

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Experimentelle Untersuchung der Kommutation mit besonderer Berücksichtigung der Änderung der Übergangsspannung und der Verteilung des Energieverlustes zwischen Kommutator und Bürste

Jordan, Friedrich

Berlin, 1909

Experimentelle Untersuchung der Kommutation mit besonderer Berücksichtigung der Änderung der Übergangsspannung [...]

[urn:nbn:de:bsz:31-274862](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-274862)

Experimentelle Untersuchung der Kommutation
mit besonderer Berücksichtigung der Änderung der
Übergangsspannung und der Verteilung des Energieverlustes
zwischen Kommutator und Bürste.

Von Dipl.-Ing. **Fr. Jordan**, Frankfurt a. M.

I. Einleitung.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung der Kommutation bei Anwendung von Kohlenbürsten von Dr.-Ing. E. Arnold, die in der Festschrift der Großh. Technischen Hochschule 1908 und auf Seite 1 bis 47 dieses Buches niedergelegt sind, machten eine Fortsetzung der Arbeit wünschenswert. Insbesondere waren die Änderung der Übergangsspannung und die Verteilung des Energieverlustes zwischen Kommutator und Bürste bei Anwendung von Kohlenbürsten einer weiteren Untersuchung zu unterziehen. Da durch die Versuche von Arnold festgestellt ist, daß die Stromdichte an den Stellen, wo Funken auftreten, in vielen Fällen sehr klein ist, war zunächst beabsichtigt, sich auf die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Stromdichte und Übergangsspannung bei funkenfreiem Gang und beim Auftreten von Funken zu beschränken, wobei die Verteilung des Energieverlustes über die Bürstenbreite und dessen Größe beim Funken festgestellt werden sollte.

Im Verlauf der Untersuchung stellte es sich aber heraus, daß der zeitliche Verlauf der Kurzschlußströme in noch anderer als der erwarteten Weise die Vorgänge beeinflusste. Deswegen mußte das ursprüngliche Programm der Arbeit etwas erweitert und auch noch kurz auf die Rückwirkung der Kurzschlußströme eingegangen werden.

Die Arbeit wurde im Elektrotechnischen Institut der Großh. Badischen Technischen Hochschule Fridriciana zu Karlsruhe durchgeführt. Ich möchte an dieser Stelle Herrn Geheimen Hofrat Prof. Dr.-Ing. E. Arnold, der mir bereitwilligst die Mittel des Instituts zur Verfügung stellte, für die Anregung zur vorliegenden Arbeit und das rege Interesse an derselben meinen wärmsten Dank sagen.

Auch den Felten & Guilleaume-Lahmeyer-Werken zu Frankfurt a. M. habe ich für die freundliche Überlassung der Wendepolspulven, der Bürstenhalter und der Kohlen zu danken.

II. Versuchsmaschine.

Bei der Theorie der Stromwendung geht man von glatten Ankern aus, weil man da möglichst einfache und übersichtliche Verhältnisse hat.

Da die Versuche von Arnold lehren, daß es oft sehr schwierig wird, die Einflüsse der Nuten auf die Stromwendung von den Wirkungen der Kurzschlußströme selbst zu trennen und ihre Rückwirkungen aufeinander richtig zu übersehen, lag es nahe, für die beabsichtigten Untersuchungen eine Maschine mit glattem Anker zu nehmen. Obwohl, wie bemerkt, die Theorie ihren Ausgang von dieser Anordnung genommen hat, sind für sie die wirklichen Vorgänge ihrem zeitlichen Verlauf nach experimentell noch nicht aufgenommen worden. Man kann bei Benutzung einer Maschine mit glattem Anker hoffen, einen möglichst einfachen und durch sekundäre Einflüsse ungetrübten Verlauf der Stromwendung zu finden.

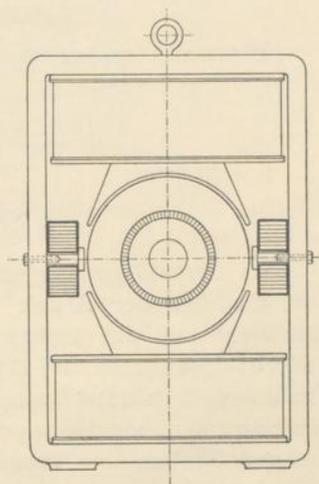


Fig. 1. Skizze der Versuchsmaschine.

Fig. 1 gibt eine Skizze der benutzten Maschine. Ihre Hauptdaten sind folgende:

Anker: Durchmesser $D = 260$ mm,
Eisenlänge $l = 220$ mm
ohne Luftschlitze,
Eisenhöhe $b = 60$ mm.

Wicklung: zweipolige Ringwicklung.

Leiterzahl $N = 224$,
Spulenzahl $S = 56$,
Windungszahl einer Spule $w = 4$,
Leiterabmessungen $3,1/3,7 \phi$.

Kommutator:

Durchmesser $D = 150$ mm,
Lamellenzahl $K = 56$
Isolation $\delta_i = 0,7$ mm.

Die Polschuhe sind abgeschrägt.

Idealer Polbogen $\alpha_i \cong 0,7$.

Wendepole:

Querschnitt 20×160 mm,

Polschuh 35×220 mm,

Windungszahl pro Pol $w_w = 36$.

Die Maschine lief als fremderregter Nebenschlußgenerator.

III. Meßanordnung.

1. Schaltungsschema.

Im Grunde genommen ist die benützte Schaltung die gleiche wie die bei der Arbeit von Arnold.¹⁾ Diese war aber mit Rücksicht auf die Aufnahme der Kurven mit dem Kontaktgeber aufgebaut, während bei der vorliegenden Arbeit ausschließlich der Oszillograph benutzt wurde. Dieses wesentlich anders geartete Meßinstrument machte wieder seinem Charakter entsprechend einen anderen Aufbau der Versuchseinrichtungen nötig, um so mehr als nicht nur eine qualitative Würdigung der zu erhaltenden Oszillogramme, sondern auch quantitative Ausmessung beabsichtigt war. Der Gebrauch der Oszillographen zu solchen Zwecken ist nicht neu, aber doch ziemlich selten. Man wird allerdings auf eine so große Genauigkeit, wie sie direkt zeigende Instrumente besitzen, verzichten müssen, doch ist die erreichbare Genauigkeit immerhin befriedigend und ausreichend. Es wurde ein Oszillograph von Duddell benutzt, dessen schwingendes System eine Eigenschwingungszahl von etwa 10 000 Perioden in der Sekunde hat. Die Aufnahmen wurden auf besonders für solche Zwecke angefertigtes Bromsilberpapier gemacht, das auf eine rotierende Trommel gespannt wurde. Ungenauigkeiten durch Verziehen des Papiers beim Entwickeln und Wässern traten nicht auf. Der Stromverbrauch des Oszillographen ist höchstens 0,08 Amp. für vollen Ausschlag, dabei sind Selbstinduktionen und Kapazität sehr gering.

Den Nullpunkt hält das Instrument recht gut, doch sind die Ausschläge etwas von der Temperatur des zur Dämpfung benutzten Öles abhängig. Da sich diese nicht unter allen Umständen genau gleich halten läßt, so schien es wünschenswert, jedes einzelne Oszillo-

¹⁾ Arbeiten aus dem elektrotechnischen Institut Karlsruhe, 1908—1909, S. 4 ff.

gramm für sich zu eichen. Dann konnte man auch mit Hilfe der Vorschaltwiderstände vor jeder Meßschleife (Strip) die jeweilig größtmöglichen Ausschläge einstellen, was von Vorteil für die Genauigkeit der Messungen ist.

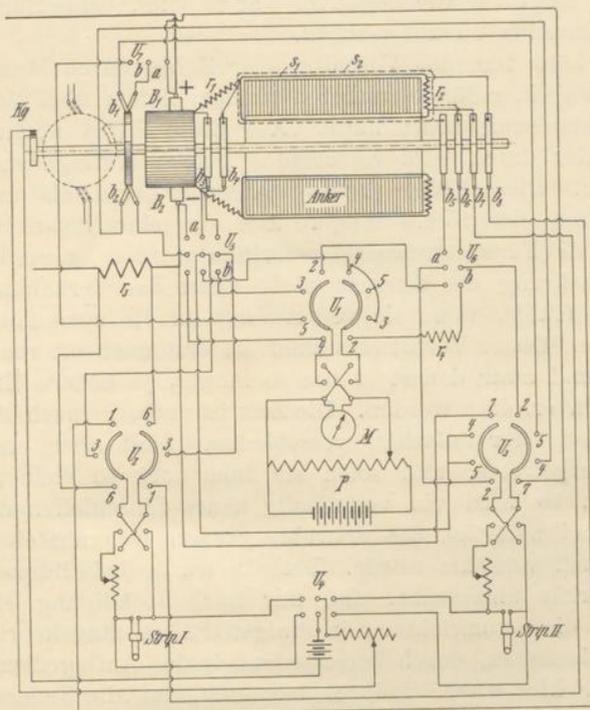


Fig. 2. Meßanordnung zur Untersuchung der Kommutation mit dem Oszillographen.

Mit der Meßanordnung Fig. 2 konnten die Momentanwerte der folgenden Größen in ihrer Abhängigkeit von der Zeit aufgenommen werden:

1. der Strom einer Spule.
2. die Feldkurve.
3. der Strom, der einer Lamelle zufließt, i_L (Lamellenstromkurve).
4. und 5. Spannung zwischen dieser Lamelle und der Bürste, sowohl der positiven als der negativen (ΔP_t -Kurve).
6. Strom im äußeren Kreis.
7. Spannung zwischen den Bürsten (Klemmenspannung).

Weiter konnten durch eine neben der Bürste B_1 angebrachte, hier nicht gezeichnete Prüfbürste, die mit einer Mikrometerschraube verschiebbar war, die Momentanwerte der Übergangsspannung

zwischen Bürste und Kommutator gemessen werden; durch Umschalten auf ein geeignetes Voltmeter auch der Mittel- oder Effektivwert dieser Größe.

Da die positive Bürste auch auf dem Kommutator ein anderes Verhalten zeigt wie die negative, war es nötig, beide Bürsten möglichst gleichzeitig zu untersuchen.

Man hätte nun das Verhalten der Kohle durch Wechseln der Polarität an einer Bürste studieren können, indem man die Polarität der Maschine umgekehrt hätte. Auf diese Weise kommen dann keine Fehler durch etwa verschieden großen Auflagedruck in die Messungen. Dieser Weg erwies sich aber bald als ungangbar. Hat nämlich eine Kohle längere Zeit die eine Polarität gehabt, ohne daß die Funkengrenze überschritten worden ist, so nimmt sie nach Umkehrung des Stromes nicht sofort das Verhalten an, das sie zeigen müßte, wenn sie von Anfang an die neue Polarität gezeigt hätte. Dieses Verhalten nimmt sie erst nach oft recht langer Zeit an, und zwar dauert es um so länger, je höhere Übergangsspannungen erreicht werden. Die Zeit ist auch, je nach dem Sinne des Wechsels der Polarität, verschieden. Sind aber erst einmal Funken aufgetreten, und seien sie auch noch so klein und etwa unsichtbar, so wird ein vollständig neues Einschleifen der Kohle nötig, wobei natürlich die erstrebte größere Genauigkeit völlig in ihr Gegenteil verkehrt würde. Deshalb wurde jede Bürste nur mit einer Polarität untersucht, und nur nach Beendigung einer Versuchsreihe die Stromrichtung in einigen Fällen umgekehrt.

Dem besagten, durch Verschiedenheit des Auflagedruckes verursachten Fehler wurde dadurch begegnet, daß die Federspannung möglichst gleich gemacht und der spez. Auflagedruck höher gewählt wurde als nötig und üblich ist. Nach Band II zweite Auflage der „Gleichstrommaschine“ S. 343, Fig. 306 sieht man, daß von einem gewissen Druck von rund 120 g/cm^2 an der Auflagedruck praktisch keinen Einfluß mehr hat. Bei allen Versuchen betrug hier der spezifische Auflagedruck rund 200 g/cm^2 . Auf diese Weise wurden auch die Erschütterungen möglichst hintangehalten.

Es ist eine Spule s_1 aufgeschnitten und ein Widerstand $r_2 = 0,0074 \Omega$ eingefügt, von dessen Ende Verbindungen zu den Schleifringen mit den Bürsten b_7 und b_8 gehen. Damit hinsichtlich des Ankerwiderstandes die Symmetrie gewahrt bleibt, ist in die um 180° verschobene gegenüberliegende Spule ein Widerstand gleicher Größe eingeschaltet worden.

Der Widerstand der Verbindungen der Wicklung mit den Lamellen war so groß ($r_1 = 0,0114 \Omega$), daß der Spannungsabfall in ihnen zur Messung ausreichte. Alle Verbindungen der Lamellen

mit den Spulen waren gleich, so daß auch durch sie keine Unsymmetrien hervorgerufen wurden. Zwischen der Bürste b_3 und den Hauptbürsten B_1 oder B_2 konnte dann die jeweilige Spannung zwischen der betreffenden Lamelle und der Bürste gemessen werden. Wollte man direkt den Oszillographen zwischen die Bürsten b_3 und B_1 schalten und gleichzeitig zwischen b_3 und b_4 den Lamellenstrom aufnehmen, so würde sowohl zwischen b_4 und B_1 als auch zwischen den beiden Meßschleifen die volle Maschinenspannung auftreten. Da der Ausschlag des Oszillographen begrenzt ist, so würde man nur sehr geringe Ausschläge gerade da erhalten, wo der Verlauf der Kurven am meisten interessiert. Weiter verträgt das Instrument keine höhere Spannung als 50 Volt zwischen den Meßschleifen. Geht man höher, so wird bei dem außerordentlich kleinen Abstand, den das schwingende System des Oszillographen von den Polflächen hat, das isolierende Öl durchschlagen, was mit sofortiger Zerstörung der nur schwer ersetzbaren Meßschleifen verbunden ist. Deshalb wurden auf eine Hartgummischeibe, die mit einem kurzen Kontaktsegment versehen war, zwei Doppelbürsten b_1 und b_2 , deren Einzelteile sorgfältig isoliert waren, aufgelegt und in die Verbindung mit dem Oszillographen eingefügt. Dann können zwischen den Meßschleifen nur geringe Spannungen vorkommen und man erhält die Kurve der Spannung der Lamelle gegen die Bürste, während ihres Durchgangs unter ihr hindurch, die in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen kurz durchlaufende Potentialkurve genannt werde, in großem Maßstabe.

Dabei ist zu beachten, daß der auf- und absteigende Ast der durchlaufenden Potentialkurve, z. B. Fig. 12, 13, 24, 26 usw., dem Aus- und Einschalten durch das Segment entspricht, also für die Kurve selbst keine Bedeutung hat.

Die Feldkurven wurden wie gewöhnlich mit einer um die betreffende Ankerspule gelegten Prüfspule s_2 , aus 20 Windungen dünnen Drahtes bestehend, aufgenommen. Die Ankerspule wurde von ihr ganz bedeckt, so daß der Koeffizient der gegenseitigen Induktion gleich 1 gesetzt werden darf.

Die von den Prüfbürsten zum Oszillographen führenden Leitungen sind an zwei Umschaltern U_3 und U_2 zusammengefaßt, und zwar so, daß mit der Meßschleife II alle höheren Spannungen gemessen werden, bei deren Aufnahme ein Vorschaltwiderstand gebraucht wird, während an der anderen (Meßschleife I) alle kleinen Spannungen liegen. Die den Umschaltern U_1 , U_2 , U_3 beigeschriebenen Zahlen entsprechen der Numerierung der Kurven in diesem Abschnitt.

Bei der Aufnahme von Kurven müssen sich die Schalter U_5 , U_6 , U_7 in den Stellungen a befinden.

Der auf der Maschinenwelle sitzende Kontaktgeber (Kg) dient wieder dazu, einen bestimmten Anfangspunkt für die Oszillogramme festzulegen. Es ist wichtig, ihn, wie gezeichnet, hinter den Vorschaltwiderstand des Instrumentes anzulegen, damit er bei dessen Veränderung stets gleichen Ausschlag bewirkt und keine Ströme aus der Meßanordnung sich durch ihn schließen können.

Er kann mit dem Umschalter U_4 an die eine oder andere Meßschleife gelegt werden. Zum Betrieb genügen 2 bis 4 Volt.

2. Eichung der Oszillogramme.

Soll eine Klemmenspannung gemessen werden, so hat man, wenn

P die zu messende Spannung,
 E die Eichspannung,
 α der Ausschlag, den P ergibt,
 α' der Ausschlag, den E ergibt,

$$P = \frac{\alpha}{\alpha'} \cdot E.$$

Mißt man den Strom in dem bekannten Widerstand r_1 , so ist

$$i_L = \frac{\alpha}{\alpha'} \cdot \frac{E}{r_1}.$$

Bei der Eichung der Feldkurve, wo es sich um die Messung einer induzierten EMK handelt, ist der Widerstand der Spule selbst nicht zu vernachlässigen. Man darf die Eichspannung nicht an die Bürsten b_5 und b_6 legen, sondern muß sie in den Kreis einfügen. Um nicht gezwungen zu sein, bei jeder Eichung die Maschine still zu setzen, wurde die Eichschaltung so getroffen, daß der Widerstand r_4 anstelle der Spule tritt. Er ist gleich dem Spulenwiderstand bei einer mittleren Temperatur. Die durch sie bewirkten Schwankungen, die bei r_4 nicht berücksichtigt werden, sind belanglos gegen den Vorschaltwiderstand des Oszillographen.

Die in der Prüfspule induzierte EMK ist

$$e = 2 \cdot l \cdot w \cdot v \cdot B \cdot 10^{-8} \text{ Volt,}$$

dabei ist

l Ankerlänge in cm,
 v Umfangsgeschwindigkeit in cm/Sek.,
 B Induktion,
 w = Windungszahl der Prüfspule,

$$B = C \cdot \frac{\alpha}{\alpha'} \cdot E,$$

darin ist

$$C = \frac{60 \cdot 10^8}{2\pi \cdot w \cdot l \cdot D \cdot n}$$

Die ganze Schaltung ist so angelegt, daß man alle Eichungen vornehmen kann, ohne daß Störungen durch Isolationsfehler der Batterie und der Maschine vorkommen können, da sie während der Eichung ganz voneinander getrennt sind.

Soll ein Oszillogramm geeicht werden, so müssen die Umschalter U_5, U_6, U_7 in die Stellung b gebracht werden. Dann wird der Schalter U_1 der Nummer der Kurve entsprechend eingestellt und eine mit dem Millivoltmeter zu messende Eichspannung an dem Spannungsteiler abgegriffen. Unter der Wirkung des nun fließenden Stromes erfährt der Spiegel des Oszillographen einen konstanten Ausschlag und zeichnet eine gerade Linie auf das Papier.

3. Einfluß der in die Spulen eingeschalteten Meßwiderstände.

Gegen die im vorigen beschriebene Meßanordnung könnte man den prinzipiellen Einwand machen, daß man den Strom einer Spule, den man aufnimmt, durch den Meßwiderstand geändert hat. Für die Aufnahme mit dem Oszillographen ist es ja erforderlich, einen ziemlich großen Widerstand einzubauen, damit an seinen Enden auch bei nicht allzu großen Strömen eine Spannungsdifferenz entsteht, die groß genug ist, im Instrument einen genügenden Ausschlag hervorzubringen.

In unserem Falle betrug dieser Widerstand $r_3 = 0,0074 \Omega$ gegen $0,00647 \Omega$ einer Spule. Man sollte also erwarten, daß eine derartige Anordnung, und sei sie auch wie hier in bezug auf die Widerstände vollständig symmetrisch, eine Änderung des Kurzschlußstromes in diesen Spulen bedingt.

Hier konnte einmal untersucht werden, inwieweit das der Fall ist. Vorübergehend wurde eine Lamellenverbindung, die zu

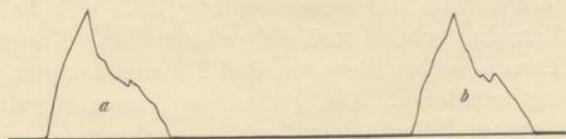


Fig. 3. *a* Lamellenstromkurve der Spule mit eingebauten Meßwiderstand.
b Lamellenstromkurve einer gewöhnlichen Ankerspule.

einer Spule ohne eingebauten Widerstand führte, an die hinteren Schleifringe gelegt und beide Lamellenstromkurven aufgenommen. Wenn der Kommutator in gutem Zustand war, wie es ja die Bedingung dieser Messungen überhaupt ist, konnten nur ganz geringe

Unterschiede zwischen den beiden Kurven bemerkt werden. Eine solche Kurve zeigt Fig. 3. Auch später wurde in den Kurven der Klemmenspannung an den Hauptbürsten oder einer vorgeschalteten Selbstinduktion keine Störung der übrigen Kurven durch diese Widerstände bemerkt. Die eingeschlagene Untersuchungsmethode liefert also einwandfreie Resultate. Gleichzeitig sieht man, welche überragende Bedeutung der Zustand der Bürstenberührungsfläche für das vorliegende Problem hat.

IV. Zusammenhang der für den Verlauf der Kommutation charakteristischen Kurven.

1. Zusammenhang der experimentell aufnehmbaren Kurven.

Es ist bemerkenswert, daß auf Grund der bisher aufgestellten Theorien sich alle mit der beschriebenen Meßschaltung aufnehmbaren Kurven auf eine einzige zurückführen lassen. Diese Kurve ist das Kommutationsdiagramm (ΔP -Kurve), d. h. die Kurve der mittleren örtlichen Übergangsspannungen.

Es ist nämlich die Kurzschlußstromkurve, die Integralkurve der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten s_{ux} .¹⁾ Diese letztere Kurve ist aber der Kurve der mittleren örtlichen Bürstenpotentiale proportional, so daß die ΔP -Kurve, da sie ohne allzu große Einrichtungen experimentell erhalten werden kann, anstelle der s_{ux} -Kurve tritt. Dann wiederum ist die Feldkurve in der Polücke die Differentialkurve der Potentialkurve. Das alles gilt für den Fall, daß die Bürste eine größere Zahl von Lamellen bedeckt. Es wäre von der größten Wichtigkeit, wenn sich diese Zusammenhänge experimentell bestätigen ließen, denn dann wären alle die teuren und nur selten herstellbaren Versuchseinrichtungen nicht nötig und der Verlauf der Stromwendung ließe sich bei jeder ausgeführten Maschine schnell und sicher beurteilen. Nun nimmt allerdings die Theorie selbst nicht an, daß die angedeuteten Zusammenhänge streng existieren. Die gemachten Aussagen gelten nur für die Mittelwerte und beruhen auf zwei Annahmen.

Einmal, daß der spezifische Übergangswiderstand über die ganze Bürstenbreite konstant und unabhängig von der Stromdichte und davon, daß der Kraftfluß sämtlicher kurzgeschlossenen Spulen außerhalb der Kommutierungszone konstant sei.²⁾

¹⁾ s. Arnold, Die Gleichstrommaschine, Bd. I, S. 445.

²⁾ Rüdénberg, Sammlung elektrischer Vorträge, 1907, S. 18.

Die erste Annahme ist für den Fall der Verwendung von Metallbürsten experimentell bestätigt worden. Sie gilt, wie Arnold gezeigt hat, nicht mehr für Kohlebürsten. Die zweite Annahme ist nur für geradlinige Stromwendung vieler Spulen annähernd richtig und trifft schon für kleine Abweichungen des Kurzschlußstromes davon nicht mehr zu.

2. Ableitung der nicht experimentell aufnehmbaren Kurven.

Nicht alle Kurven, die zur Beurteilung der Vorgänge bei der Stromwendung nötig und nützlich sind, lassen sich direkt experimentell aufnehmen. Aus der Lamellenstromkurve (i_L -Kurve) und der durchlaufenden Potentialkurve (ΔP_t -Kurve) lassen sie sich aber ausnahmslos streng ableiten.

Zunächst soll die Ableitung der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten (s_{ux} -Kurve), deren Bedeutung aus dem vorigen Abschnitt hervorgeht, abgeleitet werden. Das kann einmal geschehen, wie es in der Arbeit von Arnold¹⁾ gezeigt ist, doch läßt sich auch der Umweg über die momentanen örtlichen Stromdichten vermeiden. Die Ableitung setzt voraus, daß der Strom sich über den berührten Teil einer Lamelle gleichmäßig verteilt, und daß alle Lamellen sich ganz gleich gegen die Bürsten verhalten. Aus der Lamellenstromkurve (i_L -Kurve) und der Kurve der berührten Lamellenfläche, von denen die letztere beispielsweise in Fig. 4 (vgl. dazu Fig. 18 und 19) gezeichnet ist, läßt sich durch Division der entsprechenden Ordinaten die Kurve der durchlaufenden momentanen Stromdichten (s_{ut}) berechnen.

Teilt man nun z. B. eine Lamellenteilung, oder genauer gesagt, die Zeit des Fortschreitens um eine Lamellenteilung, und die Bürstenbreite in acht Teile ein, so wird man eine genügend große Genauigkeit erzielen. Die momentanen Stromdichten unter der auflaufenden Kante sind dann die Ordinaten 0 bis 8 der s_{ut} -

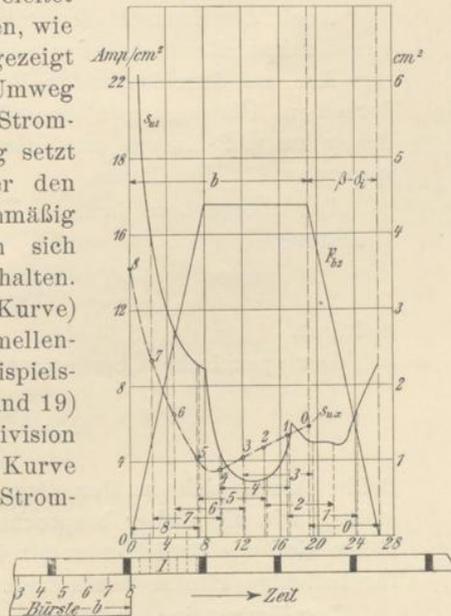


Fig. 4. Ableitung der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte ($s_{u,x}$) aus der durchlaufenden Stromdichtenkurve ($s_{u,t}$). Kurve der von der Bürste bedeckten Fläche einer Lamelle $F_{b,L}$.

¹⁾ l. c. S. 18 ff.

Kurve. Berührt der Punkt 7 der Bürste die Lamelle, so ist die in diesem Augenblick zwischen beiden vorhandene Stromdichte durch die Ordinaten der s_{ut} -Kurve gegeben, die die Bürstenkante dann erreicht hat. Diese Ordinate ist um $\frac{b}{8}$ Teile vom Anfangspunkt entfernt. Die übrigen gesuchten Stromdichten für diesen Punkt liegen dann zwischen den Ordinaten $\frac{b}{8}$ und $\frac{b}{8} + (\beta - \delta_i)$. Ebenso hat man an den anderen Punkten zu verfahren, so daß man schließlich acht Abschnitte der s_{ut} -Kurve von der Breite $\beta - \delta_i$ erhält. Der Mittelwert, den man durch Planimetrieren dieser Abschnitte erhält, ist die gesuchte mittlere örtliche Stromdichte s_{ux} , die dann über den entsprechenden Teilen der Bürste aufgetragen wird.

Die effektive Stromdichte unter der Bürste $s_{u\text{eff}}$ und den Formfaktor der Stromverteilung f_u erhält man dann in bekannter Weise aus dieser Kurve.¹⁾

Auch die Kurzschlußstromkurve läßt sich in bekannter Weise aus der Lamellenstromkurve ableiten.

Aus der durchlaufenden Potentialkurve erhält man auf Grund derselben Überlegungen in gleicher Weise das Kommutationsdiagramm (ΔP -Kurve) und die mittlere und effektive Übergangsspannung für die Bürste.

Der momentane örtliche Übergangswiderstand ist durch die Gleichung

$$R_{wt} = \frac{\Delta P_t}{i_L}$$

definiert.

Der spezifische Übergangswiderstand ist

$$R_k = \frac{\Delta P_t}{s_{ut}} \Omega/\text{cm}^2.$$

Beide lassen sich in derselben Abhängigkeit von der Zeit darstellen, wie die bisher besprochenen Größen, und aus den Kurven ließen sich die örtlichen und zeitlichen Momentan- und Mittelwerte für beliebige Punkte bestimmen.

Der Verlust in der Übergangsschicht während der Zeit, in der eine Lamelle mit der Bürste in Berührung steht, ist

$$W_L = i_L \cdot \Delta P_t.$$

Die Werte von W_L in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen, ergeben die durchlaufende Verlustkurve. Aus ihr lassen sich in

¹⁾ Arnold, Die Gleichstrommaschine, 2. Aufl., Bd. I, S. 444.

der in Kap. VII näher zu behandelnden Weise die gesamten Übergangsverluste berechnen.

Ebenso wie aus der Lamellenstromkurve die Stromdichtekurve, erhält man aus der Verlustkurve die Energiedichtenkurve

$$E_L = \frac{W_L}{F_{bL}}$$

und aus ihr wieder die entsprechenden örtlichen und zeitlichen Momentan- und Mittelwerte an beliebigen Bürstenpunkten.

Es lassen sich also ableiten:

1. aus der Lamellenstromkurve (i_L -Kurve):

- a) die momentanen örtlichen Stromdichten s_{ut} ,
- b) die zeitliche Variation der Stromdichten an verschiedenen Bürstenpunkten,
- c) die Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten (s_{ux} -Kurve),
- d) die effektive Stromdichte unter der Bürste s_{ueff} ,
- e) der Formfaktor der Stromverteilung f_u ,
- f) die Kurzschlußstromkurve;

2. aus der durchlaufenden Potentialkurve (ΔP_t -Kurve)

- a) die momentanen örtlichen Übergangsspannungen ΔP_t ,
- b) die zeitliche Variation der Übergangsspannung an verschiedenen Bürstenpunkten,
- c) die mittlere und effektive Übergangsspannung für die ganze Bürste,
- d) das Kommutationsdiagramm (ΔP -Kurve).

Aus 1. und 2.

- a) die durchlaufende Verlustkurve (W_L -Kurve),
- b) die durchlaufende Energiedichtenkurve (E_L -Kurve),
- c) die momentanen örtlichen Verluste- und Energiedichten,
- d) die zeitliche Variation der Verluste- und Energiedichten für verschiedene Bürstenpunkte,
- e) der gesamte Verlust unter den Bürsten W_u ,
- f) der spezifische Übergangswiderstand R_n .

Es ist demnach klar, daß die beiden Kurven, Lamellenstromkurve und durchlaufende Potentialkurve, die wichtigsten sind, da sie alle anderen bis auf die Feldkurve enthalten.

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.

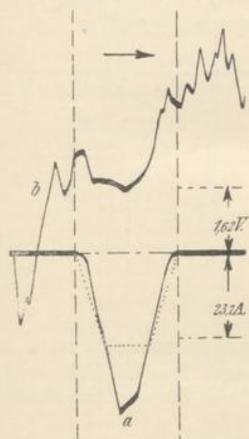


Fig. 5. *a* Lamellenstromkurve. *b* Durchlaufende Potentialkurve.
 $J = 60,8 \text{ Amp. } E = 100 \text{ Volt. } n = 1000.$
 Erregung der Wendepole $i_{em} = 45 \text{ Amp.}$
 Windungszahl pro Spule $w_w = 36.$
 Zwei Bürsten pro Stift.

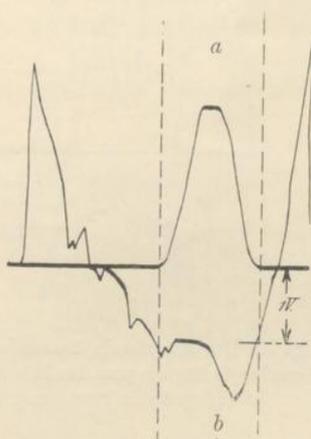


Fig. 6. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve (negative Bürste). $J = 67,2 \text{ Amp. } E = 100 \text{ Volt. } n = 1000.$ Eine Bürste pro Stift, $17,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben.

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.

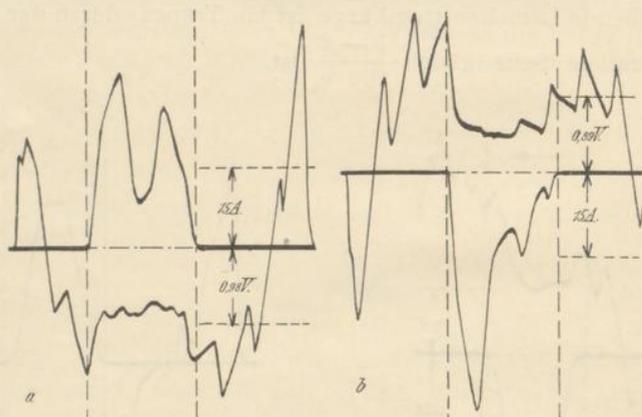


Fig. 7. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve, *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J=54,2$ Amp., $E=100$ Volt, $n=1000$. Wendepole in Serie mit dem Anker. Zwei Bürsten pro Stift.

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 Berührungsflächen. 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. 7 a 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.

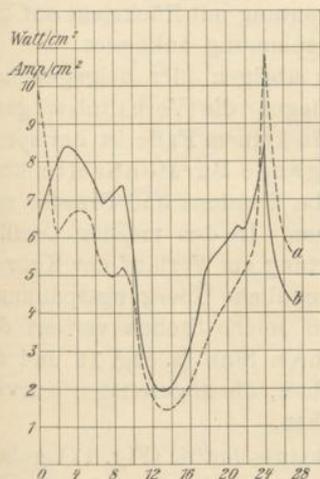


Fig. 8. a Energiedichtenkurven, b durchlaufende Stromdichtenkurve zu Fig. 7 a.

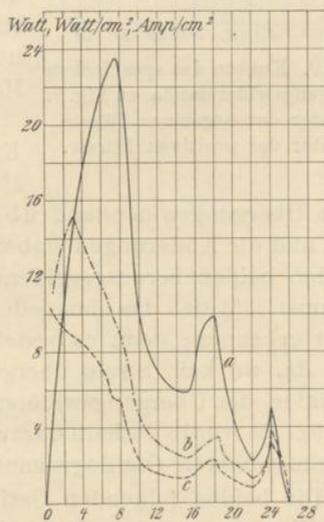


Fig. 9. Durchlaufende Verluste (a), Stromdichten (b) und Energiedichtenkurven (c) zu Fig. 7 b.

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

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

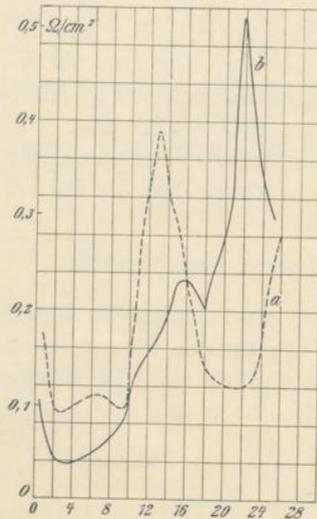


Fig. 10. Kurven des spezifischen Übergangswiderstandes zu Fig. 7. *a* unter der negativen Bürste. *b* unter der positiven Bürste.

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 $0,179 \Omega$ und für die positive Bürste $0,215 \Omega$. 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 spezifische 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

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 denselben 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 Ab-
laufen der Lamelle bewirkt. Die mittlere Übergangsspannung unter den Bürsten ist jedoch bedeutend gestiegen (Fig. 12).

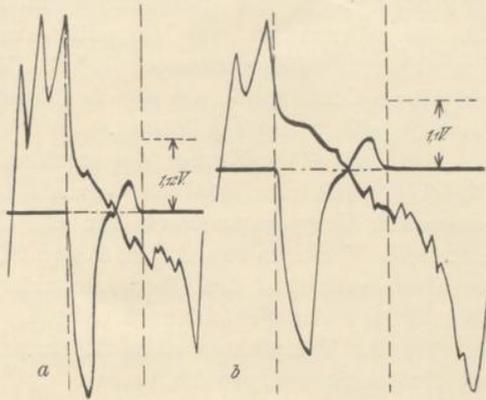


Fig. 11. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve, *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

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

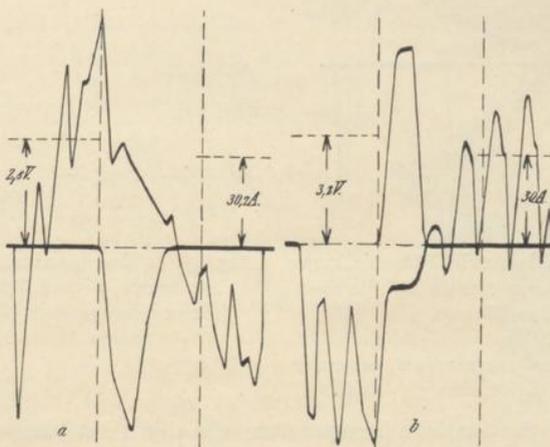


Fig. 12. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

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

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 Pfiffner¹⁾ über den Einfluß der Temperatur auf den Übergangswiderstand bei Anwendung von Kohlebürsten auf Schleifringen 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-

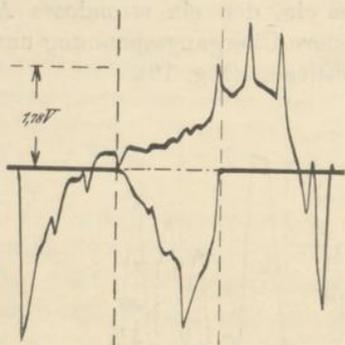


Fig. 13. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurven für die negative Bürste.

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

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-

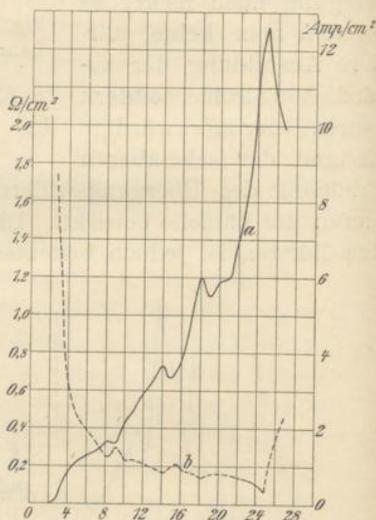


Fig. 14. *a* durchlaufende Stromdichtenkurve, *b* spezifischer Übergangswiderstand zu Fig. 13.

¹⁾ Arbeiten aus dem elektrotechn. Institut Karlsruhe 1908—1909, S. 299 ff.

gebildet hat. Wie man weiter aus den angezogenen Versuchen sieht, variiert die Übergangsspannung unter dem Einfluß der Temperatur am meisten in dem Intervall zwischen $40-80^{\circ}$. 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

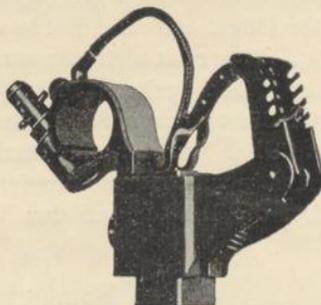


Fig. 15.

¹⁾ Die Reibung von Dynamobürsten. (Arbeiten aus dem elektrotechn. Institut Karlsruhe, 1908—1909. 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

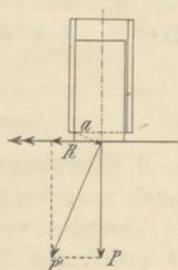


Fig. 16.

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.

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

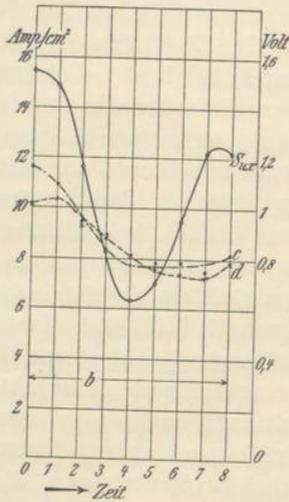


Fig. 17. Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte ($s_{u,x}$)- ΔP -Kurven, c mit dem Dynamometer, d mit Millivoltmeter (100Ω) aufgenommen.

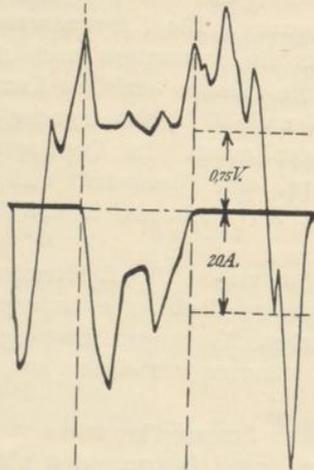


Fig. 18. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve für die negative Bürste. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Wendepol in Serie mit dem Anker $w_n = 36$. Zwei Bürsten pro Stift.

¹⁾ Aus gleichen Gründen sind die von Herrn Jonas (Arbeiten aus dem elektrotechnischen Institut Karlsruhe 1908—1909, 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 ($s_{u,x}$ -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.

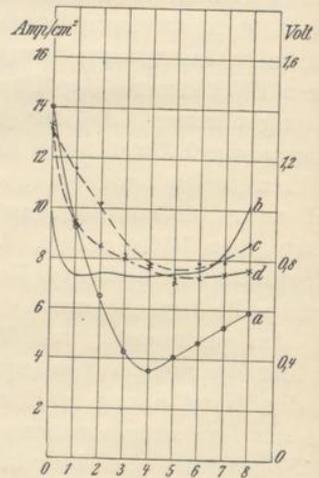


Fig. 19. a Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte aus der Lamellenstromkurve. b ΔP -Kurve aus der durchlaufenden Potentialkurve abgeleitet. c ΔP -Kurve mit dem Millivoltmeter (100Ω) gemessen. d ΔP -Kurve mit dem Dynamometer aufgenommen.

VI. Das Verhalten der Kohlebürsten bei Funkenbildung.

1. Die Stellung der Theorie zur Frage der Funkenbildung.

Die Brauchbarkeit einer Kommutatormaschine hängt in erster Linie davon ab, ob es gelingt, eine Funkenbildung an den Bürsten zu vermeiden. Die wesentliche Aufgabe der Kommutationstheorie ist es deshalb, aus den Abmessungen einer Maschine die Funken-
grenze zu berechnen. Diese Aufgabe zu lösen ist der Theorie bisher nur unvollkommen gelungen, denn, wenn es sich um die genauere Berechnung der Funken-
grenze handelt, versagt die Theorie.

Der Gedankengang, der den bekannten Theorien zugrunde liegt, ist kurz folgender:

Der Strom des äußeren Kreises verteilt sich den Übergangswiderständen entsprechend über die Bürsten und Lamellenverbindungen. Bei konstantem spezifischen Übergangswiderstand und bei Abwesenheit von Selbstinduktion würde dann der Stromverlauf in einer kurzgeschlossenen Spule, während sie aus dem einen Ankerzweig in den anderen übergeht, geradlinig sein. Die stets vorhandene Selbstinduktion muß nun durch Bewegung der kurzgeschlossenen Spule in einem Feld aufgehoben werden, wobei Form und Stärke des Feldes so beschaffen sein müssen, daß die infolge der Bewegung der Spule in ihr induzierte EMK in jedem Augenblick den EMKen der Selbstinduktion entgegengesetzt gleich ist. Weicht das Feld — Wendefeld oder kommutierendes Feld genannt — von dem dann genau bestimmten Verlauf ab, so entstehen zusätzliche Kurzschlußströme. Haben diese in dem Augenblick, in dem die Spule den Kurzschluß verläßt, noch beträchtlichen Wert, so muß das zur Funkenbildung führen. Man kommt so zu der bekannten Bedingung¹⁾

$$A = \frac{R_{wT} \cdot T}{F_u \cdot S} > 1,$$

worin R_{wT} den spezifischen Übergangswiderstand der ablaufenden Bürstenkante,

T die Kurzschlußzeit,

F_u die Berührungsfläche der Bürste,

S den größten Wert der scheinbaren Selbstinduktion

einer Spule bedeutet.

¹⁾ Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, Bd. I, S. 425 und 508.

Würde dieser Wert < 1 , so müßte die Übergangsspannung zwischen Kommutator und Bürste am Ende der Kurzschlußzeit einen unzulässig hohen Wert annehmen.

Berücksichtigt man noch die Nebenschließungen durch Anker und äußeren Kreis, so erhält man eine ähnliche Bedingung, die einen etwas größeren Spielraum gewährt.¹⁾

Nun gehört zur Erzeugung eines Funkens eine gewisse Energiedichte, und die kann auch dann innerhalb gewisser Grenzen bleiben, wenn eine große Stromdichte nur sehr kurze Zeit anhält.

Verfolgt man diesen Gesichtspunkt weiter, so kommt man, wie Arnold und La Cour²⁾ gezeigt haben, zu dem Resultat, daß die Leistung, die in der Zeit T_a pro cm Bürstenlänge frei wird, 50 Watt nicht übersteigen soll. T_a ist die Zeit, die von dem Augenblicke an, in dem der variable Widerstand gleich dem konstanten Widerstand des Kurzschlußkreises ist, bis zum Aufhören des in dieser Zeit verschwindenden maximalen zusätzlichen Stromes vergeht.

Die Versuche, auf denen die vorstehend angedeuteten Überlegungen beruhen, sind nun an einer Versuchsanordnung gemacht, die nicht die tatsächlichen Verhältnisse der Kommutation nachahmt, sondern sie prüfen nur die zugrunde gelegte Anschauung von der Unterbrechung eines Stromes. Die bei diesen Anordnungen auftretenden Funken können nur entstehende Lichtbogen sein. Ihre Dauer ist höchstens gleich der Zeit des Fortschreitens um eine Isolationsdicke, denn die auf eine angeschlossene Lamelle folgende Leerlamelle kühlt so stark ab, daß ein Funke eben nur so lange bestehen kann, als sie noch nicht unter der Bürste hervorgetreten ist. Bestände der Lichtbogen länger, so müßte er überhaupt stehen bleiben (Rundfeuer).

Dasselbe gilt auch von den Versuchen von Liska, ETZ 1909, S. 82, die ohne Vorschaltung von Selbstinduktion unternommen sind.

Die Resultate hinsichtlich der Funkenspannung entsprechen denn auch dem Charakter und der Größe nach ganz den aus der Lichtbogentheorie bekannten. Überblickt man dagegen die folgenden Oszillogramme, so wird man finden, daß es sich auch da, wo es sich um kräftiges Funken handelt, wie es an Gleichstrommaschinen mit den verderblichsten Folgen für den Kommutator verbunden ist, keineswegs um ein Ausschalten zusätzlicher Ströme an der ablaufenden Bürstenkante handelt.

¹⁾ Arnold, ETZ 1908 S. 399. Rüdberg hat die von Arnold angegebene Wirkung der Nebenschließungen mathematisch formuliert. ETZ 1909 S. 370.

²⁾ Sammlung Elektrotechn. Vorträge. Bd. IX. Stuttgart 1906.

2. Der Verlauf der durchlaufenden Potentialkurve und der Lamellenstromkurve bei Funkenbildung.

a) Bei Belastung.

Schon die in der mehrfach erwähnten Arbeit von Arnold wiedergegebenen Kurzschlußstromkurven zeigen, daß es bei drei verschiedenen Maschinen nicht möglich war, einen solchen Verlauf des Stromes in den kurzgeschlossenen Spulen zu erzwingen, wie ihn die vorstehenden Ausführungen auch für den Fall der Überkommuntation verlangen. Im vorigen Kapitel war ein Beispiel gegeben, wo trotz Abwesenheit von Funken der anfänglich in der erwarteten Weise verlaufende Kurzschlußstrom nicht in gleicher Weise bis zur Erreichung der Funkengrenze zunahm (Fig. 11 und 12). Die Erregung der Wendepole war langsam gesteigert worden, so daß zur Einstellung des stationären Zustandes genügend Zeit blieb. Für Momente läßt sich

auch der geforderte Verlauf erzwingen, wenn man die entsprechende Erregung plötzlich einstellt. Das ist aber für die Bürste von sehr unerwünschten Folgen und kann zum vollständigen Verderb der Kanten führen. Nach sehr kurzer Zeit, die meistens nicht genügt, eine Aufnahme zu gestatten, war aber der vorige Zustand erreicht. Die zwei nächsten Oszillogramme geben ein Beispiel für diese Vorgänge. Die Aufnahmen Fig. 20 für beide Bürsten sind gleich nach Einstellung des Belastungszustandes gemacht. Die mittlere Temperatur des Kommutators betrug 60° . Es

waren an beiden ablaufenden Bürstenkanten Funken, die gleichmäßig über die Länge der Kanten verteilt waren, zu sehen.

Die Fig. 21 a und b entsprechen genau denselben Verhältnissen, doch liegt hier nur je eine Bürste pro Stift auf. Hier war dann

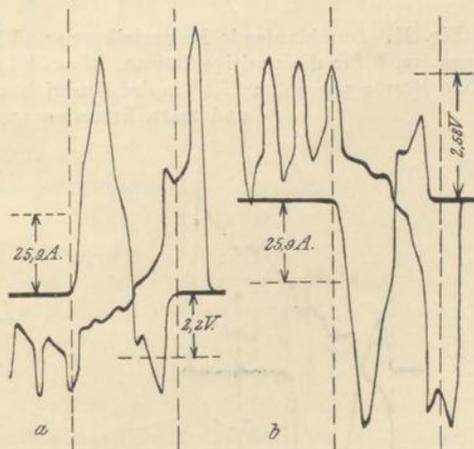


Fig. 20. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

$J = 54,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$.
Zwei Bürsten pro Stift; $27,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Funken an den ablaufenden Kanten. — Nach dem Abstellen: Bürstenkanten gefärbt. Lamellen an den Kanten 8 mm weit matt.

des besonderen Zustandes wegen ein Stromübergang an der ablaufenden Kante nicht möglich.

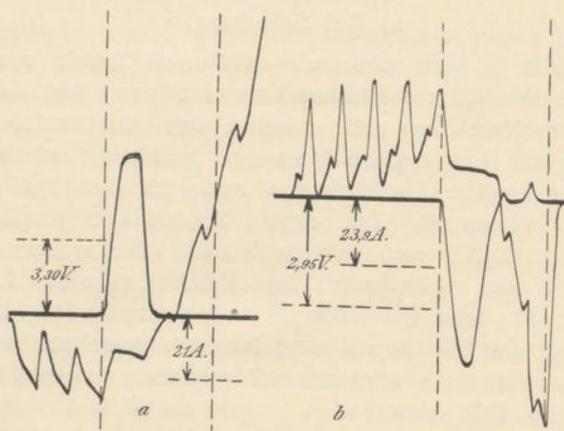


Fig. 21. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J = 54,6$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Eine Bürste pro Stift; $27,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Bürsten gefärbt und matt, Lamellen angefressen.

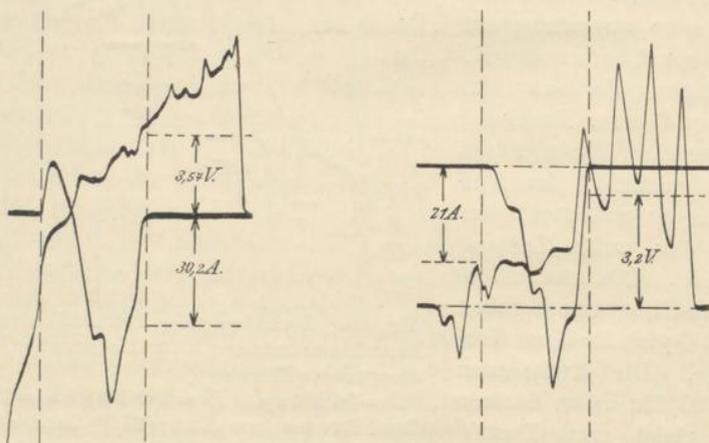


Fig. 22. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve für die negative Bürste. $J = 54,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Eine Bürste pro Stift; 14° gegen die Drehrichtung verstellt. Funken; Bürstenkanten u. ablaufende Kante der Lamellen matt.

Fig. 23. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve für die negative Bürste. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Wendepole in Serie mit dem Anker $w_w = 18$ pro Pol. Zwei Bürsten pro Stift. Leichte Funken an der ablaufenden Kante der negativen Bürste. Bürsten blank. Lamellen leicht an der ablaufenden Kante geschwärzt und angefressen.

Die Fig. 22 und 23 geben Unterkommutionen an negativen Bürsten bei gegen die Drehrichtung verschobenen Bürsten und bei Anwendung von Wendepolen wieder. In beiden Fällen hat man es nur mit leichten Funken zu tun und in beiden Aufnahmen fehlt jedes Anzeichen in den Potentialkurven, das auf eine Unterbrechung des gegen Ende noch recht beträchtlichen Stromes deutet. Auffällig ist nur der Unterschied zwischen dem Verlauf der Potentialkurve außerhalb der Kurzschlußzone.

Um auch ganz ungewöhnlich kräftige Funken bei Unterkommution zu erhalten, wurde der Strom in den Wendepolen umgekehrt und ihre Erregung bis auf 20 Amp. gesteigert. Den Verlauf der Kurven in diesem Fall zeigen die Fig. 24 a und b.

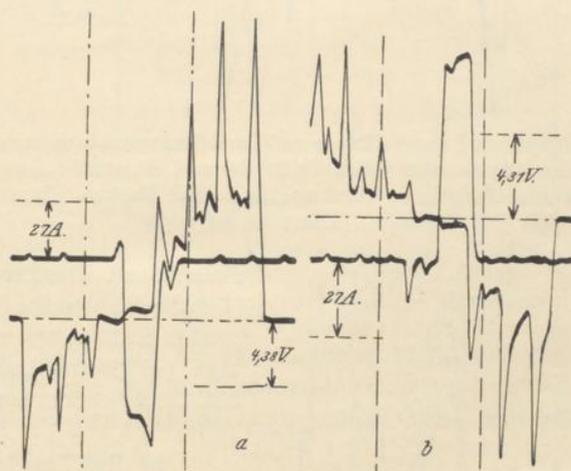


Fig. 24. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenkurve. *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

$J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ev} = 20$ Amp. (Polarität der Wendepole vertauscht), $w_p = 36$.

Eine Bürste. Starke spritzende Funken. Bürsten streifig matt und gefärbt, Kommutator geschwärzt, Lamellen angefrassen.

Bei Überkommution treten so heftige Folgen der Funken nicht auf. Die folgenden Oszillogramme geben noch einige Fälle von Überkommution mit stärkerer Funkenbildung. Die Fig. 25 a und b entsprechen demselben Belastungszustand. Bei der letzteren ist die hintere Bürste abgehoben, die mittlere Stromdichte also fast doppelt so groß. Der Unterschied im Verlauf der Kurven ist aber nicht sehr wesentlich.

Sehr starke Funken hat man auch in dem in den Fig. 26a und b dargestellten Fall, an und unter den Bürstenspitzen beider

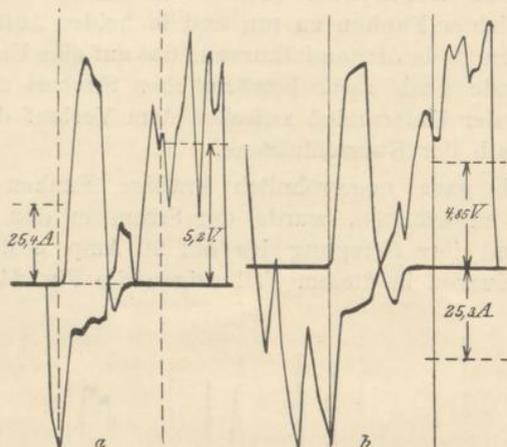


Fig. 25. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve für die negative Bürste. *a* eine Bürste auf jedem Stift. *b* zwei Bürsten. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ew} = 145$ Amp., $w_n = 36$. Funken. Bürsten schwach gefärbt. Lamellen schwarz.

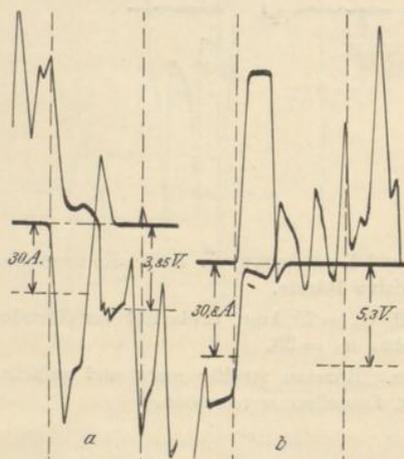


Fig. 26. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ew} = 184$ Amp., $w_n = 36$. Eine Bürste. Starke Funken; Bürsten schwach gefärbt und matt. Lamellen schwarz.

Polaritäten. Die Erregung der Wendepole mußte hier des großen Luftspaltes wegen, den man bei glatten Ankern nötig hat, hoch genommen werden.

b) Bei Leerlauf.

Auch bei Leerlauf unterscheidet sich der Verlauf der Kurven seinem Charakter nach nicht von den übrigen Fällen, wie die Oszillogrammausschnitte in Fig. 27 zeigen. Das kommutierende Feld sollte hier Null sein, doch hat es dann auch noch meist endliche Werte, so daß Kurzschlußströme fließen müssen. Das Stromvolumen muß auf der einen Seite der Bürste ebenso groß sein wie auf der anderen,

da sich die Ströme nur über die Bürste schließen können. Man bemerkt auch hier, daß die Lamellen stromlos ablaufen. Die ablaufenden Kanten sind gefärbt. Auffällig ist die Größe der Ströme,

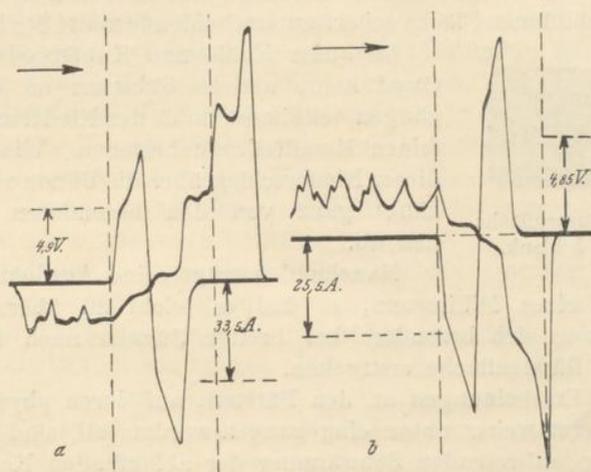


Fig. 27. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve. *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. Leerlauf $J=0$, $E=100$ Volt, $n=1000$, Zwei Bürsten. $27,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Funken. Bürsten streifig von rot bis matt. Die auflaufenden Kanten bleiben blank. Lamellen an den ablaufenden Seiten geschwärzt und angefressen.

die auch, ohne daß Funken sichtbar sind, sehr hohe Werte erreichen können. Die Erwärmung des Kommutators war hier ebenso groß wie bei dauernder Belastung mit 54 Amp. in derselben Bürstenstellung (57° C).

3. Die Vorgänge an den Bürstenkanten.

Bei der Betrachtung des Verlaufs der beiden für die Stromwendung charakteristischen Größen war schon darauf aufmerksam gemacht worden, daß sich zwischen den Bürstenkanten und an den ablaufenden Seiten der Lamelle Vorgänge abspielen, die bei guter Kommutation fehlen. Die äußeren Zeichen für diese Vorgänge sind die Veränderungen an den Laufflächen der Bürste und des Kommutators. Die vorher blank geschliffene Lauffläche der Bürste wird an der ablaufenden Kante zunächst matt und nimmt dann, besonders wenn Funken aufgetreten sind, eine rötliche Färbung an. Die Färbung kann sich in Streifen teilen, zwischen denen blanke Stellen oder nur schwach matte Stellen liegen. Das Mattwerden der Lauffläche tritt auch manchmal schon ein, wenn keine

Funken an den Kanten sichtbar gewesen sind. Ein Bild von dem Aussehen der Lauffläche in solchem Zustande gibt Fig. 28. Diese Färbung hat den Charakter eines Niederschlags, denn sie läßt sich leicht fortwischen. Es bleibt allerdings eine sich von der übrigen blank geschliffenen Fläche scharf unterscheidende matte Stelle zurück.

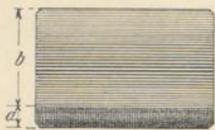


Fig. 28. Bürstenfläche.
a matt. b blank.

Da außer Kohle und Kupfer oder dessen Oxyd keine andere Substanz an den Vorgängen teilnimmt, muß der Niederschlag aus feinen Metallteilchen bestehen. Wieweit sich dieser Niederschlag über die Bürste verbreitet, hängt ganz von den besonderen Umständen ab.

Manchmal beträgt seine Ausdehnung nur Bruchteile eines Millimeters, so daß es leicht zu übersehen ist, doch kann es sich besonders bei breiten Bürsten auch fast über die ganze Bürstenfläche erstrecken.

Diese Erscheinungen an den Bürsten, auf deren physikalische Ursachen erst weiter unten eingegangen werden soll, sind mit einer gleichzeitig auftretenden Schwärzung der ablaufenden Kanten der Lamelle verbunden.

In dem durch die Oszillogrammausschnitte der Fig. 24 bezeichneten Fall war die Maschine etwa eine Stunde lang in Betrieb. Nach Aufnahme der Kurve wurde die Maschine stillgesetzt und nun zeigte sich, daß die auflaufenden Kanten der Lamellen ganz blank geblieben waren, während die ablaufenden Kanten auf etwa 5 mm Länge schwarz waren. Nach späterer Entfernung des schwarzen Überzugs durch Abreiben mit Petroleum blieben matte Stellen zurück. Sie konnten nur durch Abdrehen wieder zum Verschwinden gebracht werden.

Tritt die Färbung oder das Mattwerden der Bürste bei geringen Funkenbildungen auf, so braucht es auch dann oft tagelangen Einschleifens oder kräftigen Abschmirens, bis die Stellen wieder ganz verschwunden sind.

Die abgeleiteten Kurven, besonders hinsichtlich der Stromdichte, können dann natürlich keinen Anspruch auf Genauigkeit mehr machen, weil über die Größe der an der Stromleitung beteiligten Fläche der Lamelle und über die Stromverteilung über sie nichts mehr ausgesagt werden kann.

Das ist aber von keiner Bedeutung, da stets die aufgenommenen Kurven selbst zur Beurteilung der Vorgänge genügen.

Um festzustellen, wie sich die Bürsten der beiden Polaritäten verhalten, wenn jede für sich auf besonderer Lauffläche schleift, wurden sie gegeneinander versetzt. Hat man Überkommutation,

so wird man finden, daß sich die Lauffläche unter der negativen Bürste schwärzt, während sie unter der positiven Bürste blank bleibt und die Kanten angefressen werden. Dafür wird dort die ablaufende Kante der Bürste matt und färbt sich schließlich. Nun hat man aber zu beachten, daß sich bei Überkommulation die Richtung von Strom und Spannung in der ablaufenden Bürstenspitze gegen die Richtung in der auflaufenden Kante umkehrt. An der positiven Bürste ist die Spitze nicht mehr Kathode, sondern Anode und an der negativen Bürste ist sie zur Kathode geworden.

Schleifen, wie das gewöhnlich der Fall ist, beide Bürsten auf derselben Fläche, so verwischen sich die Erscheinungen. Es färbt sich dann auch die andere Bürste etwas, während sich die angefressenen Teile der Lamellen mit dem schwarzen Überzug bedecken.

Die Isolation des Kommutators der Versuchsmaschine war mit etwa 1 mm Tiefe ausgeschabt, um Störungen durch abgeriebene Isolationsteilchen zu vermeiden. Diese Störungen erwiesen sich bei den Vorversuchen als sehr beträchtlich, so daß es nicht gelang auch nur für kurze Zeit einen unveränderlichen am ganzen Umfang gleichen Zustand des Kommutators zu erreichen.

Die losen Kohleteilchen werden von den Bürsten auch in die Isolationsrillen gestrichen, die sich bald damit anfüllen. Bei genügend hoher Spannung zwischen zwei Lamellen geht Strom (s. Fig. 24 u. 55) über und es entsteht dann die Gefahr, daß Rundfeuer auftritt. Kommutatoren mit ausgeschabter Isolation werden also auch einer gewissen Wartung mit Hinsicht auf diesen Umstand bedürfen.

4. Das Wesen der Funkenbildung.

Wenn man den beschriebenen Erscheinungen auf den Grund kommen will, muß man vor allem daran denken, daß der Begriff des „Übergangswiderstandes“ hier in besonderer Weise aufgefaßt werden muß. Er ist als Quotient aus der Übergangsspannung und dem entsprechenden Strom definiert. Dabei ist stillschweigend vorausgesetzt, daß es sich stets um inniges Berühren der Flächen handelt, zwischen denen der Stromübergang stattfindet; daß man es also bei Schleifringen und Kommutatoren mit reinem Gleiten der Kohle auf dem Metall zu tun hat.

Daß dem aber nicht so ist, geht zur Genüge aus dem Umstand hervor, daß, wenn man bei den Kohleuntersuchungsapparaten, wie sie Arnold angegeben und Kahn¹⁾ bei seinen Untersuchungen

¹⁾ Kahn, „Der Übergangswiderstand von Kohlebürsten“. Sammlung Elektrotechn. Vorträge, Stuttgart 1902.

benutzt hat, vom glatten Schleifring zum kommutatorartig aufgebauten übergeht, die Übergangsspannung stark steigt und der Reibungskoeffizient bedeutend kleiner wird.¹⁾

Das deutet daraufhin, daß der Vorgang beim Gleiten so ist, daß einmal die Bürste in direkter metallischer Berührung mit dem Kommutator ist, und sich dann ganz von ihm entfernt. Der Stromübergang findet nur während des metallischen Berührens statt. Das Spiel wiederholt sich fortwährend. Die Zeiten des Spiels und der entstehende Abstand sind natürlich ganz außerordentlich klein, so daß äußerlich ein erschütterungsfreies Laufen und ein konstanter Betrag von Strom und Übergangsspannung sich einstellt.

Trennt man in den Untersuchungsapparaten die Kohle ganz vom Schleifring, so steigt die Spannung zwischen beiden bis auf die Klemmenspannung der Batterie. Bei sehr kleinen Zeiten der Trennung ist das nicht möglich. Es stellt sich ein Mittelwert ein, der höher liegt als die reine Übergangsspannung.

Bei einer Kommutatormaschine ist die der Batteriespannung entsprechende Spannung die in den kurzgeschlossenen Spulen induzierte EMK. Bei ungünstigen Kommutationsverhältnissen vollzieht sich, wie die Oszillogramme im Abschnitt 2 (VI.) zeigen, die Stromwendung sehr schnell. Der Strom wird auf eine kurze Strecke der Bürste zusammengedrängt und der Wert der Übergangsspannung nach den gegebenen Gesichtspunkten geändert. An den übrigen Stellen reicht dann die Spannung nicht aus, während der Zeit des metallischen Berührens einen zusätzlichen Strom fließen zu lassen, da diesem Wege auch der Ankerzweig parallel geschaltet ist. Es treten dann zwischen der Bürste und der Lamelle, auch ohne daß Stromübergang stattfindet, den in der Spule induzierten EMK entsprechende Spannungen auf.

Diese Spannungen können relativ sehr hohe Werte erreichen, höhere als sie eine reine Übergangsspannung je annehmen kann.

Daß diese Spannungen nicht von hohen Stromdichten herühren, ist bei Überkommutation sicher. Also sind die Stromdichten und Energiedichten auch nicht die Ursache der Färbung und der Funkenbildung. Auch bei Unterkommutation, wo am Ende der Lamellenstromkurve (Fig. 13, 22, 23) noch beträchtliche Ströme vorhanden sind, könnten die hohen Spannungen nicht allein von den Stromdichten verursacht werden, denn die haben viel eher, wie wir gesehen haben, die Tendenz, die Spannung herunterzudrücken.

Auch der Umstand, daß an den auflaufenden Kanten, wo sehr erhebliche Stromdichten auftreten können, die Lamellen stets blank

¹⁾ Liska, Die Reibung von Dynamobürsten (Arbeiten aus dem elektrotechn. Institut Karlsruhe 1908–1909. S. 71).

bleiben, beweist, daß die Stromdichten mit den beschriebenen Erscheinungen nichts zu tun haben.

Der Strom der Funken ist unter allen Umständen sehr gering. Man kann es deshalb bei der Funkenbildung nicht mit Lichtbogen zu tun haben.

Man hat zwar die Funken an Kommutatoren als kleine Lichtbogen angesehen und man ist sogar soweit gegangen, anzunehmen, die ganze Stromleitung zwischen Kohle und Kupfer beruhe auf sehr kleinen über die ganze Berührungsfläche verteilten Lichtbogen.

Nun ist aber das charakteristische an einem Lichtbogen der Umstand, daß die Elektroden infolge des Stromdurchgangs auf so hoher Temperatur sind, daß sie Ionen aussenden, auf deren Anwesenheit im Luftraum die Stromleitung beruht.

Für die Lichtbogen besteht bekanntlich die Beziehung

$$V = m + u \cdot l,$$

worin V die Spannung zwischen den Elektroden, l die Länge des Bogens und m und u Konstante sind. Zur Unterhaltung und zum Entstehen sind also Spannungen von bestimmter Größe nötig, die höher liegen (≤ 20 Volt) als sie je hier erreicht werden.

Ein Lichtbogen zwischen Kohle-Kupfer-Elektroden ist zudem nur möglich, wenn die Kohle Kathode ist. Darauf beruht die Ventilwirkung des Wechselstromlichtbogens.

Der Funken, wie er bei der Kommutation auftritt, ist also ein Glimmstrom. Er tritt zwischen Bürste und Lamelle auf, sowie sie sich voneinander trennen und eine genügend große Spannung zwischen ihnen vorhanden ist. Das wird meist an der ablaufenden Kante der Fall sein. Der Funken kann höchstens für die Dauer des Fortschreitens um eine Isolationsbreite bestehen.

Nun sind die Potentialdifferenzen, die zur Erzeugung derartiger Funken zwischen Elektroden in Luft nötig sind, meist noch viel größer, als die zur Aufrechterhaltung von Lichtbogen nötigen.

Es sind aber Versuche bekannt, die sowohl der Spannung als auch der Funkenlänge nach hierher passen. Kinsley¹⁾ hat Versuche angestellt mit Funkenlängen von $3 \cdot 10^{-7}$ cm und einem Volt Funkenspannung. Andere Beobachter²⁾ haben für Funkenlängen von 0,05 cm bis 0,1 cm zwischen Platten 8,94 bis 14,7 Volt und wieder andere zwischen Kugeln von 1 cm bis 0,25 cm Radius bei 0,01 cm bis 0,07 cm Funkenlänge, 3,8 bis 12,29 Volt gefunden.

Ist nun auch unter den Bürstenkanten die Spannung gegen

¹⁾ J. J. Thomson, Conduction of Electricity through Gases. Cambridge 1906. S. 357 ff.

²⁾ l. c.

die Lamelle groß genug, so können sich solche sehr kurze Funken auch dort ausbilden, während der Zeit, in der, wie angenommen, ein sehr kleiner Luftraum zwischen beiden besteht.

Wenn an derselben Stelle mehrere Funken kurz nacheinander übergehen, so ist ein geringerer Spannungsbetrag zur Aufrechterhaltung nötig als zur Zündung. Dann aber zerstäubt ein Glimmstrom seine Kathode, wobei weniger an eine thermische als eine mechanische Wirkung zu denken ist, obwohl auch erstere zu dieser Wirkung beiträgt. Diese Zerstäubung muß auch eintreten, wenn die Funken noch nicht sichtbar sind. Diese Zerstäubung der Kathode ist nun die Ursache für das Schwärzen und Anfressen des Kommutators (Zerstäuben der Kohle) und für das Mattwerden und Färben der Bürsten (Zerstäuben von Metall der Lamelle).

Der Vorgang beim Färben der Bürsten ist nun nicht so zu denken, daß sich die Färbung von der ablaufenden Kante her weiter verbreitet, weil dort die Bürste angefressen worden ist. Vielmehr tritt sie gleichzeitig überall da auf, wo die in der kurzgeschlossenen Spule induzierte EMK ausreicht die Färbung hervorzurufen, und ist ihr entsprechend verschieden stark. Es kommt dabei nicht auf die örtlichen Mittelwerte, sondern nur auf die Höchstwerte an.

Da wo die Bürste nur matt geworden oder auch nur schwach gefärbt ist, findet, wenn man z. B. von Überkommutation zu Unterkommutation übergeht, noch Stromübergang statt, doch ist der scheinbare Übergangswiderstand gegen früher erhöht. Wenn aber nach stärkerer Funkenbildung der Kommutator und die Bürste sorgfältig gereinigt werden, kann der gefärbt gewesene Teil der Bürste nicht mehr als aktive Bürste angesehen werden.

Bei Unterkommutation ist es möglich, daß ein Teil des Stromes sich auch über die Funkenbahnen schließt. Die Temperatur der Funken könnte dadurch erhöht werden. Das würde dann die Beobachtung erklären, auf die schon hingewiesen wurde, daß nämlich die Funken bei Unterkommutation schädlicher sind als bei Überkommutation.

In allen Fällen aber ist der Strom in den Funken sehr klein und deshalb sind auch die Wärmeverluste im Funken unbeschadet der hohen Temperatur der Funken selbst sehr klein. Die Energiedichte kann gleichwohl sehr erheblich sein, doch läßt sich darüber nichts aussagen.

Die Vorgänge werden noch insofern getrübt, als in den Funkenbahnen zweifellos ein Teil der Kohleteilchen verbrennt und dabei leuchtet, während bei einem reinen Glimmstromfunken nur das Gas leuchtend ist.

5. Die Funkengrenze.

Wie man aus den vorhergehenden Abschnitten sieht, treten Funken und Färben der Bürsten nur auf, wenn eine gewisse Spannung zwischen Bürste und Lamelle erreicht ist.

Welche Spannung nun Funkenspannung genannt werden muß, ist zunächst unsicher.

Bei der Behandlung der Probleme der Entladung der Elektrizität durch Gase¹⁾ heißt Funkenspannung, die größte Spannung, die unendlich lange Zeit an die Elektroden gelegt werden kann, ohne daß ein Funken auftritt. Auch ist es üblich, die Anfangsspannung anzugeben, bei welcher die Selbstentladung eintritt.²⁾ Beide sind natürlich nicht wesentlich verschieden voneinander.

In der Elektrotechnik pflegt man dagegen die Funkengrenze als erreicht anzusehen, wenn schon eine gewisse noch als zulässig zu erachtende Funkenbildung eingetreten ist. Über das Maß der zulässigen Funkenbildung werden natürlich verschiedene Beobachter verschiedener Meinung sein können.

Heute, wo man gut kommutierende Wendepolmaschinen baut, ist man bedeutend anspruchsvoller geworden und duldet auch nicht die kleinste Funkenbildung mehr.

Es wird also am wichtigsten sein, die Spannungen zu kennen, die noch zulässig sind, ohne daß Funken oder Färben der Bürsten auftreten.

Die kleinste Spannung, bei der ein Mattwerden der Lauffläche der Bürste beobachtet werden konnte, war 2,5 Volt.

Stärkere Färbungen kommen erst bei höheren Spannungen vor, wenn schon Funken auftreten.

Die Grenze für die Schwärzung des Kommutators ist nicht festzustellen, weil durch die Bürste die feinen Teilchen wieder abgestrichen und in die Isolationsrillen gebracht werden, so daß die Schwärzung erst bei stärkeren Funkenbildungen auftritt.

Die Spannung nun, bei der mit Sicherheit keine Funken mehr auftreten, war etwa 3 Volt. Für den Fall, daß die Kohlenspitze Kathode ist, liegt sie etwas höher bei 3,5 Volt.

Die Spannungen werden von den mittleren und effektiven Stromdichten und von der Kommutatortemperatur nicht beeinflusst.

Auch an den auflaufenden Kanten können Funken auftreten,

¹⁾ J. J. Thomson, *Conduction of El. through Gases*. Cambridge 1906. S. 431.

²⁾ Winkelmann, *Handbuch d. Physik*, Bd. IV, Leipzig 1905.

wie das in den Oszillogrammen der Fig. 25 und 26 der Fall war. Die Funkenspannung ist in diesem Fall 5 Volt.

Die Frage, welchen Einfluß das Bürstenmaterial auf die Funkenspannung hat, kann auf Grund der vorliegenden Versuche noch nicht entschieden werden. Aus den Untersuchungen an Funken mit verschiedenem Elektrodenmaterial kann man aber schließen, daß die Funkenspannung hierdurch nicht oder nur in geringem Maße geändert wird. Für die kommutierenden Eigenschaften einer Kohle ist diese Frage aber auch von geringerer Bedeutung. Ebenso hängt es von dem absoluten Wert der Funkenspannung nicht ab, welche Bürste zuerst zu feuern anfängt. Das alles wird wesentlich davon bestimmt, wie groß der Übergangswiderstand für die verschiedenen Stromrichtungen ist und wie er von Temperatur und Reibung beeinflusst wird.¹⁾

Bei Spannungen bis zu 7 Volt sind die Funken noch klein, die Beschädigung des Kommutators aber schon groß.

Spritzende Funken entstehen erst bei Spannungen über 8 bis 10 Volt. Sie kommen dadurch zustande, daß glühende Kohleteilchen durch den hohen Druck in den Funken weggeschleudert werden.

6. Elektrolytische Vorgänge.

In der Berührungsschicht können unter Umständen aber noch elektrolytische Vorgänge neben der hauptsächlich überwiegenden metallischen Leitung einhergehen. Infolge molekularer Anziehung kann sich auf dem Kommutator eine sehr fest anhaftende Luft- und Wasserhaut bilden, die dann unter den Bürsten in Sauerstoff und Wasserstoff gespalten wird. Einmal wird sich nun bei den außerordentlich kleinen Elektrodenabständen Sauerstoff und Wasserstoff sofort wieder vereinigen, so daß nur ein sehr geringer Teil der Sauerstoffionen sich mit dem Kupfer des Kommutators vereinigen kann, andererseits gehen unter den beiden Bürsten verschiedener Polarität die Prozesse im umgekehrten Sinne vor sich. Auch werden die an sich kleinen Wasserhäute durch die Bürsten zerquetscht, so daß die elektrolytischen Vorgänge und die dabei entstehenden Gegen-EMKE keine wesentliche Rolle spielen können. Das kann man auch schon daraus sehen, daß beim Abreiben des Kommutators mit Petroleum, das sehr fest an Metallen haftet, der Charakter der Stromwendung derselbe bleibt, während doch die elektrolytische Stromübertragung vollständig verhindert ist.

Bei hohen Kollektortemperaturen, wie sie ja meist vorkommen,

¹⁾ Siehe Arbeiten aus dem elektrotechn. Institut Karlsruhe 1908—1909, S. 299 ff.

muß das sich niedergeschlagen habende Wasser verdunsten, so daß auch dann derartige Vorgänge von selbst ausgeschlossen sind.

Den elektrolytischen Vorgängen kommt also keineswegs eine irgendwie wesentliche Bedeutung zu.

7. Die Abhängigkeit des Verlaufs der Kommutation von vorhergegangenen Zuständen.

Nach dem Vorstehenden erübrigt es sich fast nochmals darauf hinzuweisen, daß die Stromwendung in einem bestimmten Belastungsfall nicht stets denselben Charakter und Verlauf hat. Wenn einmal Funken und Färbungen unter den Kanten, und seien sie auch noch so geringfügig, eingetreten sind, vermindert sich die Breite der Bürste meist um das betreffende Stück der Bürste, oder es hat sich wenigstens der scheinbare Übergangswiderstand stark erhöht, was dann am deutlichsten bei Unterkommutation zum Ausdruck kommt.

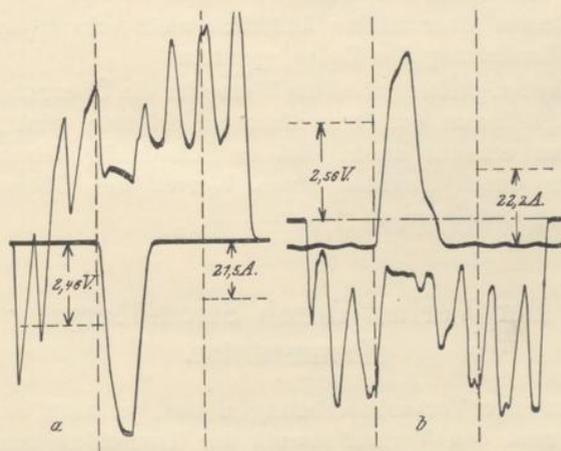


Fig. 29. Lamellenstromkurve und durchlaufende Potentialkurve. *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ew} = 55$ Amp., $w_w = 36$. Eine Bürste. Funkenfrei.

Nachdem die in Fig. 26 dargestellten Aufnahmen gemacht waren, wurde, ohne an dem Zustand der Bürsten und des Kommutators irgend etwas zu ändern, die Erregung der Wendepole so weit herabgesetzt, daß keine Funken mehr auftraten. Der dann sich einstellende Strom und Spannungsverlauf ist in Fig. 29 zu finden.

Zieht man die volle geometrische Bürstenbreite in Betracht, so scheint eine starke Überkommutation wenigstens dem Verlauf der Lamellenstromkurve nach stattzufinden. Man sieht aber aus Fig. 18,

bei der die Erregung der Wendepole noch um 5 Amp. höher war, daß man eine nur schwach ausgeprägte Überkommulation erhalten müßte. Der hier eintretende Stromverlauf wird also nur durch die Erhöhung des Widerstandes an den ablaufenden Kanten infolge der vorher aufgetretenen Funken bedingt.

Unter solchen Umständen können an der ablaufenden Bürstenskante viel höhere Spannungen auftreten, ohne daß Funkenbildung eintritt.

Man sieht also, daß man nicht immer die Kurzschlußströme nach der geometrischen Bürstenbreite in geradlinige und zusätzliche Ströme zerlegen darf.

Aber auch wenn keine Funken und kein sichtbares Mattwerden der Bürsten stattgefunden hat, läßt sich gleiche Stromverteilung über die Bürstenbreite nur dann erreichen, wenn man, von gleichem Zustand des Kommutators und der Bürste (abgedreht und die Kohlen neu eingeschliffen) ausgehend, den bestimmten Belastungszustand in derselben Reihenfolge der Zwischenstadien einstellt.

Oft können aber kleine äußerlich nicht erkennbare Zufälligkeiten die Erreichung des Zieles vereiteln.

Die Schwierigkeiten, absolute Werte für die Übergangsspannung in Abhängigkeit von der Stromdichte zu erhalten, sind ja bekannt genug. Man erkennt auch, daß es vollständig falsch ist, eine Bürstensorte durch Angabe eines Wertes des Übergangswiderstandes charakterisieren zu wollen.

VII. Der Verlust durch Stromübergang am Kommutator.

Eine strenge Vorausberechnung dieses Verlustes ist nur möglich, wenn man den Verlauf sowohl der Kurzschlußstromkurve als auch der Potentialkurve kennt. Das wird natürlich nur selten oder vielmehr nie im voraus der Fall sein können. Man kann aber auch auf andere Weise zu dem gesuchten Resultate gelangen, indem man schreibt¹⁾

$$W_u = 2 \cdot f_u \cdot J \cdot \Delta P.$$

Man hat also zuerst aus dem Kommutationsdiagramm den Formfaktor f_u zu berechnen und erhält dann

$$s_{u\text{eff}} = f_u \frac{2J}{F_b}.$$

¹⁾ Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, 2. Aufl., Bd. I, S. 668.

Aus der Kurve, die den Zusammenhang zwischen $s_{u\text{eff}}$ und ΔP für die benutzte Kohlensorte gibt, entnimmt man dann das entsprechende ΔP . Zu beachten ist, daß die fragliche Kurve unter Berücksichtigung der Temperatur erhalten sein muß.

Man erkennt aber nun auf Grund der Ausführungen der vorigen Abschnitte, daß diese Art nicht viel mehr als eine Schätzung der Verluste ermöglicht.

Bei der Vorausberechnung einer Maschine sind die meisten hier nötigen Daten nicht bekannt und bei einer Berechnung der Verluste auf Grund der aufgenommenen Kommutierungsdiagramme leidet das Verfahren an den Voraussetzungen, die gemacht worden sind, und an der Ungenauigkeit der Messung.

Es ist auch hier wieder angenommen, daß der spezifische Übergangswiderstand konstant, daß die mittlere örtliche Stromdichte sich nicht sehr stark ändere, und daß die Temperatur über die ganze Breite der Übergangsschicht konstant sei. Von allen diesen Annahmen ist im vorigen bewiesen worden, daß sie nicht zutreffen. Weiter legt man bei der Berechnung der Stromdichten die geometrische Berührungsfläche zugrunde, was, wie man aus den Oszillogrammen sieht, meist nicht zutreffend ist. Eine wirkliche Messung oder Vorausberechnung läßt sich auf diesem Wege also nicht erreichen, doch bleibt er trotz allem der praktisch einzig gangbare und reicht auch zur Bestimmung der Größenordnung der Verluste aus. Der Weg, auf dem die folgenden Kurven erhalten sind, ist für die Praxis nicht anwendbar, da er zu viel Einrichtungen, die nicht überall anbringbar, und zu viel Zeitaufwand erfordert.

Für jeden einzelnen Moment ist der Strom einer Lamelle aus der Lamellenstromkurve bekannt. Er verteilt sich, wie S. 11 der Arbeit von Arnold bewiesen, gleichmäßig auf den bedeckten Teil einer Lamelle und die Übergangsspannung ist für dieselbe Zeit über die Breite der Lamelle konstant. Der momentane Verlust, der sich in Joulesche Wärme umsetzt, ist dann

$$W_{Lt} = i_{Lt} \cdot \Delta P_t,$$

wobei die Indizes t die Momentanwerte bezeichnen sollen. Durch einfache Multiplikation der Ordinaten der Lamellenstromkurve mit den Ordinaten der durchlaufenden Potentialkurve kann man also eine Kurve erhalten, deren Ordinaten als Funktion der Zeit die Verluste in Watt angeben, die beim Passieren einer Lamelle zwischen ihr und der Bürste auftreten. Der Gesamtverlust, den eine Lamelle in dieser Zeit erleidet, ist dann

$$W_L = \int_0^{T'} i_{Lt} \cdot \Delta P_t \cdot dt,$$

wobei dann die Dauer einer Lamellenstromkurve

$$T' = \frac{b + (\beta - \delta_i)}{100 \cdot v_k}$$

ist. Das gilt für die betrachtete Wicklung. Für eine beliebige Wicklung hat man allgemein¹⁾

$$T' = \frac{b_1 + (\beta - \delta_i) \left[1 + \left(1 - (1 - p_w) \frac{a}{p} \right) \right]}{100 \cdot v_k},$$

worin b_1 die Bürstenbreite, β die Lamellentheilung, v_k die Umfangsgeschwindigkeit des Kommutators, p die Polpaarzahl, a die halbe Zahl der Ankerstromzweige, p_w die Zahl der weggelassenen aufeinanderfolgenden gleichnamigen Bürsten ist

Der Verlust wird also durch die Fläche, die die Verlustkurve mit der Abszissenachse einschließt, dargestellt. Der Gesamtübergangsverlust unter einer Bürste ist

$$W_u = \frac{K \cdot n}{60} \int_0^{T'} i_{Lt} \cdot \Delta P_t \cdot dt.$$

Da man nur den Verlust messen kann, den eine Lamelle beim Durchgang unter der Bürste hindurch erleidet, muß man voraussetzen, daß die anderen Lamellen denselben Verlust haben. Der Zustand des Kollektors muß also am ganzen Umfang derselbe sein, was ja nicht immer zutreffen wird. Bei den vorliegenden Versuchen wurde stets darauf geachtet, daß das auch wirklich der Fall war. Das läßt sich nämlich leicht mit Hilfe der Prüfbürste oder dadurch, daß man die Pulsationen der Spannung an einer vorgeschalteten Drosselspule betrachtet, kontrollieren.

Sowie die Messung tatsächlich ausgeführt wird, schließt die Gültigkeit der vorstehenden Überlegungen die Tatsache ein, daß die Bürste selbst in allen Punkten auf gleichem Potential ist. Mit genügender Genauigkeit ist das auch tatsächlich der Fall. Zwischen den Kanten der Bürste konnte man bei voller Belastung ($J = 60$ Amp.) 0,02 Volt und längs der Bürste zwischen einer nahe der Berührungsfläche um die Kohle gelegten Drahtwindung und dem Anschlußpunkt der Leitung zum Oszillographen 0,04 Volt messen. Es tritt also in der Kohle nicht der Ohmsche Verlust auf, der einfach ihrem Widerstand und ihren Dimensionen entsprechen würde. Das rührt daher, daß der Bürstenhalter einen bis dicht an die Übergangsstellen heranreichenden Nebenschluß darstellt, in dem seiner großen Nähe und

¹⁾ Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, Bd. I, S. 360.

seiner guten Leitfähigkeit wegen ein wesentlicher Spannungsabfall nicht auftreten kann. Man kann sich natürlich nicht unter allen Umständen auf diese Stromableitung verlassen, deshalb ist die Kohle, soweit sie in der Führungshülse steckt, verkupfert und mit zwei Litzen von beträchtlichem Querschnitt mit dem Halter selbst verbunden. Man mißt also die Verluste in dem Bürstenhalter und in der Lamelle mit. Sie sind aber vernachlässigbar klein.

Diese Methode, die Übergangsverluste zu bestimmen, ist die einzige direkt mögliche.

Hier seien beispielweise zwei Verlustkurven (Fig. 30) angeführt, die aus den Kurven in Fig. 21 gewonnen sind.

Die beiden Figuren 31 und 32 geben

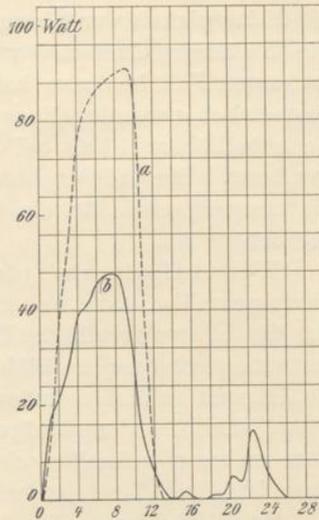


Fig. 30. Durchlaufende Verlustkurven zu Fig. 21.
a für die negative Bürste.]
b für die positive Bürste.

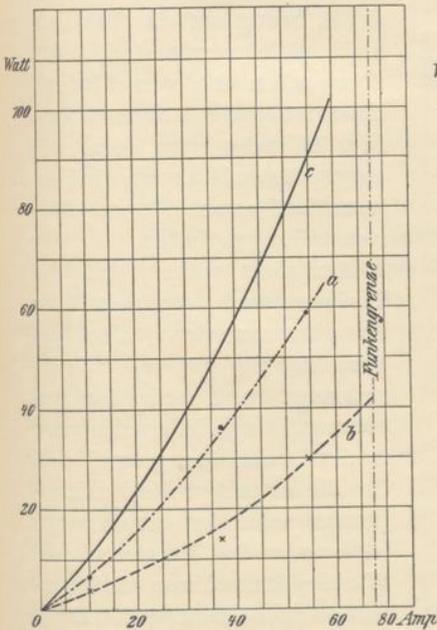


Fig. 31. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von der Belastung. a für die negative Bürste. b für die positive Bürste. c Gesamtverlust. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone; ohne Wendepole; je zwei Bürsten auf den Stiften.

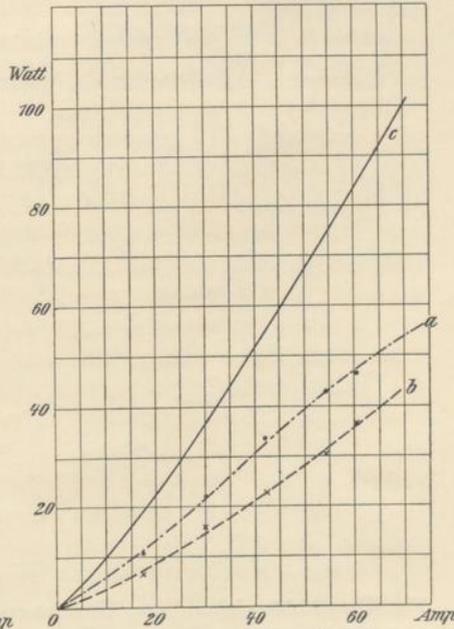


Fig. 32. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von der Belastung. Wendepole in Serie mit dem Anker $w_n = 36$. Zwei Bürsten. a für die negative Bürste. b für die positive Bürste. c Gesamtverlust.

die Abhängigkeit der Übergangsverluste von der Belastung wieder. Die Berührungsflächen der Bürsten waren in beiden Fällen gleich. Im ersten Fall hat man bei herausgenommenen Wendepolen in der geometrisch neutralen Zone Unterkommuation. Man sieht, daß die Verluste höher sind als bei der nur sehr wenig beschleunigten Stromwendung. Die bei der benutzten Wendepolerregung, die ungefähr die normale und für die beabsichtigte geradlinige Stromwendung berechnete ist.

Weiter fällt auf, daß die positiven Bürsten sehr viel geringere Verluste haben als die negativen. Das rührt daher, daß der höhere spezifische Übergangswiderstand der positiven Bürste nur eine geringere Ausbildung zusätzlicher Ströme, die sich über die Bürsten schließen müssen, zuläßt. Diese geringeren Verluste treten auch in den übrigen Zusammenstellungen auf. Die Verluste nehmen schneller als proportional der Belastung zu, und zwar ist diese Tendenz bei Unterkommuation stärker ausgeprägt.

Verschiebt man die Bürsten bei einem Generator, so wird

man eine ganze Reihe Stellungen finden können, in denen keine Funken auftreten. Daß sie in bezug auf die Verluste nicht gleichwertig sind, lehrt aber schon die verschiedene Erwärmung des Kommutators. Fig. 33 zeigt nun, ein wie ausgeprägtes Minimum die Verluste bei verschiedenen Bürstenstellungen haben.

Man sieht weiter, daß die Verluste nach der Seite der Unterkommuation, also bei Verschiebung gegen die Drehrichtung, weit schneller zunehmen, als bei Verschiebung in der Drehrichtung, und daß für die erste Art die Funken- grenze schneller erreicht ist.

Ganz analog kann man bei Wendepolmaschinen oft innerhalb weiter Grenzen die Erregung der Wendepole ändern, ohne daß Funken auftreten.

Auch kann man die Beobach-

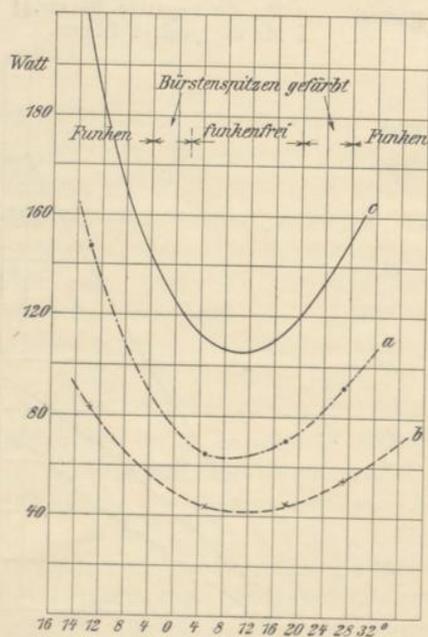


Fig. 33. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von der Bürstenstellung. $J=54,8$ Amp., $E=100$ Volt, $n=1000$. Eine Bürste. a für die negative Bürste. b für die positive Bürste. c Gesamtverlust.

tung machen, daß scheinbar gleiche Maschinen sehr verschiedene Kommutatortemperaturen annehmen können, wobei beide äußerlich gleich gut zu arbeiten scheinen.

Diese Verhältnisse werden durch die beiden Figuren 34 und 35 illustriert. Es sind die Verluste in Abhängigkeit von dem Verhältnis der Amperewindung der Wendepole zu den Amperewindungen des Ankers aufgetragen. Bei den Kurven Fig. 34 ist die mittlere Stromdichte nur halb so groß wie bei den Kurven Fig. 35, wo wieder eine Bürste auflag. Die Funkengrenzen sind wieder eingetragen. Es zeigt sich auch hier wieder die schnellere Zunahme der Verluste bei Unterkommuation und die Erscheinung, daß die positiven Bürsten weit geringere Verluste haben.

Bei der Fig. 34 mußte darauf verzichtet werden, eigentliche Kurven zu ziehen, weil die Zahl der aufgenommenen Punkte nicht ausreichte. So wurden nur die erhaltenen Punkte eingetragen und durch gerade Linien verbunden, doch genügt auch das, um zu zeigen, daß innerhalb der Funkengrenze sehr bedeutende Unterschiede in der Größe der Verluste auftreten können. Beträgt doch der kleinste gemessene Verlust nur den dritten Teil des größten vorkommenden Verlustes.

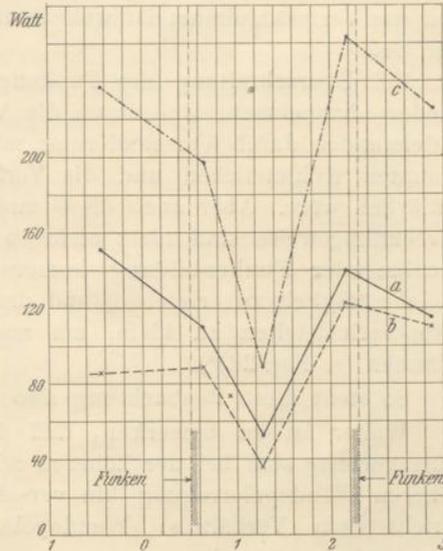


Fig. 34. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von dem Verhältnis der Amperewindungen der Wendepole zu den Ankeramperewindungen $\frac{2 AW_w}{N \cdot i_a}$.

$J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $w_w = 36$. Zwei Bürsten auf jeden Stift.

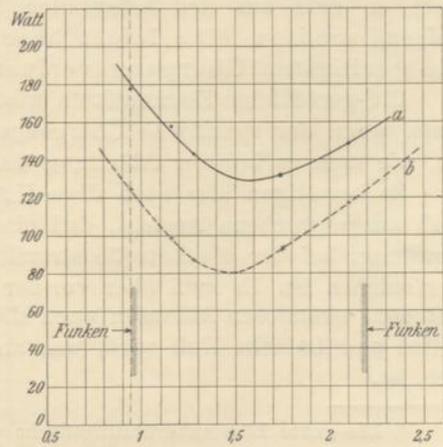


Fig. 35. Wie Fig. 34, aber nur eine Bürste auf jedem Stift.

Der Mindestbetrag der Verluste ist bei doppelter mittlerer Stromdichte auch etwa verdoppelt. Die Verluste ändern sich bei der höheren mittleren Stromdichte (Fig. 35) viel weniger schnell und das Verlustminimum ist weit weniger scharf ausgeprägt als in Fig. 34.

Bei Überschreitung der Funkengrenze scheinen die Verluste wieder abzunehmen, was durch die Vergrößerung des Übergangswiderstandes durch Verschmierung mit abgeschleuderten und verbrannten Kohleteilchen und die Verkleinerung der Bürstenbreite erklärlich wäre. Aber auch die Grundlagen der hier angewendeten Berechnungsweise sind nicht mehr so sicher. Einmal wird es mit zunehmender Funkenbildung immer schwerer, die erforderliche Gleichmäßigkeit zu erreichen, und dann wird der Ausschlag an den Hauptverluststellen zu klein, um noch eine sichere Ablesung zu erlauben (s. Fig. 26)¹⁾.

So steht diese Beobachtung also nicht ganz fest.

Weiter ist zu bemerken, daß der Minimalbetrag der Übergangsverluste sich bei der höheren mittleren Stromdichte nach der höheren Wendepolerregung hin verschiebt. In beiden Fällen entspricht dem Verhältnis: Wendepolamperewindungen zu Ankeramperewindungen oder

$$\frac{2 A W_w}{N \cdot i_a} = 1,3$$

eine deutlich beschleunigte Kommutierung. Da die geradlinige Stromwendung zwischen Unter- und Überkommutierung liegen muß (es ist schon darauf hingewiesen worden, daß sie nicht zu erreichen war), so geht aus den Schaulinien hervor, daß nicht die geradlinigen, sondern eine leicht beschleunigte Stromwendung die geringsten Übergangsverluste ergibt.

Die geradlinige Kommutation gibt nur dann die kleinsten Verluste, wenn der spezifische Übergangswiderstand wirklich konstant ist, wie man es bei der Ableitung des Minimums voraussetzt.

Es bestätigen also auch diese Untersuchungen die schon mehrfach ausgesprochene Ansicht, daß eine leicht beschleunigte Stromwendung, bei der die Lamelle stromlos abläuft, einer geradlinigen vorzuziehen ist. Es muß aber vor der Ansicht gewarnt werden, daß mit dem stromlosen Abläufen auch die Spannung zwischen Bürstenspitze und Lamelle Null wird, was an sich natürlich nicht unmöglich ist.

¹⁾ Die ganze Bürstenberührungsfläche war bei den Versuchen dieses Abschnitts innerhalb der Funkengrenze und ebenso bei den Figuren 7—10 spiegelnd eingelaufen.

VIII. Rückwirkung der Kurzschlußströme auf die Maschine.

1. Einwirkung auf die Potentialkurve.

In den Oszillogrammen der vorigen Abschnitte, die die Momentanwerte der Spannung einer Lamelle gegen die Bürsten (die durchlaufende Potentialkurve) geben, fallen die Zacken dieser Kurven

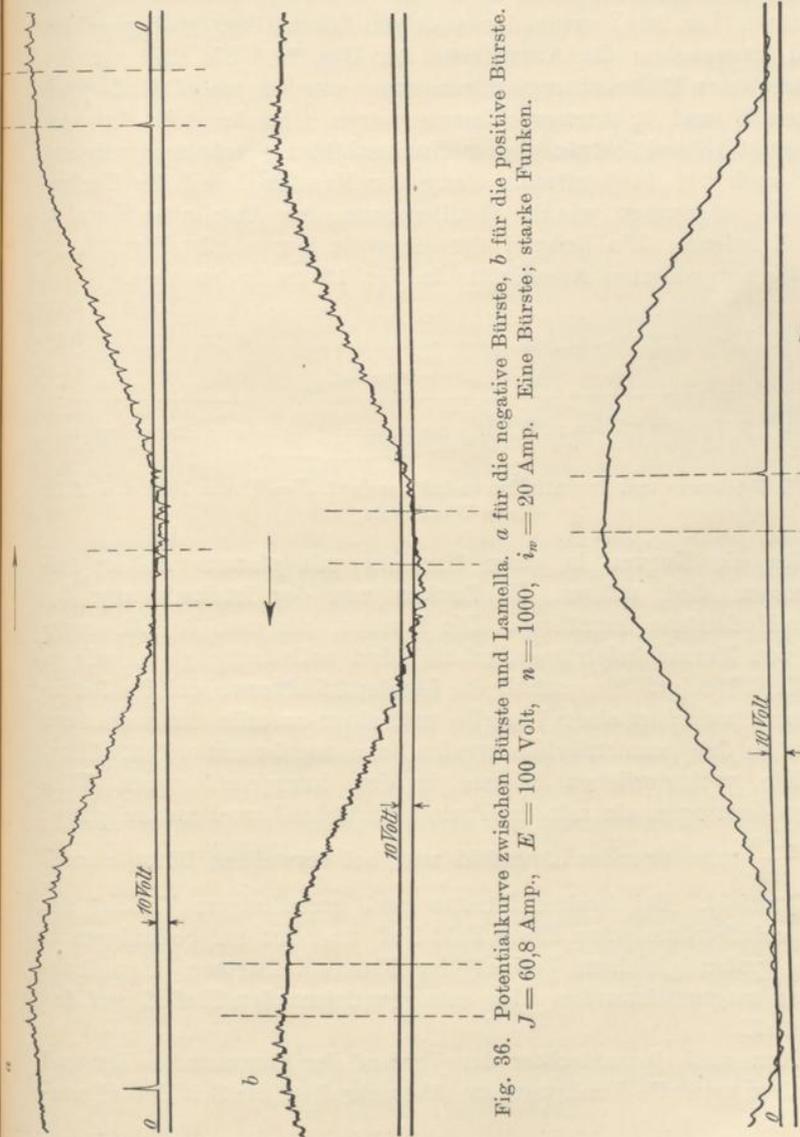


Fig. 36. Potentialkurve zwischen Bürste und Lamelle. *a* für die negative Bürste, *b* für die positive Bürste. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_w = 20$ Amp. Eine Bürste; starke Funken.

Fig. 37. Potentialkurve zwischen der positiven Bürste und einer Lamelle. $J = 60,8$ Amp., $i_w = 102$ Amp. Zwei Bürsten. Funkenfrei.

besonders auf, um so mehr als es sich hier um einen glatten Anker handelt. Man findet, daß vor und nach dem Teil, der wesentlich von den übergehenden Strömen bestimmt ist, die Kurve Spitzen aufweist, die um die Zeit des Fortschreitens um eine Lamellenteilung voneinander abstehen (vgl. Fig. 11, 13, 21, 24 usw.).

Da es sich bisher nur um die Ausschnitte aus der durchlaufenden Potentialkurve gehandelt hat, so seien zunächst einmal einige ganze Kurven, und zwar zwischen einer Lamelle und der negativen (Fig. 36a) sowie der positiven Bürste (Fig. 36b) gegeben. Ihnen entsprechen die Ausschnitte der Fig. 24. Sie sind mit der beschriebenen Meßschaltung aufgenommen worden, wobei die Doppelbürsten b_1 und b_2 kurzgeschlossen waren. Es handelt sich um Kurven, die bei beträchtlicher Funkenbildung erhalten wurden. Aber auch bei funkenfreiem Gang der Maschine sind die Zacken deutlich ausgeprägt, wie die Oszillogramme der Abschnitte 2 und 3, Kap. V zeigen. Ein Beispiel für die volle Kurve gibt Fig. 37, zu der die vergrößerten Ausschnitte in Fig. 12 zu finden sind.

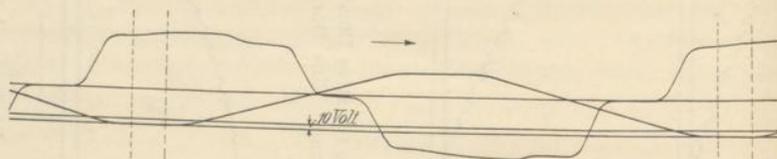


Fig. 38. Feldkurve und Potentialkurve bei Leerlauf. $J=0$, $n=1000$, $i_e=2,15$. Ohne Wendepole.

Da die Kurven in einer Maschine mit glattem Anker aufgenommen sind, müssen die Zacken von der Rückwirkung der Kurzschlußströme herrühren. Die Kurven, die man bei Abwesenheit von Kurzschlußströmen erhält, sind vollständig glatt, wie es die Fig. 38 zeigt. Sie enthält die Leerlaufsfeldkurve und die Potentialkurve zwischen einer Lamelle und einer anstelle der negativen Bürste in der geometrisch neutralen Zone angebrachten Prüfbürste.

Die veränderlichen Ströme in den kurzgeschlossenen Windungen erzeugen ein mit der Periodenzahl der Lamellendurchgänge $c_k = \frac{K \cdot n}{60}$ schwingendes Längsfeld und bei verstellten Bürsten auch ein Querfeld. Bei breiten Bürsten und geradlinigem Verlauf der Kurzschlußströme wäre dieses Feld Null und hat bei beliebigem in allen Spulen gleichem Verlauf der Kurzschlußströme einen konstanten magnetisierenden oder entmagnetisierenden Einfluß auf das Hauptfeld.

Nun wird, je schlechter der Verlauf der Kommutation ist und je weiter man die Funkengrenze überschreitet, die Zeit der eigent-

lichen Stromwendung immer kürzer, ohne daß eine größere Ausbildung zusätzlicher Ströme damit verbunden ist. Die größere Wirkung des schwingenden Feldes wird also nicht durch Vergrößerung des veränderlichen Stromvolumens, sondern durch Verkürzung der Zeit der Änderung erreicht.

Noch vor Erreichung der Funkengrenze wird sich also unter allen Umständen ein mit der Periodenzahl der Kommutation veränderlicher Kraftfluß ausbilden, der als der Träger sämtlicher Selbst- und gegenseitigen Induktionen anzusehen ist.

Er wird in den massiven Eisenteilen des Feldmagnetgestelles durch Induktion von Wirbelströmen einen erheblichen Widerstand erfahren, so daß er gezwungen ist, zum größten Teil durch die Polschuhe und die Luft zu verlaufen. Im Joch selbst wird nur ein sehr kleiner Teil des Kraftflusses fließen.

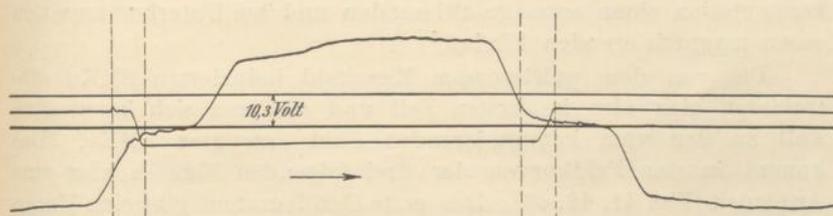


Fig. 39. Feldkurve und Strom einer Ankerspule. $J = 20,5$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Bürsten 14° gegen die Drehrichtung verstellt. Eine Bürste. Leichte Funken.

Auch von der Sättigung der Maschine, insbesondere des Ankers, hängt viel für die Möglichkeit der Ausbildung des Eigenfeldes der Kurzschlußströme ab. So zeigt z. B. Fig. 39 die Feldkurve und den Strom einer Spule. Man bemerkt in der Feldkurve nur sehr kleine Zacken von der Periodenzahl $c_k = \frac{K \cdot n}{60}$. Der pulsierende Kraftfluß der kommutierenden Spulen ist also nur sehr klein. Schaltet man nun die Felderregung ab und erregt nur vom Anker her, so daß man nun mit Hilfe der Prüfspule den Verlauf des Ankerfeldes erhält, so sieht man (Fig. 40), daß bei fast gleichem Verlauf der

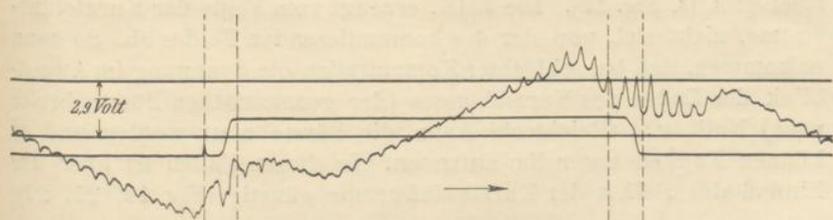


Fig. 40. Ankerfeldkurve und Strom einer Ankerspule. $J = 20,5$ Amp., $i_e = 0$, $n = 1000$. Ohne Funken.

Kurzschlußströme das Eigenfeld bedeutend schärfer ausgeprägt ist. Von diesem pulsierenden Längsfeld sind auch die Spitzen der durchlaufenden Potentialkurven erzeugt, von denen man zunächst annehmen möchte, daß sie vom Ausschalten des betreffenden Stromes herrühren (s. Fig. 13, 20, 23).

2. Die Beeinflussung der Funkengrenze.

Wie wir gesehen haben, ist nur die an den Bürstchenkanten erreichte Spannung für die Funkenbildung maßgebend. Da sich die in einer Spule induzierten EMKe aus der vom kommutierenden Feld und der vom Eigenfeld induzierten zusammensetzen, ist es klar, daß die letzteren die Funkengrenze direkt beeinflussen können.

Nun hat das Feld der Kurzschlußströme im Mittel bei Überkommuation einen entmagnetisierenden und bei Unterkommuation einen magnetisierenden Einfluß.¹⁾

Die von dem pulsierenden Eigenfeld induzierten EMKe subtrahieren sich also im ersten Fall und addieren sich im zweiten Fall zu den vom kommutierenden Feld erzeugten EMKe. Das kommt in den Feldkurven der drei folgenden Figuren klar zum Ausdruck (Fig. 41, 42, 43). Das erste Oszillogramm gibt eine Unterkommuation bei in der neutralen Zone stehenden Bürsten ohne Anwendung von Wendepolen und leichter Funkenbildung. Die Spitzen setzen sich einfach auf die Feldkurve, soweit sie vom Erregerfeld und Ankerfeld herrührt, auf. Ebenso verhält es sich beim nächsten Oszillogramm, das bei schwach erregten Wendepolen und starker Funkenbildung aufgenommen ist. Hier fällt die Spitze mit dem Austreten der Spule aus dem Kurzschluß zusammen. Man vergleiche dazu das Oszillogramm der Fig. 24. In diesen Oszillogrammen ist der Verlauf der Potentialkurve, soweit er von dem kommutierenden Feld herrührt, ziemlich gut zu erkennen, und man sieht, daß das pulsierende Feld am meisten zur Funkenbildung beiträgt.

Umgekehrt ist es bei Überkommuation, wofür Fig. 43 ein Beispiel gibt (s. Fig. 12). Die EMK, erzeugt vom Felde der Kurzschlußströme, zieht sich von der des kommutierenden Feldes ab. So kann es kommen, daß bei schlechter Kommutation die Spannung im Augenblick des Endes des Kurzschlusses (der geometrischen Bürstenbreite nach) Null ist. Gleichwohl kann die Bürste matt werden und es können Funken unter ihr auftreten. In diesen Fällen ist aber der Einfluß des Feldes der Kurzschlußströme günstig (Fig. 12, 25, 26),

¹⁾ R. Pohl, Sammlung elektrotechn. Vorträge, VI. Bd., 10. Heft.

wenn dieser Einfluß auch meist nicht so ausgeprägt ist, wie bei Unterkommulation. Bei Überkommulation kann also die Feldkurve

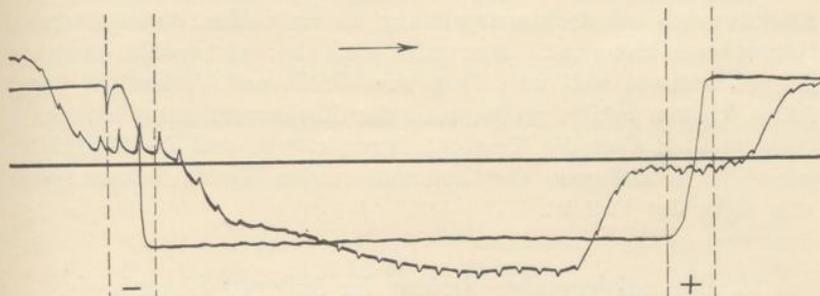


Fig. 41. Feldkurve und Strom einer Ankerspule. $J = 67$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Eine Bürste in der geometrisch neutralen Zone. Leichte Funken.

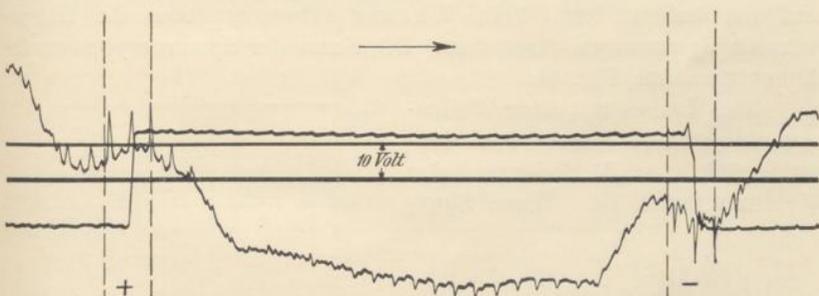


Fig. 42. Feldkurve und Strom einer Spule. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ev} = -20$ Amp., $w_n = 36$. Starke Funken.

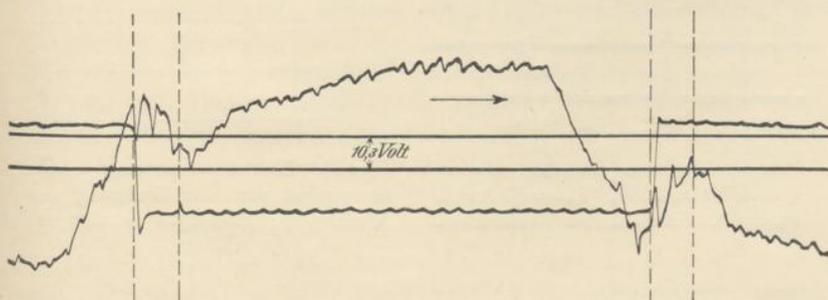


Fig. 43. Feldkurve und Strom einer Spule. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ev} = 102$ Amp., $w_n = 36$. Zwei Bürsten; ohne Funken.

steiler verlaufen und es erklärt sich damit auch die Tatsache, auf die im Kap. VII hingewiesen wurde, daß nämlich die Maschine gegen Unterkommulation empfindlicher ist. Da nach Kap. VI Abschn. 4

die Funkenbildung in diesem Fall auch noch schädlicher ist, wird man stets bestrebt sein müssen, Unterkommulation zu vermeiden.

Man sieht weiter, daß es wenig Wert hat, Mittelwerte oder Effektivwerte der Reaktanzspannung zu errechnen, da es allein auf Höchstwerte ankommt. Man wird sich aber gleichwohl damit begnügen müssen, weil man die genaue Größe und Verlauf des Eigenfeldes kennen müßte, wollte man den Höchstwert selbst berechnen. Dazu müßten aber die Kurzschlußstromkurven und die Kraftlinienwege des Kraftflusses der kommutierenden Spulen bekannt sein, was nicht der Fall ist.

3. Die pulsierenden Ströme im äußeren Stromkreis.

Erregt man bei sorgfältig entmagnetisierten Hauptpolen die Wendepole allein, so kann man, obgleich die Wendepole in bezug auf den äußeren Kreis keine Wirkung haben, zwischen den Hauptbürsten Spannungen feststellen. Die Form der Spannungskurve erkennt man aus Fig. 44.

Man hat es mit einer Wellenspannung zu tun, deren Periodenzahl gleich der Periodenzahl der Kommutation ist. Diese Span-

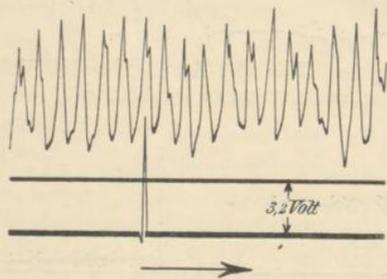


Fig. 44. Klemmenspannung. $J = 0$, $i_c = 0$, $n = 1000$, $i_{ew} = 50$ Amp., $w_w = 36$. Eine Bürste. Funkenfrei.

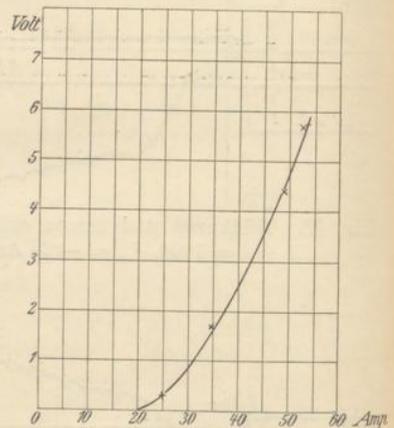


Fig. 45. Klemmenspannung in Abhängigkeit von der Erregung der Wendepole; Hauptpole entmagnetisiert.

nung ist in der folgenden Fig. 45 in Abhängigkeit von der Wendepolerregung innerhalb der Funkengrenze dargestellt. Wie in diesem Zustand die Maschine arbeitet, sei durch die nachstehenden Oszillogramme erläutert.

Fig. 46 gibt zunächst die Feldkurve der Wendepole bei abgehobenen Bürsten. Legt man nun nur die Bürsten eines Stiftes

auf, so entstehen in den von ihnen kurzgeschlossenen Spulen Ströme, die ein pulsierendes Feld hervorrufen.

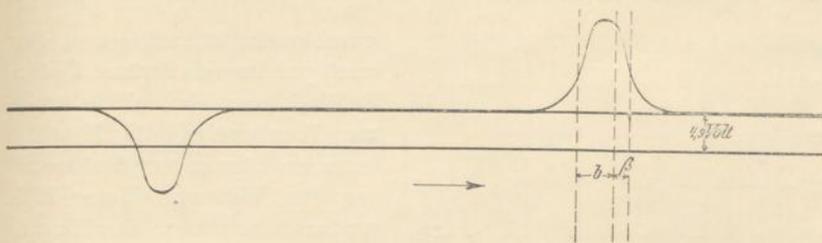


Fig. 46. Feld der Wendepole; Hauptpole entmagnetisiert; Bürsten abgehoben.
 $i_{ew} = 50 \text{ Amp.}, n = 1000.$

Aus der Fig. 47 sieht man, daß sich ein Teil des Kraftflusses innerhalb der Pollücke durch Luft und Wendepol schließt, und daß ein anderer Teil den Weg durch den Ring nimmt.

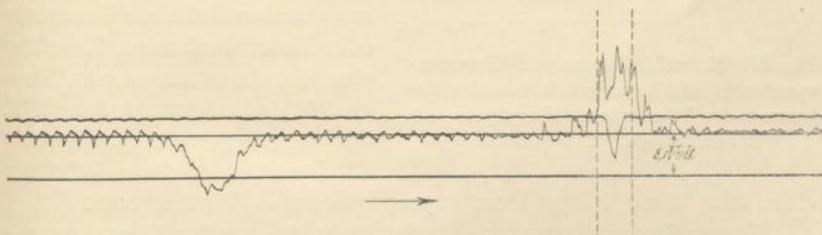


Fig. 47. Feldkurve und Strom einer Spule. Nur die negative Bürste liegt auf.
(Die Achsen der Kurven sind verschoben.) $i_{ew} = 50 \text{ Amp.}, n = 1000.$

Legt man auch die Bürsten der anderen Polarität auf (Fig. 48), so entsteht auf jeder Seite ein Feld, das in bezug auf den Ring entgegengesetzt gerichtet ist. Die pulsierenden Kraftflüsse der von den Bürsten kurzgeschlossenen Spulen müssen sich also durch Luft und Wendepole und zum Teil durch die Hauptpole schließen.

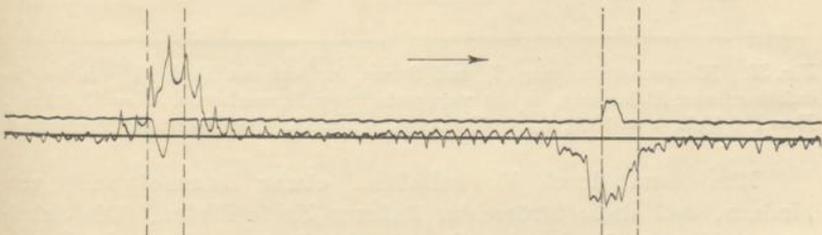


Fig. 48. Feldkurve und Strom einer Ankerspule. $i_{ew} = 50 \text{ Amp.}, n = 1000.$
Eine Bürste auf jeden Stift.

Durch Rotation des Ankers in diesem pulsierenden Feld entsteht also die EMK von der Periodenzahl $\frac{K \cdot n}{60}$. Wenn der äußere Kreis

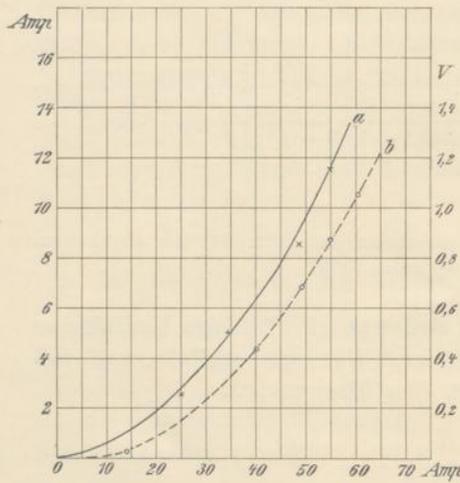


Fig. 49. Kurzschlußstrom und Klemmenspannung in Abhängigkeit von der Erregung der Wendepole. Hauptpole entmagnetisiert. Eine Bürste.

geschlossen ist, müssen in ihm auch pulsierende Ströme fließen. Schließt man bei allein erregten Wendepolen die Maschine kurz, so können nur Ströme unter der Wirkung dieser EMK zustande kommen. Der Zusammenhang der Klemmenspannung und des pulsierenden Stromes mit der Wendepolerregung, ebenfalls innerhalb der Funkengrenze, ist in Fig. 49 gegeben.

Ebenso erhält man bei der in normaler Weise als Generator oder Motor laufenden Maschine eine der konstanten vom Erregerfeld induzierten Anker EMK sich überlagernde pulsierende EMK und unter deren Wirkung

einen sich dem Hauptstrom superponierenden Wellenstrom.

Dieser Strom nimmt nun meist nicht die großen Werte an wie in dem oben beschriebenen Fall. Innerhalb der Funkengrenze und bei sehr guter Stromwendung ist er kaum nachweisbar (Fig. 50a, dazu Fig. 23).

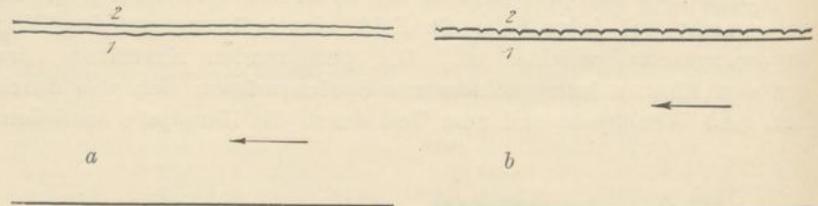


Fig. 50. Klemmenspannung (2) und Strom im äußeren Kreis (1). *a* bei induktionsfreier Belastung. *b* mit vorgeschalteter Drosselspule. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{cr} = 60,8$ Amp., $w_w = 18$. Zwei Bürsten. Funkenfrei.

Man kann durch Vorschalten einer Drosselspule verhindern, daß diese Ströme im äußeren Kreis fließen. Die Schaltung nach dem Schema der Fig. 51 ermöglicht es durch Öffnen des Schalters S_1 und gleichzeitiges Schließen von S_2 die Drosselspule

einzuschalten, ohne den effektiven Strom zu ändern. Der äußere Kreis ist dann für die pulsierenden Ströme gleichsam geöffnet. Man hat dann eine leerlaufende 2K-polige Wechselstrommaschine.

Bei konstanter Erregung, wie es hier der Fall ist, da die relativ kleinen pulsierenden Ströme die Stromverteilung über die Bürste und die kurzgeschlossenen Spulen nur unwesentlich ändern, muß also die Klemmenspannung stark steigen. Daß das der Fall ist, zeigen die folgenden Fig. 50 b, 52—54, 56.

Die Periodenzahl dieser Ströme ist nicht immer $c_k = \frac{K \cdot n}{60}$. Hat man eine ungerade Lamellenzahl, so treten die Spulen der einen Bürste eine halbe Lamellenteilung später in und aus dem Kurzschluß als die der anderen Bürste. Man wird also $c_k = \frac{2 \cdot K \cdot n}{60}$ bekommen.

Bei breiten Bürsten kann aber auch die eigentliche Stromwendung unabhängig von der Zeit des geometrischen Eintritts einer Spule in den Kurzschluß erfolgen, so daß bei gerader Lamellenzahl die doppelte Periodenzahl und bei ungerader Lamellenzahl die einfach der Zahl der Lamellen entsprechende Periodenzahl der Kommutierung erhalten werden kann.

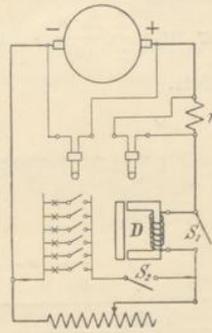


Fig. 51. Schaltung zur Änderung der Belastungsart bei konstantem Strom. r_1 Widerstand zur Aufnahme der Stromkurve. S_1, S_2 Schalter. D Drosselspule.

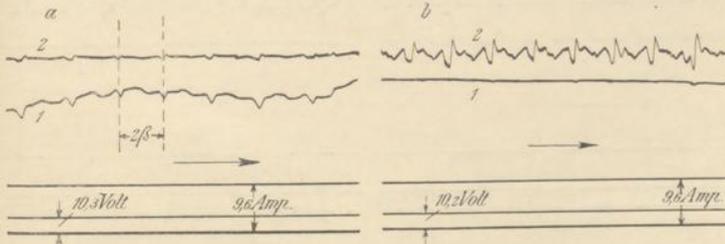


Fig. 52. Strom im äußeren Kreis (1) und Klemmenspannung (2). *a* bei induktionsfreier Belastung. *b* mit vorgeschalteter Drosselspule. Maschine als Generator mit gegen die Drehrichtung verschobenen Bürsten. $J = 60,8$ Amp., $E = 112$ Volt, $n = 855$. Funken.

Nutenanker machen von diesen Verhältnissen keine Ausnahme. Auch bei ihnen treten diese Schwankungen ebenso auf, wie bei glatten Ankern. Das zeigen die drei Fig. 52, 53, 54, die jedesmal den äußeren Strom mit und ohne vorgeschaltete Drosselspule darstellen.

Die Maschine war ein zweipoliger 11 KW-Generator mit 48 Nuten und 48 Lamellen für 110 Volt und 855 Umdrehungen in der Minute.

Im Fall der Fig. 52 lief die Maschine mit gegen die Drehrichtung verstellten Bürsten als Generator. Die Periodenzahl ist hier nur $\frac{1}{2} \frac{K \cdot n}{60}$, da zwei Spulen gleichzeitig aus dem Kurzschluß traten.

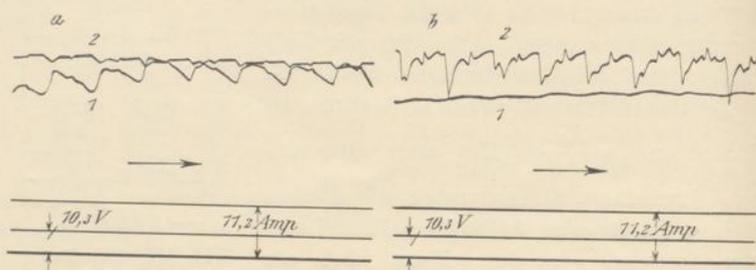


Fig. 53. Strom im äußeren Kreis (1) und Klemmenspannung (2). *a* bei induktionsfreier Belastung. *b* mit vorgeschalteter Drosselspule. Maschine als Motor; Bürsten gegen die Drehrichtung verstellt. $J = 36$ Amp., $E = 105$ Volt, $n = 855$. Funken.

Dieselbe Periodenzahl hat man auch in der Fig. 53, wobei die Maschine als Motor mit gegen die Drehrichtung verstellten Bürsten lief. Die Schwankungen sind hierbei sehr bedeutend, die Funkenbildung war allerdings sehr stark.

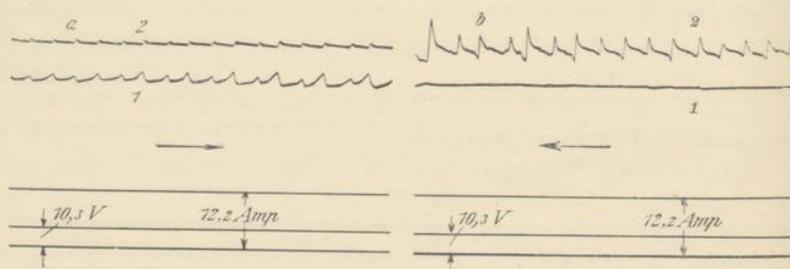


Fig. 54. Strom im äußeren Kreis (1) und Klemmenspannung (2). *a* bei induktionsfreier Belastung. *b* mit vorgeschalteter Drosselspule. Maschine als Motor laufend. Bürsten in der Drehrichtung verschoben. $J = 36$ Amp., $E = 106,5$ Volt, $n = 855$. Funken.

Man kann aber auch unter Umständen die Periodenzahl $\frac{K \cdot n}{60}$ erhalten, wie das Oszillogramm Fig. 54 zeigt. Die Bürsten der als Motor arbeitenden Maschine waren in der Drehrichtung verschoben.

Unsymmetrische Anordnung der Bürsten kann ebenfalls auf die Periodenzahlen Einfluß haben, doch ist es nicht unbedingt nötig, daß sich geringe Unsymmetrien deutlich zeigen.

Welche von den möglichen Periodenzahlen der pulsierenden Ströme und Spannungen sich einstellt, läßt sich von vornherein nicht sagen. Das hängt wesentlich vom Zustand des Kommutators und der Bürsten ab. Es ist sogar möglich, daß die Periodenzahlen sich innerhalb einer Umdrehung ändern.

Im ganzen sind diese pulsierenden Ströme für die Wirkungsweise der Maschine und für die Funkenbildung von geringer Bedeutung. Sie sind innerhalb und an der Funkengrenze zu schwach, um eine wesentliche Änderung der Lamellenstromkurve oder eine Erhöhung der Werte der durchlaufende Potentialkurve bewirken zu können. Wie gering die Änderungen in dieser Hinsicht sind, kann man aus der Fig. 55 sehen. Der äußere Strom und die Klemmenspannung sind in der Fig. 56 dargestellt. Die Funkenbildung war in diesem Fall schon recht stark.

Auch wenn die Versuchsmaschine sehr dicht an der Funkengrenze lief, konnte sie durch Einschalten der Drosselspule nicht

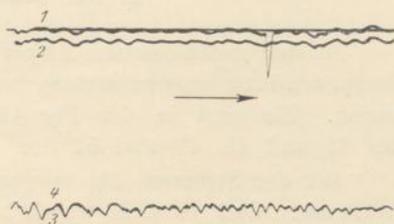


Fig. 55. Lamellenstrom (1) und durchlaufende Potentialkurve (2) für induktionsfreie Belastung. Desgl. (3) und (4) bei vorgeschalteter Drosselspule. *a* für die negative Bürste. *b* für die positive Bürste.

$J = 41$ Amp., $E = 76$ Volt, $n = 1000$. Eine Bürste; $40,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Starke Funken an den ablaufenden Kanten. Kurve 3 fällt mit der Nulllinie zu 1 u. 2 zusammen.

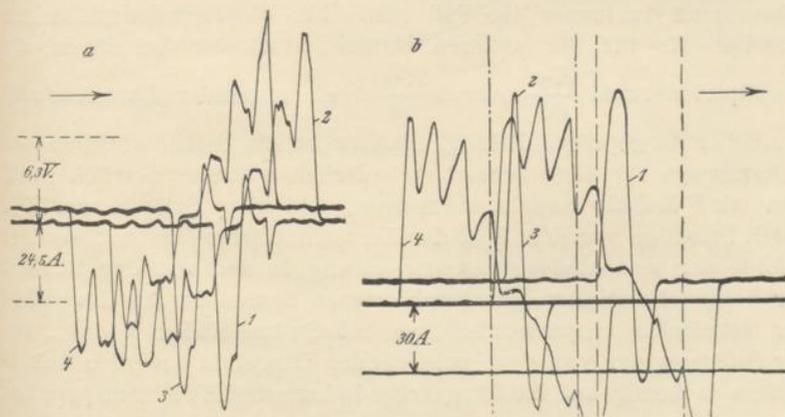


Fig. 56. Strom im äußeren Kreis (1 u. 3) und Klemmenspannung (2 u. 4) zu Fig. 55.

zum Funken gebracht werden. Einige andere Maschinen, die noch darauf hin untersucht wurden, verhielten sich ganz ebenso.

Wichtiger als die eventuelle mögliche Einwirkung auf die Funkengrenze ist die Vergrößerung der Verluste in den Zähnen und in den Polschuhen, die diese pulsierenden Felder im Gefolge haben müssen.

4. Die inneren Ströme.

In der geschlossenen Ankerwicklung fließen bei minder guter Stromwendung innere Ströme von der Periodenzahl der Kommutation. Sie sind in den Fig. 41—43, 47, 48 und in den Fig. 15 bis 18 und 43, 49 und 51 der Arbeit von Arnold zu erkennen.

Mit den Strömen, die in den äußeren Kreis abfließen, sind sie in Phase. Daß es sich wirklich um innere Ströme handelt, kann man daraus erkennen, daß sie auch bei Leerlauf (s. Fig. 48) vorhanden sind, und daß in den Fig. 18 und 49 der Arbeit von Arnold die Spitzen dieser Ströme ihre Richtung auch dann beibehalten, wenn sich der Nutzstrom einer Spule umkehrt. Auch durch Vorschalten einer Drosselspule läßt sich das beweisen, wie die Fig. 57 und 58 zeigen.

Die inneren Ströme entstehen nach Arnold dadurch, daß zu den kurzgeschlossenen Spulen die Ankerwicklung und bei Verwendung von Äquipotentialverbindungen ein Teil der Ankerwicklung parallel geschaltet ist.¹⁾ Sie können nur fließen, wenn die zusätzlichen EMKe in den von den verschiedenen Bürsten kurzgeschlossenen Spulen verschiedene Funktionen der Zeit sind. Wie wir gesehen haben, muß das immer der Fall sein. Für die Periodenzahlen gilt dasselbe wie für die äußeren Ströme, doch ist bei ihnen die Grundperiodenzahl $\frac{K \cdot n}{60}$ oder $2 \frac{K \cdot n}{60}$ (bei ungerader Lamellenzahl)

deutlicher ausgeprägt. Beim Ringanker ist die Selbstinduktion der Ankerzweige für diese schnell veränderlichen Ströme ziemlich groß. Man wird deshalb annehmen müssen, daß diese Ströme zum Teil durch Pulsation von dem Feld der Kurzschlußströme erzeugt werden. Infolge der verschiedenen Stromwendung in den von den Bürsten der beiden Polaritäten kurzgeschlossenen Spulen ist das Längsfeld zur Mittelachse unsymmetrisch, so daß Ströme fließen können, die der Differenz der von dem pulsierenden Längsfeld und den Ankerhälften in bezug auf die Längsachse induzierten EMKe entsprechen.

¹⁾ Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, Bd. I, S. 166 ff.

Bei Nutenankern kann eine derartige Unsymmetrie nicht stattfinden, da die Windungen einer Spule den ganzen Anker umschlingen. Dafür ist die Kommutation unter den verschiedenen Bürsten nicht wie beim Ringanker unabhängig voneinander. Weicht

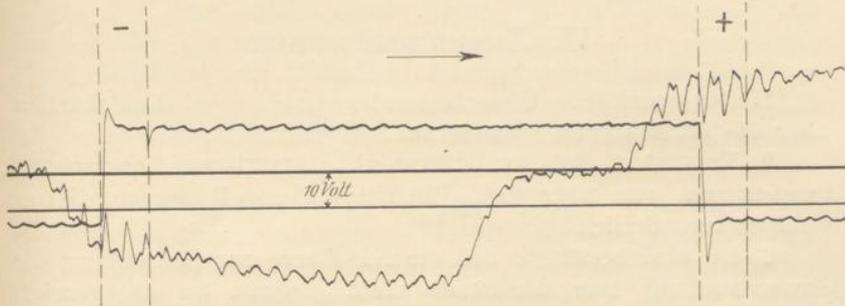


Fig. 57. Feldkurve und Strom einer Ankerspule bei induktionsfreier Belastung. $J = 41$ Amp., $E = 76$ Volt, $n = 1000$. Eine Bürste; $40,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Starke Funken.

also die Stromwendung an der Bürste einer Polarität von der geraden Linie etwa infolge schlechten Zustandes der Berührungsfläche ab, so kann auch die Kommutation an der andern Bürste nicht mehr geradlinig sein. Das kommutierende Feld müßte dann eine periodische Funktion der Zeit werden.

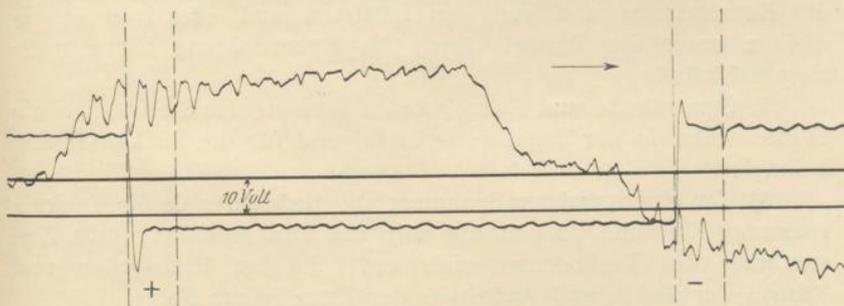


Fig. 58. Feldkurve und Strom einer Ankerspule bei vorgeschalteter Drosselspule. Wie bei Fig. 55—57.

Beim Nutenanker hebt sich aber das Feld der inneren Ströme für eine Nute jedesmal auf, weil sie in übereinanderliegenden Stäben einer Nute entgegengesetzte Richtung haben. Die Selbstinduktion ist für sie also sehr klein, weil nur die Streuinduktion wirksam ist.

Die inneren Ströme sind also für die Möglichkeit einer funkenfreien Stromwendung von der größten Bedeutung, ohne sie wäre die geschlossene Wicklung ebenso schlecht wie die offenen Ankerwicklungen.

IX. Zusammenfassung.

1. Der spezifische Übergangswiderstand ist bei Kohlebürsten über die Bürstenbreite veränderlich.
2. Er ändert sich am stärksten bei mittleren Kommutator-temperaturen von über 45° . Unterhalb dieser Temperatur ist er weniger veränderlich.
3. Es wird bestätigt, daß die ΔP -Kurve zur Beurteilung der Stromverteilung über die Bürste nicht geeignet ist und gezeigt, daß sie infolge der Schwierigkeiten bei der Aufnahme auch nicht zur Beurteilung des Spannungsverlaufs zwischen Bürste und Kommutator ausreicht.
4. Eine genaue Kenntnis des Verlaufs der Stromwendung kann nur durch Aufnahme der Lamellenstromkurve und der durchlaufenden Potentialkurve erworben werden.
5. Das Auftreten von Funken wird allein von dem Vorhandensein einer entsprechenden Spannung bedingt.
6. Die Funkenspannung wird nur von dem Material der Kohlebürste bestimmt. Sie ist unabhängig von der Temperatur des Kommutators und von den mittleren und effektiven Stromdichten unter der Bürste. Auch die Stromrichtung hat nur geringen Einfluß.
7. Stromdichte und Energiedichte sind an den Stellen, wo die Bürste funkt, in der Regel sehr klein, und für die Funkenbildung belanglos.
- 8) Von einer gewissen Spannung ab, die kleiner als die Funkenspannung ist, und gleichzeitig mit der Funkenbildung tritt Zerstäubung des Kathodenmaterials auf. Sie hat Mattwerden und Färben der Kohle und Anfressen der Lamelle zur Folge.
9. Die wirksame Bürstenbreite wird infolgedessen kleiner und die Zeit der Stromwendung kürzer.
10. Für die Funkengrenze ist der Verlauf der Potentialkurve (Feldkurve) maßgebend. Bei Unterkommutation hat auch die Größe und Form des Feldes der Kurzschlußströme erheblichen Einfluß.
11. Die Kurzschlußströme erzeugen ein pulsierendes Längsfeld, das bei schlechter Kommutierung bedeutende Werte annehmen kann. Infolge der Bewegung des Ankers in dem pulsierenden

Längsfeld werden pulsierende EMKe, die sich über die vom Erregerfeld erzeugte konstante EMK lagern, erzeugt. Der entsprechende im Anker induzierte Strom schließt sich über den äußeren Kreis. Dieser Strom ist aber von untergeordneter Bedeutung für die Maschine.

12. Im Anker fließen innere Ströme von der Periodenzahl der Kommutation, die zu den Verlusten durch Stromwendung beitragen, jedoch die Bürste von zusätzlichen Strömen entlasten. Sie entstehen dadurch, daß den kurzgeschlossenen Spulen die Ankerwicklung parallel geschaltet ist, und daß die Bürsten verschiedener Polarität verschieden kommutieren.

13. In Nutenankern ist eine geradlinige Kommutation mit konstanter Übergangsspannung, praktisch überhaupt nicht möglich.

14. Der Verlust durch Stromübergang ist unter einer negativen Bürste größer als unter einer positiven Bürste.

15. Der kleinste Übergangsverlust tritt bei leicht beschleunigter Stromwendung auf.

16. Der Übergangsverlust nimmt bei Unterkommutation mit schlechter werdender Stromwendung schneller zu als bei Überkommutation.

17. Bei guter Stromwendung nimmt der Übergangsverlust ungefähr proportional mit der mittleren Stromdichte $s_u = \frac{J}{F_b}$ zu. Er ändert sich aber bei schlechter werdender Stromwendung, und zwar langsamer bei hoher als bei kleiner mittlerer Stromdichte.

Auf Grund der vorstehenden Ausführungen erkennt man, daß die Aussichten einer mathematischen Theorie, die die Beschreibung aller bei der Stromwendung auftretenden Erscheinungen in wenigen Differentialgleichungen zusammenfaßt, recht schlecht sind. Es treten zu viele sich wechselseitig beeinflussende Faktoren in die Rechnung, deren Abhängigkeit von Ort und Zeit sich mathematisch nicht formulieren läßt. Auch können Zufälligkeiten im mechanischen Aufbau hier sehr starken Einfluß gewinnen. Man wird für die Vorausbestimmung von Abmessungen, und um überhaupt eine Übersicht über die Verhältnisse zu erlangen, stark vereinfachende Voraussetzungen machen müssen, aber man wird auch nicht vergessen dürfen, wie große Abweichungen von den so erlangten Resultaten dann auftreten können. Da es wesentlich darauf ankommt, welche EMK von dem Erregerfeld oder vom Feld der Wendepole in den kurzgeschlossenen Spulen induziert werden, muß man besonderen Wert auf die Vorausberechnung der Feldkurven legen, wofür ja genügend Methoden zur Verfügung stehen.

Weiter muß man beachten, daß eine große Breite der Bürste nur so lange günstigen Einfluß haben kann, als die Feldkurve genügend flach verläuft. Ist das nicht der Fall, so stellt sich die eigentliche Stromwendung doch so ein, als sei nur eine schmale Bürste vorhanden, und der übrige Teil der Bürste trägt nur zur Vergrößerung der Verluste und zur Beschädigung des Kommutators bei. Eine im Verhältnis zur Polteilung große Lamellenzahl, bei der auch dann von einer relativ schmalen Bürste viele Lamellen bedeckt werden, ist ein weit besseres Mittel, die Kommutation zu verbessern, bloß kann es nicht nachträglich angewandt werden, und verteuert den Kommutator.

g
B
in
de
W
G
D
P
b
d
K