



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299088



11-352032

Die experimentelle Untersuchung der Kommutationsvorgänge in Gleichstrommaschinen.

Von

Karl Czeija,

Assistent am Elektrotechnischen Institut der Grossherzogl. Badischen Technischen Hochschule zu Karlsruhe.

Mit 31 Abbildungen.

I. Einleitung und kurze Theorie.

Die experimentellen Untersuchungen der vorliegenden Arbeit stützen sich auf die von Prof. E. Arnold in seinem Werke „Die Gleichstrommaschine“, Bd. 1, gegebene Kommutationstheorie und haben zum Zwecke:

1. den Verlauf des Stromes in einer Armaturspule während der Kurzschlussperiode experimentell zu untersuchen;

2. die Abhängigkeit des Verlaufes des Kurzschlussstromes vom Felde in der Kommutierungszone und

3. die Anwendbarkeit der Methode der Bürstenpotentialmessung für die Beurteilung der Kommutationsverhältnisse einer Maschine festzustellen.

Während des Uebertrittes einer Armaturspule von einem Stromzweig in den nächstfolgenden sind die mit den Enden einer Spule verbundenen Kollektorlamellen durch die Bürste kurzgeschlossen.

Die in der kurzgeschlossenen Spule während der Dauer einer Kurzschlussperiode auftretende E.M.K. e kann nach dem Kirchhoffschen Gesetze als algebraische Summe der E.M.Ke. erhalten werden, welche

1. durch das von den Erregerampèrewindungen herrührende Feld in der Kurzschlusszone,

2. durch den Kraftfluss der quermagnetisierenden Ampèrewindungen,

3. durch den Kraftfluss, der nur mit der kurzgeschlossenen und den benachbart im Kurzschluss befindlichen Spulen verkettet ist, induziert werden, und

4. durch den Spannungsabfall, welchen der Kurzschlussstrom infolge des Ohmschen Widerstandes der Spule erleidet.

Während der Dauer des Kurzschlusses T sind nun diese E.M.Ke. mehr oder weniger veränderlich und zwar ändert sich die unter 1. genannte E.M.K. nach Massgabe des Verlaufes der Feldkurve in der Kurzschlusszone. Die vom quermagnetisierenden Kraftfluss induzierte E.M.K. e_q hängt von der magnetischen Leitfähigkeit λ_q des Querkraftflusses ab und wird je nach der Form der Polschuhe, der Bürstenstellung und der Sättigung der Polspitzen und Zähne, mit der Zeit t variieren. Befinden sich die Bürsten in der neutralen Zone und ist das Verhältnis $\alpha_i = \frac{b_i}{\tau} = \frac{\text{ideeller Polbogen}}{\text{Polteilung}}$ klein, dann bleibt e_q annähernd konstant; es steigt, wenn die Bürsten gegen die Polspitzen verschoben werden. Für ein gegebenes λ_q ist die durch den Querkraftfluss induzierte E.M.K. gleich

$$2 e_q = 2 A S \cdot \frac{N}{K} \cdot v \cdot l_i \cdot \lambda_q \cdot 10^{-6} \text{ Volt}^1).$$

Die E.M.K., welche durch die Selbst- und gegenseitige Induktion induziert wird, ist

$$2 e_m = 2 i_a \cdot \frac{L + \Sigma M}{T}^2).$$

Dieselbe variiert während T nur wenig; sie nimmt mit der Dauer des Kurzschlusses zu, wenn die Maschine als Generator läuft, und nimmt mit derselben ab, wenn die Maschine als Motor läuft.

Der Ohmsche Spannungsabfall hängt nur vom Momentanwerte des Kurzschlussstromes und dem Widerstande R der Spule und der Verbindungen zu den Lamellen ab.

Ist bei einem bestimmten Strome i_a pro Armaturstromzweig ein Feld in der Kommutierungszone vorhanden, das in der Spule die E.M.K.

$$e = e_k = 2 \cdot \left(e_m + e_q + i_a R \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right] \right)^3)$$

induziert, dann werden die während des Kurzschlusses in der Armatur-

¹⁾ Siehe Arnold, Bd. I, S. 258.

²⁾ Ibid. S. 351.

³⁾ Siehe Arnold, Bd. I, S. 383.

darstellen. Zu Beginn des Kurzschlusses $t = 0$ ist $F_u' = 0$ und zu Ende desselben $t = T$ ist $F_u' = F_u$, also

$$F_u' = \frac{t}{T} \cdot F_u.$$

Setzen wir $\frac{t}{T} = x$, also $dt = T \cdot dx$, so wird

$$dF_u' = \frac{F_u}{T} \cdot dt = F_u \cdot dx$$

und da

$$d(i_a - i) = s_{ux} \cdot dF_u',$$

so wird

$$i_a - i = F_u \cdot \int_{x=0}^{x=1} s_{ux} \cdot dx.$$

Entspricht nun der mittleren örtlichen Stromdichte s_{ux} der spezifische Widerstand R_k , so wird

$$P_x = s_{ux} \cdot R_k$$

die mittlere örtliche Potentialdifferenz zwischen Bürste und Kollektor darstellen.

Der spezifische Uebergangswiderstand kann in Abhängigkeit von der zeitlich variierenden Stromdichte durch die Beziehung ¹⁾

$$R_k = \frac{e_u}{s_{ux}} + R_w$$

ausgedrückt werden, wobei für ein bestimmtes Bürstenmaterial, e_u einer konstanten Potentialdifferenz zwischen Bürste und Kollektor und R_w einer von der effektiven Stromdichte

$$s_{u \text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T s_{ux}^2 dt}$$

abhängigen Konstanten entspricht. Es ist also

$$P_x = s_{ux} \cdot R_k = e_u + R_w \cdot s_{ux}$$

und

$$s_{ux} = \frac{P_x - e_u}{R_w}.$$

¹⁾ Dr.-Ing. M. Kahn, Uebergangswiderstand von Kohlenbürsten. (Diese Sammlung Bd. III, S. 483.)

Dies in die Formel für $i_a - i$ eingesetzt, ergibt

$$i_a - i = F_u \cdot \int_{x=0}^{x=1} \frac{(P_x - e_u)}{R_w} dx$$

oder

$$i = i_a - \frac{F_u}{R_w} \cdot \int_{x=0}^{x=1} (P_x - e_u) dx.$$

Die Potentialdifferenzen P_x können wir nun dadurch erhalten, indem wir die Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kollektor entlang der Bürstenbreite messen. Diese Potentialdifferenzen in Abhängigkeit von der Bürstenbreite aufgetragen, ergeben die Bürstenpotentialkurve oder das Kommutierungsdiagramm.

Wie aus der Formel für i hervorgeht, ist die Bürstenpotentialkurve die Integralkurve zur Kurzschlussstromkurve $i = f(x)$, oder umgekehrt, die Kurzschlussstromkurve ist die Differentialkurve der Bürstenpotentialkurve¹⁾.

Ganz exakt ist jedoch diese Ableitung nicht. Die gemessenen Mittelwerte von P_x bzw. s_{ux} werden insbesondere an den Bürstenkanten von dem, einem bestimmten Verlauf des Kurzschlussstromes entsprechenden Momentanwert abweichen.

Um die Bestimmung des Verlaufes der Kurzschlussstromkurven aus der experimentell gefundenen Potentialkurve $P_x = f(x)$ (s. Fig. 1) durchzuführen, müssen wir zunächst die konstante Potentialdifferenz e_u kennen. Ist diese für das betreffende Bürstenmaterial festgelegt, so hat man, um die Ordinatenabschnitte $P_x - e_u$ zu erhalten, eine Parallelverschiebung der x -Achse um e_u vorzunehmen (Fig. 2). Der Mittelwert der Kurve $P_x - e_u$ ergibt dann $R_w \cdot s_u$, d. i. die Potentialdifferenz, die der in jedem Momente konstanten Stromdichte

$$s_u = \frac{2i_a}{F_u}$$

entspricht. Es ist somit

$$R_w = \frac{(R_w s_u)}{s_u} \text{ Ohm.}$$

R_w stellt eine von der effektiven Stromdichte $s_{u \text{ eff}}$ abhängende Konstante dar. $s_{u \text{ eff}}$ erhalten wir aus den mittleren örtlichen Stromdichten bzw. aus der Potentialkurve folgendermassen.

¹⁾ Siehe Arnold, Bd. I, S. 370.

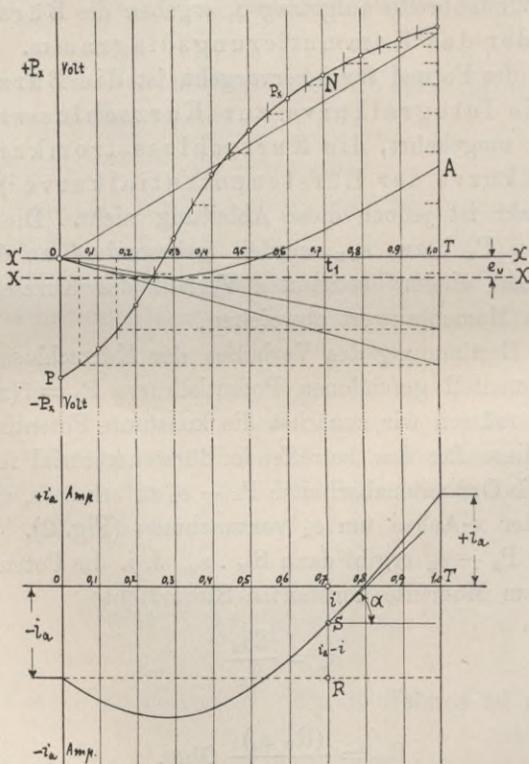
Es ist

$$s_{u \text{ eff}} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T s_{u x}^2 \cdot dt} = \frac{1}{R_w} \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (P_x - e_u)^2 dt}$$

und wenn wir das Verhältnis

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (P_x - e_u)^2 dt}}{R_w \cdot s_u} = \frac{s_{u \text{ eff}} \cdot R_w}{s_u \cdot R_w} = f_u$$

Fig. 2.



als den Formfaktor der Stromdichteverteilung unter der Bürste bezeichnen, so ist

$$s_{u \text{ eff}} = f_u \cdot s_u^1).$$

1) Siehe Arnold, Bd. I, S. 367.

Um aus der Bürstenpotentialkurve die Kurzschlussstromkurve graphisch berechnen zu können, sei hier folgende Konstruktion angeführt¹⁾. Man zerlegt die Bürstenpotentialkurve (Fig. 2) in eine Anzahl vertikaler Schichten, indem man die Abscissenachse, welche der Dauer des Kurzschlusses bzw. der Bürstenbreite entspricht, in eine bestimmte Anzahl gleicher Teile teilt. Die Mittelpunkte der so auf der Bürstenpotentialkurve entstandenen Teilstrecken werden auf die Ordinate für $t = T$ ($x = 1$) projiziert. Zieht man nach diesen Projektionen Strahlen von 0 aus, so erhält man für jede Teilschicht die Richtung der Integralkurve, bzw. der Kurzschlussstromkurve. Zeichnet man von 0 ausgehend ein Polygon, dessen Seiten zwischen je zwei Ordinaten parallel den entsprechenden Strahlen sind, so gibt dieses den Verlauf der Kurzschlussstromkurve an. Die Konstruktion wird offenbar um so genauer, je grösser die Zahl der Vertikalschichten gewählt wurde. Die erhaltenen Werte der Integralkurve können nun leicht auf den gewählten Ampèremassstab $AT = 2i_a$ reduziert werden. Die Fläche, welche der Linienzug $OPNt_1O$ mit der Achse einschliesst, ist gleich

$$\int_{x=0}^{x=x_1} (P_x - e_u) dx = \text{prop. } (i_a - i) = \overline{RS}.$$

Die Rechtecksfläche $\overline{OT} \cdot \overline{AT}$ ist gleich der Fläche, welche die Bürstenpotentialkurve mit der Abscissenachse einschliesst, und im Ordinatenmassstab ergibt \overline{AT} die mittlere Ordinate $R_w \cdot s_u$ Volt.

II. Beschreibung der Versuchsanordnung zur experimentellen Aufnahme der Kurzschlussstrom-, Feld- und Bürstenpotentialkurven.

Die ersten Untersuchungen über die experimentelle Bestimmung des Verlaufes des Kurzschlussstromes haben Everett und Peake²⁾ in der Weise durchgeführt, dass sie nach Fig. 3 an Stelle der einen normalen Bürste zwei um annähernd Kollektorlamellenbreite gegeneinander versetzte und durch Vulkanfiber isolierte Kupferbleche k_1, k_1 auf den Kollektor setzten. Die beiden Kupferbleche der Versuchs-

¹⁾ Diese Methode der graphischen Integration wurde von Prof. E. Brauer in seinem Buche „Turbinentheorie“ angegeben.

²⁾ Experiments on commutation in dynamos and motors. Electrician Bd. XL, S. 861.

bürste waren durch einen induktionsfreien Widerstand $r = 0,007$ Ohm miteinander verbunden. Mit Hilfe eines rotierenden Kontaktapparates S, der auf der Maschinenwelle angeordnet war, konnte nun der Momentanwert des Spannungsabfalles, welchen der zwischen den beiden Kupferblechen fließende Strom erzeugt, in jedem Augenblicke gemessen werden.

Diese Versuchsanordnung entspricht jedoch nicht den normalen Verhältnissen, bei welchen die Bürste entlang ihrer ganzen Fläche aufliegt. Dadurch wird infolge wesentlicher Aenderung des für die Kommutation so wichtigen Uebergangswiderstandes die Stromverteilung unter der Bürste verändert und es können demnach die erhaltenen Versuchsergebnisse nur für ganz spezielle Fälle gelten

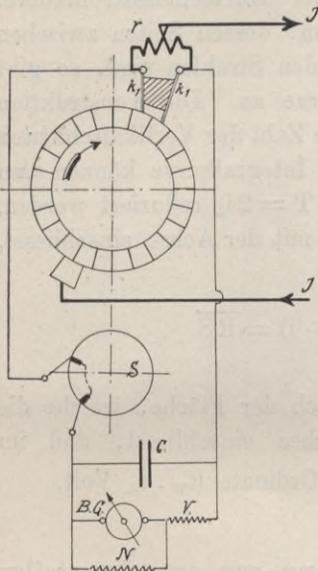
Bei der vom Verfasser gewählten Versuchsanordnung wurde der näher liegende Weg eingeschlagen, indem der Kurzschlussstrom nicht in der Bürste, sondern in der Spule direkt gemessen wurde.

Es wurde zu diesem Zwecke (Fig. 4) eine Armaturspule A aufgeschnitten und die Schnittenden durch Vermittlung von zwei Schleifringen S_1 durch einen sehr kleinen induktionsfreien Widerstand r verbunden. Der Widerstand r bestand aus zwei hintereinander geschalteten Normalwiderständen der physikalisch-technischen Reichsanstalt von je $0,001$ Ohm. Der

Versuchsanordnung von Everett und Peake.

Spannungsabfall, welcher vom Momentanwerte des in r fließenden Stromes erzeugt wurde, wurde mittels der rotierenden Kontakt-scheibe S, die auf der Maschinenwelle sass, beobachtet. Die Scheibe S bestand aus einer Stabilitätscheibe von $21,0$ cm Durchmesser. Am Umfange derselben war an einer Stelle ein Metallsegment (Fig. 5) von $7,5$ cm Länge eingelegt. Die Hilfsbürsten sassen auf zwei Ebonitstiften, die in einem am Maschinenlager drehbar angebrachten Arm befestigt waren. Durch Verstellen dieses Armes mit den Hilfsbürsten konnte der Zeitpunkt des Kontaktes für jede beliebige Lage der Armaturspule während einer Umdrehung eingestellt werden. Die Einstellung erfolgte durch einen mit dem Arm verbundenen Zeiger.

Fig. 3.

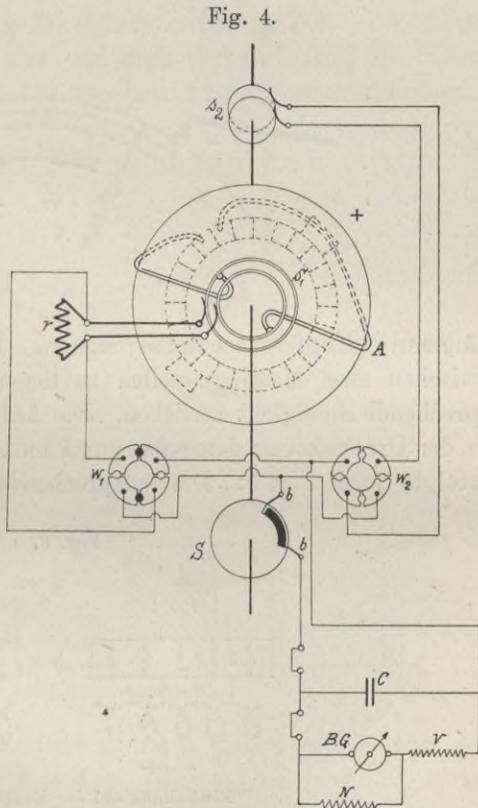


Die Stellung desselben konnte an einer in 720 Teile geteilten Teilscheibe abgelesen werden. Der Teilkreisdurchmesser derselben betrug 22,2 cm.

Dieselbe Kontaktvorrichtung wurde auch zur Aufnahme der Feldkurven benutzt. Von zwei benachbarten Kollektorlamellen waren zwei Abzweigungen zu den Schleifringen s_2 geführt. Die auf denselben schleichenden Bürsten waren mit einem Stromwender w_2 in Verbindung. Je nachdem man nun den Stromwender w_2 oder w_1 stöpselte, konnte man die Feldkurve oder Kurzschlussstromkurve aufnehmen.

Der Kondensator C war ein Glimmerkondensator von Siemens & Halske mit Kapazitätsstufen zwischen 0,001 und 0,5 MF. V und N sind Vorschalt- bzw. Nebenschlusswiderstände für das Galvanometer. Dieses war ein stark gedämpftes ballistisches Galvanometer von Siemens & Halske mit einem inneren Widerstande von 10000 Ohm. Die Schleifringe S_1 und die Kupfergazebürsten, die in den Stromkreis der aufgeschnittenen Spule geschaltet waren, waren sehr reichlich dimensioniert (Fläche einer Bürste $2,1 \text{ cm}^2$), und der Auflagerdruck sehr gross bemessen, so dass man den Uebergangswiderstand als konstant ansehen konnte.

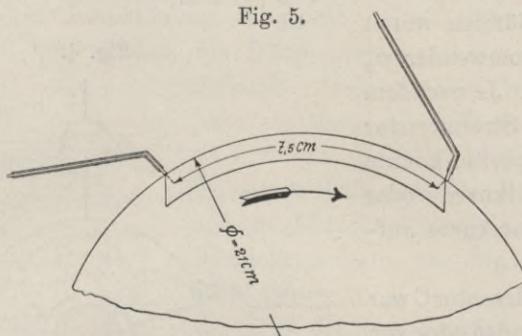
Die Normalwiderstände waren vor den Versuchen in Bezug auf ihre Selbstinduktion geprüft worden, und es konnte weder nach der Methode von Maxwell, noch durch die Messung des Spannungsabfalles, des Stromes und des verbrauchten Effektes beim Hindurch-



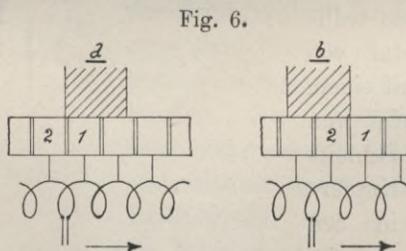
Versuchsanordnung zur Aufnahme der Kurzschlussstrom- und Feldkurven.
 w_1 gestöpselt: Aufnahme der Kurzschlussstromkurven.
 w_2 gestöpselt: Aufnahme der Feldkurven.

schicken von Wechselströmen von 50 und 100 Perioden eine Wirkung der Selbstinduktion oder Kapazität konstatiert werden.

Eine besondere Fürsorge musste den Hilfsbürsten auf der Kontaktscheibe zugewandt werden. Erst nach vielem Herumprobieren hat sich gezeigt, dass sich am günstigsten hierzu schmale, ganz flach ge-



hämmerte Kupfergazebürsten eignen. Diese Kupfergazebürste kam zwischen zwei Messinglamellen zu liegen, welche derselben die entsprechende Steifigkeit verliehen. Die Auflagebreite dieser Bürsten war in der Drehrichtung gemessen nur 1 mm. Die Einstellung der Bürsten erfolgte nach Fig. 5. Die entsprechenden Zeitpunkte für den Beginn



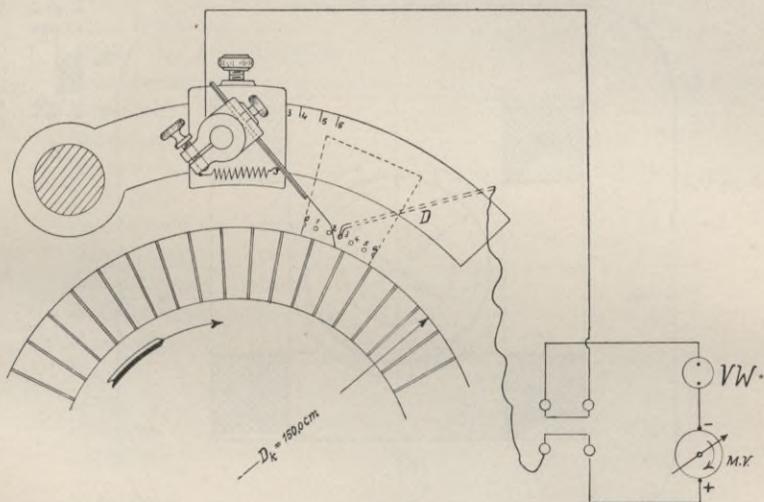
Einstellung auf der Kontaktscheibe.
a) $t = 0$, $(x = 0)$. b) $t = T$, $(x = 1)$.

und das Ende der Kommutation konnten in folgender Weise sehr einfach ermittelt werden. In Fig. 6 a und b seien 1 und 2 die Kollektorlamellen, die mit den Enden der aufgeschnittenen Armaturenpule verbunden waren. Der Kollektor wurde erst in die Lage gebracht, in welcher die auflaufende Bürstenkante mit der auflaufenden Kante der Lamelle 2 (Fig. 6 a) zusammenfiel. Nun wurden die richtig eingestellten Hilfsbürsten auf der Kontaktscheibe so lange verschoben, bis sie das Kontaktsegment an der auf- bzw. ablaufenden Kante berührten.

Die zugehörige Stellung des Zeigers auf der Teilscheibe entsprach dann für die betreffende Bürstenstellung der Maschine, dem Beginn der Kommutierung $t = 0$, ($x = 0$). Ganz analog (Fig. 6 b) wurde auch $t = T$, ($x = 1$) ermittelt.

Die erhaltenen Ablenkungen des Galvanometers entsprachen der Potentialdifferenz, mit welcher der Kondensator im Momente des Kontaktes geladen wurde. Um diese Potentialdifferenz bei einer bestimmten Empfindlichkeit und Dämpfung des Galvanometers in Volt zu erhalten, wurde die Aichung jedesmal vor und nach der Aufnahme der Kommutierungs- bzw. Feldkurve für die betreffende Tourenzahl durch-

Fig. 7.



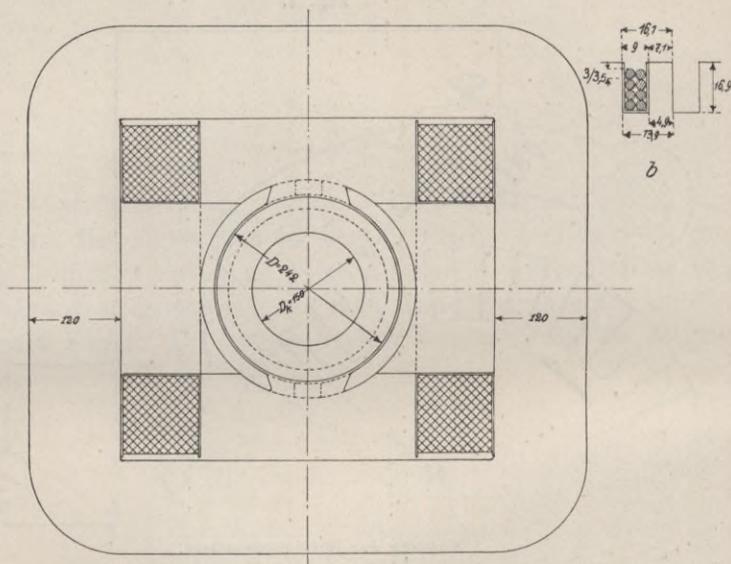
Messung der Bürstenpotentiale.

geführt. An Stelle der Schleifringe s_2 bzw. Enden von r , also den nach der Zeit veränderlichen E.M.K.en., wurde eine genau messbare Gleichstromspannung in den Messstromkreis eingeschaltet, und der einer bestimmten Spannung entsprechende Ausschlag, in Abhängigkeit von ersterer beobachtet, ergab die Aichkurve. Die bei den verschiedenen Geschwindigkeiten und Kapazitäten, bei bestimmter Empfindlichkeit des Galvanometers erhaltenen Aichkurven, verliefen innerhalb des für die Messung benutzten Skalenbereiches geradlinig.

Die Messung der Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kollektor innerhalb der auf- und ablaufenden Bürstenkante erfolgte nach der Anordnung Fig. 7. Auf den Bürstenstift wurde ein Metallsegment befestigt, welches entsprechend der Kollektorkrümmung

abgedreht war. Beliebig einstellbar auf diesem war ein Schieber, welcher auf einem isolierenden Stifte die Hilfsbürste trug. Die Kollektorbürste zwischen den beiden Kanten und ca. 1,5 bis 2,0 mm von der Auflagefläche entfernt, wurde mit einer Teilung versehen und die Punkte durch kleine Anbohrungen markiert. Mit Hilfe eines dünnen, unter die Bürste gelegten Papierstreifens, welcher die gleiche Teilung wie die Bürste besass, konnten die den einzelnen Teilpunkten entsprechenden Stellungen der Hilfsbürste auf dem Metallsegment eingestellt und markiert werden. Die Schaltungsanordnung für diesen

Fig. 8.



Hauptdimensionen der Versuchsmaschine. b Nutenform.

Versuch ist aus Fig. 7 ersichtlich. Der Kontakt mit der Bürste wurde durch ein zugespitztes Drahtstück D, welches an die einzelnen Punkte der Hauptbürste angelegt wurde, hergestellt. Zur Messung der Potentialdifferenzen diente ein Präzisionsmillivoltmeter von Siemens & Halske. Als positiv wurde für alle Versuche das Potential angesehen, welches bei der eingezeichneten Stellung der Quecksilberwippe den richtigen Ausschlag im Millivoltmeter lieferte. Die an der auf- bzw. ablaufenden Kante der Hauptbürste gemessenen Potentialdifferenzen entsprachen dann den auf der Teilscheibe des Kontaktapparates ermittelten Punkten für den Anfang bzw. das Ende der Kurzschlussperiode. Die

Zwischenpunkte konnten leicht durch Reduktion des Kollektorumfanges auf den Teilkreisumfang erhalten werden.

Die zur Untersuchung gewählte Maschine war für eine Leistung von 10 KW. bei 110 Volt und 750 Touren pro Minute bestimmt.

Die Hauptdimensionen derselben, sowie Nuten- und Polschuhform sind aus der Fig. 8 und der folgenden Tabelle zu entnehmen:

Ankerseindurchmesser	D = 24,2 cm	
Ankerseilenlänge	$l_1 = 29,0$ "	
Wicklungsart	Schleifenwicklung von Hand ausgeführt	
Polzahl	$2p = 2$	
Anzahl der Ankerstromzweige	$2a = 2$	
Spez. Belastung	$AS = 2,492 \cdot i_a$	
Anzahl der Armaturdrähte	$N = 192$	
Drahtdurchmesser, nackt/isoliert	$= 2 \cdot 3,0/3,5$ mm	
Nutenzahl	48	
Nutenform	glatt	
Nutenweite	9,0 mm	} Fig. 8 b
Nutentiefe	16,9 "	
Zahnteilung am Umfang	$t_1 = 16,1$ mm	
Zahnteilung am Fusse	$t_2 = 13,9$ "	
Zahndicke am Umfang	$z_1 = 7,1$ "	
Zahndicke am Fusse	$z_2 = 4,9$ "	
Polschuh:		
Material	Gusseisen (Fig. 8 a)	
Länge	$l_p = 28,7$ cm	
Polbogen	$b_i = 29,5$ "	
Polteilung	$\tau = 38,5$ "	
Verhältnis	$\frac{l}{b_i} = 0,98$	
Verhältnis	$\frac{b_i}{\tau} = \alpha_i = 0,765$	
Polbohrung	$= 25,0$ cm	
Luftzwischenraum	$\delta = 4$ mm	
Magnetschenkel:		
Material	Gusseisen	
Länge in der Achsenrichtung	28,5 cm	
Breite	22,7 "	
Radiale Höhe incl. Polschuh	12,5 "	
Querschnitt	$Q_m = 647$ cm ²	
Joch:		
Material	Gusseisen	
Länge in der Achsenrichtung	29,0 cm	
Radiale Höhe	12,0 "	
Querschnitt	$Q_j = 348$ cm ²	

Kollektor:

Material	Kupfer
Durchmesser	$D_k = 15,0$ cm
Nutzbare Breite	= 10,0 "
Anzahl der Lamellen	$K = 48$
Breite einer Lamelle aussen	$\beta = 0,85$ cm
Art der Isolation	eine Art Mikafabrikat
Dicke der Isolation	$\delta_i = 1,0$ mm
Maximale Spannung zwischen zwei Lamellen	= 0,0625 . E
Lamellen pro Polpaar	48
Kollektorumfangsgeschwindigkeit	$v_k = 0,00787$. n

Bürsten:

Material	Kupfer	Kohle
Anzahl der Stifte	2	2
Bürsten pro Stift	1	1
Bürstenbreite b_1	1,4 cm	1,4 cm
Bürstenlänge	2,8 "	2,1 "
Fläche aller Bürsten	$2 \times 3,92$ cm ²	$2 \times 2,94$ cm ²
Stromdichte	$\frac{1}{3,92}$. J	$\frac{1}{2,94}$. J Amp./cm ²

Nebenschluss:

Zwei Spulen in Serie	
Windungen pro Spule	1890
Drahtdurchmesser, nackt/isoliert	1,6/2,0 mm

Der Antrieb der Maschine erfolgte von einem 10 PS. Gleichstrommotor aus. Da der Riemenantrieb infolge der Riemenschlüpfung zu Fehlerquellen Veranlassung gab, wurden Generator und Motor direkt gekuppelt. Im Falle dass die Versuchsmaschine als Motor untersucht wurde, konnte die Antriebsmaschine als Generator auf einen Widerstand geschaltet werden und diente so als Belastung.

Was nun die Genauigkeit dieser Versuchsanordnung anbetrifft, so kann dieselbe ziffermässig nicht gut ausgedrückt werden. Die hier beschriebenen Anordnungen haben sich nach vielem Probieren als die zweckmässigsten erwiesen. Wählt man den in die Schnittstelle der Armaturspule geschalteten Widerstand grösser, dann kann man naturgemäss die Momentanwerte des Spannungsabfalles beliebig vergrössern. In demselben Masse wird aber dadurch der Widerstand der Spule, in welcher die Kommutationsverhältnisse untersucht werden, verändert und es könnten auf diese Weise Unsymmetrien in die beiden Ankerstromzweige gebracht werden. Die Messung wurde ferner auch dadurch beeinträchtigt, dass zur Aufnahme einer Kommutierungskurve (mindestens 10 bis 11 Punkte) ca. 25 Minuten benötigt wurden, während welcher Zeit die Laufbedingungen der Maschine vollständig

konstant bleiben sollten. Um die hierdurch entstehenden Fehlerquellen zu vermindern, wurden die Versuche nur bei stationären Temperaturen durchgeführt.

Die Kommutierungskurven wurden stets zweimal aufgenommen: einmal fortschreitend in der Drehrichtung, das anderemal entgegen derselben; dort wo sich grössere Abweichungen ergaben, wurde der Mittelwert zur Auftragung der Kurve verwendet.

Die Empfindlichkeit des Galvanometers für die Aufnahme der Kommutierungskurven betrug bei den zuerst angeführten Versuchen

$$1 \text{ Skalenteil} = 1,93 \cdot 10^{-4} \text{ Volt.}$$

In den Figuren sind jeweils die abgelesenen Skalenteile (z. B. in Fig. 11: 1 Skalenteil = $\frac{0,5}{4}$ mm) eingetragen. Die Ampèremassstäbe wurden dieser Skalenteilung angepasst.

Die bei der Aufnahme der Feldkurven sich ergebenden Galvanometerausschläge sind in den Figuren durch die aus den Aichkurven abgegriffenen Spannungen in Volt dargestellt.

Die Messung der Bürstenpotentiale wurde stets vor und nach der Aufnahme der Kommutierungskurven durchgeführt, was sich als unbedingt notwendig erwies, da sich eine während des Versuches etwa auftretende Aenderung des Bürstendruckes oder eine Lageveränderung des Kollektors in achsialer Richtung, weniger im charakteristischen Verlaufe, als in den absoluten Werten der Bürstenpotentiale ($P_x - e_u$) bemerkbar machte.

III. Die experimentell aufgenommenen Kurzschlussstrom- und Bürstenpotentialkurven.

1. Versuche mit Kupferbürsten.

a) Die Maschine besitzt Polschuhe (Fig. 8).

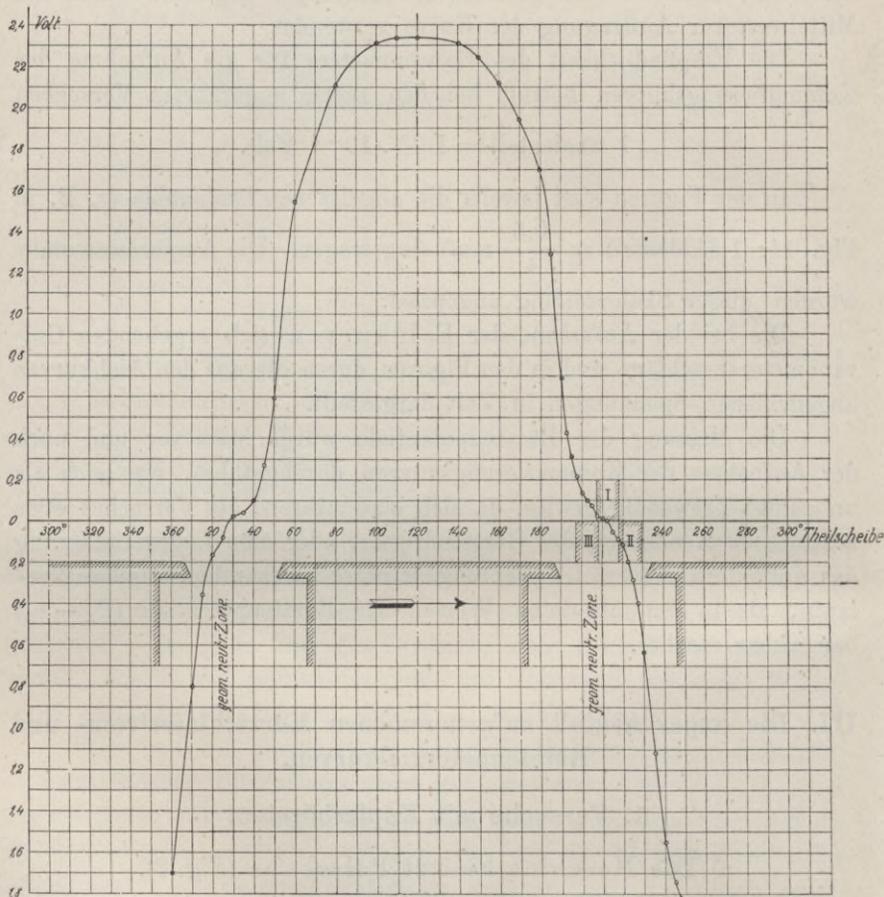
Als Bürsten waren pro Stift je eine Kupfergäzbürste von einer Auflagefläche $F_u = 1,4 \times 2,8 = 3,92 \text{ cm}^2$ aufgesetzt. Die Maschine lief als Generator mit $n = 300$ Umdrehungen pro Minute und war fremd erregt für alle untersuchten Belastungen und Bürstenstellungen mit $i_n = 3,0 \text{ Amp.}$

Für die Bürstenstellung in der geometrisch neutralen Zone, Stellung I, ist in Fig. 9 die experimentell ermittelte Feldkurve für Leerlauf und in Fig. 10 die Leerlaufcharakteristik aufgezeichnet. Fig. 9

zeigt auch die auf den Teilkreisdurchmesser reduzierte Projektion der Polschuhe.

Für diese Bürstenstellung wurden für die Stromstärken $J = 0, 40$ und 60 Amp. (Tab. I a und b, Fig. 11 a I) die Bürstenpotentialkurven

Fig. 9.

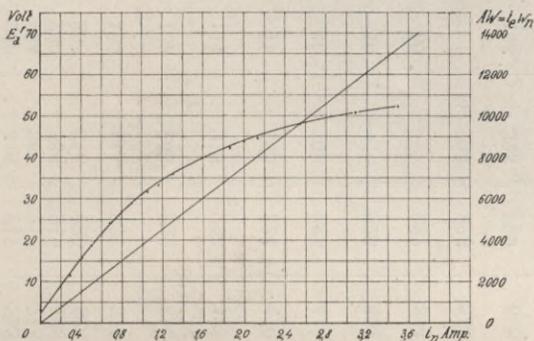


Feldkurve für Leerlauf. $i_n = 3,0$, $n = 300$. (Maschine besitzt Polschuhe.)

A_0' , A_1' und A_2' und für $J = 40$ und 60 Amp. die Kurzschlussstromkurven A_1 und A_2 aufgenommen. Die Bürstenpotentiale wurden an der negativen Bürste gemessen. Die erhaltenen Beobachtungswerte sind als Funktion der Bürstenbreite bzw. Kurzschlussdauer $x = \frac{t}{T}$ aufgetragen.

Ermittelt man nach der auf S. 319 angegebenen Konstruktion aus den Bürstenpotentialkurven A_1' und A_2' die Kurzschlussstromkurven, so erhält man bei Annahme einer konstanten Potentialdifferenz unter der Bürste von $e_u = + 0,000546$ Volt ≈ 0 , welche der mittleren Ordinate der Bürstenpotentialkurve A_0' für Leerlauf entspricht, die punktierten Kurzschlussstromkurven A_1 und A_2 . Dieselben stimmen mit den experimentell erhaltenen Kurzschlussstromkurven sowohl in ihrem

Fig. 10.



Leerlaufcharakteristik. $n = 300$. (Bürstenstellung I.)

charakteristischen Verläufe als auch in den absoluten Werten sehr gut überein.

Aus der Potentialkurve A_1' für $J = 40$ Amp. erhält man: den Mittelwert der Ordinate

$$R_w s_u = 0,0555 \text{ Volt,}$$

die zeitlich konstante mittlere Stromdichte ist

$$s_u = \frac{2i_a}{F_u} = \frac{40}{3,92} = 10,2 \text{ Amp./cm}^2$$

und der Widerstand

$$R_w = \frac{(R_w s_u)}{s_u} = \frac{0,0555}{10,2} = 0,00543 \text{ Ohm.}$$

Bildet man den Formfaktor der Stromdichteverteilung unter der Bürste

$$f_u = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (P_x - e_u)^2 dt}}{R_w \cdot s_u},$$

Tabelle Ia. Kurzschlussstromkurven. Maschine lief als Generator.

Teil- scheibe	Bürstenstellung I			Bürstenstellung II			Bürstenstellung III				
	J = 40 Amp.		Mittel	J = 40 Amp.		Mittel	J = 40 Amp.		Mittel		
	Ausschl. links	Ausschl. rechts		links	rechts		links	rechts			
207	730	270	230	217	725	275	230	211	269	731	231
208	735	267	234	218	718	282	218	210	269	732	232
209	731	269	230	219	688	318	188	209	266	733	234
210	710	302	208	220	628	468	130	208	282	718	218
211	683	323	180	221	575	425	75	207	332	675	170,5
212	630	364	133	222	539	459	38	206	336	668	170,5
213	615	387	114	223	499	500	—	205	330	630	169,0
214	580	422	79	224	470	530	30	204	578	437	169,0
215	542	462	40	225	444	554	55	203	558	430	169,0
216	504	490	10	226	422	578	78	202	572	426	169,0
216,5	438	560	60	227	394	604	105	201	762	416	169,0
217	443	552	60	228	350	650	150	200	770	414	169,0
218	304	700	198	229	698	701	200	199	770	414	169,0
219	265	735	235	229,5	276	730	230	198	770	414	169,0
220	275	725	225	230	264	734	235	197	770	414	169,0
								196	770	414	169,0
								195	770	414	169,0
								196	770	414	169,0
								197	770	414	169,0
								198	770	414	169,0
								199	770	414	169,0
								200	770	414	169,0
								201	770	414	169,0
								202	770	414	169,0
								203	770	414	169,0
								204	770	414	169,0
								205	770	414	169,0
								206	770	414	169,0
								207	770	414	169,0
								208	770	414	169,0
								209	770	414	169,0
								210	770	414	169,0
								211	770	414	169,0
								212	770	414	169,0
								213	770	414	169,0
								214	770	414	169,0
								215	770	414	169,0
								216	770	414	169,0
								217	770	414	169,0
								218	770	414	169,0
								219	770	414	169,0
								220	770	414	169,0
								221	770	414	169,0
								222	770	414	169,0
								223	770	414	169,0
								224	770	414	169,0
								225	770	414	169,0
								226	770	414	169,0
								227	770	414	169,0
								228	770	414	169,0
								229	770	414	169,0
								230	770	414	169,0
								231	770	414	169,0
								232	770	414	169,0
								233	770	414	169,0
								234	770	414	169,0
								235	770	414	169,0
								236	770	414	169,0

x = 0, t = 0 207 (Teilscheibe)
x = 1, t = T 218

x = 0 218
x = 1 229

x = 0 136,5
x = 1 207,5

Vorschaltung 2000 Ω, Nebenschluss 3000 Ω, Kapazität 0,99 MF, Empfindlichkeit 1 Skalenteil = 1,93 · 10⁻⁴ Volt.

Tabelle Ib. Potentialkurven. Maschine lief als Generator.

Marken auf der Bürste	Bürstenstellung I				Bürstenstellung II				Bürstenstellung III	
	J = 0	J = 40 A.	J = 60 A.	J = 0	J = 20 A.	J = 40 A.	J = 84 A.	J = 0	J = 40 A.	
	P _x Volt	P _x Volt	P _x Volt	P _x Volt	P _x Volt	P _x Volt	P _x Volt	P _x Volt	P _x Volt	
Auf.-K. 0	A ₀ ' × - 0,021	A ₁ ' ○ - 0,021	A ₂ ' + - 0,0345	A ₀ ' × + 0,0435	A ₁ ' + 0,066	A ₂ ' ○ + 0,066	A ₃ ' + + 0,0246	A ₀ ' × - 0,082	A ₁ ' ○ - 0,1281	
1	- 0,0096	- 0,006	- 0,0165	+ 0,039	+ 0,069	+ 0,063	+ 0,033	- 0,045	- 0,077	
2	- 0,003	+ 0,034	+ 0,0201	+ 0,0216	+ 0,055	+ 0,066	+ 0,063	- 0,015	- 0,002	
3	+ 0,0048	+ 0,062	+ 0,057	+ 0,009	+ 0,045	+ 0,0621	+ 0,078	- 0,005	+ 0,042	
4	+ 0,0081	+ 0,069	+ 0,0760	- 0,003	+ 0,030	+ 0,0564	+ 0,084	+ 0,027	+ 0,078	
5	+ 0,00855	+ 0,075	+ 0,105	- 0,021	+ 0,0165	+ 0,0435	+ 0,096	+ 0,059	+ 0,122	
6	+ 0,0027	+ 0,105	+ 0,184	- 0,0486	- 0,0117	+ 0,0285	+ 0,1985	+ 0,078	+ 0,201	
Abl.-K. 7	- 0,015	+ 0,15	+ 0,24	- 0,171	- 0,0777	+ 0,045	+ 0,1554	+ 0,086	+ 0,243	
	Funktfrei	Funktfrei	Ganz kleine Funkn. Funkn- grenze	Kleine Funkn	Funkn- grenze	Funktfrei	Minimale Funkn. Funkn- grenze	Funktfrei	Funkn- grenze	

 Die Maschine lief bei sämtlichen Versuchen mit $i_n = 3,0$ Amp., $n = 300$ Umdrehungen pro Min.

indem man das Verhältnis zwischen der Wurzel aus dem Mittelwerte von $(P_x - e_u)^2$ und dem Mittelwerte $R_w s_u$ bestimmt, so erhält man

$$f_u = \frac{0,073}{0,0555} = 1,32 \text{ und } s_{u \text{ eff}} = 10,2 \cdot 1,32 = 13,46 \text{ Amp./cm}^2.$$

Für $J = 60$ Amp., Kurve A_2' ergibt sich

$$R_w s_u = 0,0745 \text{ Volt,}$$

$$s_u = \frac{60}{3,92} = 15,3 \text{ Amp./cm}^2,$$

$$R_w = 0,0049 \text{ Ohm,}$$

$$f_u = 1,56 \text{ und } s_{u \text{ eff}} = 15,3 \cdot 1,56 = 23,9 \text{ Amp./cm}^2.$$

Bei $J = 0$ und 40 Amp. lief die Maschine vollständig funkenfrei, bei $J = 60$ Amp. waren an den ablaufenden Kanten beider Bürsten kleine Funken bemerkbar. $J = 60$ Amp. entsprach der Funkengrenze für diese Bürstenstellung; höhere Belastungen bedingten schon mittleres bis starkes Feuern.

In Tab. I a und b, Fig. 11 a II sind wieder die Bürstenpotentialkurven für $J = 0, 20, 40$ und 84 Amp. in den Kurven A_0', A_1', A_2' und A_3' und die experimentell aufgenommenen Kurzschlussstromkurven für $J = 40$ und 84 Amp. in A_2 und A_3 dargestellt. Die Bürsten, Stellung II, waren für diesen Versuch um 10^0 gegenüber der Bürstenlage I (s. Fig. 9) in der Drehrichtung verschoben. Die Maschine war wieder mit $i_n = 3,0$ Amp. erregt und lief mit $n = 300$ Touren pro Minute. Die aus den Bürstenpotentialkurven für $J = 20, 40$ und 84 Amp. konstruierten Kurzschlussstromkurven sind punktiert eingezeichnet. Für $J = 40$ Amp. zeigt die experimentell aufgenommene Kurzschlussstromkurve für die erste Hälfte fast vollständige Uebereinstimmung, während sie in der zweiten Hälfte erst flacher verläuft und circa im letzten Siebentel der Kurzschlussperiode sehr rasch in den Endwert übergeht. Für $J = 84$ Amp. stimmen die experimentell erhaltenen Punkte + mit den konstruierten • fast überein.

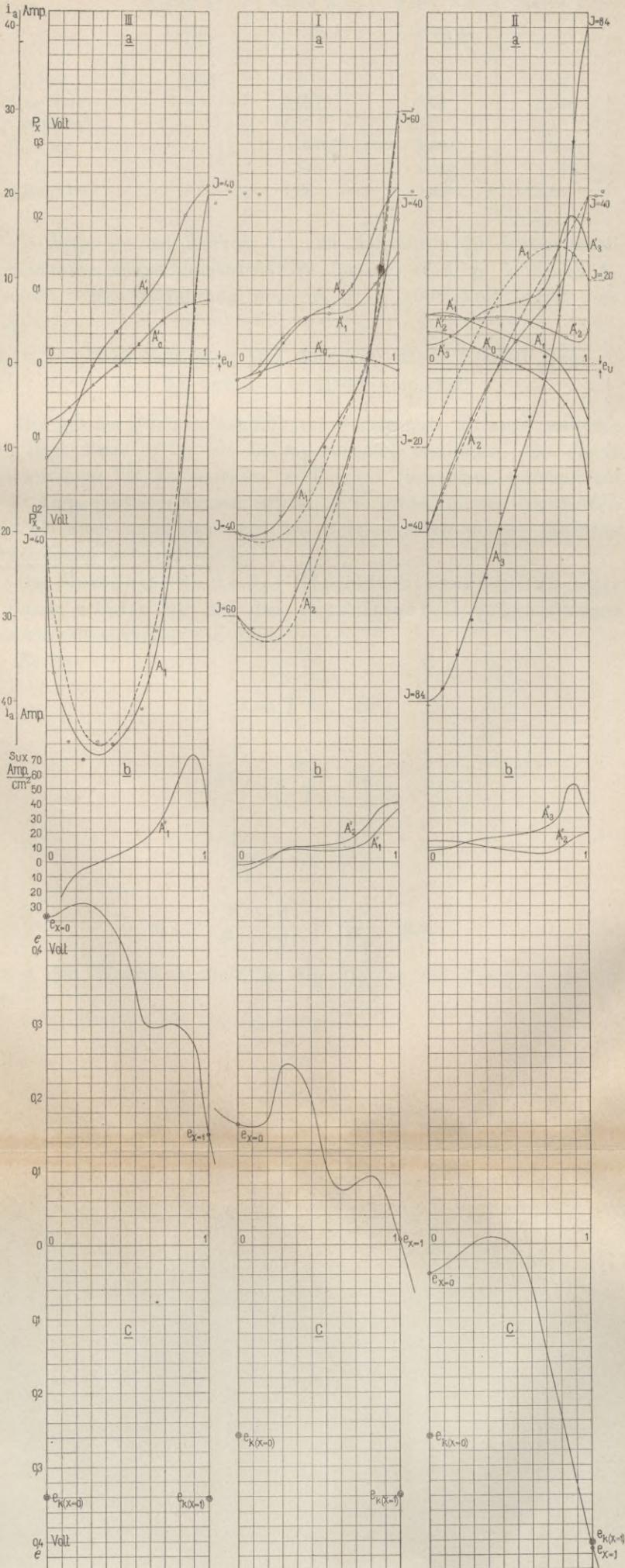
Die aus den Bürstenpotentialkurven erhaltenen Grössen sind in der Tabelle S. 333 angegeben.

In der Bürstenlage II lief die Maschine zwischen 40 und ca. 80 Amp. funkenfrei; bei $J = 20$ Amp. war ganz minimale, bei Leerlauf etwas stärkere Funkenbildung bemerkbar.

Die Bürstenstellung III, Fig. 11 a III, Tab. I a und b, entsprach einer Verschiebung der Bürsten um 10^0 aus der geometrisch neutralen Zone entgegen der Drehrichtung. Unter denselben Verhältnissen wie vorher sind hier die Potentialkurven für $J = 0$ und

Fig. 11.

- a) Experimentell aufgenommene Kurzschlussstrom- und Bürstenpotentialkurven. Maschine als Generator. (Polschuhe und Kupferbürsten.)
- b) Momentanwerte der Stromdichten.
- c) Feldkurven für $J = 40$ Amp.



	Kurve A ₀ ' J = 0	Kurve A ₁ ' J = 20 A.	Kurve A ₂ ' J = 40 A.	Kurve A ₃ ' J = 84 A.
e _u Volt	— 0,008	0 ¹⁾	0	0
R _w s _u Volt	—	0,0373	0,06	0,088
s _u Amp./cm ²	—	5,1	10,2	21,4
R _w Ohm	—	0,00732	0,0059	0,00411
f _u	—	1,545	1,041	1,087
s _u eff Amp./cm ²	—	7,88	10,61	23,3

J = 40 Amp. in den Kurven A₀' und A₁', sowie die experimentell aufgenommene Kurzschlussstromkurve für J = 40 Amp. in Kurve A₁ dargestellt. Bei Einführung eines e_u = + 0,006 Volt ergibt sich aus A₁':

$$R_w s_u = 0,0542 \text{ Volt}, \quad s_u = 10,2 \text{ Amp./cm}^2, \quad R_w = 0,00531 \text{ Ohm}, \\ f_u = 2,2 \text{ und } s_{u \text{ eff}} = 22,35 \text{ Amp./cm}^2.$$

Die aus der Bürstenpotentialkurve konstruierte Kurzschlussstromkurve liegt etwas höher als die experimentell ermittelte. Bei dieser Bürstenstellung lief die Maschine bei Leerlauf funkenfrei, während bei J = 40 Amp. mittleres Feuern auftrat, d. h. sowohl an der ablaufenden Kante als auch unter den seitlichen Bürstenkanten konnte deutliche Funkenbildung bemerkt werden.

Die Momentanwerte der Stromdichteverteilung unter der Bürste erhalten wir aus den experimentell aufgenommenen Kurzschlussstromkurven wie folgt:

Es ist

$$i_a - i = \int_{x=0}^{x=x_1} s_{u x} \cdot dF_u'$$

und

$$dF_u' = \frac{F_u}{T} \cdot dt,$$

somit

$$\frac{di}{dt} = s_{u x} \frac{F_u}{T},$$

also

$$s_{u x} = \frac{T}{F_u} \cdot \frac{di}{dt} = \frac{T}{F_u} \cdot \operatorname{tg} \alpha,$$

wenn α den Winkel darstellt (s. Fig. 2), den die Tangente an die

¹⁾ Der Wert 0 wurde hier angenommen.

experimentell aufgenommene Kurzschlussstromkurve mit einer Horizontalen einschliesst.

Im vorliegenden Falle ergibt sich die Dauer des Kurzschlusses zu

$$T = \frac{b - \delta_i}{v_k} = \frac{1,4}{236,7} = 0,00594 \text{ Sek.},$$

da

$$b - \delta_i = 1,4 \text{ cm}$$

und

$$D_k = 15,0 \text{ cm}$$

$$n = 300$$

$$v_k = \frac{D_k \cdot \pi \cdot n}{60} = 236,7 \text{ cm pro Sek.}$$

Bei Einführung der entsprechenden Massstäbe

$$\text{für Amp.: } 1 \text{ cm} = \frac{40}{23} = 1,74 \text{ Amp.}$$

und

$$\text{für Sek.: } 1 \text{ cm} = \frac{0,00594}{11} = 0,000531 \text{ Sek.}$$

erhält man die Stromdichte in Amp. pro cm^2 :

$$s_{ux} = \frac{T}{F_u} \cdot \left(\frac{\text{Ordinatenmassstab}}{\text{Abscissenmassstab}} \right) \cdot \text{tg } \alpha = \frac{0,00594}{3,92} \cdot \frac{1,74}{0,000531} \cdot \text{tg } \alpha \\ = 4,95 \cdot \text{tg } \alpha.$$

In den Fig. 11 b I, II und III sind die Kurven $s_{ux} = f(x)$ dargestellt.

Für Bürstenlage I ergab sich:

$$\text{für } J = 40 \text{ Amp. Kurve } A_1'' \text{ aus Kurve } A_1 \text{ (Fig. 11 a I)}$$

und

$$\text{für } J = 60 \text{ " " } A_2'' \text{ " " } A_2 \text{ (Fig. 11 a I).}$$

Aus Kurve A_1'' berechnet sich ferner:

$$s_{u \text{ mitt}} = 9,95 \text{ Amp./cm}^2 \text{ (vergl. S. 329 u. 332)}$$

$$s_{u \text{ eff}} = 13,5 \text{ "}$$

$$f_u = 1,355;$$

und ebenso aus Kurve A_2'' :

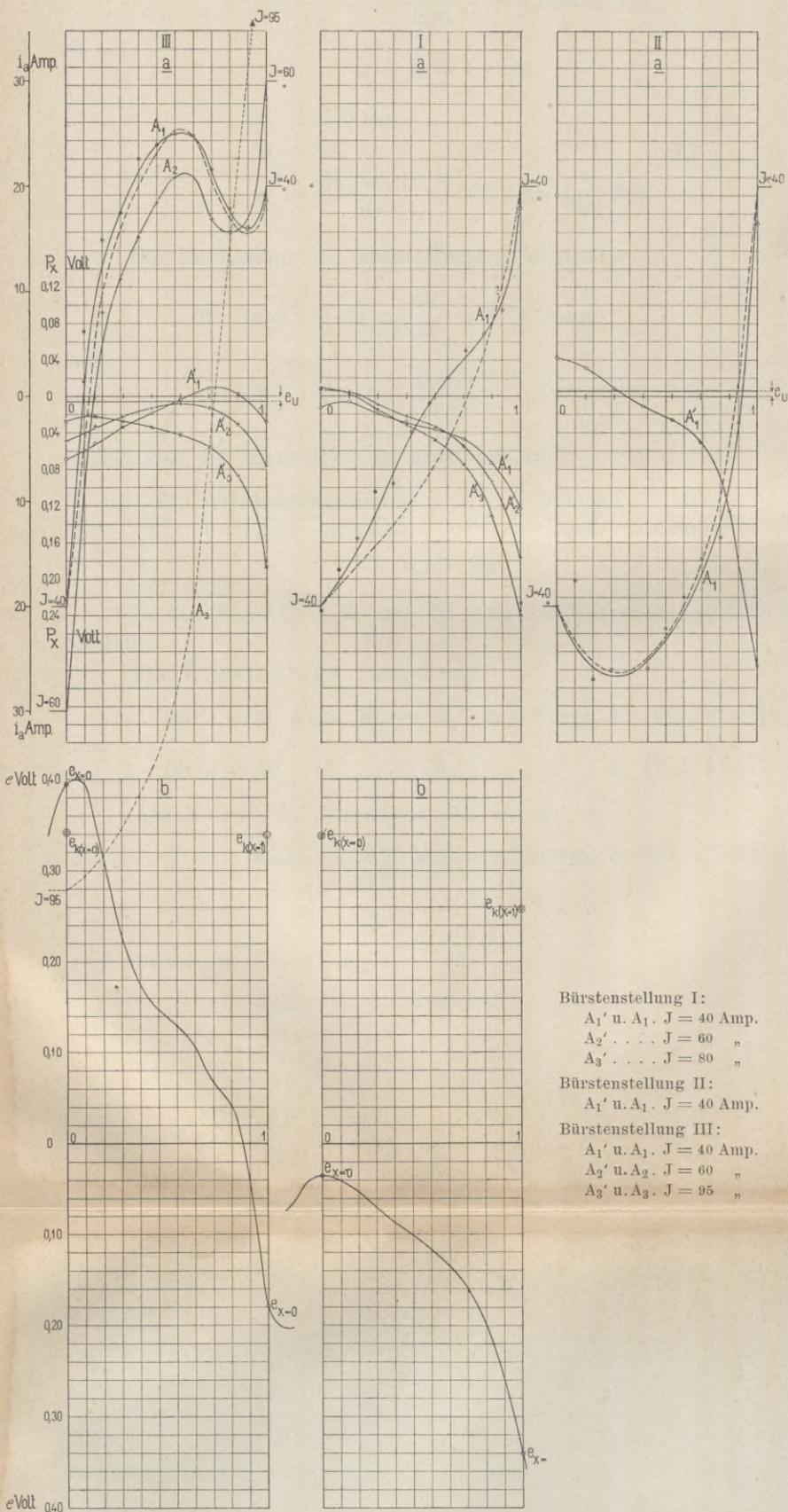
$$s_{u \text{ mitt}} = 15,0 \text{ Amp./cm}^2.$$

$$s_{u \text{ eff}} = 21,4 \text{ "}$$

$$f_u = 1,435.$$

Fig. 12.

a) Experimentell aufgenommene Kurzschlussstrom- und Bürstenpotentialkurven. Maschine als Motor.
 b) Feldkurven $J = 40$ Amp.



Bürstenstellung I:
 A_1' u. A_1 . $J = 40$ Amp.
 A_2' $J = 60$ "
 A_3' $J = 80$ "
 Bürstenstellung II:
 A_1' u. A_1 . $J = 40$ Amp.
 Bürstenstellung III:
 A_1' u. A_1 . $J = 40$ Amp.
 A_2' u. A_2 . $J = 60$ "
 A_3' u. A_3 . $J = 95$ "

Für die Bürstenlage II ergab sich:

und für $J = 40$ Amp. Kurve A_2'' aus Kurve A_2 (Fig. 11 a II)

für $J = 84$ „ „ „ A_3'' „ „ A_3 (Fig. 11 a II).

Für die Bürstenlage III ergab sich:

für $J = 40$ Amp. Kurve A_1'' aus Kurve A_1 (Fig. 11 a III).

Für die drei Bürstenstellungen I, II und III wurden ferner unter Beibehaltung derselben Erregung $i_n = 3,0$ Amp., Geschwindigkeit $n = 300$ Umdrehungen pro Min. und der gleichen Drehrichtung, die Kommutationsverhältnisse für den Betrieb der Maschine als Motor untersucht.

Die erhaltenen Beobachtungswerte sind in den Fig. 12 a, b I, II und III graphisch dargestellt.

Für eine Ankerstromstärke von $J = 40$ Amp. lief die Maschine in der Bürstenlage I und III funkenfrei, in Lage II mit deutlich bemerkbarer Funkenbildung unter der ganzen Auflagefläche. Für die Bürstenlage III entsprechen ca. 95 Amp., Kurve A_3' , für die Lage I ca. 40 Amp., Kurve A_1' , der Funkengrenze.

Die aus den Potentialkurven konstruierten Kurzschlussstromkurven sind punktiert eingezeichnet und die den einzelnen Kurven entsprechenden Werte sind aus Fig. 12 und der folgenden Tabelle zu entnehmen.

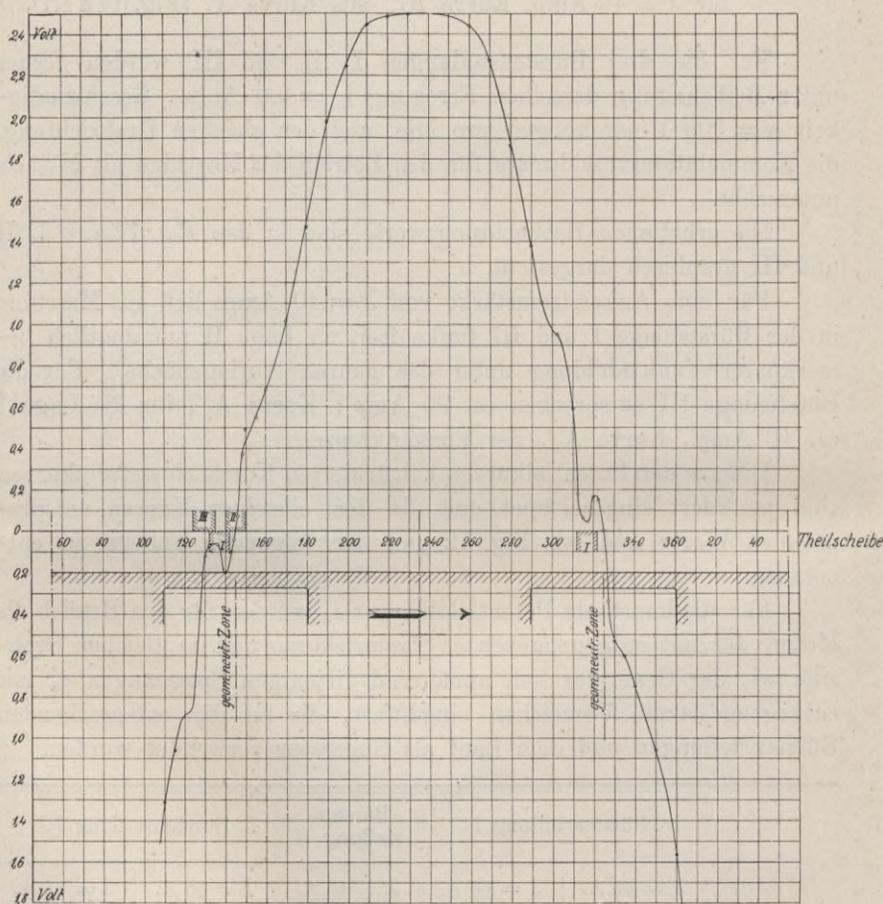
Für die konstante Potentialdifferenz e_u wurden für den Betrieb als Motor, der mit entgegengesetzter Stromrichtung und im gleichen Drehsinn wie der Generator lief, annähernd diejenigen Spannungen e_u mit entgegengesetzten Vorzeichen eingeführt, die bei den entsprechenden Bürstenstellungen und dem Lauf als Generator verwendet wurden.

	Bürstenstellung I		Bürstenstellung II	Bürstenstellung III	
	J = 40 A.	J = 60 A.	J = 40 A.	J = 40 A.	J = 95 A.
	$A_1' \circ$	$A_2' +$	$A_1' \circ$	$A_1' \circ$	$A_3' \times$
e_u	0	0	+ 0,006	- 0,006	- 0,006
$R_w s_u$	0,0371	0,0409	0,0426	0,0247	0,0507
s_u	10,2	15,3	10,2	10,2	24,25
R_w	0,00364	0,00267	0,00417	0,00245	0,0021
f_u	1,48	1,8	2,2	1,33	1,3
$s_u \text{ eff}$	15,1	27,6	22,5	13,6	31,5

b) Die Maschine besass eine Polbüchse.

Bei den folgenden Versuchen lief die Maschine mit denselben Bürsten, nur war an Stelle der Polschuhe eine Polbüchse, Fig. 8 (punktiert), eingesetzt. Die Feldkurve, die für die Maschine als

Fig. 13.



Feldkurve für Leerlauf. $i_n = 3,0$, $n = 300$. (Maschine besitzt Polschuhe.)

Generator bei $n = 300$ und $i_n = 3,0$ Amp. und für die Bürstenlage I aufgenommen wurde, zeigt Fig. 13. Im Vergleich zur Feldkurve für die Maschine mit den Polschuhen (Fig. 9), erkennt man den steilen Verlauf des Feldes in der neutralen Zone. Das Feld, welches die im Kurzschluss befindliche Spule erzeugt, ist hier selbst bei Leerlauf deut-

lich ausgeprägt (Höcker der Kurve in der neutralen Zone), da sich dieses infolge des den Anker vollkommen umschliessenden Eisenmantels sehr gut ausbilden kann.

Für die Bürstenlagen I, II und III sind in Fig. 14 I, II und III verschiedene Potentialkurven aufgetragen. Die entsprechenden Stromstärken sind aus der Figur ersichtlich.

In der Bürstenstellung I (geometrisch neutrale Zone) lief die Maschine bei 20 Amp. an der Funkengrenze, bei 42 und 51,5 Amp. mit bemerkbarer Funkenbildung. Bei der Bürstenstellung III lief die Maschine bei Leerlauf und bei $J = 17$ Amp. mit starker Funkenbildung.

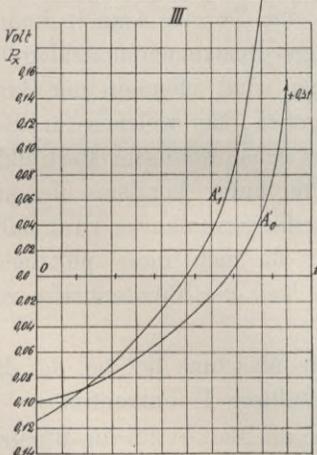
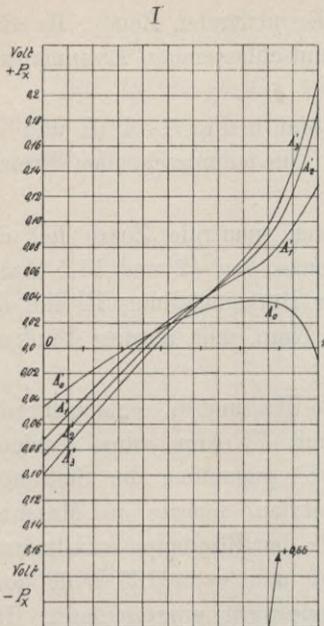
Die Bürstenstellung II, Fig. 14 IIa und b, entspricht der Einstellung, bei welcher die Maschine mit 71 Amp. ohne Funkenbildung läuft. Die Bürsten sind um ca. 8° gegenüber der Stellung I in der Drehrichtung verschoben. Bei Leerlauf feuerte die Maschine bei dieser Bürstenstellung heftig. Die aus den Bürstenpotentialkurven unter Zugrundelegung von $e_u = -0,041$ und $-0,0195$ Volt konstruierten Kurzschlussstromkurven sind punktiert eingezeichnet. Bei der Aufnahme der Bürstenpotentialkurve für $J = 40$ Amp.¹⁾ konnte für die ablaufende Bürstenkante kein ruhiger Instrumentausschlag beobachtet werden. Derartige Abweichungen sind offenbar nur durch die Natur der Bürstenpotentialkurve gegeben, bei welcher für diese Stellen die örtlichen Potentialdifferenzen zwischen zwei sehr stark differierenden Momentanwerten schwanken. Die unter Annahme der eingeführten Mittelwerte konstruierte Kurzschlussstromkurve wird daher von der tatsächlichen etwas abweichen, da sich diese plötzlichen Spannungsänderungen auf einen grösseren Teil der Bürstenbreite verschleppen und so das Bild verwischen.

Die mit der Polbüchse ausgestattete Maschine lief bei der Belastung $J = 71$ Amp. nur in der Bürstenstellung II funkenfrei.

Ein funkenfreier Betrieb der Maschine als Motor für die Bürstenstellung I oder II war nicht möglich. In Fig. 15 sind wieder die experimentell aufgenommenen Bürstenpotentialkurven A_1' , $J = 40$ Amp., A_2' , $J = 50$ Amp. und A_3' , $J = 60$ Amp. und die Kurzschlussstrom-

¹⁾ Die schwach punktiert eingezeichneten Kurventeile der experimentell aufgenommenen Kurzschlusskurve A_2 (voll ausgezogen) verbinden die beobachteten Werte. Der höckerige Verlauf der Kurzschlussstromkurve dürfte im vorliegenden Falle durch innere Ströme bedingt sein, welche durch örtliche Feldpulsationen entstehen können.

Fig. 14.

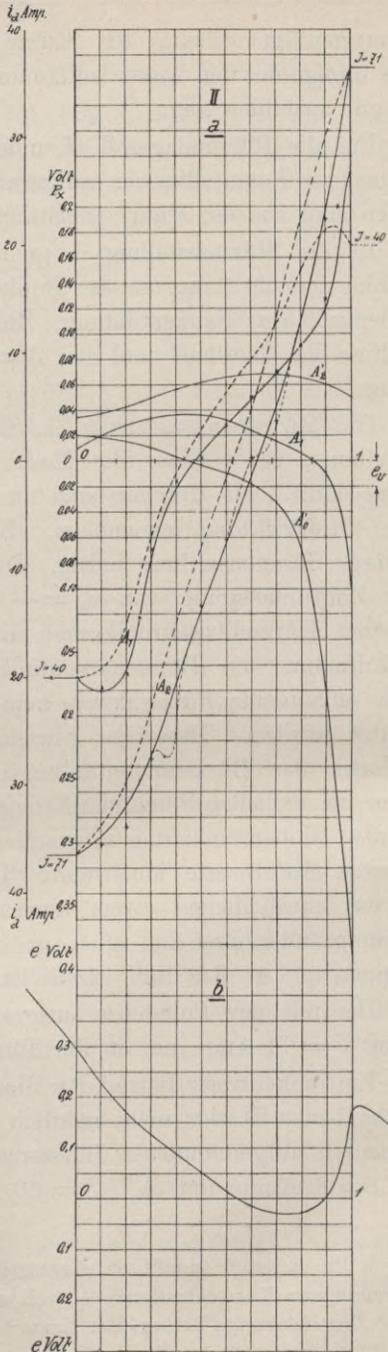


I. A_0' . . . $J = 0$ Amp.
 A_1' . . . $J = 20$ "
 A_2' . . . $J = 42$ "
 A_3' . . . $J = 51,5$ "

II a. A_0' $J = 0$ Amp.
 A_1 und A_1' . . . $J = 40$ "
 A_2 und A_2' . . . $J = 71$ "

II b. Feldkurve für $J = 71$ Amp.

III. A_0' . . . $J = 0$ Amp.
 A_1' . . . $J = 17$ "



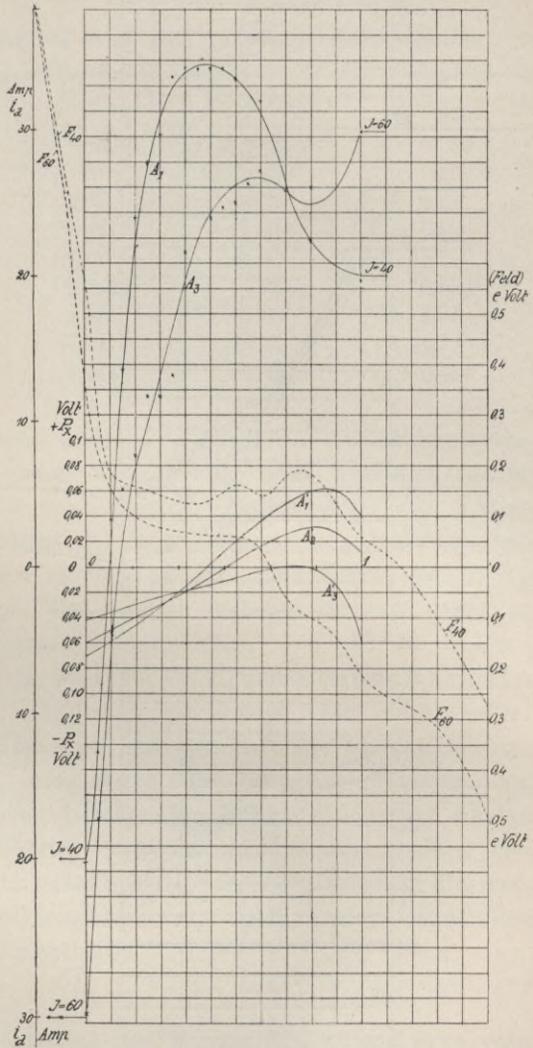
Untersuchung der Maschine mit der Polbüchse als Generator. $n = 300$, $i_n = 3,0$ Amp.

kurven A_1 und A_3 für die Bürstenlage III (siehe Fig. 13) dargestellt.

Als Motor lief die Maschine mit der Geschwindigkeit $n = 300$ Umdrehungen pro Min., Erregung $i_n = 3,0$ Amp. und mit der gleichen Drehrichtung wie als Generator.

Im übrigen zeigen die hier aufgenommenen Kurven denselben charakteristischen Verlauf, wie bei der Maschine mit Polschuhen und der Bürstenstellung III (siehe Fig. 12 a III). Zwischen 40 und 60 Amp. war keine Funkenbildung bemerkbar. Die konstruierten Kurzschlussstromkurven sind hier nicht eingezeichnet, doch erkennt man schon aus dem Verlaufe der Bürstenpotentialkurven, dass erstere auch hier im charakteristischen Verlaufe ziemlich gut mit den experimentell für $J = 40$ und 60 Amp. aufgenommenen Kurven A_1 und A_3 übereinstimmen. Die Grösse e_n könnte in diesem Falle nur aus

Fig. 15.



Untersuchung der Maschine mit der Polbüchse als Motor.
 $n = 300$, $i_n = 3,0$ Amp. (Bürstenstellung III.)

- A_1' und A_1 $J = 40$ Amp.
- A_2' $J = 50$ "
- A_3' und A_3 $J = 60$ "
- F_{40} Feldkurve . . $J = 40$ "
- F_{60} " . . . $J = 60$ "

vorher ermittelten Werten für den Uebergangswiderstand und aus ähnlichen Kommutationsverhältnissen eingeführt werden.

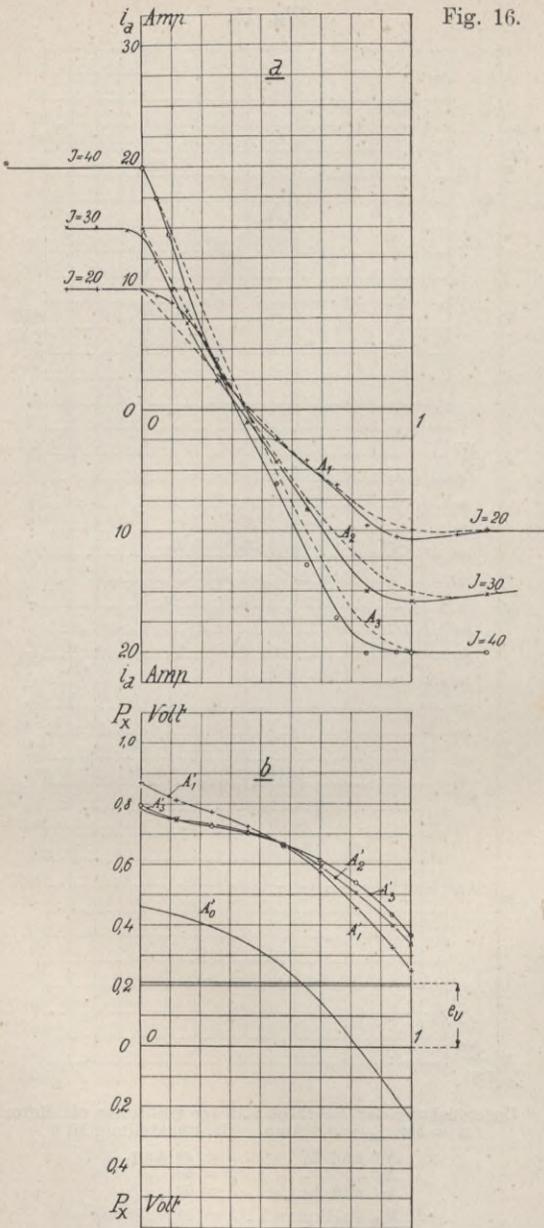


Fig. 16.

2. Versuche mit Kohlenbürsten.

Bei der Maschine mit den Polshuhen wurden die Kommutationsverhältnisse auch für den Fall untersucht, als die Maschine mit Kohlenbürsten lief. Es war pro Stift je eine Kohlenbürste le Carbone Sorte X von einer Auflagefläche $F_n = 1,5 \times 2,0 = 3,0 \text{ cm}^2$ aufgelegt. Die Maschine lief als Generator mit $i_n = 3,0 \text{ Amp.}$ und $n = 300$ Umdrehungen pro Min. Die Bürsten waren so eingestellt, dass die Bürstenmitte gerade in die Mitte zwischen den vorher bei der Maschine mit den Polshuhen untersuchten Bürstenstellungen I und II zu liegen kam.

In Fig. 16 b sind nun die Potentialkurven, die wieder an der negativen Bürste für die Stromstärken $J = 0, 20, 30$ und 40 Amp. aufgenommen wurden, in den Kurven A_0', A_1', A_2', A_3' dargestellt. Die folgende Tabelle

Kurzschlussstrom- und Bürstenpotentialkurven. Maschine lief mit Polshuhen und Kohlenbürsten.

gibt die aus den Potentialkurven ermittelten Grössen an. Die aus den Potentialkurven konstruierten Kurzschlussstromkurven sind punktiert,

die experimentell aufgenommenen voll ausgezogen in Fig. 16 a eingetragen.

Die Uebereinstimmung ist auch hier eine zufriedenstellende.

	A_0' J = 0 A.	$A_1' +$ J = 20 A.	$A_2' \times$ J = 30 A.	$A_3' \circ$ J = 40 A.
e_u	+ 0,22	0,22	0,22	0,22
$R_w s_u$	0	0,427	0,415	0,42
s_u	0	6,67	10,0	13,3
R_w	—	0,0622	0,0415	0,0321
f_u	—	1,095	1,08	1,07
$s_{u \text{ eff}}$	—	7,31	10,8	14,25
P_w	—	0,455	0,449	0,457

Weitere Untersuchungen über den Verlauf von Kurzschlussstromkurven bei Kohlenbürsten kann ich vorläufig nicht anführen, da an der Versuchsmaschine trotz wochenlangen Einschleifens der Kohlen und sorgfältigster Behandlung des Kollektors keine vollständige und ruhige Auflage der Bürsten zu erzielen war. Der Grund hierfür lag hauptsächlich an den langen und verhältnismässig dünnen, daher an allen Vibrationen teilnehmenden Bürstentippen. Die hier für Kohlenbürsten angeführten Versuche sind bei vollkommen blankem Kollektor mit besonders beschwerten Bürsten aufgenommen. Für die Aufnahme der Bürstenpotentiale machten sich naturgemäss diese kleinen Schwingungen weniger geltend, was durch die oftmalige Wiederholung der Versuche mit verschiedenen beschwerten Kohlen konstatiert werden konnte. Bei Kupfergazebürsten, wo sich infolge des weichen Geflechtes schon bei verhältnismässig geringem Bürstendruck die Auflagefläche innig an die Kollektorkrümmung anschmiegte, traten diese störenden Beeinflussungen nicht auf.

IV. Abhängigkeit des Verlaufes der Kurzschlussstromkurve vom Felde in der Kommutierungszone.

Um die erhaltenen Resultate in Betreff des Verlaufes der Kurzschlussstromkurve diskutieren zu können, ist es erforderlich, den Verlauf des Feldes in der Kommutierungszone zu kennen. Es wurden daher zugleich mit den Kurzschluss- und Bürstenpotentialkurven auch die Feldkurven, soweit sie für die Kommutationszone in Betracht kommen, aufgenommen. Die um den Spannungsabfall in der stromführenden

Spule korrigierten Feldkurven sind für die als Generator und Motor mit den Kupfergazebürsten laufende Maschine in den Kurven c, I, II und III der Fig. 11 und den Kurven b, I und III der Fig. 12 eingezeichnet. Der jeweilige Momentanwert des Spannungsabfalles ergab sich aus dem Widerstand der Spule und der in dem betreffenden Momente aus der experimentell aufgenommenen Kurzschlussstromkurve erhaltenen Stromstärke. Wir wollen im folgenden mit dem + Vorzeichen diejenigen E.M.Ke. bezeichnen, die beim Generator im Sinne des in der Drehrichtung voranliegenden, beim Motor im Sinne des rückliegenden Poles induziert werden.

Berechnung des für einen geradlinigen Verlauf des Kurzschlussstromes erforderlichen Feldes.

Um eine Kommutation mit konstanter Stromdichte zu erzielen, muss für den Generator ein Feld vorhanden sein, das gleich

$$e_k = 2 \left(e_m + e_q + i_a R \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right] \right)$$

ist. Für die vorliegende Maschine mit den Polschuhen und Kupferbürsten bei $2i_a = 40$ Amp. und $n = 300$ berechnet sich e_k wie folgt:

Es ist

$$T = 0,00594 \text{ Sek.},$$

$$R = 0,002 \text{ Ohm},$$

ideelle Länge des Ankereisens $l_i = 29,0$ cm,

Länge der Spulenköpfe . . $l_s = 28,0$ cm.

Für die in Fig. 8 b dargestellte Nutenform wurde

$$L + \Sigma M = \frac{u w^2}{10^8} \cdot (l_i [\lambda_n + \Sigma \mu_n + \lambda_k + \Sigma \mu_k] + l_s [\lambda_s + \Sigma \mu_s])^2$$

$$= 8 \cdot 10^{-8} \cdot (29 \cdot 4,9 + 28 \cdot 0,645) = 1,28 \cdot 10^{-5}$$

und

$$e_m = i_a \cdot \frac{L + \Sigma M}{T} = 20 \cdot \frac{1,28 \cdot 10^{-5}}{0,00594} = 0,0432 \text{ Volt}$$

gefunden.

Um λ_q zu bestimmen, wollen wir experimentell vorgehen. Die durch das Armaturfeld in einer Spule induzierte E.M.K. ist

$$2e_q = 2 \frac{N}{K} \cdot A S \cdot v \cdot l_i \lambda_q \cdot 10^{-6} \text{ Volt}$$

$$= 2 \cdot 4 \cdot 49,9 \cdot 3,85 \cdot 29 \cdot \lambda_q \cdot 10^{-6} = 2 \cdot 0,0225 \cdot \lambda_q \text{ Volt.}$$

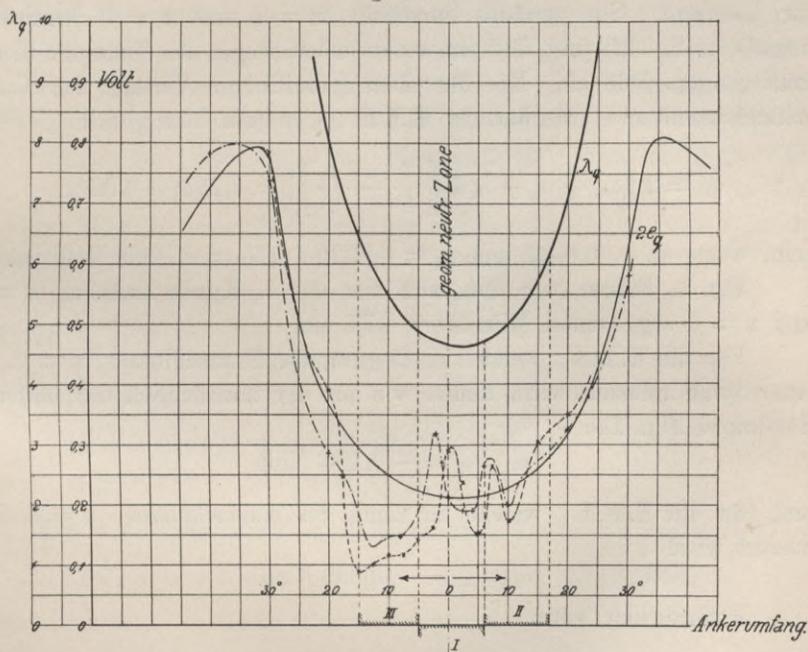
¹⁾ Siehe Arnold Bd. I S. 350.

Nehmen wir nun das Ankerfeld der Maschine auf, so entspricht die an den Enden einer Armaturspule gemessene induzierte E.M.K. (also abzüglich des Spannungsabfalles) der Spannung $2e_q$, und wir erhalten für die spezifische magnetische Leitfähigkeit entlang des Ankerumfangs

$$\lambda_q = \frac{(2e_q) \cdot 10^6}{2 \cdot \frac{N}{K} \cdot AS \cdot v \cdot l_i}$$

In Fig. 17 ist das bei $n = 300$ Touren, $J = 40$ Amp. und bei in geometrisch neutraler Zone stehenden Bürsten aufgenommene Anker-

Fig. 17.



--- Armaturfeld, $J = 40$ Amp. Feld bei kurzgeschlossener Armatur, $J_k = 40$ Amp.

feld, Stellung I, Fig. 9, dargestellt. Die experimentell aufgenommene (punktierete) Kurve wurde durch die voll ausgezogene ersetzt, aus welcher sich bei Einführung der entsprechenden Werte die spezifischen Leitfähigkeiten

$$\lambda_q = \frac{2e_q}{0,045}$$

ergeben.

Für die weitere Betrachtung soll nun angenommen werden, dass e_m für alle Bürstenstellungen und während der Dauer des Kurzschlusses konstant bleibe, während wir die Werte von $2e_q$ nach der vorher ermittelten λ_q -Kurve für jede Bürstenstellung besonders berechnen wollen.

Ermittlung der zusätzlichen E.M.Ke. e_z und Diskussion der Kurzschlussstromkurven.

1. Maschine als Generator.

Für die Bürstenstellung I, $J = 40$ Amp., zeigt die Feldkurve Fig. 11 c I eine starke Rechtsverschiebung gegenüber dem Felde für Leerlauf. Sie verläuft innerhalb $x = 0$ und $x = 1$ durchweg negativ (s. S. 342) und fällt im wesentlichen gegen das Ende der Kommutierungsperiode ab. Die für einen geradlinigen Verlauf der Kurzschlussstromkurve erforderliche E.M.K. e_k müsste hier gleich

$$e_k = 2 \left(e_m + e_q + i_a R \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right] \right) = 0,258 + 0,08 x$$

sein, wenn $e_m = 0,0432$ und $e_q = 0,0225 \cdot 4,75 = 0,1065$ Volt ist.

Für λ_q führen wir den sich aus der λ_q -Kurve zwischen $x = 0$ und $x = 1$ ergebenden Mittelwert 4,75 ein.

Für die E.M.K., welche zu Beginn des Kurzschlusses, $x = 0$, in einer Spule induziert wird, finden wir aus der thatsächlich vorhandenen Feldkurve Fig. 11 c I

$$e_{(x=0)} = -0,164 \text{ Volt}$$

und für die E.M.K., welche zu Ende des Kurzschlusses, $x = 1$, induziert wird

$$e_{(x=1)} = -0,008 \text{ Volt.}$$

Erforderlich wäre

$$\text{für } x = 0 \dots \text{ die E.M.K. } e_{k(x=0)^1} = +0,258 \text{ Volt}$$

und

$$\text{für } x = 1 \dots \text{ die E.M.K. } e_{k(x=1)} = +0,338 \text{ Volt;}$$

somit ergibt sich eine zusätzliche E.M.K. $e_z = e - e_k$

$$\text{für } x = 0 \dots e_{z(x=0)} = -0,422 \text{ Volt}$$

und

$$\text{für } x = 1 \dots e_{z(x=1)} = -0,346 \text{ Volt.}$$

¹⁾ Die Punkte $e_{k(x=0)}$ und $e_{k(x=1)}$ sind in der Figur eingezeichnet.

Dieser für die ganze Kommutierungsdauer negativen zusätzlichen E.M.K. entspricht auch ein negativer zusätzlicher Strom, der sich im Verlaufe der Kurzschlussstromkurve Fig. 11 a I durch eine Unterkommütierung und Verzögerung des Kommutierungsvorganges äussert. Der Strom in der kurzgeschlossenen Spule wächst bis ca. $x = 0,1$ an, geht erst bei $x = 0,8$ durch Null und erreicht zwischen $x = 0,8$ und $x = 1,0$ seinen Endwert. Die Vollendung der Kommutation erfolgt nur durch das Ablaufen der Lamelle.

Noch deutlicher ist der Einfluss des negativen Feldes für die Kurzschlussstromkurve $J = 60$ Amp. durch die stärkere Unterkommütierung ausgeprägt. Das zusätzliche Feld ist hier offenbar zu Beginn der Kommutierung relativ grösser als bei $J = 40$ Amp.

Für die Bürstenstellung II ist das Feld bei Eintritt in die Kurzschlusszone schwach und positiv, wird in der Mitte sogar negativ und steigt dann sehr steil an. Um hier e_k zu berechnen, müssen wir die Variation von λ_q innerhalb der Kurzschlusszone berücksichtigen. Wir nehmen an, dass für diese Bürstenstellung dasselbe Ankerfeld gilt wie für die Bürstenlage I, und erhalten dann, wenn wir in der λ_q -Kurve, Fig. 17, das Stück zwischen $\lambda_{q_0} = 4,75$ und $\lambda_{q_1} = 6,2$ durch eine gerade Linie ersetzen, für

$$\lambda_q = 4,75 + 1,45 x$$

und für

$$e_q = 0,0225 \cdot (4,75 + 1,45 x).$$

Es ist dann

$$e_k = 2 (0,0432 + 0,0225 [4,75 + 1,45 x] + 0,04 [x - 0,5])$$

$$e_k = 0,259 + 0,145 x \text{ Volt.}$$

Aus der experimentell aufgenommenen Feldkurve ergibt sich

$$e_{(x=0)} = + 0,039 \text{ Volt und } e_{(x=1)} = + 0,413 \text{ Volt;}$$

erforderlich ist

$$e_{k(x=0)} = + 0,259 \text{ Volt und } e_{k(x=1)} = + 0,404 \text{ Volt,}$$

somit

$$e_{z(x=0)} = - 0,22 \text{ Volt und } e_{z(x=1)} = + 0,009 \text{ Volt.}$$

Das Feld ist für diese Bürstenstellung und in Bezug auf einen geradlinigen Verlauf der Kurzschlussstromkurve anfangs nur etwas zu schwach, zu Ende nur ganz wenig zu stark. Die experimentell aufgenommene Kurzschlussstromkurve zeigt den Einfluss des schwachen Feldes nur für den mittleren Teil der Periode, was auch im Zusammenhange mit dem Felde leicht zu erklären ist.

Für $J = 84$ Amp. ist offenbar infolge der grösseren Rechtsverschiebung das Feld insbesondere zu Ende des Kurzschlusses schwächer geworden, und die Kurzschlussstromkurve entspricht einer Verzögerung des Kommutierungsvorganges.

Für dieselbe Bürstenstellung, Erregung und Geschwindigkeit muss dann für $J = 20$ Amp. das Feld in der Kommutierungszone sehr steil und stark positiv verlaufen.

Die konstruierte Kurzschlussstromkurve zeigt daher eine Ueberkommutierung. Wir erkennen aus diesem Versuche sehr deutlich den Einfluss, welchen das bei dieser Maschine und den verschiedenen Belastungen sehr stark variierende Feld auf den Kommutationsvorgang ausübt.

Für die Bürstenstellung III und $J = 40$ Amp., Fig. 11 c III, ist das Feld im negativen Sinne sehr stark.

Berechnen wir wieder die erforderliche kommutierende E.M.K. e_k , so erhalten wir, indem wir die Werte von λ_q aus der Kurve abgreifen:

$$e_q = 0,0225 \cdot (6,5 - 1,7 x)$$

und

$$e_k = 2 (0,0432 + 0,0225 [6,5 - 1,7 x] + 0,04 [x - 0,5])$$

$$e_k = 0,339 + 0,0034 x \text{ Volt.}$$

Aus der aufgenommenen Feldkurve ergibt sich:

$$e_{(x=0)} = -0,447 \text{ Volt und } e_{(x=1)} = -0,15 \text{ Volt;}$$

erforderlich ist

$$e_k(x=0) = +0,339 \text{ Volt und } e_k(x=1) = +0,342 \text{ Volt,}$$

somit

$$e_z(x=0) = -0,786 \text{ Volt und } e_z(x=1) = -0,492 \text{ Volt.}$$

Dieser sehr starken negativen zusätzlichen E.M.K. entsprechen auch starke negative zusätzliche Ströme, wodurch der Strom in der kurzgeschlossenen Spule zwischen $x = 0$ und $x = 0,3$ von $i = i_a = 20$ Amp. auf $i = 46,5$ Amp. ansteigt. Die eigentliche Stromwendung erfolgt erst zwischen $x = 0,88$ und $x = 1$, offenbar nur durch die Vorgänge unter den Bürsten. Diese erzwungene Stromumkehr bedingt das Auftreten von grossen Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Lamelle und gibt Anlass zur Funkenbildung.

2. Maschine als Motor.

Genau dieselben Betrachtungen können wir auch für den Lauf der Maschine als Motor, der mit gleicher Drehrichtung wie der Gene-

rator lief, anstellen. Für die Bürstenstellung I und den Ankerstrom $J = 40$ Amp. (Fig. 12 b I) erhalten wir unter Beibehaltung der für den Lauf als Generator berechneten Werte für e_m und e_q die für die Kommutation mit konstanter Stromdichte erforderliche kommutierende E.M.K.

$$e_k = 0,338 - 0,08 x,$$

also

$$e_{k(x=0)} = + 0,338 \text{ Volt und } e_{k(x=1)} = + 0,258 \text{ Volt.}$$

Aus der Feldkurve (Fig. 12 b I) ergibt sich

$$e_{(x=0)} = - 0,035 \text{ Volt und } e_{(x=1)} = - 0,34 \text{ Volt,}$$

und somit

$$e_{z(x=0)} = - 0,373 \text{ Volt und } e_{z(x=1)} = - 0,598 \text{ Volt.}$$

Dieser negativen zusätzlichen E.M.K. entspricht wieder die insbesondere gegen Ende der Kurzschlussperiode deutlich ausgeprägte Verzögerung des Kommutierungsvorganges.

Die in Fig. 12 b III für die Bürstenstellung III erhaltenen Kurzschlussstromkurven sind charakteristisch für ein sehr steil verlaufendes Motorfeld.

Es ist hier die erforderliche kommutierende E.M.K.

$$e_k = 0,342 - 0,0034 x,$$

also

$$e_{k(x=0)} = + 0,342 \text{ Volt und } e_{k(x=1)} = + 0,339 \text{ Volt,}$$

und die aus der Feldkurve erhaltenen Werte

$$e_{(x=0)} = + 0,395 \text{ Volt und } e_{(x=1)} = - 0,18 \text{ Volt}$$

und somit

$$e_{z(x=0)} = + 0,053 \text{ Volt und } e_{z(x=1)} = - 0,519 \text{ Volt.}$$

Die zusätzliche E.M.K. ist hier zu Beginn der Kommutierungsperiode positiv. Die Kommutation erfolgt zuerst sehr rasch und es tritt bei $x = 0,55$ sogar eine Ueberkommutierung auf, indem der Kurzschlussstrom den Wert $i = 26$ Amp. erreicht. Infolge des plötzlich zu schwach werdenden Feldes sinkt die Stromstärke und erreicht zugleich mit dem Ablauen von der Bürste den Endwert.

Denselben charakteristischen Verlauf zeigt auch die für $J = 60$ Amp. erhaltene Kurzschlussstromkurve, nur ist hier keine Ueberkommutierung zu bemerken. Würde man die Belastung weiter steigern, z. B. bis $J = 95$ Amp. (konstruierte Kurzschlussstromkurve A_3), so verschwindet infolge der grösseren Linksverschiebung des resultierenden Feldes das

positive zusätzliche Feld für den Beginn, das negative Feld für das Ende des Kurzschlusses wird kleiner, und die Kommutation erfolgt in einem günstigeren Felde.

Vergleichen wir die Grössenordnungen der den gefundenen zusätzlichen E.M.Ke. $e_{z(x=0)}$ und $e_{z(x=1)}$ entsprechenden zusätzlichen Ströme, so erkennen wir zunächst aus Bürstenstellung I (s. S. 344 und 347), dass ungefähr gleiche zusätzliche E.M.Ke. beim Generator viel grössere zusätzliche Ströme hervorrufen als beim Motor. Beachtet man jedoch, dass e_m mit zunehmender Kurzschlussdauer beim Motor ab-, beim Generator zunimmt, da $(L + \Sigma M)$ mit zunehmender Entfernung von der Polspitze abnimmt, und dass ferner die magnetische Hysterisis die Kommutation beim Motor unterstützt, so stimmt dieses Verhalten mit der Theorie vollkommen überein (s. Arnold, Gleichstrommaschine, Bd. I, S. 316). Sehr deutlich ist auch aus Fig. 12 b III zu erkennen, dass das berechnete und konstant angenommene e_m für den Motor zu grosse Werte liefert, indem der beobachteten starken Beschleunigung des Kommutationsvorganges zu Beginn der Periode nur eine zusätzliche E.M.K. von $e_{z(x=0)} = + 0,053$ Volt entspricht.

Eine analytische Verfolgung dieser Vorgänge ist nur schwer möglich, weshalb wir uns auf die Anführung der Tatsache beschränken wollen.

Für die Bürstenstellung II muss offenbar das Feld durchweg negativ verlaufen, und die hier auftretenden negativen zusätzlichen Ströme bedingen die aus der Kurzschlussstromkurve ersichtliche Unterkommutierung und Verzögerung des Kommutierungsvorganges.

3. Maschine mit der Polbüchse als Generator.

Eine quantitative Verfolgung der hier auftretenden Werte für die zusätzlichen E.M.Ke. ist wegen der bei den vorliegenden Verhältnissen nur sehr ungenauen Berechnung von e_m und e_q nicht möglich. Wir wollen daher die Vorgänge nur qualitativ betrachten. Die für $J = 71$ Amp., $n = 300$, $i_n = 3,0$ Amp. und für die Bürstenstellung II aufgenommene Feldkurve (Fig. 14 b II) verläuft bei Eintritt in die Kurzschlusszone negativ und abfallend und steigt gegen Ende der Periode plötzlich wieder sehr steil an. Die Kurzschlussstromkurve zeigt dementsprechend eine Verzögerung des Kommutierungsvorganges, doch ist dieselbe insbesondere gegen Ende der Periode nicht so stark ausgeprägt, als man von dem nochmaligen steilen Ansteigen des Feldes erwarten könnte. Dies kann vielleicht nur durch das Zusammen-

wirken des Einflusses der E.M.K. der Selbstinduktion und der Vorgänge unter der Bürste erklärt werden. Der durch den Eintritt der kurzgeschlossenen Spule in das plötzlich steil ansteigende Feld bewirkten Aenderung des Stromes wirkt die E.M.K. der Selbstinduktion entgegen und verhindert eine noch weitere Verzögerung der Kommutierung.

Die für $J = 40$ Amp. erhaltene Kurzschlussstromkurve zeigt zuerst eine kleine Unterkommutierung, dann eine, wenn auch nur kurz dauernde Beschleunigung der Kommutierung. In der Mitte der Kurzschlussdauer wird die Kommutierung stark verzögert und fast zugleich mit dem Ende derselben tritt noch eine Ueberkommutierung auf. Die Maximalwerte für diese Ueber-, bzw. Unterkommutierung sind etwas unsicher, da an diesen Stellen kein konstanter Galvanometerausschlag beobachtet werden konnte. Die Maschine feuerte bei dieser Bürstenstellung.

Das Feld für diese Belastung wurde nicht aufgenommen, doch erklärt sich der Verlauf desselben aus der Kurzschlussstromkurve, indem entsprechend der geringeren Belastung im Vergleich zu $J = 71$ Amp. das quermagnetisierende Feld verringert wurde und nun das kommutierende Feld gegen Schluss der Periode plötzlich sehr steil abfällt. Dadurch entstehen die unmittelbar vor Ablauf der Bürste auftretenden positiven zusätzlichen Ströme.

4. Maschine mit der Polbüchse als Motor.

In der Bürstenstellung III wurden für die als Motor laufende Maschine für die Feldkurven bei den Belastungen $J = 40$ Amp. und 60 Amp. die in Fig. 15 wiedergegebenen Kurven F_{40} und F_{60} erhalten. Dieselben zeigen einen sehr steilen Verlauf, und es ist offenbar e_z für den Beginn des Kurzschlusses positiv, was sich in dem beschleunigten Verlaufe der Kurzschlussstromkurven ausprägt. Für $J = 40$ Amp. steigt der Strom in der Mitte des Kurzschlusses, $x = 0,4$, bis auf ca. $i = 35$ Amp. an und geht dann, erst steiler, dann flacher auslaufend, in den Endwert über. Das Feld verläuft für Mitte und Ende der Periode im wesentlichen flach abfallend. Für $J = 60$ Amp. ist das Feld zu Ende der Periode negativ, für den Beginn derselben schwächer als für $J = 40$ Amp., doch immer noch grösser als die hier erforderliche kommutierende E.M.K. $e_k(x=0)$. Die Kurzschlussstromkurve zeigt anfangs wieder eine beträchtliche Beschleunigung der Kommutierung, ein nochmaliges Abfallen und eine offenbar nur durch die Vorgänge unter der ablaufenden Lamelle vollendete Kommutierung.

V. Zusammenfassung der Versuchsergebnisse.

a) Abhängigkeit zwischen Kurzschlussstromkurve und kommutierendem Feld.

Wie wir aus den bisher angeführten Beispielen erkennen, finden wir in allen Fällen den Zusammenhang des Verlaufes der Kurzschlussstromkurve mit dem Felde in der Kommutierungszone deutlich ausgeprägt. Die hier durch Rechnung erhaltenen und die sich aus den ermittelten Feldkurven ergebenden Werte liefern uns, wenn dieselben auch nur als Anhaltspunkte für die Grössenordnung der auftretenden Werte von e_z dienen können, in jedem Falle ein deutliches und diskutierbares Bild über den Einfluss der Feldvariationen auf den jeweiligen Verlauf des Stromes in der kurzgeschlossenen Spule.

Durch die vorliegenden Versuche ist somit auch der experimentelle Beweis dafür erbracht, dass der Verlauf des Kommutierungsvorganges in erster Linie nur durch die Grösse und Richtung der zusätzlichen E.M.Ke. bedingt wird.

Der durch das Feld der kurzgeschlossenen Spulen hervorgerufene zackige Verlauf des Feldes in der Kommutierungszone lässt sich experimentell und analytisch nicht weiter verfolgen, da eine Messung der Koeffizienten der selbst- und gegenseitigen Induktion, insbesondere der E.M.K. der scheinbaren Selbstinduktion, $L_s = k_s L^1$ für die den tatsächlichen Verhältnissen entsprechenden Bedingungen (Rotation der Armatur und Variation des Stromes in den benachbart im Kurzschlusse befindlichen Spulen), nicht durchzuführen ist. Immerhin reichen die für den Beginn $x = 0$ und das Ende $x = 1$ der Kurzschlussperiode bestimmten Werte für e_z aus, um den Zusammenhang zwischen Feld und Kurzschlussstromkurve zu beweisen.

b) Uebereinstimmung zwischen den experimentell aufgenommenen und den aus den Bürstenpotentialkurven konstruierten Kurzschlussstromkurven.

Betrachten wir die Gleichung

$$i = i_a - F_u \cdot \int_{x=0}^{x=1} \frac{P_x - e_u}{R_w} \cdot dx,$$

¹⁾ Siehe Arnold, Gleichstrommaschine Bd. I, S. 351.

so erhalten wir dieselbe unter der Annahme, dass der Kollektor unendlich viel Lamellen besitzt, dass sich also für alle Punkte zwischen Kollektor und Bürste der Verlauf der Stromdichteverteilung innerhalb der Zeitdauer einer Periode nur sehr wenig ändert. Dieses trifft nun mit ziemlicher Annäherung für den in der Mitte befindlichen Teil der Bürsten zu; an den Bürstenkanten wird jedoch die Stromdichte innerhalb einer Periode mehr oder weniger schwanken. Ueber die äussersten Grenzen dieser Schwankungen und deren Verlauf während der Periode dem messbaren Mittelwerte gegenüber können wir nun so lange nichts aussagen, als wir nicht den Verlauf des Kurzschlussstromes in der Bürste selbst, bezw. die zeitlichen Variationen der örtlichen Potentialdifferenzen untersuchen können. Eine derartige Versuchsanordnung, welche bei einer bestimmten Anzahl von der Bürste bedeckten Lamellen die örtlichen Stromdichteveränderungen während der Kurzschlussperiode zu beobachten gestattet, ist bei den für praktische Zwecke gebauten Maschinen nicht leicht möglich, da einerseits die hier unter der Bürste zu messenden Grössen sehr klein sind und durch die Uebergangswiderstände stark beeinflusst werden, andererseits die Dauer des Kurzschlusses selbst sehr kurz ist, nur Bruchteile von $\frac{1}{100}$ Sekunden beträgt.

Der Einfluss der Zahl der von der Bürste bedeckten Lamellen auf die Bürstenpotentialkurve ist analytisch in allgemeiner Form nicht auszudrücken, da hier die Art der Wickelung (Schleifen- oder Wellenwickelung), die elektrische und magnetische Verkettung der im Kurzschluss befindlichen Spulen und das Verhältnis von Lamellenbreite zu Bürstenbreite gleichzeitig zu berücksichtigen sind.

Bei Schleifenwickelungen (s. Arnold, Bd. I, S. 376) erstreckt sich die P_x -Kurve sowohl im reduzierten wie auch im wirklichen Schema nur über eine Bürstenbreite. Bei Wellenwickelungen erstreckt sich der Kommutationsvorgang stets über eine Bürstengruppe im reduzierten Schema. Wir können nun aber die Messungen nur an der, dem wirklichen Schema entsprechenden Bürstenbreite ausführen, weshalb für Wellenwickelungen unter Umständen grössere Abweichungen zwischen der Integralkurve zur P_x -Kurve und der wirklichen Kurzschlussstromkurve auftreten können. Wir werden jedoch später sehen, dass die an solchen Maschinen erhaltenen Kurven ebenfalls sehr gut diskutierbare Resultate liefern.

Was die elektrische Verkettung anbelangt, so ist diese noch schwieriger zu behandeln, da man die Induktionskoeffizienten und effektiven Widerstände sowohl rechnerisch als auch experimentell nur annähernd bestimmen kann. Die Kenntnis der gegenseitigen Beein-

flussung der benachbart liegenden und in verschiedenen Stadien des Kurzschlusses befindlichen Spulen ist aber unbedingt erforderlich, um das Problem zu lösen.

Um hier Grundlagen für eine genaue Berechnung zu schaffen, müssten Resultate an Maschinen vorliegen, bei denen man unter sonst gleichen Laufbedingungen die in einer Nute liegenden Spulenseiten und Wickelungsverhältnisse beliebig variieren könnte.

Beschränken wir uns auf die hier angeführten Versuche und Resultate, so finden wir eine vollkommen zufriedenstellende Uebereinstimmung zwischen den experimentell aufgenommenen und den aus den Potentialkurven konstruierten Kurzschlussstromkurven. Der charakteristische Verlauf der Kurzschlussstromkurve ist in jedem Falle in der Bürstenpotentialkurve deutlich ausgeprägt.

Betrachten wir umgekehrt die aus den experimentell aufgenommenen Kurzschlussstromkurven nach der Beziehung (s. S. 334)

$$s_{ux} = \frac{T}{F_u} \cdot \left(\frac{\text{Ordinatenmassstab}}{\text{Abscissenmassstab}} \right) \cdot \text{tg } \alpha = \frac{1}{R_w} \cdot (P_x - e_u)$$

ermittelten Momentanwerte der Stromdichteverteilung (Fig. 11 b I, II, III), so müssen dieselben, mit R_w multipliziert, die Bürstenpotentialkurven ergeben. Die Uebereinstimmung zwischen diesen beiden Kurven ist in Bezug auf den charakteristischen Verlauf ebenfalls eine sehr gute. Auch die einmal aus den Potentialkurven, das anderemal aus der Kurve für die Momentanwerte der Stromdichteverteilung berechneten Werte für s_u , $s_{u \text{ eff}}$ und f_u stimmen gut überein. Es kommt hier noch die etwas unsichere Ermittlung für die Werte von R_w und e_u hinzu, doch genügt die aus den Figuren 11 b I, II, III erhaltene Uebereinstimmung, um auch zu beweisen, dass die Kurzschlussstromkurve die Differentialkurve der Bürstenpotentialkurve ist.

Auf Grund des so erhaltenen Beweises für den analytischen Zusammenhang zwischen Kurzschlussstrom- und Bürstenpotentialkurve können wir dazu übergehen, die Kommutationsverhältnisse direkt aus der Bürstenpotentialkurve zu untersuchen.

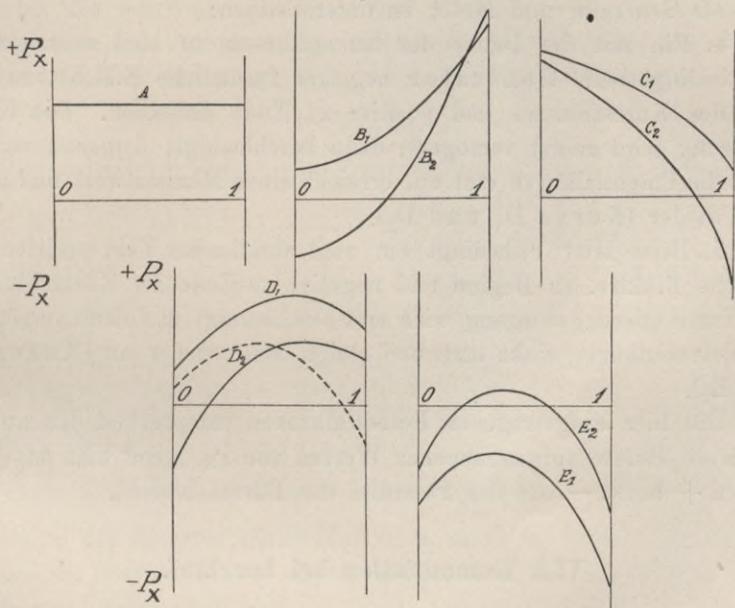
VI. Beurteilung des Feldes in der Kommutierungszone aus den experimentell aufgenommenen Potentialkurven.

Nach dem Vorhergehenden können wir also den Verlauf des Feldes in der Kommutierungszone, bzw. den Verlauf der Kurzschluss-

stromkurve aus den Bürstenpotentialen erkennen. Da es sich in praktischen Fällen jedoch nur darum handeln wird, die Variationen des Feldes bei verschiedenen Belastungen zu untersuchen, so sollen im folgenden die, allgemein bei normalen Maschinen vorkommenden, charakteristischen Potentialkurven bei belasteter Maschine zusammengestellt werden, Fig. 18.

1. Das Feld in der Kommutierungszone entspricht der Bedingung für eine Kommutation mit konstanter Stromdichte; es ist $e_z = 0$

Fig. 18.



Charakteristische Bürstenpotentialkurven.

und die Potentiale P_x sind für die ganze Bürstenbreite konstant (Kurve A).

2. Das Feld ist während der ganzen Kommutierungsperiode zu schwach, e_z negativ; der Kommutierungsvorgang wird verzögert. Die Potentialkurve besitzt kleine Werte unter der auflaufenden Bürstenkante. Gegen die ablaufende Kante zu wachsen dieselben rasch an (Kurve B_1). Ist das Feld zu Beginn der Periode sehr schwach, dann tritt Unterkommütierung auf; der Strom in der kurzgeschlossenen Spule erreicht Werte, die grösser sind als der Strom pro Ankerstromzweig. Dem Maximum des Stromes i entspricht der Vorzeichenwechsel in den gemessenen Potentialen P_x (Kurve B_2).

3. Das Feld ist während des ganzen Kommutierungsvorganges zu stark, e_z positiv; die Kommutierung wird beschleunigt. Die entsprechende Potentialkurve fällt im wesentlichen gegen die ablaufende Kante zu ab (Kurve C_1). Ist das Feld gegen Ende der Kurzschlussperiode sehr stark und positiv, dann tritt Ueberkommutierung auf. Bevor der Kurzschlussstrom seinen Endwert für den folgenden Ankerstromzweig erreicht, nimmt er Werte an, die grösser sind als i_a (Kurve C_2).

Bei einem zu steil verlaufenden Felde haben wir zwischen dem Lauf als Generator und Motor zu unterscheiden:

4. Ein mit der Dauer des Kurzschlusses zu steil ansteigendes Feld bedingt beim Generator negative zusätzliche E.M.Ke. zu Beginn des Kurzschlusses und positive zu Ende desselben. Die Kommutierung wird zuerst verzögert, dann beschleunigt; dementsprechend steigt die Potentialkurve erst an, erreicht einen Maximalwert und sinkt dann wieder (Kurve D_1 und D_2).

5. Beim Motor bedingt ein steil abfallendes Feld positive zusätzliche E.M.Ke. zu Beginn und negative zu Ende des Kurzschlusses. Der Kommutierungsvorgang wird erst beschleunigt und dann verzögert. Die Potentialkurve sinkt erst und steigt dann wieder an (Kurve E_1 und E_2).

Die hier aufgetragenen Potentialkurven entsprechen den an der negativen Bürste aufgenommenen Werten von P_x , wenn man das Vorzeichen + bzw. - auf das Potential der Bürste bezieht.

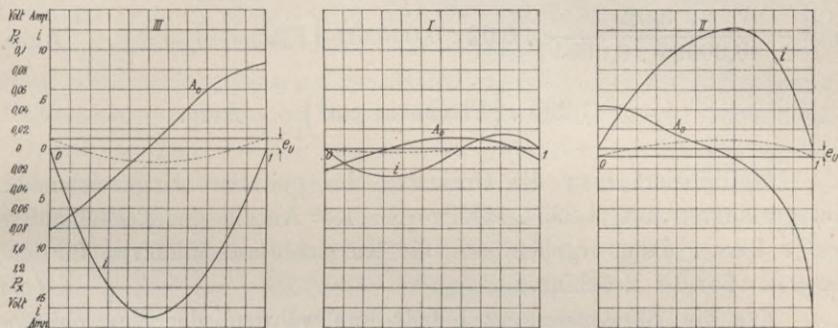
VII. Kommutation bei Leerlauf.

Läuft die Maschine normal erregt und mit stromlosem Anker, so wird zwischen benachbarten Lamellen in einem bestimmten Augenblicke eine solche Potentialdifferenz bestehen, welche dem Felde entspricht, in dem sich die mit den betrachteten Lamellen verbundene Spule bewegt. Kommen die betreffenden Lamellen unter die Bürste zu liegen, so wird die induzierte E.M.K. einen Strom durch die Spule treiben, die durch die Bürste kurzgeschlossen ist. Die Grösse und Richtung dieses Stromes hängt offenbar nur von der Grösse und Richtung der induzierten E.M.K., vom Widerstande und der Selbstinduktion des so gebildeten Stromkreises ab. Zu Beginn und Ende des Kurzschlusses ist demnach der Strom gleich Null; er verläuft während der ganzen Kurzschlussperiode in der gleichen Richtung, wenn die induzierte E.M.K. während derselben ihre Polarität beibehält.

Ändert die induzierte E.M.K. ihre Polarität, so wird auch der Strom in der kurzgeschlossenen Spule innerhalb der Dauer der Periode seine Richtung ändern. Der Fall tritt ein, wenn die Bürsten in der geometrisch neutralen Zone stehen; der Strom behält in Bezug auf den Verlauf in der Spule seine Richtung bei, wenn die Bürsten im einen oder anderen Sinne aus der neutralen Zone verschoben sind (s. Feldkurve Fig. 9). Für die Versuchsmaschine sind nun in Fig. 19 I, II und III für die untersuchten Bürstenstellungen I, II und III die Potentialkurven für die negative Bürste bei Fremderregung mit $i_n = 3,0$ Amp. und bei der Geschwindigkeit $n = 300$ Touren pro Min. aufgezeichnet.

Unter der Voraussetzung, dass keine inneren Ströme vorhanden sind, dass also für $x = 0$ und $x = 1$ der Kurzschlussstrom und der

Fig. 19.



Kommutation bei Leerlauf ($i_n = 0$).

Strom in der Armatur gleich Null sind, muss die Summe der Flächen, welche die Potentialkurven ober- und unterhalb der Abscissenachse einschliessen, gleich Null sein.

Führt man die Integration der Potentialkurve mittels Planimeter oder graphisch durch, so erkennt man, dass dieses nicht zutrifft. Wir müssen sonach eine Parallelverschiebung der x -Achse um einen Betrag e_u vornehmen, der gleich der mittleren Ordinate der Leerlaufpotentialkurve ist.

Im vorliegenden Falle ergab sich für die

Lage I . . . $e_u = + 0,000546 \approx 0$ Volt

„ II . . . $e_u = - 0,008$ „

„ III . . . $e_u = + 0,0103$ „

Führen wir den aus den Bürstenpotentialkurven für $J = 40$ Amp. sich ergebenden Mittelwert von

$R_w = 0,0054$ Ohm (s. S. 329, 332 u. f.)

ein, welchen wir für die hier in Betracht kommenden Stromdichten bei Kupferbürsten als konstant ansehen wollen, so erhalten wir aus

$$i = i_a - \frac{F_u}{R_w} \int_{x=0}^{x=1} (P_x - e_u) dx = i_a - \frac{F_u}{T \cdot R_w} \cdot \int_{t=0}^{t=t_1} (P_x - e_u) dt;$$

und für den vorliegenden Fall:

$$i_a = 0$$

$$F_u = 3,92 \text{ cm}^2$$

$$T = 0,00594 \text{ Sek.}$$

$$\text{Massstab: } 1 \text{ cm} = 0,02 \text{ Volt}$$

$$" \quad 1 \text{ cm} = 0,000531 \text{ Sek.}$$

wird

$$i = - \frac{3,92}{0,00594 \cdot 0,0054} \cdot 0,02 \cdot 0,000531 \left(\text{Fläche in cm}^2 \right)_{t=0}^{t=t_1} \text{ Amp.}$$

$$i = - 1,295 \cdot \left(\text{Fläche in cm}^2 \right)_{t=0}^{t=t_1} \text{ Amp.}$$

Multipliziert man die Ordinaten der punktiert eingezeichneten Integralkurven mit $(1,295 \cdot 11)$ (worin $11 =$ Anzahl der Teilschichten zu je 1 cm), dann ergeben sich die Kurzschlussstromkurven für die leerlaufende Maschine.

Für die Bürstenstellung I tritt nun während der Kurzschlussperiode eine Richtungsänderung der induzierten E.M.K. auf, wodurch z. B. während der ersten Halbperiode der Strom bei der auflaufenden Bürstenkante in die Lamelle eintritt, bei der ablaufenden Kante nach der Bürste übertritt. Der Strom wird für eine bestimmte Stelle Null und verläuft in der zweiten Halbperiode in entgegengesetzter Richtung. Der Maximalwert des Kurzschlussstromes beträgt hier nur ca. $2,7 \text{ Amp.}$

In der Bürstenstellung II, bzw. III, in der die Bürsten in der Drehrichtung, bzw. entgegen derselben, verschoben sind, bleibt die Polarität (s. Feldkurve Fig. 9) der induzierten E.M.K. während der ganzen Kurzschlussdauer die gleiche; es wird demnach auch der Strom während derselben seine Richtung in der Spule nicht ändern und wird für die auflaufende Kante von der Bürste nach der Lamelle und für die ablaufende von der Lamelle nach der Bürste verlaufen, bzw. umgekehrt für die Lage III.

Die angenäherten Momentanwerte für den Kurzschlussstrom können aus der Fig. 19 (Kurven i) entnommen werden. Die 3 Kurven A_0 der Fig. 19 stellen nun die unter normalen Verhältnissen

überhaupt möglichen Fälle dar, die der Verlauf der Potential- und Kurzschlussstromkurven für Leerlauf ($i_a = 0$) aufweisen kann.

Was nun die Parallelverschiebung der Abscissenachse um e_u Volt betrifft, so entspricht dieselbe ihrer physikalischen Bedeutung nach der für ein bestimmtes Bürstenmaterial konstanten Potentialdifferenz e_u , denn wir hatten für den spezifischen Widerstand die Beziehung

$$R_k = \frac{e_u}{s_{u x}} + R_w,$$

bezw. für die Potentialdifferenz

$$P_x = e_u + s_{u x} \cdot R_w$$

eingeführt. Nun ergibt sich aber die Tatsache, dass die Grösse und Richtung von e_u sowohl von der Stromrichtung, als auch von den auftretenden Stromdichten abhängig ist. Sie ist im Falle eines während der ganzen Kommutierungsperiode bei der auflaufenden Bürstenkante austretenden und bei der ablaufenden Kante eintretenden Stromes positiv; bei der umgekehrten Stromrichtung ist sie im allgemeinen viel kleiner, sogar negativ, und für einen während des Kommutationsvorganges seine Richtung wechselnden Strom wird e_u fast Null. Dieselbe Beobachtung ergibt sich auch für Kohlenbürsten. Die Beziehung für den spezifischen Widerstand R_k gilt, wie wir später sehen werden, bei Kupferbürsten nur für Stromdichten, die grösser sind als 6 Amp./cm², für Kohlenbürsten (s. Dr.-Ing. M. Kahn, Uebergangswiderstände von Kohlenbürsten) nur für solche von mehr als 1 Amp./cm².

Für die bei der Kommutation der leerlaufenden Maschine auftretenden Stromdichten ist somit diese Gleichung nicht mehr streng gültig. Es hat sich ferner aus dem Vergleich zwischen den experimentell aufgenommenen und den aus den Bürstenpotentialkurven konstruierten Kurzschlussstromkurven gezeigt, dass die mehr oder weniger gute Uebereinstimmung wesentlich von der Grösse der Parallelverschiebung abhängt.

Beim Motor ist eine Aufnahme der Leerlaufpotentiale nicht möglich, weil der Anker den Leerlaufstrom führt. Nehmen wir jedoch an, es seien keine Leerlaufverluste vorhanden, oder es würde die zur Deckung derselben erforderliche Energie mechanisch zugeführt, dann gäbe es bei demselben Felde und der gleichen Drehrichtung keinen Unterschied zwischen dem Leerlauf als Generator und dem theoretischen Leerlauf als Motor, und man hätte mit Bezug auf die entgegen-

gesetzte Stromrichtung eine gleich grosse, aber mit entgegengesetzten Vorzeichen eingeführte Parallelverschiebung e_u zu Grunde zu legen. Die so erhaltenen Kurzschlussstromkurven stimmten jedoch mit den experimentell erhaltenen nicht so gut überein, als mit den für die Konstruktion verwandten Werten:

Bürstenstellung I . . .	$e_u = 0$ Volt
„ II . . .	$e_u = + 0,006$ Volt
„ III . . .	$e_u = - 0,006$ „

Beim Motor kommt eben hier noch in Betracht, dass der Strom in der gleichen Bürste im entgegengesetzten Sinne verläuft, wie beim Generator. Handelt es sich im allgemeinen nur darum, aus dem Verlaufe der Potentialkurven auf die Feldvariationen während der Belastung zu schliessen, so wird man bei Kupferbürsten keinen grossen Fehler begehen, wenn man $e_u = 0$ setzt. Einige Anhaltspunkte für die richtige Wahl von e_u geben die folgenden Werte: Für Kupfergazebürsten ist e_u für den Fall, dass die Bürstenpotentialkurven gegen Ende der Periode keine zu grossen Potentialdifferenzen aufweisen, zwischen 0,003 und 0,008 Volt einzuführen. Die grösseren Werte beziehen sich auf Potentialkurven vom charakteristischen Verlaufe der Kurve III (Fig. 19), die kleineren auf Kurven ähnlich der Kurve II. Bei Kohlenbürsten ist, soweit dies aus den vorliegenden Versuchen geschlossen werden kann, für e_u ca. 0,1 bis 0,2 Volt zu wählen. Für die negative Bürste ist e_u positiv für den Lauf als Generator und negativ für den Lauf als Motor anzutragen.

VIII. Kommutation bei Kurzschluss und Superposition der Leerlauf- und Kurzschlusspotentialkurve.

Schliesst man die Klemmen einer Maschine kurz und erregt dieselbe so weit, dass bei einer bestimmten Geschwindigkeit ein gewisser Strom durch die Armatur fliesst, so muss auch in diesem Falle die Stromwendung unter Einfluss des resultierenden Feldes der kurzgeschlossenen Maschine und durch die Vorgänge unter den Bürsten erfolgen.

Das Feld der kurzgeschlossenen Maschine entsteht durch die Superposition der Felder, die durch die Ampèrewindungen der Armatur und durch die Erregerampèrewindungen erzeugt werden. Das Feld der Erregerampèrewindungen ist für die Bürstenstellung in der geometrisch neutralen Zone, gegenüber dem von den Ankerampèrewin-

dungen hervorgerufenen Felde, vernachlässigbar klein. Die Feldkurve der kurzgeschlossenen Maschine wird demnach im wesentlichen den gleichen Verlauf aufweisen, wie das durch die Ankerampèrewindungen gebildete Feld und zeigt im Gegensatze zu letzterem nur eine kleine Verschiebung den Polmitten gegenüber, welche von der Grösse der Erregerampèrewindungen abhängig ist. Für die Kommutierungszone fällt jedoch das Feld der kurzgeschlossenen Maschine mit dem Armaturfelde zusammen. In Fig. 17 ist für die Versuchsmaschine und der Bürstenstellung in der geometrisch neutralen Zone, nebst dem Ankerfelde für $J = 40$ Amp. (punktierte Kurve), auch das Feld der kurzgeschlossenen Maschine für dieselbe Stromstärke durch die strichpunktierte Kurve dargestellt. Wir begehen hier keinen grossen Fehler, wenn wir das Feld der kurzgeschlossenen Maschine durch die gleiche Kurve ersetzen (voll ausgezogene Kurve), wie das Ankerfeld und erhalten dann für die spezifische Leitfähigkeit entlang des Armaturumfanges die gleiche λ_q -Kurve wie für den Querkraftfluss allein. Die in einer Ankerspule vom Armaturfelde induzierte E.M.K. können wir dann mit hinreichender Genauigkeit durch die Beziehung

$$2e_q = -2 \frac{N}{K} \cdot v \cdot l_i \cdot AS \cdot \lambda_q \cdot 10^{-6} \text{ Volt}$$

ausdrücken.

Die durch die Selbst- und gegenseitige Induktion ($L + \Sigma M$), welche wir wieder als konstant während der Zeit T ansehen wollen, in der kurzgeschlossenen Spule induzierte E.M.K. ist

$$2e_m = -2i_a \frac{L + \Sigma M}{T} \text{ Volt,}$$

und der Ohmsche Spannungsabfall in der Spule für die Annahme eines geradlinig nach der Zeit verlaufenden Kurzschlussstromes ist gleich

$$-2i_a \cdot R \cdot \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right).$$

Damit bei einem Strome i_a pro Armaturstromzweig die Kommutation mit konstanter Stromdichte erfolgt, ist eine E.M.K.

$$e_k = 2 \left(e_m + e_q + i_a R \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right] \right)$$

erforderlich.

In der Fig. 20 sind für eine und dieselbe Bürstenstellung die Feldkurven durch die in der Spule induzierten E.M.Ke. dargestellt. I stellt die Feldkurve der mit normaler Erregung leerlaufenden

Bevor wir auf eine weitere Diskussion dieser Ergebnisse eingehen, sollen einige diesbezügliche Versuche¹⁾ angeführt werden.

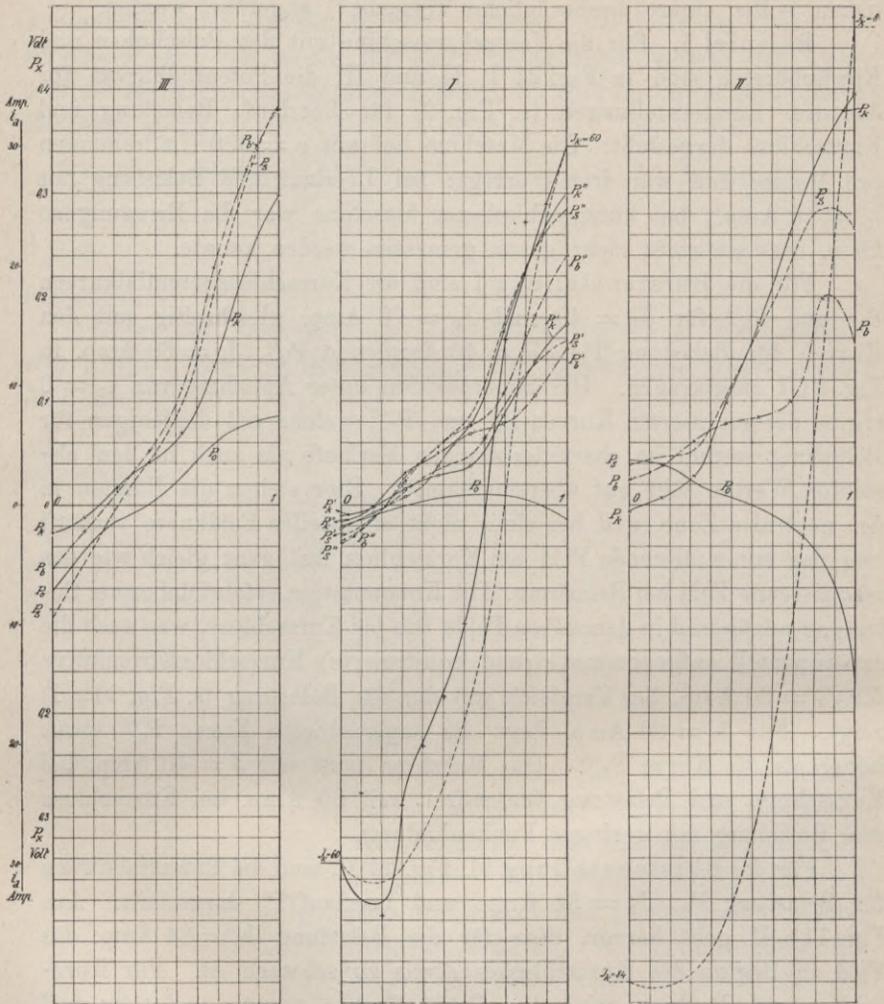
Beispiel I. Für die Versuchsmaschine mit den Polschuhen und Kupferbürsten sind in Fig. 21 I, II und III die Potentialkurven für die drei Bürstenstellungen (s. Fig. 9) für Leerlauf, Belastung und Kurzschluss dargestellt. Die Maschine lief mit $n = 300$ Umdrehungen pro Minute und war fremd erregt: bei Leerlauf und Belastung mit $i_n = 3,0$ Amp., bei kurzgeschlossenener Maschine war die Erregung so klein, dass sie nicht mehr genau gemessen werden konnte.

Für die Bürstenstellung I sind die Kurzschlusspotentialkurven P_k' und P_k'' für $J_k = 40$ und $J_k = 60$ Amp. gleichzeitig mit den Kurven für Belastung P_b' , $J_b = 40$ Amp. und P_b'' , $J_b = 60$ Amp. in Fig. 21 I aufgetragen. Die Superposition unter Annahme von $e_u = 0$ ergibt die punktierten Kurven P_s' und P_s'' , welche mit denjenigen für Belastung sowohl im charakteristischen Verlaufe als auch in den absoluten Werten sehr gut übereinstimmen. Hier stehen die Bürsten in der neutralen Zone, und bei einer nicht allzusteilen Feldkurve verläuft hier das kommutierende Feld bei Kurzschluss fast ganz gleich wie das resultierende Feld bei Belastung. Die Kommutation erfolgt daher bei Belastung annähernd in demselben Felde wie bei Kurzschluss, was auch die experimentell aufgenommene (und konstruierte) Kurzschlussstromkurve für $J_k = 60$ Amp. bei Vergleich mit der für Belastung (s. Fig. 11 a I) zeigt. Für $J_k = 60$ Amp. liegt die superponierte Kurve P_s'' etwas höher als die Kurve P_b'' . Die Maschine läuft mit $J = 40$ Amp. bei Kurzschluss und Belastung funkenfrei, mit 60 Amp. bei Kurzschluss und Belastung mit geringer Funkenbildung.

Für die Bürstenstellung II, Fig. 21 II, sind die Potentialkurven für Belastung P_b , $J_b = 84$ Amp. und Leerlauf P_0 dargestellt. Aus Fig. 11 b II geht hervor, dass für die Belastung $J_b = 84$ Amp. das Feld zu Beginn des Kurzschlusses etwas zu schwach ist. Für Kurzschluss und 84 Amp. wird das Feld offenbar negativ und sehr steil ansteigend verlaufen (s. Fig. 17), daher auch das rasche Anwachsen der Potentialdifferenzen, entsprechend dem verzögerten Verlaufe der Stromwendung (s. konstruierte Kurzschlussstromkurve für $J_k = 84$ Amp.). Der Kommutierung für Leerlauf entspricht ein starkes positives Feld. Durch die Nähe der Polspitzen wird hier die Superposition des Leerlauf- und Kurzschlussfeldes nicht mehr genau das Belastungsfeld er-

¹⁾ Die erste Anregung zur experimentellen Untersuchung der Superposition der Leerlauf- und Kurzschlusspotentialkurven verdanke ich Herrn Ing. J. L. la Cour.
Sammlung elektrotechnischer Vorträge. V. 24

Fig. 21.



Untersuchung der Kommutation bei Kurzschluss. Beispiel I.

P_0 $J = 0$ Amp.	P_0 $J = 0$ Amp.	P_0 $J = 0$ Amp.
P_b $J_b = 60$ "	P_b' $J_b = 40$ "	P_b $J_b = 84$ "
P_k $J_k = 60$ "	P_k' $J_k = 40$ "	P_k $J_k = 84$ "
$\bar{P}_s = \bar{P}_k + \bar{P}_0$. $J = 60$ "	$\bar{P}_s' = \bar{P}_k' + \bar{P}_0$. $J = 40$ "	$\bar{P}_s = \bar{P}_k + \bar{P}_0$. $J = 84$ "
	P_b'' $J_b = 60$ "	
	P_k'' $J_k = 60$ "	
	$\bar{P}_s'' = \bar{P}_k'' + \bar{P}_0$. $J = 60$ "	

geben, was auch die Abweichung der durch Superposition erhaltenen (punktirten) Potentialkurve gegenüber der tatsächlich bei Belastung $J_b = 84$ Amp. aufgenommenen Kurve P_b bedingt. Die Maschine feuert

bei Kurzschluss, bei Belastung arbeitet sie an der Funkengrenze. Durch Superposition wird eine Spannung für die ablaufende Bürstenkante erhalten, die etwas höher als die Funkengrenze liegt.

Für die Bürstenstellung III und $J_b = 60$ Amp. stimmt die durch Superposition von P_0 und P_k erhaltene Kurve P_s mit der bei Belastung aufgenommenen Kurve P_b gut überein. Die Kommutation erfolgt hier bei Kurzschluss in einem günstigeren Felde wie bei Belastung und derselben Bürstenstellung, da das zusätzliche Feld bei Belastung viel grösser als das bei Kurzschluss ist. Dieser Fall wird immer dann eintreten, wenn die Bürsten etwas entgegen der Drehrichtung verschoben sind und die Feldkurve für Leerlauf sehr steil verläuft.

In der nebenstehenden Tabelle sind einige aus den Potentialkurven berechnete Grössen zusammengestellt.

Beispiel II. Die Versuchsmaschine (mit Polschuhen) lief mit breiten Kohlenbürsten $b_1 = 30$ mm, $i_n = 3,0$ Amp. und $n = 300$. In Fig. 22 a sind zunächst die aufgenommenen Potentialkurven für Leerlauf ($J = 0$), P_0 , Belastung $J_b = 60$ Amp., $P_{b'}$ und Kurzschluss $J_k = 60$ Amp., $P_{k'}$ und $J_k = 100,5$ Amp., $P_{k''}$ dargestellt. Die Bürsten stehen hier, wie aus der Feldkurve I (Fig. 22 b) und der Leerlaufpotentialkurve P_0 ersichtlich, in der geometrisch neutralen Zone. Die durch Superposition aus Leerlauf und Kurzschluss erhaltene Kurve $P_{s'}$ stimmt mit

	Bürstenstellung I						Bürstenstellung II			Bürstenstellung III		
	60 Amp.			40 Amp.			84 Amp.			60 Amp.		
	$P_{k''}$	$P_{b''}$	$P_{s''}$	$P_{k'}$	$P_{b'}$	$P_{s'}$	P_k	P_b	P_s	P_k	P_b	P_s
e_u	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_w s_u$	0,099	0,075	0,099	0,053	0,0502	0,0522	0,101	0,0895	0,1376	0,0876	0,1224	0,106
s_u	15,3	15,3	15,3	10,2	10,2	10,2	21,5	21,5	21,5	15,3	15,3	15,3
R_w	0,00646	0,00492	0,00646	0,0052	0,00492	0,00512	0,00761	0,0042	0,00588	0,00572	0,0076	0,00693
Spannung an der ablaufenden Kante (Volt)	0,3	0,24	0,284	0,174	0,15	0,158	0,438	0,157	0,266	0,298	0,381	0,384

Fig. 22.

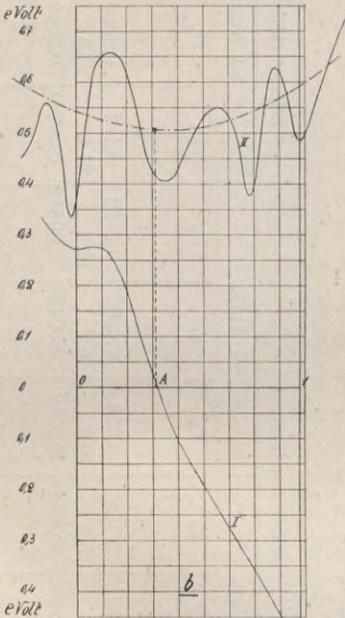
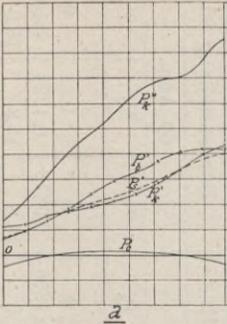
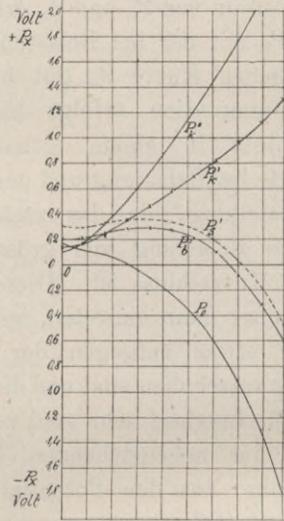


Fig. 23.



P_0	$J = 0$ Amp.
P_b'	$J_b = 60$ "
P_k'	$J_k = 60$ "
$\bar{P}_s' = \bar{P}_b' + \bar{P}_k'$	$J = 60$ "
P_k''	$J_k = 104$ "

Untersuchung der Kommutation bei Kurzschluss. Beispiel II.

- a) P_0 $J = 0$ Amp.
- P_b' $J_b = 60$ "
- P_k' $J_k = 60$ "
- $\bar{P}_s' = \bar{P}_b' + \bar{P}_k'$ $J = 60$ "
- b) Kurve I: Feldkurve $i_n = 3,0$ Amp.,
 $J = 0$ Amp.
- " II: Feldkurve $J_k = 100,5$ "

der Belastungspotentialkurve P_b' gut überein. Die Maschine läuft bei dieser Bürstenstellung zwischen 0 und 80 Amp. funkenfrei, mit 100,5 Amp. bei Kurzschluss und Belastung an der Funkengrenze.

Die Feldkurve II (Fig. 22b), die für $J_k = 100,5$ Amp. erhalten wurde, entspricht, wie eine Nachrechnung anzeigt, fast ganz der λ_q -Kurve, die wir aus Fig. 17 und dem Ankerfelde für $J = 40$ Amp. erhielten. Es ist z. B. für den Punkt A:

$$2 e_q = 0,51 \text{ Volt,}$$

ferner

$$A S = 125, v = 3,85 \text{ m/Sek., } l_i = 29 \text{ cm}$$

und somit

$$\lambda_q = \frac{2 e_q \cdot 10^6}{2 \frac{N}{K} \cdot A S \cdot v \cdot l_i} = \frac{2 e_q \cdot 10^3}{112} = 4,55.$$

Für denselben Punkt am Ankerumfang erhielten wir aus Fig. 17

$$\lambda_q = 4,63.$$

Ebenso ergaben sich für eine Bürstenstellung, bei der die Bürsten um ca. 17° aus der geometrisch neutralen Zone in der Drehrichtung verschoben wurden, die in Fig. 23 für $J_b = 60$ Amp. und $J_k = 60$ Amp. dargestellten Potentialkurven. Die Maschine läuft bei dieser Stromstärke und $n = 300$ Umdrehungen pro Min. bei Kurzschluss und Belastung funkenfrei; mit 104 Amp. lief die Maschine bei Belastung funkenfrei, bei Kurzschluss mit geringer Funkenbildung.

Beispiel III. In Fig. 24a sind die Potentialkurven für eine Maschine der Gesellschaft für elektrische Industrie Karlsruhe für 110 Volt, 80 Amp. und 800 Umdrehungen pro Min. dargestellt. Die Bürsten sind nur ganz wenig aus der neutralen Zone verschoben. Die Maschine lief mit $n = 800$ bei dieser Bürstenstellung zwischen Leerlauf und Vollast und bei Kurzschluss mit normalem Strome funkenfrei. Die Potentialkurven für

$$J_b = 0, 40 \text{ und } 82 \text{ Amp.,}$$

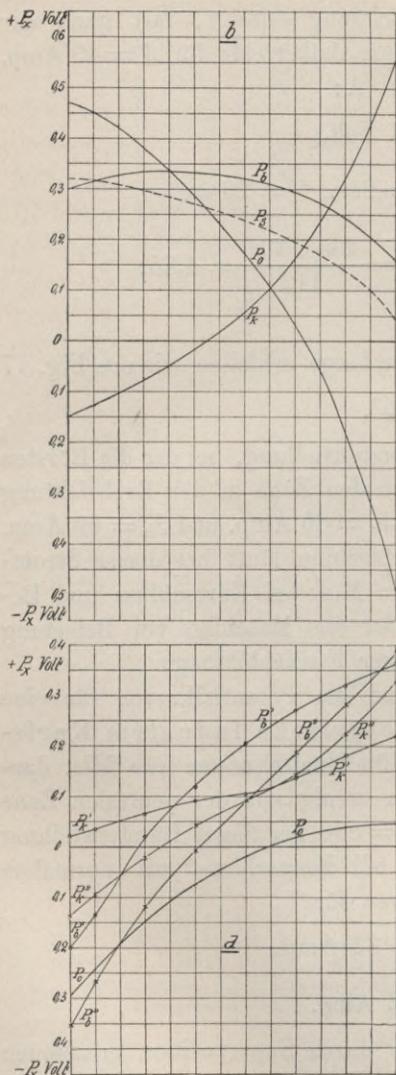
sowie für

$$J_k = 40 \text{ und } 82 \text{ Amp.}$$

sind aus der Figur ersichtlich. Die durch Superposition erhaltenen Belastungspotentialkurven ergeben gute Uebereinstimmung mit den für Belastung tatsächlich erhaltenen. (Die ersteren sind hier mit Rücksicht auf die Deutlichkeit der Figur fortgelassen.)

Fig. 24b zeigt die Potentialkurven für Leerlauf, normale Belastung und Kurzschluss mit normalem Strome. Die Bürsten sind hier in das für Belastung (normal) richtige Feld eingestellt. Die Maschine lief bei dieser Bürstenstellung funkenfrei zwischen Leerlauf und Normallast.

Fig. 24.



Untersuchung der Kommutation bei Kurzschluss. Beispiel III.

- a) P_0 $J = 0$ Amp.
- $P_{b'}$ $J_b = 40$ "
- $P_{k'}$ $J_k = 40$ "
- $P_{b''}$ $J_b = 82$ "
- $P_{k''}$ $J_k = 82$ "
- b) P_0 $J = 0$ "
- P_b $J_b = 80$ "
- P_k $J_k = 80$ "
- $\bar{P}_s = \bar{P}_0 + \bar{P}_k$. . . $J = 80$ "

Beispiel IV. Für eine 22 KW.-Maschine (Gasdynamo) sind in Fig. 28 a die für normale und konstant gehaltene Erregung bei 0, 1/2, 3/4, 4/4 und ca. 5/4 Belastung aufgenommenen Bürstenpotentialkurven dargestellt. Die Bürsten sind hier so eingestellt, dass für Halblast, $J_b = 100$ Amp., die Kommutation mit annähernd konstanter Stromdichte erfolgt. Die bei derselben Bürstenstellung und bei Kurzschluss mit den Strömen $J_k = 100, 150$ und 200 Amp. erhaltenen Potentialkurven (Fig. 28 b) ergeben, mit der Leerlaufpotentialkurve superponiert, Kurven, die mit den bei den entsprechenden Belastungen aufgenommenen gut übereinstimmen. Es entspricht in Fig. 28 b bzw. a:

- Kurve I . . . $J_b = 100$ Amp.
- " II . . . $J_b = 150$ "
- " III . . . $J_b = 200$ "

Diese Beispiele, welche an Maschinentypen mit den verschiedensten Sättigungsverhältnissen, Polschuhformen und Wickelungsanordnungen erhalten wurden, mögen genügen, um zu beweisen, dass die Superposition von Leerlauf- und Kurzschlusspotentialkurven mit genügender Annäherung den Verlauf der Belastungspotentialkurve ergibt.

Die Abweichungen rühren zum Teil von Verschiedenheiten her, welche für die verschiedenen Strom-

dichteverteilungen die Potentialdifferenz e_u und der Widerstand R_w erleidet. Diese Einflüsse sind jedoch rechnerisch nicht zu verfolgen, weshalb wir in diesem Falle am sichersten gehen, wenn wir e_u bei der Superposition vernachlässigen. Dies ist auch schon dadurch gerechtfertigt, dass es sich hier weniger um absolute Werte, als nur um die Beurteilung des charakteristischen Verlaufes handelt. Die scheinbare E.M.K. der Selbstinduktion wird ferner, entsprechend den verschiedenen zusätzlichen Strömen für Belastung und Kurzschluss, nicht dieselbe bleiben, was insbesondere bei grösseren Bürstenverstellungen zu beträchtlichen Abweichungen führen könnte.

Im allgemeinen ergibt sich nun, dass die Uebereinstimmung eine um so bessere ist, je weniger die Bürsten aus der neutralen Zone verschoben sind, also überall dort, wo man die Gültigkeit der Superposition der zusätzlichen E.M.Ke. voraussetzen darf.

Es wird nun von einigen Firmen der funkenfreie Lauf einer Maschine bei kurzgeschlossener Armatur als ein Kriterium für einen ebenfalls funkenfreien Lauf bei der normalen Belastung und derselben Bürstenstellung aufgefasst.

Wir wollen untersuchen, innerhalb welcher Belastungsgrenzen und bei welcher Bürstenverstellung ein funkenfreier Lauf bei Kurzschluss möglich sein muss, damit man ein sicheres Urteil über die Kommutation bei Belastung erhält.

Nehmen wir zunächst an, die Bürsten stehen in dem für Halblast richtigen Felde, so dass für diese Belastung $e_z = 0$, also

$$e_k = e_m + e_q + i_a R \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right).$$

Nach S. 359 erhalten wir bei Kurzschluss und dem halben normalen Strom ein Feld, dem die in der kurzgeschlossenen Spule induzierte E.M.K.

$$e' = - \left(e_m + e_k + i_a R \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right] \right)$$

entspricht. Für einen geradlinigen Verlauf der Kurzschlussstromkurve bei kurzgeschlossener Armatur ist die kommutierende E.M.K.

$$e_k' = e_k = e_m + e_q + i_a R \left(\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right)$$

erforderlich, so dass

$$e' - e_k' = e_z' = - 2 \left(e_m + e_q + i_a R \left[\frac{t}{T} - \frac{1}{2} \right] \right)$$

wird.

Wir erhalten in diesem Falle (kurzgeschlossene Armatur und halber normaler Strom) die grösste zusätzliche E.M.K., die zwischen Leerlauf und Volllast auftreten kann. Die Forderung, dass bei dieser zusätzlichen E.M.K. die Maschine ohne Funkenbildung läuft, ist vollkommen gerechtfertigt.

Bei normaler Volllast oder bei Leerlauf arbeitet die Maschine, wenn die Kommutation bei Halblast mit konstanter Stromdichte erfolgt, nur mit der Hälfte dieser berechneten zusätzlichen E.M.K. Es bietet daher der funkenfreie Lauf bei Kurzschluss und dem halben normalen Strome genügende Sicherheit, um auch eine funkenfreie Stromwendung bei normaler Volllast und derselben Bürstenstellung erwarten zu dürfen.

Stehen die Bürsten in der geometrisch neutralen Zone, dann entspricht die Feldvariation zwischen Leerlauf und normaler Belastung fast demselben Felde, in dem bei Kurzschluss mit dem normalen Strome kommutiert wird. Dies ist auch leicht erklärlich, wenn man die Feldkurven für das Polfeld und Ankerfeld betrachtet (s. Fig. 20). Bei Kurzschluss haben wir bei dieser Bürstenstellung in der Kommutierungszone ein Feld, das dem Ankerfelde entspricht; bei Belastung hingegen ein Feld, das an dieser Stelle durch Superposition des Leerlauf- und Ankerfeldes gebildet wird. Das resultierende Feld in der Kommutierungszone bei Belastung wird somit umso weniger von demjenigen abweichen, in welchem bei Kurzschluss kommutiert wird, je flacher die Feldkurve für Leerlauf verläuft. Die zusätzlichen E.M.Ke. für Leerlauf und Kurzschluss und bei normaler Belastung sind daher annähernd die gleichen, ebenso die Kommutationsverhältnisse (s. z. B. Fig. 21 I oder 22a). Letztere entsprechen den ungünstigsten Bedingungen, die überhaupt beim normalen Betriebe auftreten können; man kann hieraus schliessen, dass eine Maschine, die bei dieser Bürstenstellung und Kurzschluss funkenfrei den normalen Strom kommutiert, auch normal belastet ohne Funkenbildung laufen wird.

Es ist nun für verschiedene Maschinentypen mehr oder weniger Erfahrungssache, inwiefern bei in geometrisch neutraler Zone stehenden Bürsten ein funkenfreier Lauf zwischen Leerlauf und Volllast möglich ist, und man hat hiernach seine Forderungen¹⁾ in Betreff der für die Untersuchung bei Kurzschluss zu wählenden Maximalstromstärke zu stellen.

¹⁾ Dr. Behn-Eschenburg, E.T.Z. 1902, S. 1058.

Von normalen und richtig dimensionierten Maschinen wird man in allen Fällen verlangen können, dass dieselben in der für Halb- last richtigen Bürstenstellung und bei Kurzschluss $\frac{1}{2}$ bis $\frac{3}{4}$ der normalen Stromstärke, und für in geometrisch neutraler Zone stehenden Bürsten und bei Kurzschluss $\frac{3}{4}$ bis $\frac{4}{4}$ des normalen Stromes funkenfrei oder mindestens an der Funkengrenze kommutieren.

Ein ergänzendes Bild über die Kommutationsverhältnisse erhält man jedoch in jedem Falle immer erst dann, wenn man nebst der Untersuchung des Kurzschlusses auch den Leerlauf bei der normalen Erregung und derselben Bürstenstellung beobachtet.

IX. Vorgang bei der experimentellen Beurteilung der Kommutation. (Beispiel.)

Die Ursachen zur Funkenbildung bei den für eine bestimmte Maschine zulässigen Belastungen sind entweder durch konstruktive Mängel bedingt, oder sie entstehen erst während des Betriebes durch ungenügende Wartung des Kollektors und der Bürstenapparate. Letztere Ursachen sind leicht zu erkennen und daher auch verhältnismässig einfach zu beheben. Ungleich wichtiger ist die durch konstruktiven Aufbau hervorgerufene Funkenbildung am Kollektor. Von allen den hier massgebenden Faktoren (s. Arnold, Gleichstrommaschine, Bd. 1) sollen jedoch nur die für die experimentelle Beurteilung der Kommutationsvorgänge am meisten in Betracht kommenden behandelt werden.

Diese sind:

1. Einfluss der Konstruktion der Polschuhe mit Rücksicht auf die magnetische Leitfähigkeit für den Querkraftfluss und den Verlauf des Polfeldes in der Kommutierungszone.
2. Anordnung der Wicklung und Unterbringung der Armaturleiter auf dem Anker.
3. Dimensionierung und Konstruktion des Kollektors und der Stromabnehmer.

Wie wir aus der Behandlung der Bürstenpotential- und Kurzschlussstromkurven ersehen haben, sind die unter Einfluss einer bestimmten Polschuhform bei verschiedenen Belastungen auftretenden Feldvariationen aus dem Verlaufe derselben zu erkennen. Auf die Grösse der Feldvariationen wirkt in erster Linie die Grösse der spezifischen Leitfähigkeit λ_q für den Querkraftfluss, und die Armaturselbstinduktion und gegenseitige Induktion ein. Wie sich aus der Betrachtung

tung der Grössen für e_q und e_m ergibt, besitzt jedoch die durch den Querkraftfluss induzierte E.M.K. e_q den grössten Anteil. Bei der jetzt allgemein üblichen Bauart von Gleichstrommaschinen sind die berechneten Werte von λ_m und $k_s \cdot \lambda_L$ mehr oder weniger von der gleichen Grössenordnung (s. Arnold, Bd. I, 391 und 392), während λ_q je nach der Grösse von $\alpha_i = \frac{b_i}{\tau}$ und je nach der Form und Sättigung der Polspitzen innerhalb weiterer Grenzen schwankt. Mit der Anordnung der Armaturleiter ist man im allgemeinen an bestimmte Grenzen gebunden, die durch die Zahnsättigung und die Rücksichtnahme auf Wirbelstromverluste in den Armaturleitern und Polschuh, die Anwendung von ganz aussergewöhnlichen Verhältnissen zwischen Nutenhöhe und Nutenbreite ausschliessen. Liegen dann noch die gleichzeitig im Kurzschluss befindlichen Spulenseiten nicht in zu verschiedenen kommutierenden Feldern, worüber eine Kontrolle der Anzahl der zwischen den Polspitzen liegenden Nuten $\frac{\tau - b_i}{t_1} = \frac{(1 - \alpha_i) \tau}{t_1}$ Aufschluss gewährt, so hat man die grösste Aufmerksamkeit einer richtigen Formgebung der Polschuhe und der Sättigung der Polspitzen zuzuwenden.

Von diesen Gesichtspunkten haben wir auch bei der Untersuchung der Kommutation einer Maschine auszugehen. Da sich im Verlaufe der experimentell bei irgend einer Bürstenstellung und Belastung aufgenommenen Bürstenpotentialkurve stets das Zusammenwirken aller dieser Faktoren äussert, so werden wir, um ein vollständiges Kriterium über die Kommutationsverhältnisse zu erhalten, nebst der experimentellen Beobachtung, auch eine Kontrolle über die Wicklungsverhältnisse, der Spannung zwischen benachbarten Kollektorlamellen und der Werte von $\frac{N}{K} \cdot AS \cdot l_i \cdot v \cdot 10^{-6}$, α_i , λ_q , λ_m , $\lambda_L k_s$ auszuführen haben.

Liegt eine fertige Maschine vor, so wird sich nun für die Untersuchung der Kommutation am besten diejenige Bürstenstellung eignen, bei welcher bei Halblast mit konstanter Stromdichte kommutiert wird. Diese wird bei allen Maschinen mit nur halbwegs richtig dimensionierter Polschuhform durch einen Vorversuch leicht zu ermitteln sein, indem man die Maschine mit normaler Klemmenspannung und dem halben Strome laufen lässt. Während man die Bürsten verstellt, hat man durch Messung der Bürstenpotentiale diejenige Stellung ausfindig zu machen, bei welcher die Bürstenpotentialkurve nur positiv bzw. negativ und möglichst flach und geradlinig verläuft.

Die bei dieser Bürstenstellung bei Leerlauf, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{4}{4}$ und $\frac{5}{4}$ Belastung aufgenommenen Bürstenpotentialkurven lassen dann eine Beurteilung der Feldvariationen zwischen Leerlauf und Belastung gegenüber dem Felde bei Halblast zu. Die bei Volllast in der Bürstenpotentialkurve im allgemeinen ausgeprägte Verzögerung der Kommutierung oder Unterkommutierung wird um so kleiner sein, je geringer im wesentlichen λ_q ist; ferner wird die für Leerlauf erhaltene Kurve um so weniger steil ansteigen, je flacher das Feld in der Kommutierungszone verläuft. Je weniger also die für verschiedene Belastungen sich ergebenden Potentialkurven im charakteristischen Verlauf von der für Halblast abweichen, und je geringere Potentialdifferenzen die für Leerlauf erhaltene Kurve aufweist, desto stabiler ist das Feld und desto besser wird die Maschine bei konstanter Bürstenstellung die Bedingung eines funkenfreien Laufes bei den geringsten Kollektorübergangsverlusten erfüllen.

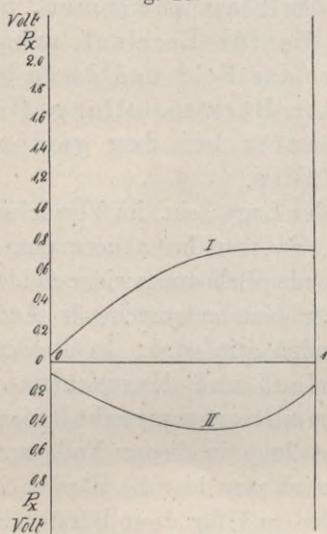
Man wird nun nicht immer in der Lage sein, im Versuchsraume einer Fabrik voll belasten zu können, da man bei abnormalen Spannungen einerseits nicht über genügende Belastungswiderstände verfügen wird, andererseits nicht immer eine entsprechende Antriebsenergiequelle für grosse Typen vorhanden sein wird. In diesem Falle lässt die Untersuchung bei Leerlauf und Kurzschluss eine vollständige Beurteilung der Kommutierungsverhältnisse zu. Da die für Halblast richtige Bürstenstellung in diesem Falle nur umständlich gefunden werden kann, so wird man hier die Bürsten in die geometrisch neutrale Zone einstellen und für diese Bürstenstellung die Bürstenpotentialkurven aufnehmen, wenn die kurzgeschlossene Armatur $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ und $\frac{4}{4}$ des normalen Stromes führt. Die durch Superposition erhaltenen Potentialkurven werden dann eine ähnliche Beurteilung über die Feldvariationen zwischen Leerlauf und Volllast zulassen, wie die direkt bei Belastung aufgenommenen. Die Bürstenstellung in der neutralen Zone kann experimentell sehr leicht aufgefunden werden, indem man bei fremder Erregung mit dem normalen Erregerstrom durch die Aufnahme der Bürstenpotentialkurven diejenige Stellung aufsucht, bei welcher die Leerlaufpotentialkurve zweimal die Abscissenachse schneidet (s. Fig. 19 I).

Bei kurzgeschlossener Maschine lässt sich auch ohne viel Energieaufwand eine Dauerprobe der stromführenden Maschine leicht durchführen, aus welcher man Aufschlüsse über die Erwärmung der Armatur, des Kollektors und der Stromabnehmer erhält. Es wäre daher gerade

diese letztere Untersuchungsmethode¹⁾, selbst wenn die Belastung direkt untersucht werden kann, für alle Maschinen zu empfehlen.

Die Aufnahme der Potentialkurven ist nach der auf S. 323 und 374 angegebenen Versuchsanordnung wohl an allen Maschinen und ohne besondere Vorrichtungen leicht durchzuführen. Um Irrtümern vorzubeugen, untersucht man vor dem Versuche die Polarität der Bürsten, an welchen die Potentialkurven aufgenommen werden und legt ein für allemal bestimmte Vorzeichen für die Auftragung der Potentiale fest. In der vorliegenden Arbeit (s. Fig. 7) beziehen sich die positiv bzw.

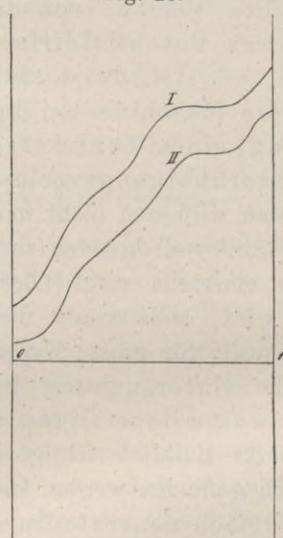
Fig. 25.



Bürstenpotentialkurven, an verschiedenen Bürstenstiften gemessen.

I negative, II positive Bürste.

Fig. 26.



Einfluss der Temperatur.

Kurve I im kalten Zustande,
J = 100 Amp.

Kurve II im warmen Zustande,
J = 100 Amp.

negativ aufgetragenen Werte für P_x stets auf das Potential der Bürste.

Wesentlich ist ferner noch die Beschaffenheit des Kollektors und das gleichförmige Aufliegen sämtlicher Bürsten. An Kollektoren, die geschmiert werden, oder die durch die Bürsten angefressen bzw. stark geschwärzt sind, kann man keine brauchbaren Messresultate erzielen. Bei Maschinen mit vielen Bürstenstiften ist es ferner zweckmässig, die Potentialmessungen an verschiedenen Bürsten vorzunehmen, da in diesem

¹⁾ Siehe Dr. Behn-Eschenburg, E.T.Z. 1902.

Falle die Bürsten einerseits gegenseitig verschoben sein können, andererseits nicht alle Bürstenstifte gleichförmig an der Stromabnahme teilnehmen könnten. Bei Schleifenwicklungen können derartige Unsymmetrien nur durch ungleiche, von den Polen austretende Kraftflüsse, oder durch excentrische Lagerung des Ankers hervorgerufen werden.

Bei Wellenwicklungen hingegen ist letzteres ganz besonders zu beachten, da dieselben aus nicht in sich abgeschlossenen, sondern aus durch die Bürsten verketteten Stromkreisen bestehen. Die Gesamtstromstärke verteilt sich dann, wenn keine Aequipotentialverbindungen vorhanden sind, auf die einzelnen Bürstenstifte, entsprechend dem reciproken Werte der Widerstände der einzelnen Bürstensätze¹⁾. Ist also ein Bürstensatz weniger gut eingelaufen, so nimmt er weniger Strom ab als der benachbarte. Bei einer Maschine für 65 KW. $p = 3$ und $a = 3$, wurden so z. B. für zwei benachbarte Bürstenstifte die in Fig. 25 dargestellten Potentialkurven bei einer gelieferten Stromstärke von $J = 355$ Amp. erhalten. Unter Einfluss der grösseren Stromdichte werden sich nun auch die betreffenden Bürsten erwärmen, wodurch bei Kohlenbürsten der Widerstand rasch abfällt und die Stromabnahme vom Kollektor nur noch ungleichförmiger wird. Dadurch erklärt sich auch, dass bei solchen Maschinen mitunter während des Betriebes der eine oder der andere Bürstensatz plötzlich zu feuern anfängt. Die Potentialkurven, die an der Versuchsmaschine einmal bei kalten Kohlen, das anderemal bei durch den Stromdurchgang erwärmten Kohlen gemessen wurden, zeigt die Fig. 26.

Es geht schon daraus hervor, dass bei der Untersuchung der Bürstenpotentiale auch auf eine stationäre Temperatur Rücksicht genommen werden muss.

Beispiel für die Untersuchung der Kommutation.

Im folgenden soll an der Hand eines Beispielles kurz der Gang einer solchen Untersuchung erläutert werden.

Zur Untersuchung gelangte eine von einem Gasmotor angetriebene 22 KW.-Maschine für 120 bis 170 Volt und $n = 188$. Es ist $p = 4$, $a = 1$, Reihenschaltung, $N = 346$, $Z = 173$, $K = 173$, $AS = 145$,

$$\alpha_i = \frac{21,5}{29,9} = 0,72, \quad \frac{\tau(1 - \alpha_1)}{t_1} = \infty 6,$$

¹⁾ Siehe auch Niethammer, E.T.Z. 1902, S. 437.

4 Bürstenstifte mit je 4 Kohlenbürsten (le Carbone, Sorte o)

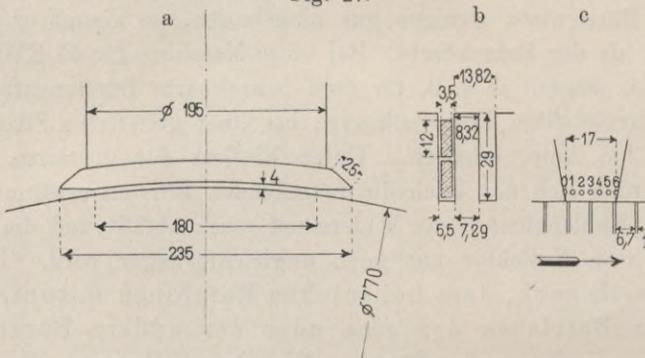
Breite $b_1 = 1,7$ cm,

Länge = 3,0 cm,

$$s_u = \frac{200}{2 \cdot 4 \cdot 1,7 \cdot 3} = 4,9 \text{ Amp./cm}^2.$$

Vor Beginn der Versuche lief die Maschine mit normaler Belastung während 3 Stunden. Die Bürstenpotentialkurven wurden an der positiven und negativen Bürste aufgenommen. Als Spannungsmesser diente ein Präzisions-Millivoltmeter von Siemens & Halske mit 100 Ohm

Fig. 27.



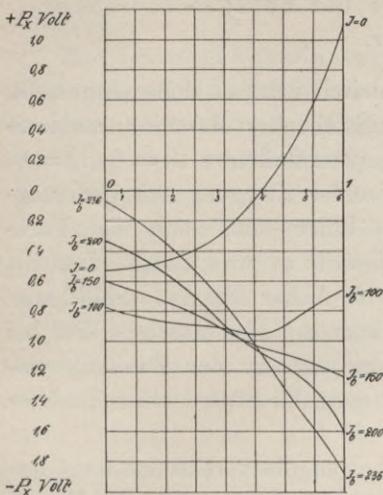
Widerstand. Die Potentiale wurden zwischen zwei Spitzen gemessen, wovon die eine jeweils an einen der auf der Kohle markierten Punkte (Fig. 27c), die andere auf das am glatten Kollektorumfang deutlich sichtbare Spiegelbild der entsprechenden Kohlenmarke gehalten wurde.

1. Untersuchung bei normal erregter Maschine.

Durch einen Vorversuch wurde die Bürstenstellung ermittelt, bei welcher für Halblast $J = 100$ Amp., $E_k = 120$ Volt, die Potentialkurve am flachsten und annähernd geradlinig verlief. Die bei der so gefundenen Bürstenstellung und bei konstanter Klemmenspannung $E_k = 120$ Volt für die Ströme $J = 100, 150, 200$ und 236 Amp. aufgenommenen Bürstenpotentialkurven zeigt Fig. 28 a. (In derselben sind bloss die für die positive Bürste erhaltenen Werte aufgetragen, da die an der negativen Bürste erhaltenen im charakteristischen Verlaufe dem Spiegelbild in Bezug auf die Abscissenachse entsprechen.)

Bei 236 Amp. lief die Maschine mit minimaler Funkenbildung, zwischen Normallast und Leerlauf funkenfrei. Die im Verlauf der

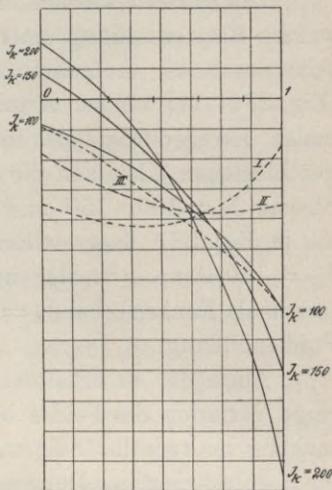
Fig. 28 a.



Untersuchung bei für Halblast richtig eingestellten Bürsten und normaler Erregung.

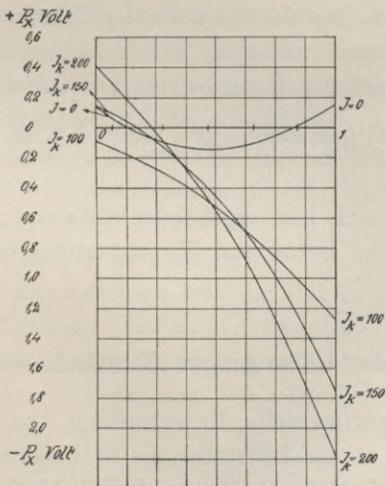
Fig. 28 b.

Kurve I: $(\bar{P}_0 + \bar{P}_k) \dots J = 100$ Amp.
 „ II: $(\bar{P}_0 + \bar{P}_k) \dots J = 150$ „
 „ III: $(\bar{P}_0 + \bar{P}_k) \dots J = 200$ „



Untersuchung bei für Halblast richtig eingestellten Bürsten und kurzgeschlossener Armatur.

Fig. 28 c.



Untersuchung bei Kurzschluss und bei in geometrisch neutraler Zone stehenden Bürsten.

Potentialkurven bei zunehmender Belastung ausgeprägte zunehmende Verzögerung des Kommutierungsvorganges ist hier sehr gering.

2. Untersuchung der Maschine bei kurzgeschlossener Armatur.

Die Bürsten wurden in die geometrisch neutrale Zone eingestellt, welche Bürstenstellung einerseits bei stillstehender Maschine, andererseits durch die Aufnahme der Bürstenpotentialkurve $J = 0$ ($i_a = 0$) (Fig. 28 c) bei offener Armatur und fremder Erregung mit dem normalen Erregerstrom ermittelt wurde. Indem man nun bei kurzgeschlossenen Klemmen die Maschine jeweils so weit erregt, dass die Ströme $J_k = 100, 150$ und 200 Amp. im Anker fließen, erhält man die in Fig. 28 c dargestellten Potentialkurven. Die Maschine lief bei $J_k = 150$ Amp. ($\frac{3}{4}$ der normalen Belastung) an der Funkengrenze (minimale Funken); bei $J_k = 200$ Amp. (normaler Strom) mit schwacher Funkenbildung.

Auch die so erhaltenen Kurven zeigen die verhältnismässig geringe Variation des Feldes bei der Belastungsänderung. Um die Untersuchung zu vervollständigen, sind auch noch in Fig. 28 b die bei der für Halblast richtigen Bürstenstellung und bei kurzgeschlossener Armatur für die Ströme $J_k = 100, 150$ und 200 Amp. gemessenen Bürstenpotentialkurven aufgetragen, welche, mit der bei Leerlauf und normaler Erregung erhaltenen Kurve superponiert, genau dasselbe Bild über die Feldvariation ergeben, wie das bei normaler Belastung gefundene. Die Verstellung der Bürsten zwischen der neutralen Zone und der für Halblast richtigen Bürstenstellung betrug, am Kollektorumfange ($D_k \cdot \pi = 45 \cdot \pi = 141,5$ cm) gemessen, nur $1,8$ cm, d. h. ca. $\frac{1,8}{0,77} = 2,32$ Lammellenbreiten.

Fasst man die sich hier ergebenden Resultate zusammen, so kann man die Maschine in Bezug auf Kommutationsverhältnisse als sehr günstig bezeichnen.

X. Untersuchung der Uebergangswiderstände von Kupferbürsten.

Ueber die experimentelle Untersuchung von Kupferübergangswiderständen liegen in der Litteratur die Beobachtungswerte von Prof. Arnold, E.T.Z. 1899, S. 5, Dettmar, E.T.Z. 1900, S. 429 und Hellmund, E.T.Z. 1902, S. 824 vor.

Im folgenden soll daher nur das über die Uebergangswiderstände gesagt werden, was für die Beurteilung derselben für den Kommutierungsvorgang bei Kupferbürsten, insbesondere für die Betrachtung des Wider-

standes des Kurzschlussstromkreises und der Uebergangsverluste notwendig ist.

Den Uebergangswiderstand zwischen einer Kupferbürste und einem rotierenden Kollektor oder Schleifring wollen wir als Verhältnis von gemessenem Spannungsabfall zwischen Bürste und Kollektor zu dem übertretenden Strom I definieren, welcher den ersteren erzeugt.

Dieser so erhaltene Widerstand auf die Flächeneinheit der Auflagerfläche reduziert, ergibt den spezifischen Uebergangswiderstand R_k .

Die Versuche wurden mit Kupfergazebürsten durchgeführt. Der Auflagerdruck wurde sowohl bei ruhendem, als rotierendem Kollektor mittels einer Wage gemessen, an deren einem Balken die Bürste befestigt war. Auf die Schale des anderen Balkens wurden immer so viel Gewichte gelegt, bis sich die Bürste vom Kollektor abhob und den schmalen Lichtspalt¹⁾ einer in der Visierebene aufgehängten Glühlampe sehen liess. Nun wurden wieder so viel Gewichte abgenommen, bis sich die Bürste auf den Kollektor ohne Druck auflegte und der Lichtspalt verschwand. Die halbe Differenz aus den Gewichten, die aufgelegt wurden, bis sich die Bürste abhob, gegen die, bei welchen sich die Bürste wieder aufsetzte, ergab den Auflagerdruck, der im folgenden stets auf 1 cm² der Auflagerfläche reduziert wurde.

Die genaue Bestimmung der Auflagerfläche ist bei Kupferbürsten schwierig, da sich die Bürstenkanten stets etwas ausfranzen und auch infolge des losen Geflechtes sich oft einzelne Schichten loslösten und so Zwischenräume bildeten, welche die Auflagerfläche unterbrachen. Nach jedem Versuche wurden daher die Bürsten abgenommen, die Auflagerflächen mit feinem Graphitstaube bestreut und der so auf Papier erhaltene Abdruck mehrmals planimetriert.

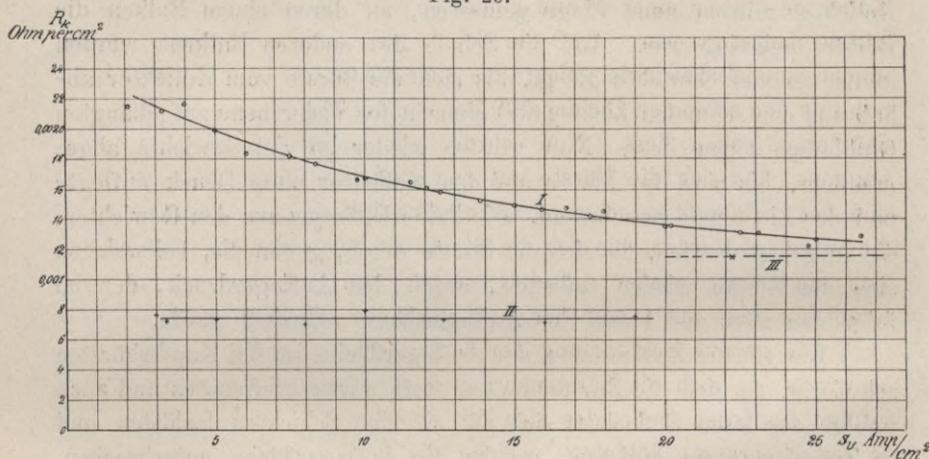
Die Versuchsanordnung war die folgende. Auf einem isolierenden Bürstentift wurden die beiden Bürstenträger so aufgesetzt, dass die auf- und ablaufenden Bürstenkanten in Bezug auf die Längsrichtung des Kollektors sich deckten. Die Stromzufuhr erfolgte von den Bürstenträgern aus, die Messung des Spannungsabfalles in den beiden in Serie geschalteten Uebergangsschichten durch ein Westonmillivoltmeter. Die Drähte für die Spannungsmessung waren unmittelbar oberhalb der Auflagerfläche von der Bürste abgezweigt.

Die Fig. 29 zeigt den spezifischen Uebergangswiderstand R_k in

¹⁾ Dr.-Ing. M. K a h n, Der Uebergangswiderstand von Kohlenbürsten (Enke). Sammlung elektrotechnischer Vorträge. V.

Abhängigkeit von der Stromdichte s_u bei konstanter Kollektorgeschwindigkeit $v_k = 6,11$ m pro Sek. und $v_k = 0$, (Kurven I und II). Der Auflagerdruck musste hier etwas gross, gleich 280 g pro cm^2 gewählt werden, da infolge der stark vibrierenden Bürstenstifte eine Messung bei niederem Auflagerdrucke nicht möglich war. Dieser Auflagerdruck brachte mit sich, dass sich der Kollektor etwas rauh schliiff. Von einem Oelen des Kollektors wurde Abstand genommen, da in diesem Falle eine Messung zu unzuverlässig schien und trotz mehrfacher Versuche keine diskutierbaren Kurven erhalten werden konnten. Ebenso musste von einer Messung der Widerstände einer einzelnen Uebergangsschicht zum Zwecke des Studiums des verschiedenen Verhaltens bei Uebertritt

Fig. 29.



Abhängigkeit des Uebergangswiderstandes R_k von der Stromdichte s_u .
Auflagerdruck 280 g pro cm^2 .

Kurve I: $v_k = 6,11$ m/Sek.; Kurve II: $v_k = 0$; Kurve III (Hellmund): $v_k = 8$ m/Sek.

des Stromes von Kollektor zur Bürste und umgekehrt abgesehen werden, da sich wegen der Kleinheit der hier zu messenden Grössen ein Unterschied nur unsicher feststellen liess.

Bei der wiedergegebenen Kurve Fig. 29, I und II (Tabelle untenstehend) betrug die Auflagerfläche der einen Bürste $0,99$ cm^2 , die der anderen $0,9$ cm^2 . Als Mittelwert wurde $F_u = 0,945$ cm^2 eingeführt. Es ist demnach

$$s_u = \frac{i}{F_u} \text{ Amp./cm}^2$$

und

$$R_k = \frac{e}{2 \cdot s_u} \text{ Ohm eines cm}^2,$$

wenn i den Strom in Amp. und e die gemessene Spannung an zwei hintereinander geschalteten Uebergangsschichten in Volt darstellt.

Aus Beobachtung berechnet				Aus Kurve I (Fig. 29)			Temperatur
$s_u = 1,058 i$	R_k	s_u	R_k	s_u	R_k	$P_g = s_u \cdot R_k$ Volt	
23,1	0,001212	12,1	0,001605	5,0	0,00199	$9,96 \cdot 10^{-3}$	Zu Beginn der Versuchsreihe $35^\circ C.$, zu Ende $35,6^\circ C.$ (gemessen an Bürste und Kollektor), Auflagerdruck 280 g/cm^2
24,75	0,001222	11,52	0,001647	7,5	0,00182	$13,65 \cdot 10^{-3}$	
26,5	0,001298	9,75	0,001656	10,0	0,00167	$16,7 \cdot 10^{-3}$	
23,1	0,001313	8,39	0,001772	12,5	0,00158	$19,75 \cdot 10^{-3}$	
20,2	0,001360	6,03	0,00184	15,0	0,00149	$22,35 \cdot 10^{-3}$	
17,95	0,001455	3,99	0,002163	17,5	0,00142	$24,9 \cdot 10^{-3}$	
16,71	0,001478	3,25	0,00212	20,0	0,00135	$27,0 \cdot 10^{-3}$	
15,9	0,00147	2,1	0,0215	22,5	0,00131	$29,5 \cdot 10^{-3}$	
13,85	0,001525			25,0	0,00127	$31,7 \cdot 10^{-3}$	

Bilden wir aus der Kurve $R_k = f(s_u)$ (Kurve I) die Abhängigkeit zwischen $s_u \cdot R_k$ und s_u , und tragen wir diese Funktion graphisch auf, so erhalten wir die in Fig. 30 mit \circ markierten Punkte.

Nun können wir die Abhängigkeit zwischen R_k und s_u durch die Gleichung

$$R_k = \frac{\alpha}{s_u} + \beta^1)$$

ausdrücken, worin α und β Konstanten sind, die von der Beschaffenheit der Auflagerflächen, dem Bürsten- bzw. Kollektormaterial und dem Auflagerdrucke abhängen.

Diese Gleichung auf die Kurve C (Fig. 30) angewendet, ergibt für

$$\alpha = 0,0064$$

und

$$\beta = 0,00103,$$

so dass

$$R_k = \frac{0,0064}{s_u} + 0,00103.$$

Diese Formel gibt für Stromdichten unter 7 Amp./cm^2 etwas zu grosse Werte, während sie für die normalen Stromdichten

$$10 \text{ bis } 25 \text{ Amp./cm}^2$$

sehr gute Uebereinstimmung liefert.

¹⁾ Siehe Arnold, Bd. I, S. 487.

In Fig. 30 sind noch Beobachtungswerte, welche aus den Versuchen von Prof. Arnold, Dettmar und Hellmund entnommen wurden, durch die Beziehungen $R_k s_u = f(s_u)$ zusammengestellt.

Die Ergebnisse verschiedener Beobachter zeigen vor allem, dass die Differenzen innerhalb der gemessenen Werte sehr beträchtlich sind. Dettmar erhielt die grössten Werte für den Uebergangswiderstand, der Verfasser die kleinsten. Die Grössenordnung der von mir gemessenen Uebergangswiderstände stimmt mit den von Hellmund auf rauher, trockener Gleitfläche gemessenen überein, nur erhielt Hellmund den Widerstand als unabhängig von der Stromdichte (s. Fig. 29, Kurve III).

Ermittelt man die Konstanten α und β für die dargestellten Versuchsergebnisse, so ergibt sich für die Resultate von:

$$\text{Prof. Arnold } R_k = \frac{0,0064}{s_u} + 0,004 \quad (\text{Kurve A})$$

$$\text{Dettmar } R_k = \frac{0,1}{s_u} + 0,008 \quad (\text{Kurve D})$$

$$\text{Hellmund } R_k = \frac{0,1275}{s_u} + 0,0024 \quad (\text{Kurve H})$$

$$\text{Verfasser } R_k = \frac{0,0064}{s_u} + 0,00103 \quad (\text{Kurve C})$$

Diese gelten im allgemeinen für die Stromdichten zwischen 6 und 35 Amp./cm².

Sei $P_g = R_k \cdot s_u = \alpha + \beta \cdot s_u$, so erhalten wir für die Potentialdifferenz P_g bei zeitlicher und entlang der ganzen Auflagerfläche konstanter Stromdichte s_u die Gleichungen:

$$\text{Beobachter Prof. Arnold } P_g = 0,0064 + 0,004 s_u$$

$$\text{„ Dettmar } P_g = 0,1 + 0,008 s_u$$

$$\text{„ Hellmund } P_g = 0,1275 + 0,0024 s_u$$

$$\text{„ Verfasser } P_g = 0,0064 + 0,00103 s_u$$

Während bei Kohlenbürsten $P_g = R_k s_u$ mit grosser Annäherung konstant gesetzt werden konnte, ist dies bei Kupferbürsten nicht zulässig, weil bei den hier auftretenden grossen Stromdichten, bis zu 30 Amp./cm², der Teil der Potentialdifferenz, der von $\beta \cdot s_u$ herrührt, grösser ist, als der konstante, von der Stromdichte unabhängige Teil. Wie wir aus diesen Gleichungen ferner noch sehen können, schwankt α zwischen

$$0,0064 \text{ und } 0,1275,$$

während β nur zwischen

$$0,008 \text{ und } 0,00103$$

variiert.

Hieraus können wir schliessen, dass in der Grösse α zum grössten Teil der Einfluss der Gleitflächenbeschaffenheit, also der Einfluss der Reibungsverhältnisse liegt, während der absolute Wert von β offenbar nur das Material in Bezug auf seine Leitfähigkeit berücksichtigt. Tatsächlich ist die Konstante α , wie aus den Versuchen von Hellmund hervorgeht, bei vollständig rauher Auflagerfläche sehr klein, sogar Null, während sie bei vollständig glatter Auflagerfläche den Wert 0,1275 erreichen kann.

Dies sagt mit anderen Worten, dass, abgesehen von Temperatureinflüssen, die Abhängigkeit des Uebergangswiderstandes von der Stromdichte bei rotierendem Kollektor oder Schleifring, nur bei deutlich ausgebildeter homogener Uebergangsschicht (Grenzschicht) besteht; wo diese durch kleine Unebenheiten der Gleitfläche, welche durch das Einschleifen der Kupferbürsten entstehen, sich nicht ausbilden kann, verschwindet das Charakteristikum für die Abhängigkeit zwischen Uebergangswiderstand und Stromdichte. Bei Kohlen-

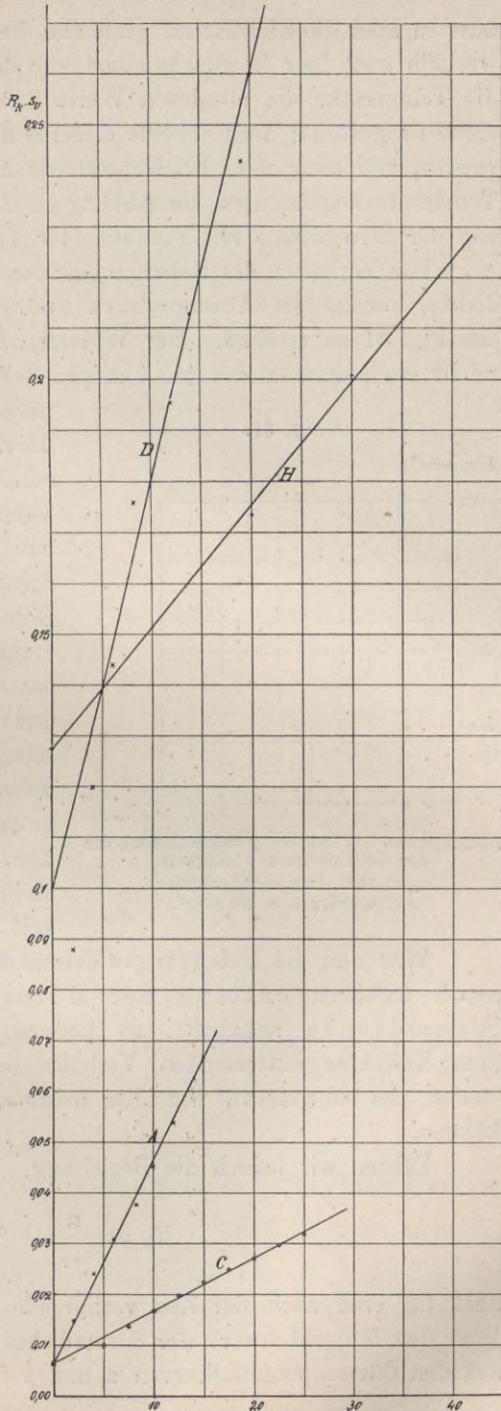


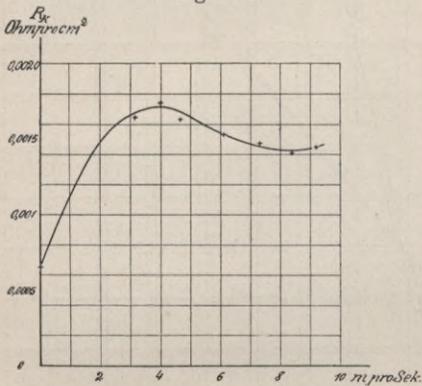
Fig. 30.

Die von verschiedenen Beobachtern erhaltenen Beziehungen zwischen $R_k s_u$ und s_u .

bürsten sind die Gleitflächen glatt und die Uebergangsschicht homogen, weshalb auch hier die Erscheinung sehr stark ausgeprägt ist. Inwiefern die Temperatur die absoluten Werte von α und β beeinflusst, wurde nicht festgestellt; doch scheint dieselbe nur auf die Konstante β einzuwirken, und zwar wird bei Kupferbürsten nach Massgabe des positiven Temperaturkoeffizienten die Abhängigkeit des Uebergangswiderstandes von der Stromdichte mit zunehmender Temperatur abnehmen.

Das Verhalten des Uebergangswiderstandes bei konstanter Stromdichte, konstantem Auflagerdruck und variabler Geschwindigkeit ist aus Fig. 31 zu ersehen. Der Widerstand steigt hiernach erst an, erreicht ein Maximum bei ca. 4 m pro Sek. und geht dann nach und

Fig. 31.



Abhängigkeit des Uebergangswiderstandes von der Kollektorgeschwindigkeit.
 $s_u = 14,37$ Amp./ cm^2 konstant.
 Auflagerdruck = 280 g/cm^2 .

nach in einen konstanten Wert über. Diese Variation wird ausschliesslich, wie auch schon die Versuche von Prof. Arnold zeigen, nur durch das Verhältnis der Schwingungen der Maschine zur Eigenschwingung der Bürste bedingt. Hierfür ist die Kollektorbeschaffenheit, die Konstruktion und das Gewicht der Bürstenhalter massgebend. Bei den vorliegenden Bürstenträgern kann der Uebergangswiderstand bei Geschwindigkeiten von über 5 m pro Sek. als unabhängig von der Geschwindigkeit angesehen werden.

Was nun die Uebergangswiderstände bei sowohl zeitlich, als auch örtlich entlang der Bürstenfläche variierender Stromdichte anbetrifft, so können wir uns die bei rotierendem Kollektor auftretenden Verhältnisse nicht in der Weise herstellen, um sie getrennt von allen Induktionsvorgängen untersuchen zu können.

Führen wir jedoch die Beziehung

$$R_k = \frac{\alpha}{s_u x} + \beta$$

auch für eine nach der Zeit variierende Stromdichte ein, wobei wir jetzt den Momentanwert der Stromdichte betrachten, so können wir aus den Bürstenpotentialkurven α und β bestimmen. α entspricht der

konstanten Potentialdifferenz e_u ¹⁾ und β dem spezifischen Widerstand

$$R_w = \frac{(R_w s_u)}{s_u}$$

Die Grösse R_w erhielt man bei Kohlenbürsten als annähernd umgekehrt proportional der effektiven Stromdichte $s_{u \text{ eff}}$, also muss

$$R_w s_{u \text{ eff}} = P_w = \text{konstant}$$

sein. Bei den angeführten Versuchen (s. S. 341) erhielten wir für P_w einen annähernd konstanten Wert und zwar war für die untersuchte Kohlensorte $P_w \approx 0,455$ Volt.

Bei Kupferbürsten trifft dies jedoch nicht zu. Bilden wir für einige Werte von $s_{u \text{ eff}}$ und R_w (s. S. 332 u. f.) das Produkt P_w :

z. B. $R_w = 0,00732$ Ohm,	$s_{u \text{ eff}} = 7,88$ Amp./cm ² ,	$P_w = 0,0577$ Volt
$R_w = 0,0059$ "	$s_{u \text{ eff}} = 10,61$ "	$P_w = 0,0627$ "
$R_w = 0,00543$ "	$s_{u \text{ eff}} = 13,5$ "	$P_w = 0,073$ "
$R_w = 0,00531$ "	$s_{u \text{ eff}} = 22,35$ "	$P_w = 0,1185$ "
$R_w = 0,0049$ "	$s_{u \text{ eff}} = 23,9$ "	$P_w = 0,117$ "
$R_w = 0,00411$ "	$s_{u \text{ eff}} = 23,3$ "	$P_w = 0,096$ "

so sehen wir, das P_w im wesentlichen mit $s_{u \text{ eff}}$ zunimmt. Die Abhängigkeit dieser beiden Grössen kann man wegen der Kleinheit der hier zu messenden Grössen, und ferner wegen der unsicheren Bestimmung von e_u durch eine Funktion nicht genau feststellen. Wir begehen jedoch keinen grossen Fehler, wenn wir bei Kupferbürsten R_w als unabhängig von $s_{u \text{ eff}}$ betrachten und als Mittelwert für die Potentialdifferenz zwischen Bürste und Kollektor die Beziehung

$$P_g = 0,0065 \text{ bis } 0,1 + 0,005 s_u \text{ Volt,}$$

bezw. für den spezifischen Widerstand

$$R_k = \frac{0,0065 \text{ bis } 0,1}{s_u} + 0,005 \text{ Ohm}$$

ansehen. Die erhaltenen Werte für R_w entsprechen dann auch den durch die Messung der Uebergangswiderstände bei konstanter Stromdichte ermittelten Werten für β .

XI. Verschiedenes Verhalten der positiven und negativen Bürsten.

Betrachten wir die aus den Bürstenpotentialkurven ermittelten Werte für R_w bei Kupfergazebürsten, so erkennen wir, dass dieselben für eine und dieselbe Bürste für die Stromrichtung Bürste-Lamelle

¹⁾ Siehe auch S. 357.

und für annähernd die gleiche Stromdichte s_u und $s_{u\text{ eff}}$ kleiner ausfallen, als für die umgekehrte Stromrichtung (s. Versuche bei der als Motor laufenden Maschine S. 335 und bei der als Generator laufenden Maschine S. 329 u. f.)

Der Grund zu diesem Verhalten kann nur in Verschiedenheiten der Uebergangswiderstände je nach der Stromrichtung gesucht werden.

Derartige Verschiedenheiten wurden auch von Prof. Sengel (E.T.Z. 1897, S. 527) und von Dr.-Ing. M. Kahn („Uebergangswiderstände von Kohlenbürsten“) beobachtet. Beide Beobachter fanden, dass die aus dem Uebergangswiderstände bei der Stromrichtung Bürste-Lamelle gemessenen Spannungsdifferenzen kleiner waren, als die bei gleicher Stromdichte und entgegengesetzter Stromrichtung erhaltenen.

Ein sehr interessanter Fall wurde bei einer grossen Elektrolytmaschine mit zwei Kollektoren, einer für die positiven, der andere für die negativen Bürsten beobachtet. Man fand hier, dass der positive Kollektor in kurzer Zeit sehr heiss wurde, während sich der negative nur wenig erwärmte. Die Stromdichten waren für die aufgelegten Kupferbürsten als zulässig zu betrachten und auch die Kollektoren waren in Bezug auf Material und Dimensionen gleich. Eine wirksame Abhilfe war erst geschaffen, nachdem man die Armatur umwickelte und bei denselben Bürstendimensionen auf jeden Kollektor sowohl positive als negative Bürsten auflegte.

An zwei Maschinen, die sowohl mit Kupfer- als auch Kohlenbürsten liefen, wurden diesbezügliche Versuche angestellt. Aus denselben ergab sich, dass bei konstanter Bürstenstellung und Steigerung der Stromstärke bis zur Funkengrenze das Auftreten einer Funkenbildung zuerst an den positiven Bürsten beobachtet werden konnte. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering und konnten nur für die Belastungen bezw. Bürstenstellungen beobachtet werden, bei welchen die Maschinen gerade an der Funkengrenze arbeiteten.

XII. Grösse der Funkenspannung.

Bei einer bestimmten Potentialdifferenz zwischen Bürste und Kollektor tritt Funkenbildung auf. Diejenige Spannung, bei welcher zwischen ablaufender bezw. auflaufender Bürstenkante und dem gegenüberliegenden Punkt am Kollektor eine Funkenbildung gerade noch bemerkt werden kann, wollen wir als Funkengrenze bezeichnen.

Um die Funkengrenzen festzustellen, wurden an Hand der bei den verschiedensten Bürstenstellungen, Belastungen und Geschwindig-

keiten, sowohl bei Kupfergaze- als auch Kohlenbürsten aufgenommenen Bürstenpotentialkurven die Spannungen an den Bürstenkanten untersucht. Im folgenden sind die erhaltenen Ergebnisse zusammengestellt. Die Vorzeichen beziehen sich stets auf das Potential der Bürste.

a) Kupfergazebürsten.

Funkengrenze (gerade noch bemerkbare Perlen)	Mittleres Feuern	Deutliches Funken entlang der ablaufenden Kante	Feuern unter ablaufender Kante und seitlichen Kanten, mitunter Spritzen
Volt:	Volt:	Volt:	Volt:
- 0,123 + 0,15	- 0,186 + 0,243	+ 0,381 - 0,33	+ 0,4
- 0,08 + 0,141	- 0,297 + 0,31	+ 0,36 - 0,35	+ 0,42
- 0,177 + 0,174	- 0,171	+ 0,4	+ 0,438
- 0,186 + 0,18	- 0,24	+ 0,35	+ 0,4
- 0,116 + 0,19	- 0,297		+ 0,55
+ 0,24			+ 0,8
0,15 bis 0,22	0,18 bis 0,29	0,35	0,4 bis 0,55

Hiernach liegt die Funkengrenze für Kupfergazebürsten zwischen 0,15 bis 0,22 Volt.

Bei Spannungen über 0,25 Volt ist die Funkenbildung in jedem Falle deutlich zu bemerken. Zwischen 0,35 und 0,5 Volt beobachtet man Funken und „Spritzen“ und eine rasche Erwärmung des Kollektors. Schon bei Spannungen von über 0,3 Volt wird durch das Feuern das Bürstengewebe zerstört, wodurch, wenn bei den entsprechenden Belastungsverhältnissen keine Aenderung der Bürstenstellung vorgenommen wird, die Funkenbildung durch das Ausfransen der Bürste sehr rasch zunimmt.

b) Bei Kohlenbürsten ist die Funkenspannung innerhalb noch weiterer Grenzen variabel. Hier spielt die Kollektortemperatur, Kollektorbeschaffenheit und das Kohlenmaterial eine wesentliche Rolle.

Aus eingehenden Versuchen, die hierüber mit „le Carbone“-Kohle, Sorte ∞, angestellt wurden, sollen nur einige Werte angeführt werden. Hiernach konnte die Funkengrenze beobachtet werden:

Funkengrenze:

- 1,11 Volt	+ 2,05 Volt
- 0,85 „	+ 2,45 „
- 0,97 „	+ 2,2 „
- 1,8 „	+ 2,54 „
- 1,96 „	+ 2,7 „
- 2,15 „	

Als mittlere Grenzwerte können wir

1,8 bis 2,7 Volt

einführen. Bei Spannungen über 3,0 Volt tritt unter allen Umständen deutlich bemerkbare Funkenbildung auf.

Betrachten wir die gemessenen Potentialdifferenzen mit Rücksicht auf ihr Vorzeichen, so erkennen wir, dass sowohl bei Kupfer- als auch Kohlenbürsten die mit + bezeichneten Werte grösser sind als die mit - bezeichneten.

Die mit dem + Vorzeichen bezeichnete Potentialdifferenz entspricht der Stromrichtung Bürste-Lamelle.

Bei der Funkenbildung haben wir es offenbar nur mit einer Lichtbogenbildung zu tun, weshalb auch diese Erscheinung nur auf die verschiedenen Leitfähigkeiten des Lichtbogens, je nach der Stromrichtung, zurückzuführen sein wird.

Verschiedene Beobachter fanden, dass im Gleichstrombogen Metall-Kohle die Leitfähigkeit des Bogens grösser ist, wenn der Strom vom Metall zur Kohle fliesst, als in umgekehrter Richtung und bei der gleichen Stromstärke.

Einige Versuchswerte von Arons¹⁾ mögen dies illustrieren. Ist Kupfer Anode und Kohle Kathode, dann wurde bei 7 mm Bogenlänge eine Spannung von 60 Volt, und für Kohle als Anode und Kupfer als Kathode dieselbe Spannung bei einer Bogenlänge von nur 4 mm beobachtet. Bei einer konstanten Bogenlänge und Stromstärke bildet sich sonach der Lichtbogen für die Stromrichtung Kohle-Kupfer (Bürste-Lamelle) erst bei einer grösseren Spannung, als für die umgekehrte Stromrichtung.

Dies steht nun auch im Einklange mit den beobachteten Funkenspannungen²⁾. Für die Stromrichtung Bürste-Lamelle (Kohle-Kupfer z. B.) bildet sich ein bemerkbarer Lichtbogen erst bei einer Spannung von ca. 2,2 Volt, für die umgekehrte Stromrichtung schon bei einer Spannung von ca. 1,5 Volt. Dasselbe Verhalten kann auch bei Kupfergazebürsten beobachtet werden, nur sind hier die Differenzen nicht so beträchtlich.

¹⁾ Wiedemanns Annalen 1896, 57, 185.

²⁾ Die auf S. 384 angeführte Beobachtung dürfte hiernach dadurch zu erklären sein, dass bei konstanter Bürstenstellung und zunehmender Belastung (Verzögerung der Kommutation) für die ablaufenden Kanten der positiven Bürsten rasch zunehmende, mit - bezeichnete Potentialdifferenzen entstehen. Bei diesen Funkenspannungen tritt nun eine Lichtbogenbildung schon bei kleineren Werten auf, als bei den mit + bezeichneten.

Inwieferne diese Variationen der Funkenspannung mit den Aenderungen des Uebergangswiderstandes R_w ¹⁾ bzw. R_k im Zusammenhange stehen, kann hier nicht untersucht werden, und es soll hier nur die Tatsache angeführt werden, dass derartige Verschiedenheiten bemerkt wurden.

Die Erklärung dieser Erscheinungen kann ohne genaue Kenntnis der Eigenschaften der Uebergangsschicht (Polarisationswirkungen, Fritterwirkungen²⁾) einerseits, und der Eigenschaften dieses speziellen Falles einer Lichtbogenbildung andererseits, in exakter Form nicht gegeben werden.

Soweit es sich übrigens um normale Maschinen handelt, kommen diese kleinen Verschiedenheiten der Potentialdifferenzen unter der positiven und negativen Bürste gegenüber den übrigen, für den funkenfreien Lauf massgebenden Grössen nicht in Betracht.

Bei Elektrolytmaschinen für sehr grosse Stromstärken könnte man diese Erscheinung in der Weise berücksichtigen, dass man die Auflagerfläche der positiven Bürsten vergrössert.

Schluss.

Die vorliegende Arbeit möge in erster Linie bezwecken, einige Einblicke in die experimentell nur schwer zugänglichen Kommutierungsprobleme zu geben. Nun bietet gerade die Kommutierung, bei welcher gleichzeitig so mannigfache und verschiedenartige physikalische Vorgänge zusammenwirken, noch ein reichliches Feld zu eingehendem Studium auf experimenteller Grundlage.

Bei der Aufnahme der Bürstenpotentialkurven wurden die Potentialdifferenzen stets zwischen gegenüberliegenden Punkten der Bürste und des Kollektors gemessen. Auf eine Beobachtung und Behandlung der Kurven, die sich entlang der Bürstenbreite und in der Fortsetzung entlang des Kollektorumfanges ergeben, wenn man zwischen einem festen Punkte auf der Bürste und einer entlang des ganzen Kollektorumfanges verschiebbaren Hilfsbürste die Potentialdifferenzen misst, wurde

1) Für den Uebergangswiderstand $R_w = \frac{(R_w s_u)}{s_u}$ bei der Stromrichtung

Bürste-Lamelle erhielten wir kleinere Werte, als für die umgekehrte Richtung. Der Stromrichtung Bürste-Lamelle entspricht also der kleinere Uebergangswiderstand und die kleinere Leitfähigkeit für den Lichtbogen. Inwieweit sich nun mit den Aenderungen des Uebergangswiderstandes auch die zusätzlichen Ströme ändern, entzieht sich jeder Betrachtung.

nicht weiter eingegangen. Diese Bürstenpotentialkurve muss dann das durch die Vorgänge unter der Bürste beeinflusste Stück der Kollektorpotentialkurve (Summationskurve) darstellen und in dieselbe übergehen, was auch für verschiedene Fälle bereits experimentell bestätigt wurde.

Eine bedeutende Vervollkommnung der hier verwendeten Methode zur Aufnahme der Kurzschlussstromkurven könnte durch Verwendung eines Dudellschen Oscillographen erreicht werden, welcher mit genügender Genauigkeit den der Kurzschlussdauer entsprechenden Bruchteil einer vollen Umdrehung zu beobachten gestattet.

Die vorliegende Arbeit wurde im Mai 1903 der Technischen Hochschule zu Karlsruhe als Doktor-Dissertation eingereicht. Die experimentellen Untersuchungen wurden im Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule zu Karlsruhe in der Zeit zwischen Herbst 1901 und Ende 1902 ausgeführt.

Die Anregung zu dem behandelten Thema verdanke ich Herrn Hofrat Professor E. Arnold, der mich auch während der Durchführung der Versuche stets in liebenswürdigster Weise mit seinem Rate unterstützt hat. Ihm, sowie Herrn Professor Dr. A. Schleiermacher sage ich an dieser Stelle meinen besten Dank für das mir bewiesene Entgegenkommen.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352029

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316090

TECHNICZNE KRAKÓ

KLASYF.

431

1. X 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352030

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316092

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352031

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316093

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352032

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316094

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352033

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316095

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352034

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316096

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-351649

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299088