

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

V. Verhalten der Kohlebürsten innerhalb der Funkengrenze

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

V. Verhalten der Kohlebürsten innerhalb der Funkengrenze.

1. Verhalten der Kohlebürsten auf Schleifringen.

Der Zusammenhang von Strom und Übergangsspannung bei Kohlebürsten wurde zunächst an besonderen, die komplizierten Vorgänge bei der Stromwendung vereinfachenden Einrichtungen untersucht. Diese Untersuchungen ergaben bekanntlich recht mannigfache und oft komplizierte, unübersichtliche Zusammenhänge. Wollte man aber eine mathematische Theorie der Kommutation schaffen, so müßten auch diese Vorgänge in eine, und zwar einfache und möglichst lineare Abhängigkeit voneinander gebracht werden. So entstand aus den an Schleifringen erhaltenen Kurven die Zusammengehörigkeit von Stromdichte und Übergangsspannung bei Anwendung von Wechselstrom und Wellenstrom die Beziehung¹⁾

$$\Delta P = e_u + s_{ux} \cdot R_w \quad \text{und} \quad R_k = \frac{e_u}{s_{ux}} + R_w.$$

Da aber e_u sehr klein und noch dazu nicht einfach erhältlich ist, vernachlässigt man das erste Glied der Gleichung und erhält

$$R_w = R_k, \\ \Delta P = R_k \cdot s_{u \text{ eff}}.$$

Bei Schleifringen, für welche diese Beziehung gilt, ist die Stromdichte über die ganze Breite der Bürste konstant, oder doch annähernd konstant, während sie bei der Kommutation stark veränderlich ist. Es handelt sich da um Wellenströme mit sehr hohen Periodenzahlen. Es war daher die Frage zu prüfen, ob innerhalb der Funkengrenze auch dann noch $R_k = \text{konst.}$ gesetzt werden darf. Der Weg dieser Prüfung ist im vorigen Kapitel gegeben.

Die folgenden Figuren sind Ausschnitte aus den in der oben beschriebenen Weise erhaltenen Oszillogrammen.

Bei allen Figuren geht die Zeit als Abszisse von links nach rechts. Die Dauer der Lamellenstromkurve ist durch zwei gestrichelte, senkrechte Linien gekennzeichnet. Hier soll uns zunächst nur der Verlauf der Kurven innerhalb dieser Grenzen beschäftigen. Sie konnten mit Hilfe der Kontaktgebermarken auf den Oszillogrammen sehr genau bestimmt werden. Bei allen Versuchen betrug die Bürstenbreite $b = 20 \text{ mm}$. Es waren also höchstens drei, mindestens zwei Spulen kurzgeschlossen. Die benützte Bürste war eine mittelharte Kohle der Firma Le Carbone, Marke L. C.

¹⁾ Arnold, Die Gleichstrommaschine, Bd. I, S. 350.

Die Berührungsfläche pro Stift beträgt, wenn eine Bürste aufliegt, $F_b = 5,85 \text{ cm}^2$ und bei zwei Bürsten pro Stift $F'_b = 11,38 \text{ cm}^2$.

Für die hier zu behandelnden Fragen ist es gleichgültig, ob die Maschine mit Wendepolen versehen ist oder nicht. Das Material ist deshalb nicht in zwei Gruppen getrennt worden. Die entsprechenden Feldkurven sollen erst später behandelt werden. In der Legende der einzelnen Figuren ist alles Wichtige kurz zusammengestellt.

2. Geradlinige Kommutation.

Man hat sich daran gewöhnt, als idealen Verlauf des Stromes in einer Spule während ihres Übertrittes aus dem einen in den anderen Ankerstromkreis den geradlinigen Verlauf anzusehen. Die entsprechende Lamellenstromkurve ist ein Trapez, deren der Grundlinie parallele Seite gleich $\frac{b-\beta}{100 \cdot v_k}$ ist.

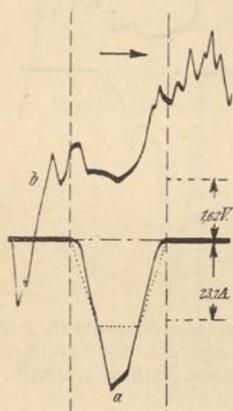


Fig. 5. *a* Lamellenstromkurve. *b* Durchlaufende Potentialkurve. $J = 60,8 \text{ Amp. } E = 100 \text{ Volt. } n = 1000.$ Erregung der Wendepole $i_{ew} = 45 \text{ Amp.}$ Windungszahl pro Spule $w_w = 36.$ Zwei Bürsten pro Stift.

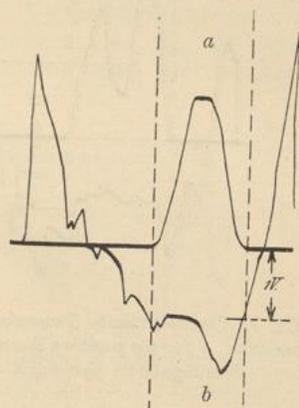


Fig. 6. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve (negative Bürste). $J = 67,2 \text{ Amp. } E = 100 \text{ Volt. } n = 1000.$ Eine Bürste pro Stift, $17,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben.

Ich habe mich bemüht, eine diesem Ideale entsprechende Kurve aufzunehmen, doch ist es mir nie geglückt. In den Fig. 5 und 6 sind zwei Fälle dargestellt, bei denen der Verlauf der Kurven einem angenähert geradlinigen Verlauf des Kurzschlußstromes entspricht. In die Fig. 5 ist gestrichelt der Verlauf der Kurve eingetragen, den sie bei genau geradlinigem Verlauf haben müßte.

Wie man sieht, sind die Abweichungen noch recht beträchtlich. Die Potentialkurve weicht von der zu erwartenden Form noch sehr ab. In das Oszillogramm sind die Eichwerte mit eingezeichnet.

Einer fast geradlinigen Stromwendung entspricht auch Fig. 7a. Sie stellt eine leicht beschleunigte Stromwendung dar, was man daraus sieht, daß die größten Stromwerte vor der Mitte der Kurve liegen. Überhaupt läßt sich aus der Lamellenstromkurve ebenso leicht und sicher und aus den hier zusammen aufgenommenen Kurven mit weit größerer Sicherheit die Art der Kommutation erkennen. Es ist deshalb in allen folgenden Fällen auf die Wiedergabe der Kurzschlußstromkurve verzichtet worden. Einige dieser Kurven findet man später mit den nötigen Hinweisen versehen bei den Feldkurven.

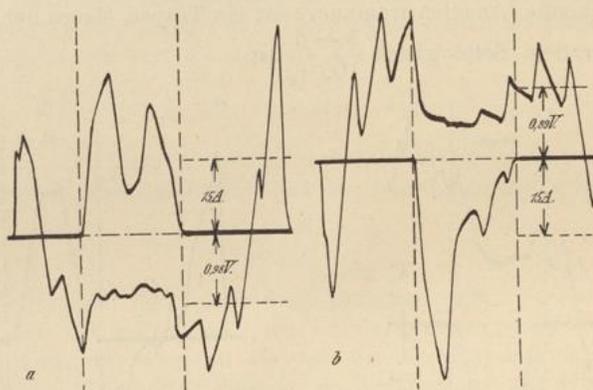
256a
b

Fig. 7. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve, *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J=54,2$ Amp., $E=100$ Volt, $n=1000$. Wendepole in Serie mit dem Anker. Zwei Bürsten pro Stift.

In der Fig. 7a ist der Verlauf der Potentialkurve annähernd parallel der Mittellinie wenigstens unter der Mitte der Bürste. An den Kanten hat sie allerdings einen von anderen Umständen bedingten Verlauf.

Fig. 7b gibt die gleichzeitig mit Fig. 7a aufgenommene Lamellenstrom- und durchlaufende Potentialkurve unter der positiven Bürste. Man sieht, daß beide Bürsten recht verschieden kommutieren. Da die Maschine vollständig symmetrisch gebaut und auch die Wendepole sorgfältig eingesetzt waren, ist die Ursache der auffallenden Verschiedenheit der für die beiden Stromrichtungen ungleiche Wert des Übergangswiderstandes. Aus den Versuchen an Schleifringen her weiß man, daß er für die Stromrichtung Metall-Kohle (positive

Bürste) größer ist als für die negative Bürste. Die Folge davon ist, daß, was bei den üblichen Theorien meist außer acht bleibt, die Kommutation unter beiden Bürsten unter sonst ganz gleichen Umständen immer verschieden sein muß.

Wenn die Bedingung dafür, nämlich

$$e_k = e_r + e_w,$$

in jedem Augenblick streng erfüllt¹⁾ ist, kann unter beiden Bürsten konstante Stromdichte stattfinden. Weicht aber e_k von dem so bestimmten Verlauf ab, so hat dann die entstehende zusätzliche EMK e_z ganz verschiedenen Einfluß auf die Stromverteilung über die Berührungsf lächen. Im ganzen sind die zusätzlichen Ströme unter der positiven Bürste kleiner und die Stromwendung deshalb besser.

3. Verhalten der Kohlebürsten auf dem Kommutator.

Zu dem Oszillogramm Fig. 7a und b findet man in Fig. 8 und 9 die abgeleiteten Kurven. Die Verlustkurve nimmt einen Verlauf, der dem der Lamellenstromkurve ähnlich ist. Die Stromdichte- und Energiedichtenkurven verlaufen nach Art der durchlaufenden Potentialkurve.

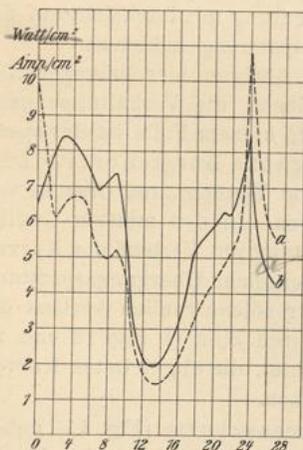


Fig. 8. *a* Energiedichtenkurven, *b* durchlaufende Stromdichtenkurve zu Fig. 7a.

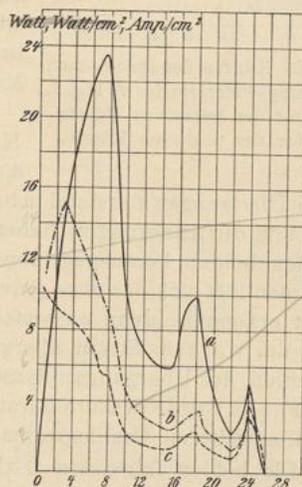


Fig. 9. Durchlaufende Verluste (*a*), Stromdichten (*b*) und Energiedichtenkurven (*c*) zu Fig. 7b.

¹⁾ s. E. Arnold, Die Gleichstrommaschine, 2. Aufl. Bd. I, S. 416.

Hätte man es wirklich mit einem konstanten spezifischen Übergangswiderstand zu tun, so müßten die beiden letzten Kurven parallel und nur durch eine Maßstabänderung aus der durchlaufenden Potentialkurve zu erhalten sein. Der spezifische Übergangswiderstand selbst ist in der Fig. 10 dargestellt.

Als Ordinaten sind

$$R_k = \frac{\Delta P_t}{s_{ut}}$$

aufgetragen und als Abszisse die Zeit, wobei die Zeit des Fortschreitens um eine Lamellenteilung in acht Teile geteilt ist. Die Numerierung der Abszissenachse der Kurven entspricht dieser Einteilung. Diese spezifischen Übergangswiderstände sind weit davon entfernt, konstant zu sein. Im Mittel beträgt der Übergangswiderstand für die negative Bürste 0,179 Ω und für die positive Bürste 0,215 Ω . Das sind jedoch keine Zahlen, die für die betreffende Kohlensorte charakteristisch sind und denen eine physikalische Bedeutung mit Rücksicht auf die Maschinenspannung zukommt.

Für die übrigen hier beigegebenen Kurven liegen die Verhältnisse ganz ähnlich. In keinem Falle ist der spezi-

fische Übergangswiderstand über die ganze Bürstenbreite konstant und die Änderungen haben dieselbe Tendenz und Ursache wie bei den beiden herausgegriffenen Kurven. In den meisten Oszillogrammen läßt sich das ohne jede Auswertung am Verlauf der Kurven selbst erkennen; denn es besteht eine endliche Übergangsspannung auch da, wo kein Strom übergeht. Für solche Stellen verliert die Definition des Übergangswiderstandes ihren Sinn (s. Fig. 12 und 21 bis 29). Es wurde deshalb darauf verzichtet, die abgeleiteten Kurven für alle weiteren Oszillogramme zu geben.

Die beiden folgenden Oszillogrammausschnitte (Fig. 11) geben eine Überkommutation für beide Polaritäten derart, wie sie die Theorie als bestehend voraussetzt. Die Bürsten sind blank und funkenfrei. Daß man es mit Überkommutation zu tun hat, sieht man daraus, daß die Lamellenstromkurve die Abszissenachse gegen Ende hin durchschneidet. Bei Unterkommutation liegt der Schnitt

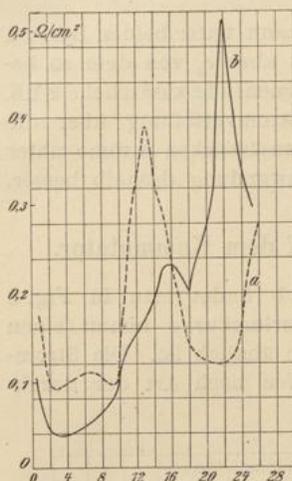


Fig. 10. Kurven des spezifischen Übergangswiderstandes zu Fig. 7. a unter der negativen Bürste. b unter der positiven Bürste.

258

mit der Achse vor der Mitte der Kurve, und der Hauptstromübergang verschiebt sich nach der ablaufenden Kante der Bürste hin. Die Potentialkurve schneidet die Abszissenachse stets in demselben Punkte wie die Lamellenstromkurve.

Der zusätzliche Kurzschlußstrom verschwindet, ohne eine plötzliche Spannungsänderung unter der Bürste hervorzubringen. Beschleunigt man die Stromwendung durch Verstärken der Wendepol-erregung noch mehr, so erreicht man keine stärkere Ausbildung der zusätzlichen Ströme, sondern es tritt jener merkwürdige

Zustand der scheinbaren Erhöhung des Übergangswiderstandes ein, der ein stromloses Abläufen der Lamelle bewirkt. Die mittlere Übergangsspannung unter den Bürsten ist jedoch bedeutend gestiegen (Fig. 12).

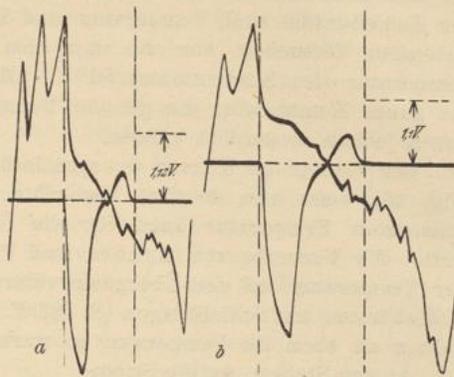


Fig. 11. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve, *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

$J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$.
 $i_{em} = 92$ Amp., $w_w = 36$. Zwei Bürsten pro Stift.

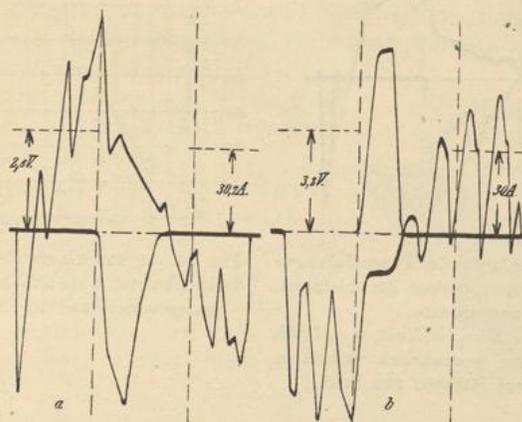


Fig. 12. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

$J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. $i_{em} = 102$ Amp., $w_w = 36$.

4. Der Einfluß der Temperatur.

Die Ursachen des im vorstehenden beschriebenen Verhaltens der Kohlebürsten sind Temperatur und Reibung. Bei den in Rede stehenden Versuchen war die mit dem Thermometer gemessene Temperatur des Kommutators 60°C . Man kann annehmen, daß der ganze Kommutator die gleiche Temperatur hatte. Die Kohlen waren jedoch wesentlich kühler.

Der Verlauf der Kurven des spezifischen Übergangswiderstandes (Fig. 10) weist nun deutlich daraufhin, daß die Annahme einer konstanten Temperatur auch für die Übergangsschicht nicht zutrifft. Die Versuche von Arnold und Pfiffner über den Einfluß der Temperatur auf den Übergangswiderstand bei Anwendung von Kohlebürsten auf Schleifringen (S. 299 ff.) zeigen, daß kein anderer Faktor als eben die Temperatur so stark einwirken kann.

An den Stellen, wo die Stromdichten am größten sind, hat man auch den relativ kleinsten spezifischen Übergangswiderstand. An diesen Stellen ist die Wärmeerzeugung am größten, und infolge-

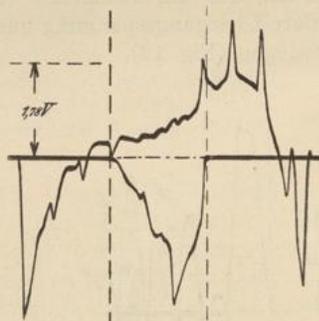


Fig. 13. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurven für die negative Bürste.

$J = 36,6$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, Bürsten in der geometrisch neutralen Zone. Zwei Bürsten pro Stift.

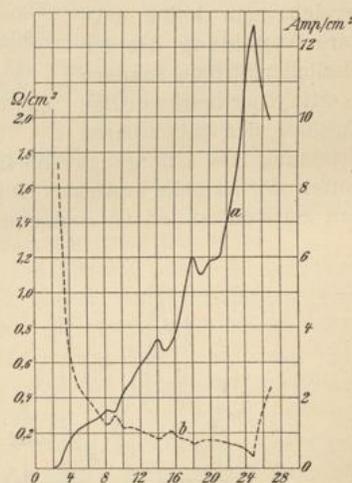


Fig. 14. *a* durchlaufende Stromdichtenkurve, *b* spezifischer Übergangswiderstand zu Fig. 13.

dessen auch die örtliche Temperatur, die den Übergangswiderstand herunterdrückt. Dadurch wird wieder die Strombelastung der betreffenden Stelle vergrößert, bis sich für die drei Faktoren, Strom, Wärme und Ableitung der Wärme ein Gleichgewichtszustand aus-

gebildet hat. Wie man weiter aus den angezogenen Versuchen sieht, variiert die Übergangsspannung unter dem Einfluß der Temperatur am meisten in dem Intervall zwischen 40—80°. Man wird also bei mittleren Kollektortemperaturen, die außerhalb der angegebenen Temperaturintervalle liegen, ein gleichmäßigeres Verhalten des Übergangswiderstandes erwarten dürfen.

Bei der benutzten Versuchsanordnung war es nicht möglich, die Kommutatortemperatur willkürlich einzustellen. Um gleichwohl den Einfluß der Temperatur wenigstens übersehen zu können, wurde die Maschine so belastet, daß die betreffende Temperatur erreicht wurde, oder es wurde für die niederen Temperaturen sofort nach Belastung, ehe die Maschine sich erwärmen konnte, die gewünschten Aufnahmen gemacht. Auf diese Weise ist das Oszillogramm Fig. 13 entstanden. Die Stromwendung ist in diesem Falle verzögert. Wie nach den vorhergehenden Überlegungen zu erwarten war, ist hier der Übergangswiderstand (Fig. 14) weit weniger von der Stromdichte abhängig, obwohl er auch hier mit zunehmender Stromdichte etwas abnimmt. Nur an den Bürstenkanten ändert er sich in anderer Weise.

5. Der Einfluß der Reibung.

Weiter werden Stromverteilung, Temperatur und Übergangswiderstand von der Reibung beeinflusst, die aber auch umgekehrt wieder auf sie bestimmend zurückwirken. Wie die Versuche von Liska¹⁾ zeigen, hängt die Größe des Reibungskoeffizienten in mathematisch nicht darstellbarer Weise von Stromrichtung, Stromdichte, der Temperatur und dem Auf-
lagedruck ab. Die beiden letzten Faktoren können nun von dem Bürstenhalter selbst beeinflusst werden.

Bei den Versuchen wurden Bürstenhalter (Fig. 15) mit radial stehenden Bürsten verwendet. Die Bürste war von einem Blechkasten umgeben, der durch ein starres Messingstück mit dem Bürstenträgerstift verbunden war. Sie wurde durch eine Feder mittels eines Bügels aufgedrückt. Um eine gute Stromableitung zu sichern, war die Bürste in dem oberen Teil verkupfert und mit zwei starken Drahtlitzen mit dem Hauptkörper des Bürstenhalters verbunden. Derartige

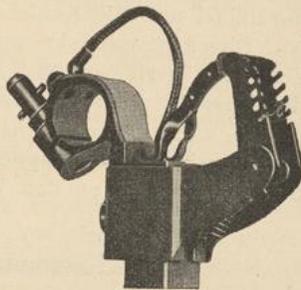


Fig. 15.

¹⁾ Die Reibung von Dynamobürsten, dieses Buch S. 48 ff.

Bürstenhalter werden neuerdings meist benutzt. Sie haben den Vorteil, keiner Nachstellung zu bedürfen, da sich die Kontaktfläche bei der Abnutzung nicht relativ zum Kommutator verschieben kann. Das ist bei Wendepolmaschinen, die zwar keiner Bürsterverschiebung bei verschiedenen Belastungszuständen bedürfen, aber doch oft eine sehr genaue Einstellung nötig haben, von Wichtigkeit. Weiter ist hierbei die Masse der den unvermeidlichen Erschütterungen ausgesetzten Teile möglichst klein.

Nun sind weder die Flächen der Kohlen, noch die der Führungshülse bearbeitet. Damit sich die Kohle nicht klemmen kann, muß sie ein gewisses Spiel in der Hülse haben. Die Reibung sucht nun die Kohle mitzunehmen und drückt sie gegen die vordere Seite der Hülse. (Fig. 16.)

Denkt man sich den Radius des Kommutators unendlich groß und in der Richtung des Doppelpfeils fortschreitend, so stellt der Vektor R die der Reibung entsprechende Kraft dar. Der von dem Bügel ausgeübte Druck P setzt sich mit ihr zu einer Resultante P' zusammen. Diese Resultante sucht nun die Kohle um die Kante a der Hülse zu drehen und die Folge ist ein verstärkter Auflagedruck an der auflaufenden Kante der Bürste und eine Verminderung des Druckes an der ablaufenden Kante. Wie stark durch diesen Vorgang der Verlauf der Stromwendung beeinflusst wird, ist von vornherein nicht zu übersehen.

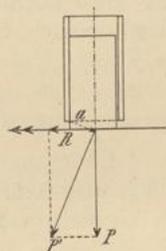


Fig. 16.

Weiter ist zu beachten, daß der Druck, den der Bügel auf die Kohle ausübt, nicht gleich dem Auflagedruck ist. Dieser ist vielmehr um die Reibung der Kohle an den Wänden der Hülse geringer. Man könnte einen gleichmäßigen Auflagedruck der Bürste durch Schrägstellen des Halters erreichen. Das gelänge natürlich nur für eine einzige Belastung. Damit gibt man aber den günstig wirkenden dämpfenden Einfluß auf die Erschütterungen auf, den die Reibung an den Wänden hat.

6. Das Kommutationsdiagramm (ΔP -Kurve).

Das Ergebnis aller dieser Versuche bestätigt das Resultat der Untersuchungen von Arnold, daß nämlich bei Verwendung von Kohlebürsten das Kommutationsdiagramm (ΔP -Kurve) nicht allein als Grundlage zur Beurteilung der Kommutation dienen kann. Aber auch die Art der Aufnahme dieser Kurve ist nicht geeignet, ein-

wandfreie Werte für die mittleren oder effektiven örtlichen Mittelwerte der Übergangsspannung zu erhalten. Die Prüfbürste selbst hat einen wesentlichen Einfluß auf das Meßergebnis. Erst bei einem Auflagedruck, der zu groß ist, um ein längeres Schleifen der Bürste auf dem Kommutator zulässig zu machen, ohne ihn zu beschädigen, ändern sich die gemessenen Werte nicht mehr mit ihm. Dann hat die Breite der Meßbürste einen ungünstigen Einfluß, denn unter etwa $\frac{1}{2}$ mm wird man nicht gehen können. Auch die benützten Instrumente wirken wesentlich auf die Resultate ein. Es wurden, um die Einwirkungen zu übersehen, bei sonst gleichen Verhältnissen die ΔP -Kurven mit einem Millivoltmeter von 100Ω und einem von 1Ω , einem Elektrometer in Quadrantschaltung mit Hilfspotential, einem eisenfreien Kugelspulendynamometer und einem Hitzdrahtinstrument mit einem Meßbereich bis zu 2 Volt aufgenommen. Weiter lassen sich aus den ebenfalls mit Hilfe der Prüfbürsten aufzunehmenden Oszillogrammen der momentanen örtlichen Spannungen die örtlichen Mittel- und Effektivwerte erhalten.

Am sichersten ist aber die Ableitung der ΔP -Kurve aus der durchlaufenden Potentialkurve durch Ausplanimetrieren in der weiter vorn auseinandergesetzten Art und Weise. Die drei erstgenannten Instrumente messen Mittelwerte, die beiden letzten dagegen Effektivwerte der Übergangsspannung. Die Kurven wurden so aufgenommen, daß für jeden Punkt ein Instrument nach dem anderen durch Umschalten benutzt wurde. Die so erzielten Kurven weichen meist bedeutend, oft bis 30 und 50 % voneinander ab, und zwar am stärksten an den Bürstenkanten. Im Oszillograph konnte man leicht sehen, daß ein durch den Eisengehalt und die Selbstinduktion bedingtes Verzerren der Kurvenformen in den Meßkreisen die Ursache war.

Am geeignetsten zur direkten Aufnahme ist das Elektrometer, da hier die meisten Fehlerquellen fortfallen, doch ist es unbequem in der Handhabung und zu praktischen Messungen ungeeignet. Die mit ihm aufgenommenen Kurven stimmen mit denen aus den Oszillogrammen gut überein.

Am ungünstigsten ist seines hohen Stromverbrauches wegen das Hitzdrahtvoltmeter. Mißt man mit zwei Instrumenten gleichzeitig, z. B. mit dem Millivoltmeter und dem Dynamometer, so ändern beide Instrumente ihre Angaben gegen die in Einzelschaltung bis zu 20 %. Nimmt man das Dynamometer, das noch wegen seiner Störungen durch äußere Felder Vorsicht erheischt, mit dem Hitzdrahtinstrument zusammen, so steigt der Ausschlag des ersteren bis um 15 %.

Aus den verschiedenen angeführten Gründen sieht man, daß

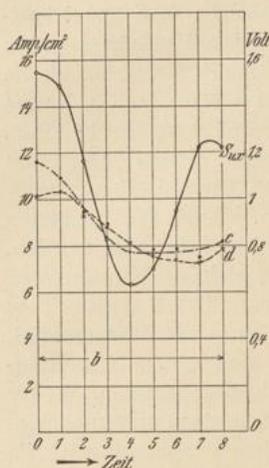


Fig. 17. Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte (s_{ux}). ΔP -Kurven, c mit dem Dynamometer, d mit Millivoltmeter (100Ω) aufgenommen.

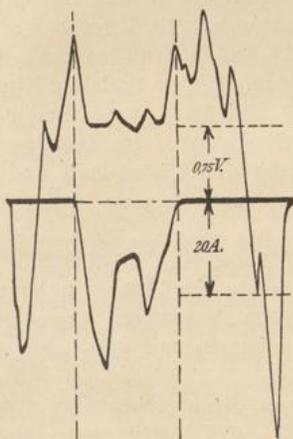


Fig. 18. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve für die negative Bürste. $J=60,8$ Amp., $E=100$ Volt, $n=1000$. Wendepol in Serie mit dem Anker $w_w=36$. Zwei Bürsten pro Stift.

¹⁾ Aus gleichen Gründen sind die von Herrn Jonas (z. B. S. 187 Fig. 36) mit Hilfsbürsten zwischen Kommutatorlamellen gemessenen Spannungen nicht absolut richtig; sie sind zu klein, gestatten aber unter sich einen Vergleich und geben ein relatives Maß für die gemessenen Spannungen. E. A.

das Kommutationsdiagramm kein ganz sicheres Mittel für die Beurteilung der Kommutation ist.¹⁾ Für den Fall des Auftretens von Funken versagt es vollständig, wie man aus den Kurven ohne weiteres sieht, und ist nicht einmal zur Beurteilung des Spannungsverlaufs zu gebrauchen. In der Fig. 17 sind die aufgenommenen ΔP -Kurven mit der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte (s_{ux} -Kurve) zusammengestellt. Die Kurven gehören zu dem in Fig. 7a dargestellten Fall. Noch ein derartiges Beispiel geben die zusammengehörigen Figuren 18 und 19. Die näheren Umstände geben die Legenden zu den Figuren. Diese Beispiele mögen zur Klärung dieser Frage genügen.

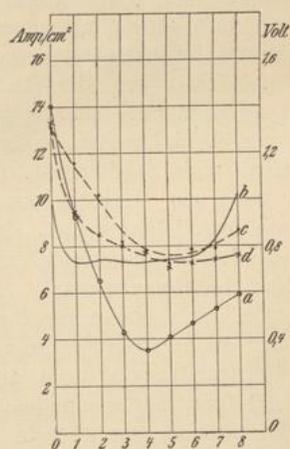


Fig. 19. a Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte aus der Lamellenstromkurve. b ΔP -Kurve aus der durchlaufenden Potentialkurve abgeleitet. c ΔP -Kurve mit dem Millivoltmeter (100Ω) gemessen. d ΔP -Kurve mit dem Dynamometer aufgenommen.