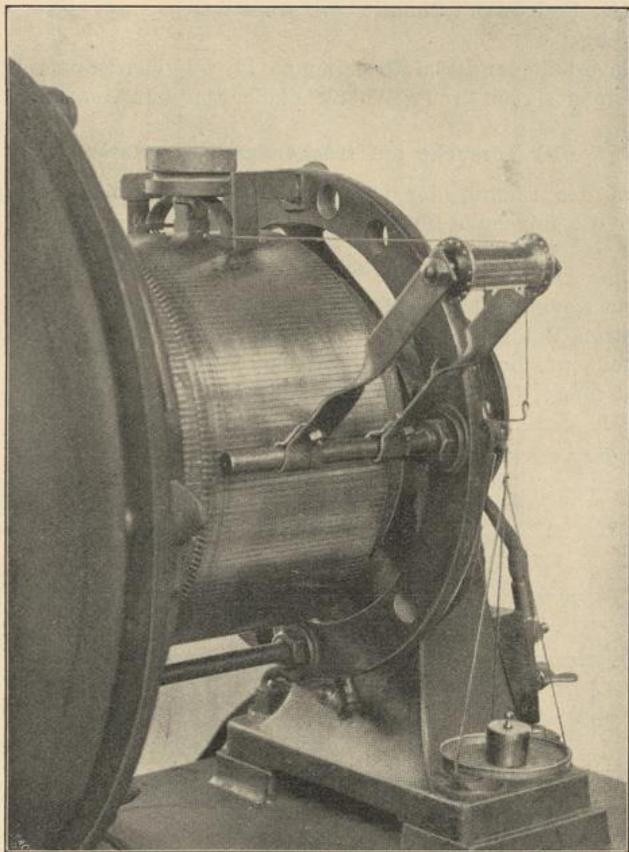


Fig. 14. Kommutator mit der Versuchseinrichtung zur Messung des Reibungskoeffizienten.

Fig. 14 zu ersehen ist. Der Kommutator hatte einen Durchmesser von 312 mm und bestand aus 200 Kupferlamellen von 4 mm Breite. Die Dicke der Glimmerisolation, welche nicht ausgehobelt war,

betrug 0,9 mm. Da der Durchmesser des Kommutators dem des früher benützten Ringes nicht gleich war, mußte man die Bürsten von neuem einlaufen lassen. Mit Rücksicht hierauf wurden am Kommutator nur die Bürsten

- IV. Ringsdorff „K IV“
- VII. Endruweit „Kupfer-Kohle“
- VIII. Bronskol „W“ und
- IX. Endruweit „Metall“

untersucht.

Die erhaltenen Resultate stimmen für alle vier Bürsten überein, so daß man sie mit großer Wahrscheinlichkeit verallgemeinern kann.

#### a) Versuche auf trockenem Kommutator.

Um den Einfluß der veränderten Lauffläche zu konstatieren, wurden die folgenden Versuche ausgeführt:

##### a) Einfluß des spezifischen Druckes.

Der Kommutator wurde während des Versuches durch einen Gleichstrom-Motor angetrieben und nun die gleichen Verhältnisse hergestellt wie bei den entsprechenden Versuchen am Ring. Also:  $v_k = 7,5$  m/sec,  $T \approx 15^\circ$  C,  $s_u = 0$ . Die Änderungen in  $\varrho$  sind folglich allein der anderen Lauffläche zuzuschreiben.

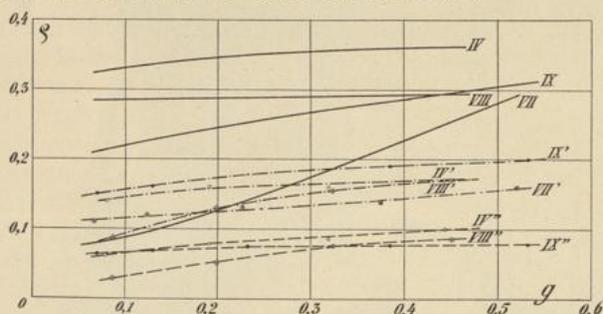


Fig. 15. Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom Material und der Beschaffenheit der Lauffläche.

Voll ausgezogen: Versuche auf trockenem Bronzering,  
strich-punktiert: Versuche auf trockenem Kommutator,  
gestrichelt: Versuche auf geöltem Kommutator.

Diese Änderungen bestehen durchweg in einer Abnahme der Reibung um ca. 20 bis 50 %, gegenüber den am Bronzering erhaltenen Werten, außerdem werden die Formen der Kurven  $\varrho = f(g)$  einander ähnlicher als früher, indem alle Kurven langsamer als proportional mit  $g$  ansteigen.

Tabelle 5.

Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom spez. Auflagedruck auf einem Kommutator.  
A. Kommutator trocken.

IV. Ringsdorf „K IV“.  
 $p = 0,12; F = 4.$

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,77	0,444	0,3	0,17
1,15	1,27	0,318	0,2	0,16
0,65	0,77	0,192	0,12	0,16
0,2	0,32	0,08	0,045	0,14

VII. Endruweit „Kupferkohle“.  
 $p = 0,122; F = 3,4.$

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,772	0,522	0,28	0,16
1,15	1,272	0,375	0,18	0,14
0,65	0,772	0,227	0,1	0,13
0,3	0,422	0,124	0,05	0,12
0,1	0,222	0,0655	0,025	0,11

VIII. Bronskol „W“.  
 $p = 0,142; F = 4.$

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,792	0,324	0,3	0,17
1,15	1,292	0,45	0,2	0,155
0,65	0,792	0,198	0,1	0,13
0,2	0,342	0,0855	0,03	0,088

IX. Endruweit „Metall“.  
 $p = 0,136; F = 3,36.$

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,786	0,532	0,36	0,2
1,15	1,286	0,384	0,25	0,19
0,65	0,786	0,234	0,14	0,18
0,3	0,436	0,13	0,07	0,16
0,1	0,236	0,07	0,035	0,15

Der Grund dieser beiden Erscheinungen liegt nun einerseits im anderen Material der Lauffläche, andererseits in der durch den Kommutator bedingten Vibration der Bürsten. Man kann sich die Verschiedenheit der Kurven gegen früher in der Weise erklären, daß man sich erst nur das Material von Bronze auf Kupfer geändert denkt. Je nach der Bürstensorte wird dann die Abhängigkeit  $\varrho = f(g)$  jeweils eine andere werden als im Falle eines Bronzerings. — Wird nun der glatte Kupfering in Lamellen geteilt, so wird dies eine abermalige Änderung in den Kurven hervorrufen, welche aber für alle Bürsten die gleiche sein wird. Finden wir nun als Resultat, daß diese Kurven voneinander weniger verschieden sind als die ursprünglichen, so kann man annehmen, daß die Änderungen hauptsächlich durch die un stetige Beschaffenheit der Lauffläche bedingt sind, deren Einfluß vom Bürstenmaterial unabhängig ist.

Die Resultate sind in Fig. 15 sowie Tabelle 5 zusammengestellt. In der Figur sind zum Vergleich auch die am Ring erhaltenen Werte nochmals eingetragen.

#### β) Einfluß der Geschwindigkeit.

Auch hier waren die Werte der übrigen  $\varrho$  beeinflussenden Faktoren dieselben wie bei den entsprechenden Versuchen am

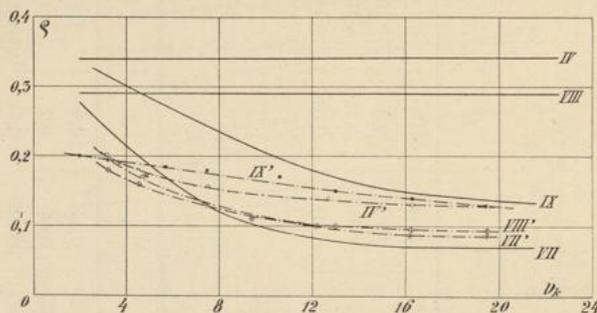


Fig. 16. Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom Material und der Beschaffenheit der Lauffläche:

Voll ausgezogen: Versuche am Bronzering,  
strich-punktiert: Versuche am Kommutator.

Ring. Die Versuche ergaben, daß infolge der Vibration auch die Reibung jener Bürsten mit wachsender Geschwindigkeit eine Abnahme erfährt, welche dieses Verhalten am glatten Ring nicht zeigten.

Tabelle 6.

Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten von der Umfangsgeschwindigkeit auf einem Kommutator. (trocken).

IV. Ringsdorf „K IV“. $G = 0,77$ ; $g = 0,192$ .			VII. Endruweit „Kupfer-Kohle“. $G = 0,772$ ; $g = 0,227$ .		
$v_k$	$R$	$\varrho$	$v_k$	$R$	$\varrho$
3,25	0,15	0,2	3,25	0,15	0,195
4,7	0,13	0,17	4,85	0,13	0,17
7,5	0,12	0,16	7,5	0,1	0,13
12,7	0,105	0,14	12,2	0,08	0,1
16,25	0,1	0,13	16,2	0,07	0,09
19,5	0,1	0,13	19,5	0,07	0,09

VIII. Bronskol „W“. $G = 0,792$ ; $g = 0,198$ .			IX. Endruweit „Metall“. $G = 0,786$ ; $g = 0,234$ .		
$v_k$	$R$	$\varrho$	$v_k$	$R$	$\varrho$
3,25	0,14	0,18	2	0,16	0,2
4,55	0,13	0,16	3,6	0,15	0,19
7,5	0,105	0,13	5,7	0,145	0,185
9,4	0,09	0,11	7,5	0,14	0,18
13	0,08	0,10	10,6	0,13	0,17
16,25	0,075	0,095	13	0,12	0,15
19,5	0,075	0,095	16,3	0,11	0,14
			19,5	0,105	0,13

Die Resultate sind samt denen, welche am Ring erhalten wurden, aus Fig. 16 und Tabelle 6 ersichtlich.

#### b) Versuche auf geschmiertem Kommutator.

Diese Versuche schlossen sich denen unter  $\alpha$ ) an, indem zur Konstatierung des Einflusses verschiedener Schmiermittel die Funktion  $\varrho = f(g)$  bestimmt wurde.

Bei allen Bürsten zeigte sich bei Anwendung von dickflüssigem Lageröl, sowie von Kommutatorschmiere eine Vergrößerung der Reibung. Eine bedeutende Verminderung ließ sich durch Schmieren des Kommutators mit Petroleum erreichen. Bei der Bürste VII (Kupfer-Kohle) jedoch, hatte auch Petroleum eine Vergrößerung der Reibung zur Folge.

Um während der Messungen konstante Verhältnisse zu haben, wurde das Schmieren durch ein, mit dem betreffenden Öl durchtränktes Stück Putzwolle besorgt, welches mittels einer Lederbürste leicht an den Kommutator gedrückt wurde. — Die Versuche wurden nur unter Anwendung von Petroleum ausgeführt. Die erhaltenen Kurven — siehe Fig. 15 und Tabelle 7 — zeigen denselben Charakter wie jene am trockenen Kommutator, ihre Ordinaten sind jedoch um ca. 50 % niedriger als dort, also 60 bis 80 % niedriger als am trockenen Bronzering.

Tabelle 7.

Abhängigkeit des Reibungskoeffizienten vom spez. Auf-  
lagedruck auf einem Kommutator.

## B. Kommutator geölt.

IV. Ringsdorff „K IV“.

 $p = 0,12; F = 4.$ 

VIII. Bronskol „W“.

 $p = 0,142; F = 4.$ 

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$	$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,77	0,444	0,18	0,1	1,65	1,792	0,324	0,165	0,09
1,15	1,27	0,318	0,11	0,087	1,15	1,292	0,45	0,1	0,077
0,65	0,77	0,192	0,06	0,078	0,65	0,792	0,198	0,04	0,05
0,2	0,32	0,188	0,02	0,062	0,2	0,342	0,0855	0,01	0,029

IX. Endrueit „Metall“.

 $p = 0,136; F = 3,36.$ 

$G'$	$G$	$g$	$R$	$e$
1,65	1,786	0,582	0,14	0,078
1,15	1,286	0,384	0,1	0,078
0,65	0,786	0,234	0,06	0,076
0,3	0,486	0,13	0,03	0,069
0,1	0,236	0,07	0,015	0,064

## V. Zusammenfassung der Resultate.

Aus den Versuchen gehen in bezug auf den Sinn des Einflusses der untersuchten Faktoren — d. h. ob sie  $e$  vergrößern oder verkleinern — die folgenden allgemein gültigen Sätze hervor:

1. Der Reibungskoeffizient vergrößert sich mit steigendem Druck.
2. Der Reibungskoeffizient verkleinert sich mit steigender Umfangsgeschwindigkeit.

3. Der Reibungskoeffizient ist kleiner auf einem Kupfer-Kommutator, als auf einem Bronzering.

4. Der Reibungskoeffizient nimmt ab beim Schmieren der Lauffläche mit dünnflüssigen Ölen.

5. Der Sinn des Einflusses der Temperatur, Stromdichte und Stromrichtung ist je nach dem Bürstenmaterial verschieden.

Um zu Zahlenwerten für  $\rho$  zu gelangen, welche einen Vergleich der Bürsten möglich machen, müssen wir, wegen des großen, und bei den einzelnen Bürsten verschiedenen Einflusses der untersuchten Faktoren, bei allen den gleichen Zustand voraussetzen. Wir wollen die folgenden, ungefähr normalen Verhältnisse annehmen:

$$\begin{aligned}g &= 0,15 \text{ kg/cm}^2 \\v_k &= 12 \text{ m/sec} \\T &= 60^\circ \text{ C.}\end{aligned}$$

Die normale Stromdichte ist je nach der Bürste verschieden, wir wählen bei den Bürsten

$$\left. \begin{array}{l} \text{II. Morganite „1“} \\ \text{IV. Ringsdorff „K IV“} \\ \text{V. Le Carbone „Z“} \end{array} \right\} s_u = 6 \text{ Amp./cm}^2$$

bei den Bürsten

$$\begin{array}{l} \text{III. Morganite „2“, } s_u = 12 \text{ Amp./cm}^2 \\ \text{VI. Le Carbone „BB“ 5, } s_u = 10 \text{ Amp./cm}^2 \end{array}$$

bei den übrigen Bürsten (Kohle-Metall- und Metallbürsten)

$$s_u = 20 \text{ Amp./cm}^2.$$

Um für diese Verhältnisse aus den Versuchen auf  $\rho$  folgern zu können, müssen wir die Annahme machen, daß sich die Ordinaten der Kurve, welche  $\rho$  in Abhängigkeit irgend eines Faktors, für je einen bestimmten Wert der übrigen Faktoren darstellt, proportional ändern, wenn die übrigen Faktoren andere Werte annehmen.

So ist z. B. für die Bürste II (Morganite „1“) bei

$$\begin{aligned}g &= 0,15 \\v_k &= 7,5 \\T &\simeq 15^\circ \text{ C} \\s_u &= 0 \\ \rho &= 0,02;\end{aligned}$$

für  $g=0,172$ , nimmt  $\rho$  bei der Steigerung der Geschwindigkeit von  $v_k=7,5$  auf  $v_k=12$ , von  $\rho=0,023$  auf  $0,02$  ab. Wir setzen nun voraus, daß die Abnahme von  $\rho$  bei  $g=0,15$  im gleichen Verhältnis geschieht, also

$$\text{von } \rho=0,02, \text{ auf } \rho=0,02 \cdot \frac{0,02}{0,023} = 0,017.$$

Ebenso kann man bezüglich der übrigen beeinflussenden Größen verfahren, und erhält für den trockenen Bronzering die Tabelle 8, in welcher  $\rho$  für stromlosen Zustand, für beide Stromrichtungen und für Wechselstrom enthalten ist. Außerdem ist noch der Mittelwert von  $\rho$  für beide Stromrichtungen — wie er bei Gleichstromführung meist in Betracht kommt — ausgerechnet. Betrachten wir diese letzteren Werte, so sehen wir, daß sie sich in den weiten Grenzen von 0,06 bis 0,5 bewegen, ferner, daß weder zwischen den Kohlebürsten verschiedener Härte, noch zwischen den Bürsten verschiedenen Materials (Kohle oder Metall) eine natürliche, charakteristische Trennung besteht.

Tabelle 8.  
Werte der Reibungskoeffizienten für trockenen  
Bronzering.

Bürste	Stromlos	Strom- richtung Metall— Bürste	Strom- richtung Bürste— Metall	Wechsel- strom	Mittelwert für beide Strom- richtungen
Conradty „W“ . . .	0,23	—	—	—	—
Morganite „1“ . . .	0,017	0,103	0,017	0,103	0,06
Morganite „2“ . . .	0,4	0,43	0,41	0,43	0,42
Ringsdorff „K IV“ . . .	0,24	0,27	0,24	0,26	0,255
Le Carbone „Z“ . . .	0,26	0,27	0,26	0,26	0,265
Le Carbone „BB 5“ . . .	0,22	0,2	0,23	0,22	0,215
Endrweit „Kupf.-Kohle“	0,087	0,125	0,107	0,107	0,116
Bronskol „W“ . . .	0,35	0,3	0,38	0,35	0,34
Endrweit „Metall“ . . .	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Ringsdorff „Metall“ . . .	0,28	0,27	0,31	0,28	0,29
Boudreaux „Tombak“ . . .	0,49	0,44	0,55	0,49	0,495
Boudreaux „Gewebe“ . . .	0,116	0,116	0,116	0,116	0,116

Was die Kohlebürsten betrifft, so scheint die Weichheit wohl eine notwendige, aber keine genügende Bedingung für kleine Reibung zu sein. So z. B. unterscheiden sich die Bürsten II. Morganite „1“ und III. Morganite „2“ im Härtegrad nicht wesentlich, während sie bezüglich Reibung bedeutende Unterschiede aufweisen.

Von den untersuchten Metallbürsten waren alle, bis auf XI. Boudreaux „Tombak“ mit Graphiteinlagen versehen. Bürste XI hat einen Reibungskoeffizienten von  $\sim 0,5$ , während der der übrigen zwischen 0,12 bis 0,3 liegt. Man ersieht hieraus, daß es auch aus diesem Grunde von Vorteil ist, die Metallbürsten mit Graphiteinlagen zu versehen.

Obzwar sich, wie schon erwähnt, keine Basis finden läßt, auf welcher die Bürsten so eingeteilt werden können, daß sich die Werte von  $\varrho$  der einzelnen Gruppen nicht überdecken, so soll doch, um die Resultate übersichtlicher zu gestalten, die folgende Einteilung angenommen werden: Graphit — Kohle — Metall mit Graphit-einlagen — Reines Metall.

Wir finden unter den oben angegebenen Verhältnissen für einen trockenen Bronzering aus der letzten Kolonne der Tabelle 8 bei:

Graphit	} Bürsten	$\varrho = 0,06 \sim 0,2$
Kohle		$= 0,2 \sim 0,35$
Metall-Graphit		$= 0,12 \sim 0,3$
Metall		$\approx 0,5.$

Die Werte von  $\varrho$  — für dieselben Verhältnisse — können wir für den Fall eines trockenen Kommutators, mit den gleichen Annahmen wie früher, nur für die am Kommutator untersuchten Bürsten IV, VII, VIII und IX bestimmen. Bei den übrigen Bürsten sind wir auf eine Schätzung angewiesen, wobei als Anhaltspunkt das Verhalten der betreffenden Bürste am Ring, verglichen mit den auch am Kommutator untersuchten, dienen kann. Wir ersehen aus den Versuchen am trockenen Ring, daß die folgenden Bürsten ein ähnliches Verhalten zeigen:

II. Morganite „1“ und VII. Endruweit „Kupfer-Kohle“.  
 III. Morganite „2“. V. Le Carbone „Z“. VI. Le Carbone „BB 5“ und IV. Ringsdorff „K IV“.

Tabelle 9.

Werte der Reibungskoeffizienten für trockenen Kommutator.

Bürste	Stromlos	Strom- richtung Metall— Bürste	Strom- richtung Bürste— Metall	Wechsel- strom	Mittelwert für beide Strom- richtungen
Conradty „W“ . . .	—	—	—	—	—
Morganite „1“ . . .	—	—	—	—	0,06
Morganite „2“ . . .	—	—	—	—	0,21
Ringsdorff „K IV“ . .	0,13	0,14	0,13	0,14	0,135
Le Carbone „Z“ . . .	—	—	—	—	0,13
Le Carbone „BB 5“ . .	—	—	—	—	0,1
Endruweit „Kupf.-Kohle“	0,088	0,125	0,108	0,108	0,117
Bronskol „W“ . . .	0,1	0,088	0,11	0,1	0,1
Endruweit „Metall“ . .	0,145	0,145	0,145	0,145	0,145
Ringsdorff „Metall“ . .	—	—	—	—	0,23
Boudreaux „Tombak“ . .	—	—	—	—	0,17
Boudreaux „Gewebe“ . .	—	—	—	—	0,09

XI. Boudreaux „Tombak“ und VIII. Bronskol „W“,  
 X. Ringsdorff „Metall“, XII. Boudreaux „Gewebe“ und  
 IX. Endruweit „Metall“  
 und nehmen deshalb an, daß sich die Reibung gegenüber den  
 Werten am Ring in folgender Weise vermindert:

Bei II. Morganite „1“	um 0 %.
III. Morganite „2“	„ 50 „
V. Le Carbone „Z“	„ 50 „
VI. Le Carbone „BB 5“	„ 50 „
X. Ringsdorff „Metall“	„ 20 „
XI. Boudreaux „Tombak“	„ 66 „
XII. Boudreaux „Gewebe“	„ 20 „

Die Werte, welche wir so erhalten, sind in Tabelle 9 zusammen-  
 gestellt, für die geschätzten Werte ist jedoch nur die letzte Kolonne  
 ausgefüllt. Die Grenzen sind infolge der schon erwähnten aus-  
 gleichenden Wirkung des Kommutators enger, und zwar liegt  $\rho$   
 zwischen 0,06 und 0,2.

Wir entnehmen der Tabelle für einen trockenen Kommutator:

bei Graphit	} Bürsten	$\rho = 0,06 \sim 0,1$
Kohle		$= 0,1 \sim 0,2$
Metall-Graphit		$= 0,1 \sim 0,2$
Metall		$\approx 0,17.$

Obzwar die Versuche bezüglich einer mit Petroleum geölten  
 Lauffläche nur auf dem Kommutator ausgeführt wurden, können  
 wir für die in dieser Hinsicht untersuchten drei Bürsten IV, VIII

Tabelle 10.

Werte der Reibungskoeffizienten für geölten Bronzering.

Bürste	Stromlos	Strom- richtung Metall— Bürste	Strom- richtung Bürste— Metall	Wechsel- strom	Mittelwert für beide Strom- richtungen
Conradty „W“ . . . . .	—	—	—	—	—
Morganite „1“ . . . . .	—	—	—	—	—
Morganite „2“ . . . . .	—	—	—	—	0,21
Ringsdorff „KIV“ . . . . .	0,12	0,13	0,12	0,13	0,125
Le Carbone „Z“ . . . . .	—	—	—	—	0,13
Le Carbone „BB5“ . . . . .	—	—	—	—	0,10
Endruweit „Kupf.-Kohle“		$\rho$ vergrößert			
Bronskol „W“ . . . . .	0,21	0,18	0,23	0,21	0,20
Endruweit „Metall“ . . . . .	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Ringsdorff „Metall“ . . . . .	—	—	—	—	0,14
Boudreaux „Tombak“ . . . . .	—	—	—	—	0,25
Boudreaux „Gewebe“ . . . . .	—	—	—	—	0,06

und IX die Werte von  $\rho$  unter den gleichen Annahmen, wie in den beiden vorhergehenden Fällen, für diese drei Bürsten mit ziemlicher Sicherheit auch für den geölten Bronzering bestimmen. Die Werte der übrigen Sorten müssen auch hier geschätzt werden. Wir erhalten auf diese Weise die Tabelle 10. Es wurden bei den Bürsten, welche nur auf trockener Lauffläche untersucht worden waren, die folgenden Verminderungen der Reibung gegenüber den Werten am trockenen Ring angenommen:

II. Morganite „1“	0	%	(wie Bürste VII)
III. Morganite „2“	50	"	( " " IV)
V. Le Carbone „Z“	50	"	( " " IV)
VI. Le Carbone „BB 5“	50	"	( " " IV)
X. Ringsdorff „Metall“	50	"	( " " IX)
XI. Boudreaux „Tombak“	50	"	( " " VIII)
XII. Boudreaux „Gewebe“	50	"	( " " IX)

Die Grenzen ergeben sich zu 0,06 und 0,25, und wir erhalten für

Graphit	} Bürsten	$\rho \approx 0,1$
Kohle		$= 0,1 \sim 0,2$
Metall-Graphit		$= 0,06 \sim 0,15$
Metall		$\approx 0,25.$

Schießlich erhalten wir noch in der gleichen Weise wie früher die Reibungskoeffizienten für einen mit Petroleum geölten Kommutator, welche in Tabelle 11 zusammengestellt sind. Es wurden

Tabelle 11.

Werte der Reibungskoeffizienten für geölten Kommutator.

Bürste	Stromlos	Strom- richtung Metall- Bürste	Strom- richtung Bürste- Metall	Wechsel- strom	Mittelwert für beide Strom- richtungen
Conradty „W“ . . . . .	—	—	—	—	—
Morganite „1“ . . . . .	—	—	—	—	—
Morganite „2“ . . . . .	—	—	—	—	0,13
Ringsdorff „KIV“ . . . . .	0,065	0,077	0,065	0,069	0,068
Le Carbone „Z“ . . . . .	—	—	—	—	0,08
Le Carbone „BB5“ . . . . .	—	—	—	—	0,065
Endruweit „Kupf.-Kohle“	$\rho$ vergrößert				
Bronskol „W“ . . . . .	0,062	0,053	0,068	0,062	0,06
Endruweit „Metall“ . . . . .	0,061	0,061	0,061	0,061	0,061
Ringsdorff „Metall“ . . . . .	—	—	—	—	0,11
Boudreaux „Tombak“ . . . . .	—	—	—	—	0,1
Boudreaux „Gewebe“ . . . . .	—	—	—	—	0,05

Arnold, Arbeiten. I.

hierbei die folgenden Abnahmen der Reibung gegenüber den Werten am trockenen Ring zugrunde gelegt:

für II. Morganite „1“	0	%	(wie Bürste VII)
III. Morganite „2“	70	„	( „ „ IV)
V. Le Carbone „Z“	70	„	( „ „ IV)
VI. Le Carbone „BB 5“	70	„	( „ „ IV)
X. Ringsdorff „Metall“	60	„	( „ „ IX)
XI. Boudreaux „Tombak“	80	„	( „ „ VIII)
XII. Boudreaux „Gewebe“	60	„	( „ „ IX).

Die Grenzen für  $\varrho$  sind hier am engsten, nämlich 0,05 und 0,12.  
Es ist für

Graphit	} Bürsten	$\varrho \approx 0,06$
Kohle		$= 0,06 \sim 0,12$
Metall-Graphit		$= 0,05 \sim 0,1$
Metall		$\approx 0,1.$

Fassen wir die vier betrachteten Fälle: trockener und geölter Bronzering, trockener und geölter Kommutator, zusammen, so sehen wir, daß sich  $\varrho$  für die vorausgesetzten Verhältnisse in den Grenzen zwischen 0,05 und 0,5 bewegt. Es liegt der Reibungskoeffizient für

Graphit	} Bürsten	zwischen 0,06 und 0,2	
Kohle		„ 0,06	„ 0,35
Metall-Graphit		„ 0,05	„ 0,3
Metall		„ 0,1	„ 0,5

Wegen der Weite dieser Grenzen wird es sich in Fällen, wo es darauf ankommt, die Größe der Reibung genau zu kennen, sei es wegen der Größe der Reibungsverluste selbst, wegen der Erwärmung des Kommutators oder wegen der Abnutzung des Kommutators und der Bürsten, empfehlen, die Reibung unter den tatsächlichen Verhältnissen experimentell zu bestimmen. — Die beschriebene Versuchseinrichtung ist für diese Zwecke besonders geeignet; sie ist mit den einfachsten Mitteln herstellbar und kann auf jeden Kommutator oder Ring angebracht werden, wie dies auch aus Fig. 14 hervorgeht.