

# **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**

VII. Der Verlust durch Stromübergang am Kommutator

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

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 schreibt<sup>1)</sup>

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

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

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

<sup>1)</sup> Arnold, „Die Gleichstrommaschine“, 2. Aufl., Bd. I, S. 668.

Aus der Kurve, die den Zusammenhang zwischen  $s_{u\text{eff}}$  und  $\Delta P$  für die benutzte Kohlensorte gibt, entnimmt man dann das entsprechende  $\Delta P$ . 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 allgemein<sup>1)</sup>

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

worin  $b_1$  die Bürstenbreite,  $\beta$  die Lamellenteilung,  $v_k$  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

<sup>1)</sup> 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

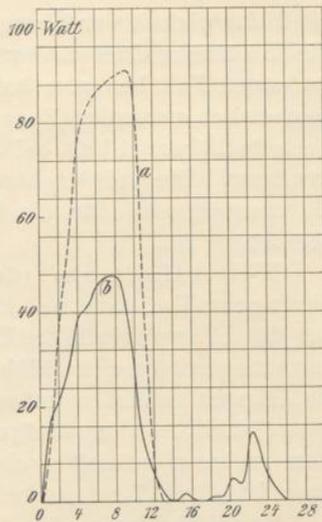


Fig. 30. Durchlaufende Verlustkurven zu Fig. 21.  
a für die negative Bürste. ]  
b für die positive Bürste.

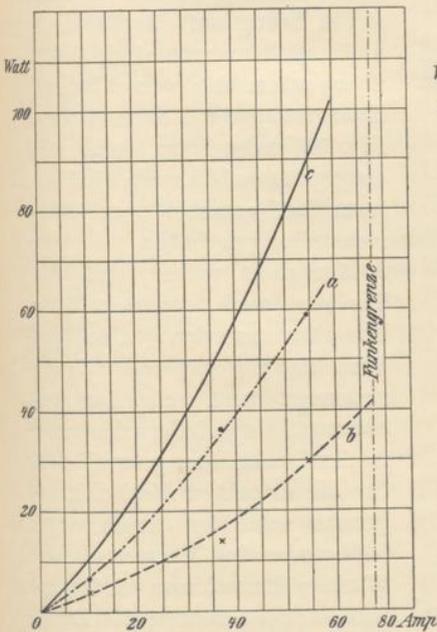


Fig. 31. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von der Belastung. a für die negative Bürste. b für die positive Bürste. c Gesamtverlust. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone; ohne Wendepole; je zwei Bürsten auf den Stiften.

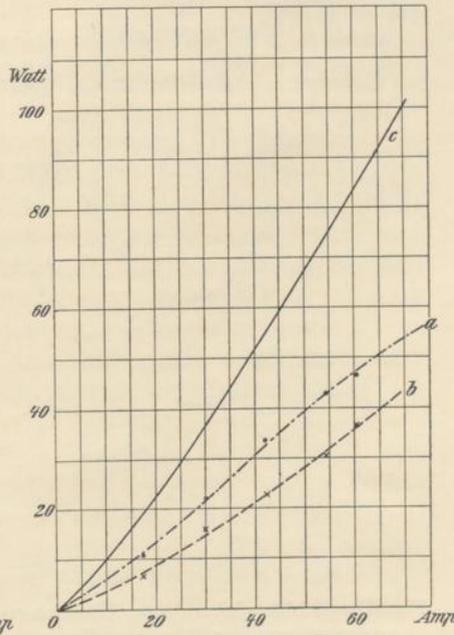


Fig. 32. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von der Belastung. Wendepole in Serie mit dem Anker  $w_n = 36$ . Zwei Bürsten. a für die negative Bürste. b für die positive Bürste. c Gesamtverlust.

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-

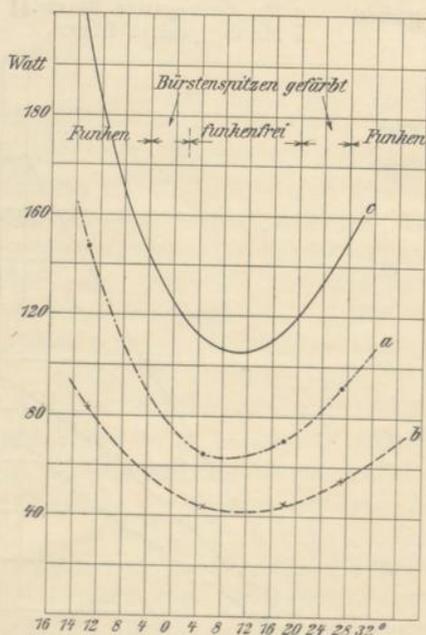


Fig. 33. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von der Bürstenstellung.  $J=54,8$  Amp.,  $E=100$  Volt,  $n=1000$ . Eine Bürste.  $a$  für die negative Bürste.  $b$  für die positive Bürste.  $c$  Gesamtverlust.

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.

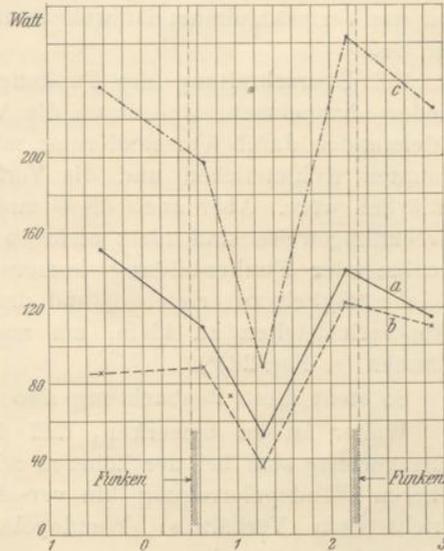


Fig. 34. Abhängigkeit des Übergangsverlustes von dem Verhältnis der Amperewindungen der Wendepole zu den Ankeramperewindungen  $\frac{2 AW_w}{N \cdot i_a}$ .

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

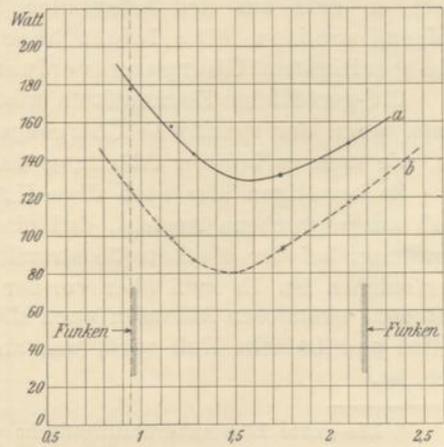


Fig. 35. Wie Fig. 34, aber nur eine Bürste auf jedem Stift.

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)<sup>1)</sup>.

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.

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