

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

VI. Das Verhalten der Kohlebürsten bei Funkenbildung

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

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 Funkengrenze 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 Überkommutation 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

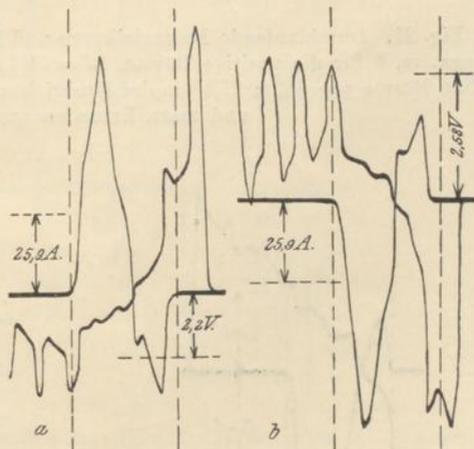


Fig. 20. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

$J = 54,8$ 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.

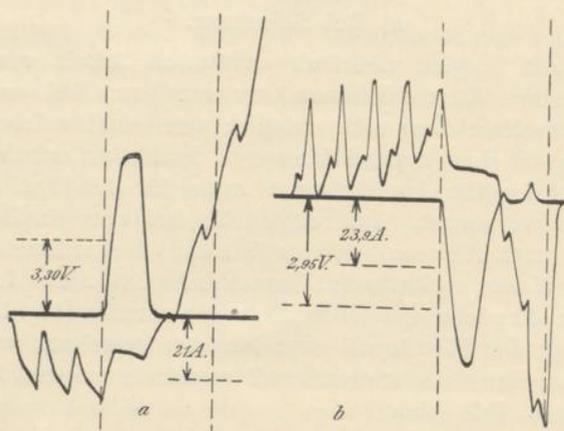


Fig. 21. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J = 54,6$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Eine Bürste pro Stift; $27,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Bürsten gefärbt und matt, Lamellen angegriffen.

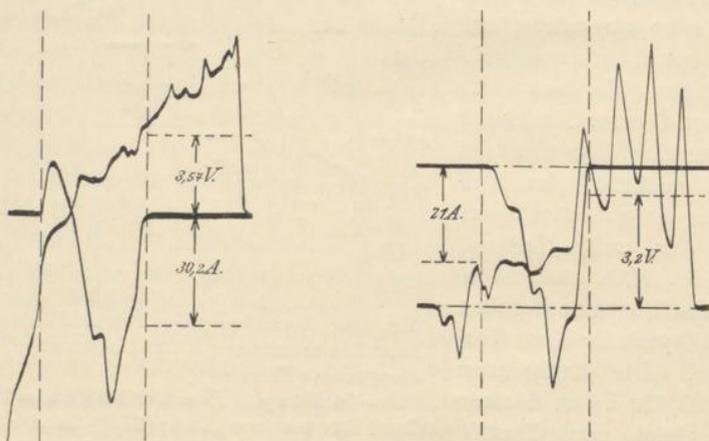


Fig. 22. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve für die negative Bürste. $J = 54,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$. Eine Bürste pro Stift; 14° gegen die Drehrichtung verstellt. Funken; Bürstenkanten u. ablaufende Kante der Lamellen matt.

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 angegriffen.

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.

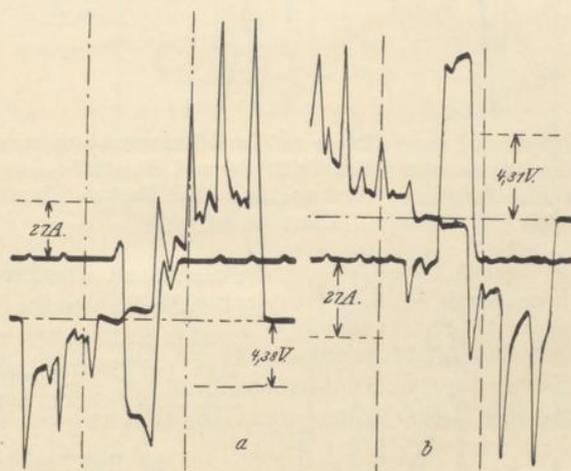


Fig. 24. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenkurve. *a* für die negative, *b* für die positive Bürste.

$J = 60,8$ 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

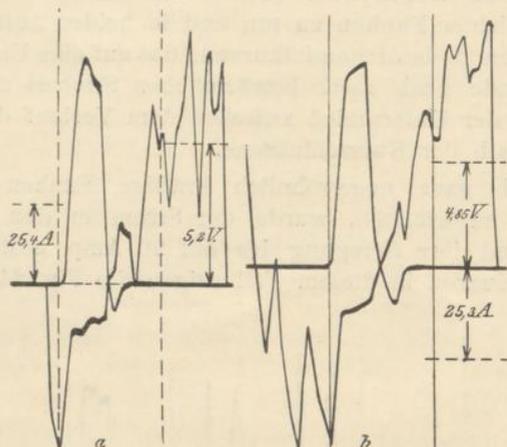


Fig. 25. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve für die negative Bürste. *a* eine Bürste auf jedem Stift. *b* zwei Bürsten. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ew} = 145$ Amp., $w_n = 36$. Funken. Bürsten schwach gefärbt. Lamellen schwarz.

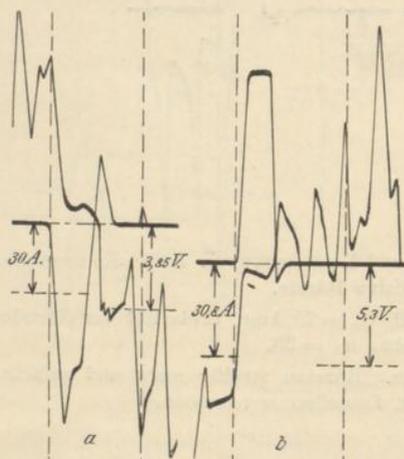


Fig. 26. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ew} = 184$ Amp., $w_n = 36$. Eine Bürste. Starke Funken; Bürsten schwach gefärbt und matt. Lamellen schwarz.

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,

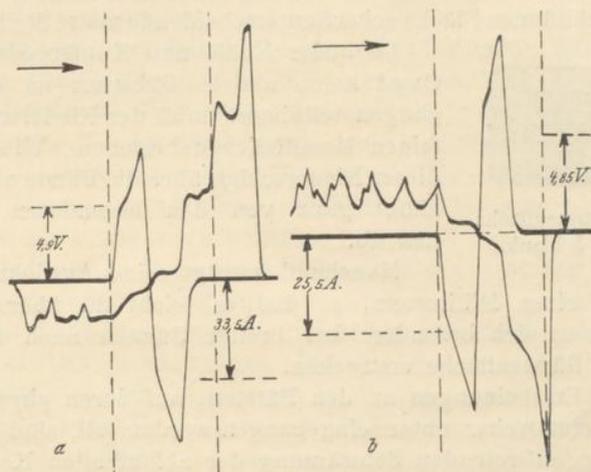


Fig. 27. Durchlaufende Potentialkurve und Lamellenstromkurve. *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. Leerlauf $J=0$, $E=100$ Volt, $n=1000$, Zwei Bürsten. $27,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Funken. Bürsten streifig von rot bis matt. Die auflaufenden Kanten bleiben blank. Lamellen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

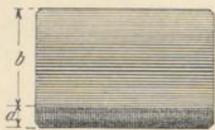


Fig. 28. Bürstenfläche.
a matt. b blank.

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 Funke 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.

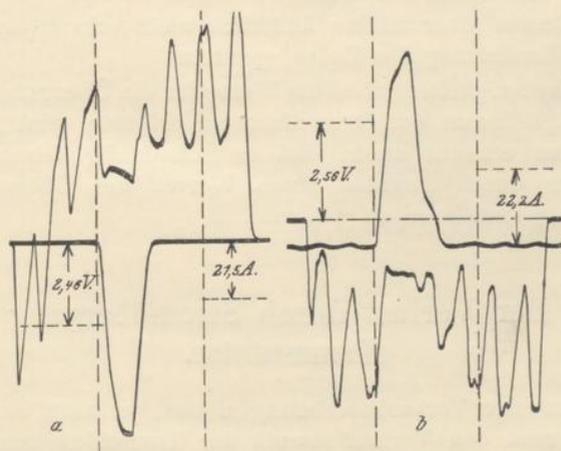


Fig. 29. Lamellenstromkurve und durchlaufende Potentialkurve. *a* für die negative, *b* für die positive Bürste. $J = 60,8$ Amp., $E = 100$ Volt, $n = 1000$, $i_{ew} = 55$ Amp., $w_w = 36$. Eine Bürste. Funkenfrei.

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 Überkommutation 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.