

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

Experimentelle Untersuchung der Kommutation bei
Gleichstrommaschinen

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

Experimentelle Untersuchung der Kommutation bei Gleichstrommaschinen.

Von Prof. Dr.-Ing. E. Arnold.

Die elektromotorischen Kräfte, die in einer während der Kommutation kurzgeschlossenen Spule induziert werden, erzeugen Ströme in dieser Spule, die sich quer über die Bürste schließen. Man bezeichnet sie als zusätzliche Kurzschlußströme. Die in der Spule induzierten EMKe sind zweierlei Art. Wir können die vom Hauptfeld induzierte EMK und die EMK der Selbstinduktion (vom Streufeld induziert) unterscheiden. Von der Größe der Resultante beider EMKe ist die Güte der Kommutierung bzw. der funkenlose Gang der Maschine abhängig. Man erhält eine gute Kommutierung, wenn diese Resultante gleich Null ist, denn dann treten keine zusätzlichen Kurzschlußströme auf.

Die Bedingung für eine gute bzw. funkenfreie Kommutierung erscheint somit in einfacher Form. Die Erfüllung dieser Bedingung für alle Belastungen der Maschine bei unveränderlicher Bürstenstellung bereitet aber sehr große Schwierigkeiten, ja eine genaue Erfüllung derselben ist geradezu unmöglich. Der Grund hierfür liegt darin, daß die vom Hauptfeld (das von den Feld- und Ankeramperewindungen gemeinsam erzeugt wird) induzierte EMK, welche zur Erfüllung obiger Bedingung in jedem Momente während der Kurzschlußzeit der EMK der Selbstinduktion gleich aber ihr entgegengesetzt gerichtet sein soll, eine andere Funktion der Zeit ist als die EMK der Selbstinduktion. Die vom Hauptfeld induzierte EMK ist abhängig von der Form, den Schwingungen und Pulsationen dieses Feldes und von der Umfangsgeschwindigkeit des Ankers, während die zeitliche Änderung der EMK der Selbstinduktion von dem zeitlichen Verlauf des Stromes der kurzgeschlossenen Spule allein abhängt. Dieser zeitliche Verlauf des Kurzschlußstromes wird zwar von der vom Hauptfeld induzierten EMK beeinflusst, aber sie ist außerdem in hohem Maße abhängig vom Übergangswiderstand zwischen Bürste und Kommutator, der Oberflächenbeschaffenheit des Kommutators und den Erschütterungen der Bürsten. Namentlich der Übergangswiderstand der Bürsten, der

sich sprungweise ändern kann, wie die nachfolgenden Untersuchungen zeigen, hat einen viel größeren Einfluß auf den zeitlichen Verlauf des Kurzschlußstromes, als bisher angenommen wurde.

Die vom Hauptfeld induzierte EMK und die EMK der Selbstinduktion sind somit zwei zeitliche Funktionen, die nur während einzelner Momente der Kurzschlußzeit sich kompensieren, und es ist unmöglich, den zeitlichen Verlauf beider so einzustellen, daß die verlangte Kompensation während der ganzen Kurzschlußzeit anhält. Eine vollkommene Kompensation der EMK der Selbstinduktion ist also in keinem Fall erreichbar. In dieser Tatsache liegen die Schwierigkeiten einer funkenlosen Kommutierung, die um so größer werden, je kürzer die Kurzschlußzeit und je größer die zu kommutierende Stromstärke ist, denn wie leicht einzusehen, können in solchen Fällen die momentanen Unterschiede der beiden EMKe trotz momentaner Kompensation unzulässig groß werden.

Wenn es möglich wäre, die durch Selbstinduktion induzierte EMK durch eine vom äußeren Felde induzierte EMK vollkommen zu kompensieren oder ihre Differenz während der ganzen Kurzschlußzeit beliebig klein zu machen, so würde die Größe der Selbstinduktion einer Ankerspule auf die Güte der Kommutierung ohne Einfluß sein. Das ist aber, wie gesagt, nicht der Fall, und man ist daher gezwungen, eine möglichst geringe Selbstinduktion der Ankerwindungen anzustreben.

Wenn man die Vorgänge bei der Kommutierung bis ins einzelne verfolgen will, darf man sich somit nicht mit der Beobachtung von Mittelwerten begnügen, sondern man muß die Momentwerte messen. Das bereitet aber insofern Schwierigkeiten, als die ganze Zeit, innerhalb welcher sich die Kommutation vollzieht, sehr klein ist. Bei den nachfolgend untersuchten Maschinen betrug sie etwa $\frac{1}{500}$ bis $\frac{1}{1000}$ Sekunde.

Die nachfolgenden Untersuchungen beschäftigen sich hauptsächlich mit der Messung der Momentanwerte von Strömen, EMKen und Feldstärken, welche bei der Kommutation in Frage kommen. Durch die Anwendung eines für diese Zwecke konstruierten Kontaktgebers, der gestattet, die Dauer der Meßzeit etwa auf $\frac{1}{30000}$ Sekunde zu reduzieren und die Anwendung des Oszillographen ist die Ausführung dieser Versuche ermöglicht worden.

Mit der Theorie der Kommutation haben sich mehrere Autoren beschäftigt. Der Verfasser selbst hat sich im Laufe der letzten 15 Jahre mehrfach und ausführlich mit diesem Thema befaßt. Um die Differentialgleichungen des Kurzschlußkreises lösen zu

können¹⁾, ist man aber gezwungen, gewisse vereinfachende Annahmen zu machen, die der Wirklichkeit nicht entsprechen, besonders ist man hierbei genötigt, entweder mit Mittelwerten des Feldes und des Übergangswiderstandes der Bürsten oder doch mit einer Änderung derselben nach einem einfachen Gesetz zu rechnen. Diese Annahmen sind aber nur eine verhältnismäßig grobe Annäherung an die scheinbar in launenhafter Weise veränderlichen Größen.

Es war daher notwendig zu untersuchen, inwieweit die rechnerisch erlangten Ergebnisse von den experimentell erlangten abweichen. Die nachfolgenden Untersuchungen zeigen für diejenigen, die sich auf die Theorie allein stützen möchten, wenig Erfreuliches. Die Abweichungen sind in fast allen Fällen sehr groß und eine einigermaßen befriedigende Übereinstimmung tritt nur in besonderen Fällen auf, d. h. dort, wo die wirklichen Verhältnisse den bei der Rechnung angenommenen annähernd entsprechen.

Je mehr man sich mit dem Problem der Kommutation befaßt, um so mehr erscheint eine genaue rechnerische Verfolgung der sehr verwickelten Vorgänge als ausgeschlossen. Man wird sich zunächst mit einer Theorie begnügen müssen, die bei möglicher Einfachheit das Wesentliche widerspiegelt und darauf verzichtet, auf die scheinbar launenhaften Unregelmäßigkeiten, von denen jede Maschine eine besondere, ihr eigentümliche Anzahl besitzt, einzugehen.

Am wenigsten oder gar nicht aufgeklärt sind die Vorgänge in der Berührungsschicht zwischen Kommutator und Bürste. Um die Theorie weiter zu fördern, ist ein eingehendes Studium dieser Vorgänge erforderlich. Die plötzliche Änderung des als Quotient der Potentialdifferenz und der Stromdichte definierten Übergangswiderstandes deutet darauf hin, daß die Art, wie der Strom über die Berührungsschicht geleitet wird, bei einem gewissen Zustande, bei dem die Temperatur eine wesentliche Rolle spielt, sich ebenfalls plötzlich ändert. Das verschiedene Verhalten der positiven und negativen Kohlen und der große Einfluß der Temperatur, die in der Berührungsschicht hoch sein kann, weisen darauf hin, daß der Strom nicht allein durch direkten Kontakt, sondern auch durch kleine Funkenstrecken über eine dünne Gasschicht geleitet wird, wobei eine Ionenwanderung durch die Berührungsschicht auftritt. Die plötzliche Erhöhung des Übergangswiderstandes tritt dort auf, wo die Leitung durch direkten Kontakt nahezu oder ganz verschwindet.

Die große technische und wirtschaftliche Bedeutung,

¹⁾ Siehe ETZ 1899 E. Arnold und G. Mie, Theorie der Kommutation.

Eine Ankerspule s_1 ist aufgeschnitten und die beiden Schnittenden a, b sind durch einen Widerstand r_1 von 0,02 Ohm miteinander und durch zwei Schleifringe mit den Bürsten b_2, b_3 verbunden.

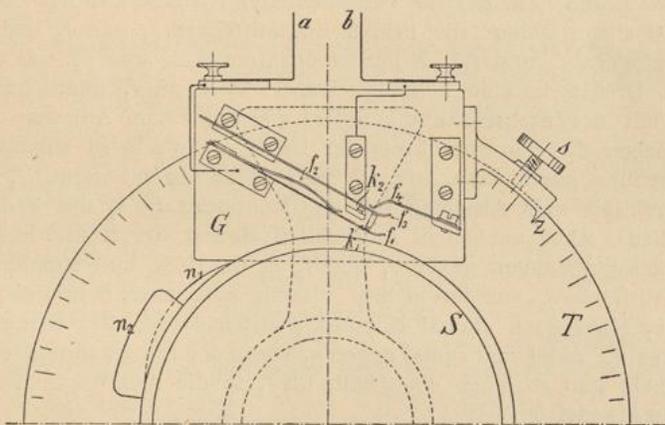
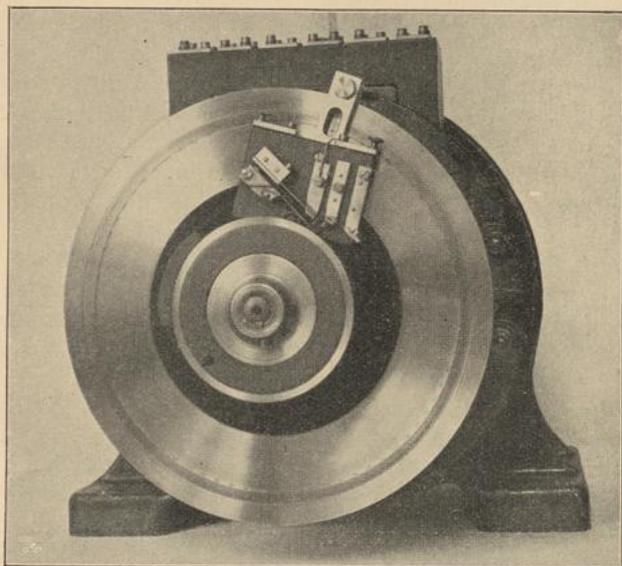


Fig. 2a und b. Kontaktgeber.

Der Widerstand einer Spule beträgt etwa 0,025 Ohm. Der in der Spule s_1 fließende Kurzschlußstrom kann dann durch Messung des Spannungsabfalls zwischen $a-b$ bestimmt werden. Um die geringe

Störung, die durch das Aufschneiden der Spule hineingebracht wird, zu vermeiden, müßten alle Ankerspulen mit dem gleichen Widerstand r_1 versehen werden. Der Einfachheit wegen wurde jedoch hier davon abgesehen.

Weiter ist ein ähnlicher Widerstand r_2 in die Verbindung der Spule mit dem Kommutator eingefügt und die Punkte c, d sind zu zwei Schleifringen geführt, auf welchen die Bürsten b_5, b_6 aufliegen. Der auf diese Weise meßbare Spannungsabfall in r_2 ist ein Maß für den einer Lamelle zufließenden Strom. Solche Widerstände sind auch in die benachbarten Verbinder eingebaut, so daß durch sie eine Störung der Stromverteilung unter der Bürste nicht hervorgerufen werden kann.

Zur Aufnahme der Feldkurve liegt oben in derselben Nut eine Prüfspule s_2 aus 8 Windungen dünnen Drahtes, deren Enden durch zwei Schleifringe mit den Bürsten b_1 und b_2 verbunden sind.

Die Aufnahme der Kurve des Kurzschlußstromes, des Stromes einer Lamelle und der Feldkurve geschieht mit Hilfe des auf der Welle sitzenden Kontaktapparates K (Fig. 2a und b). Bei ihm sind nicht wie bei den üblichen Konstruktionen Schleifkontakte, sondern Druckkontakte angewandt, und die Dauer des Kontaktes ist so weit herabgedrückt, daß der Apparat auch bei sehr schnellen Stromwechseln tadellos funktioniert. Er besteht im Prinzip aus der mit der Maschinenwelle starr gekuppelten Kontaktscheibe S , einer Teilscheibe T und dem auf ihr verschiebbaren Gleitstück G aus Ebonit. Auf G sitzen isoliert die beiden Kontaktfedern f_1 und f_3 und die Gegenfedern f_2 und f_4 . S hat einen Kontaktnocken n_1 . G kann durch Drehen in eine beliebige Lage relativ zu n_1 gebracht und hier mit der Stellschraube s fixiert werden. Zum Ablesen dient der Zeiger Z . Der Stromkreis der Leiter a und b wird einmal pro Umdrehung geschlossen, wenn n_1 unter f_1 zu liegen kommt. f_1 wird dadurch bis zum Anschlag mit der Kontaktfläche k_1 der Feder f_3 gehoben. Aber nur einen Augenblick dauert der Kontakt, denn im nächsten Moment gehen f_1 und f_3 in die Höhe und trennen die Kontaktfläche k_2 von ihrem Sitz. Damit aber nach dem Passieren von n_1 nicht noch einmal Kontakt gemacht wird, ist ein zweiter Nocken n_2 , axial und radial gegen n_1 verschoben, vorhanden, der f_3 hochhebt und so lange oben hält, bis f_1 in die ursprüngliche Lage zurückgekehrt ist.

Der Momentanwert einer Spannung, wie ihn der Kontaktgeber K liefert, ist an dem ballistischen Galvanometer G , in der bekannten Schaltung (s. Fig. 1) mit Widerstand und Kondensator C , ablesbar. Sind die vom Kontaktgeber bei jeder Umdrehung gegebenen Momentanspannungen annähernd gleich, so kann der Galvanometer als Null-

instrument benützt werden, indem man die Gleichstromspannung zwischen f e durch Änderung des Widerstandes R so reguliert, daß der Galvanometeranschlag Null wird. Am Millivoltmeter MV kann in der Stellung 5 des Umschalters U_4 die kompensierte Spannung abgelesen werden.

Die eigentliche Messung vollzieht sich also folgendermaßen: An dem Umschalter U_1 wird die der gewünschten Kurvenart entsprechende Verbindung hergestellt, dann U_2 entweder auf den Oszillographen oder den Kontaktapparat umgelegt und je nachdem man im letzteren Falle mit Galvanometeranschlag oder nach der Kompensationsmethode arbeiten will, wird U_3 in die Stellung 4 oder die Stellung 3 gebracht.

Die Eichung des Galvanometers G erfolgt mit der regulierbaren Spannung $e-f$, die mit dem Millivoltmeter MV bei Stellung 5 des Umschalters U_4 bei richtiger Tourenzahl des Kontaktgebers gemessen werden kann; dabei ist der Umschalter U_3 in der Stellung 3 und U_2 offen.

Es kann gemessen werden:

a) Die mittlere örtliche Potentialdifferenz zwischen Kommutator und Bürste (AP -Kurve oder Kommutationsdiagramm). Umschalter U_1 in Stellung II, U_2 in Stellung 1, U_3 offen und U_4 in Stellung 6. Die schmale Hilfsbürste b_4 wird nach und nach über die ganze Breite der Hauptbürste B verschoben. Jeder Stellung der Hilfsbürste entspricht ein Punkt der Kurve. Der Kontaktmacher K ist kurz geschlossen.

b) Die momentane örtliche Potentialdifferenz zwischen Kommutator und Bürste (d. h. die zeitliche Änderung der Potentialdifferenz zwischen dem Kommutator und einem Bürstenpunkt). U_1 in II, U_2 in 1, U_3 in 4, U_4 offen. Die Hilfsbürste b_4 steht fest und der Kontaktgeber K wird über einem Bogen, der der Kurzschlußzeit entspricht, in verschiedene Stellungen gebracht.

c) Die momentanen Werte des Kurzschlußstromes einer Spule (Kurzschlußstromkurve) U_1 in III, U_2 in 1, U_3 in 4, U_4 offen. Der Kontaktmacher wird wie bei b) eingestellt.

d) Die momentanen Stromstärken in der Verbindung einer Spule mit einer Lamelle (die Lamellenstromkurve). U_1 in IV, sonst wie bei a) und b).

e) Feldkurven. U_1 in I, sonst wie bei a) und b).

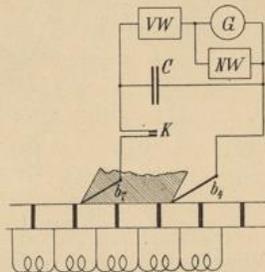


Fig. 3. Schema der Versuchsanordnung zur Messung der Kurzschlußspannung.

f) Weiter ist noch eine in der Fig. 1 nicht gezeichnete Hilfsbürste vorhanden, die hinter b_4 sitzt, so daß man, wenn b_4 und b_7 (wie Fig. 3 zeigt) an den Kanten der Bürste stehen, den Verlauf der Kurzschlußspannung Δe zwischen den Bürstenkanten erhalten kann.

Die Teilscheibe des Kontaktgebers ist in 360 Grade geteilt. Diese Grade sind in den folgenden Figuren angegeben.

Die nachfolgenden Versuche sind mit zwei mit Wendepolen versehenen Maschinen ausgeführt worden. Die eine Maschine ist zweipolig, die andere vierpolig.

Versuche mit Maschine I.

Die Hauptdaten der ersten Maschine sind (s. Fig. 4):

Anker: Durchmesser $D = 25$ cm
 Eisenlänge $l = 15$ cm
 Zahl der Luftschlitze = 1
 Breite des Luftschlitzes = 1 cm.

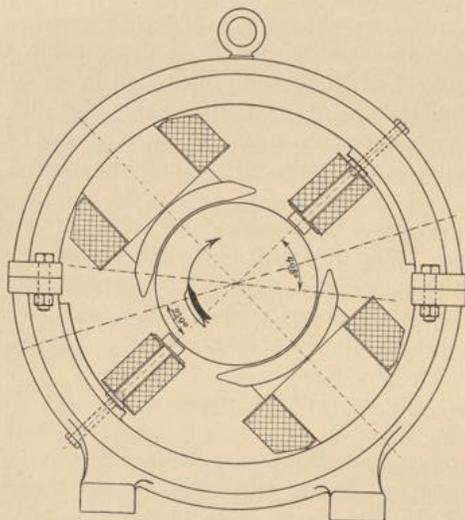


Fig. 4. Skizze der Versuchsmaschine I.

Wicklung: zweipolig
 Leiterzahl $N = 270$
 Nutenzahl $Z = 45$
 Windungszahl einer Spule $w = 3$
 Leiterabmessungen: 4 Drähte parallel 1,3 mm nackt
 Spulenseiten in einer Nut $u_n = 2$.

Kommutator: Durchmesser $D_k = 15,8$ cm
 Lamellenzahl $K = 45$
 Lamellenteilung $\beta' = 11$ mm
 Lamellenbreite $\beta = 10,3$ mm
 Isolation $\delta_i = 0,7$ mm
 Pole: Polbogen $b_p = 24$ cm

Die Wendepole haben auswechselbare Polschuhe mit verschiedenem Polbogen.

Luftspalt für den Hauptpol $\delta = 2$ mm

„ „ „ Wendepol $\delta_w = 2$ mm.

Denken wir uns die in der Drehrichtung des Kommutators gemessene Bürstenbreite in mehrere Teile zerlegt und in jedem Teilpunkte die Stromdichten für verschiedene aufeinanderfolgende Momente der Kommutation gemessen und als Funktion der Kurzschlußzeit aufgetragen, so stellt die mittlere Ordinate der so erhaltenen Kurve die mittlere örtliche Stromdichte dar. Wäre die mittlere örtliche Stromdichte konstant und proportional der an der betreffenden Stelle zwischen Bürste und Kommutator gemessenen mittleren Potentialdifferenz ΔP , so ließe sich (s. Die Gleichstrommaschine, Band I, S. 445) der zeitliche Verlauf des Kurzschlußstromes (die Kurzschlußstromkurve) in einfacher Weise berechnen, denn die Kurzschlußstromkurve wird in diesem Falle die Integralkurve der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten.

Da die mittleren Potentialdifferenzen ΔP sich mit Hilfe eines Voltmeters an jeder Maschine rasch und einfach messen lassen, und die Kurzschlußstromkurve aus der ΔP -Kurve (dem Kommutationsdiagramm) durch eine einfache graphische Konstruktion (s. Die Gleichstrommaschine, Band I, S. 774) gefunden werden kann, ist es wichtig zu wissen, wie weit die berechnete Kurzschlußstromkurve mit der tatsächlich vorhandenen und experimentell aufgenommenen Kurve übereinstimmt, denn wenn die Übereinstimmung eine gute wäre, hätte man in dem Kommutationsdiagramm ein einfaches Mittel zur Beurteilung der inneren Vorgänge bei der Kommutation.

Auf Veranlassung des Verfassers hat schon früher Dr.-Ing. K. Czeija¹⁾ eine dahingehende Untersuchung durchgeführt und nachgewiesen, daß bei Verwendung von Metallbürsten die aus dem Kommutationsdiagramm berechnete und die experimentell gefundene Kurzschlußstromkurve in einer für die Praxis befriedigenden Weise übereinstimmen. Die Ausdehnung der Versuche auf Kohlenbürsten führten damals zu keinem Ergebnis, denn die Kohlenbürsten bereiten große Schwierigkeiten, weil ihr Übergangswiderstand sehr

¹⁾ Die experimentelle Untersuchung der Kommutierungsvorgänge in Gleichstrommaschinen. Sammlung elektrotechnischer Vorträge. 1903.

wesentlich von dem Zustand und der Temperatur des Kommutators abhängt und weil er sich, beim Auftreten von kleinen, kaum sichtbaren Funken, stark und sprungweise ändert. Auch laufen Kohlenbürsten nur langsam gut ein, so daß die Versuche recht mühsam und zeitraubend gewesen sind.

Die nachfolgend zuerst angeführten Versuche verfolgen nun das Ziel, festzustellen, wie bei Kohlenbürsten die aus den ΔP -Kurven und den Kurven der mittleren örtlichen Stromdichte berechneten Kurzschlußstromkurven mit den experimentell gefundenen übereinstimmen. Wir werden sehen, daß das Ergebnis ein wesentlich ungünstigeres ist als bei Kupferbürsten.

Versuche ohne Wendepole.

Die ersten hier angeführten Versuche sind bei herausgenommenen Wendepolen gemacht worden.

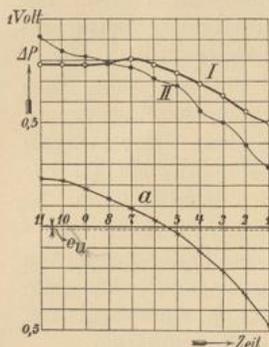


Fig. 5. ΔP -Kurven:
a. bei Leerlauf,
I. bei 16,5 Ampere Belastung,
II. „ 7,9 „ „

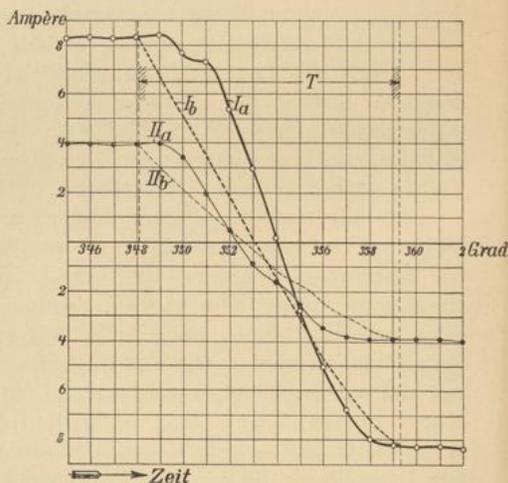


Fig. 6. Ia und IIa: mit dem Kontaktgeber aufgenommene Kurzschlußstromkurven bei 16,5 und 7,9 Ampere Belastung, Ib und IIb: aus den ΔP -Kurven I und II Fig. 5 konstruierte Kurzschlußkurven.

Fig. 5 gibt die ΔP -Kurve bei einer Bürstenbreite b_1 von 16,5 mm, 800 Umdrehungen in der Minute und $i_e = 0,79$ Amp. Erregung, für die Belastungsströme $J = 0$, $J = 7,9$ und $J = 16,5$ Ampere. Die Bürsten sind $27,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Dazu gibt Fig. 6 die experimentell erhaltenen und, darüber gezeichnet, die

aus den obigen ΔP -Kurven gewonnenen Kurzschlußstromkurven. Die Übereinstimmung ist recht mangelhaft. Ebensovienig findet sich in den anderen Figuren, in denen die konstruierte Kurzschlußstromkurve gegeben ist, eine bessere Übereinstimmung. Es läßt sich aus den Kurven des mittleren örtlichen Bürstenpotentials ΔP wohl ersehen, ob Über- oder Unterkommulation statthat, doch sind die Ergebnisse zu wenig charakteristisch, um in allen Fällen einigermaßen sichere Schlüsse zu erlauben. Ja es können sogar, wie eine spätere Figur zeigt, direkte Widersprüche vorkommen.

Die Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte läßt sich zwar nicht experimentell finden, jedoch aus der Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes konstruieren. Auf diese Weise läßt sich dann prüfen, ob die gemachte Voraussetzung zutrifft. Der Symmetrie wegen muß jeder nachfolgenden Lamelle derselbe Strom zufließen, der um die Zeit des Fortschreitens um eine Kommutatorteilung früher der betrachteten Lamelle zugeströmt ist. Es läßt sich also aus der Lamellenstromkurve die momentane örtliche Stromverteilung und damit auch die Stromdichte aus dieser Kurve ermitteln, wenn man die einzige und bei schmalen Lamellen besonders zulässige Annahme macht, daß sich der Strom gleichmäßig über den bedeckten Teil einer Lamelle verteilt. Experimente haben ergeben, daß die in einem bestimmten Moment zwischen einer Lamelle und der Bürste bestehende Potentialdifferenz über die ganze Breite der Lamelle konstant ist; obige Annahme ist daher zulässig.

Die Stromdichten erhält man aus der Stromverteilung, indem man bei nicht ganz überdeckten Lamellen nur die bedeckte Fläche in Rechnung zieht. Hat man die Stromdichte für mehrere Stellungen relativ zur Bürste ermittelt und an der Bürste selbst einige Punkte festgelegt, so läßt sich die zeitliche Änderung der Stromdichte an einem solchen Punkte ohne weiteres angeben. Bringt man diese Werte in eine Darstellung mit der Zeit als Abszisse, so gibt der Mittelwert, den man durch Planimetrieren erhält, die mittlere örtliche Stromdichte an dem betreffenden Punkte. Auf diese Weise wird die ganze Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte unter der Bürste erhalten, und aus ihr läßt sich dann in bekannter Weise durch graphische Integration die Kurzschlußstromkurve konstruieren. Dieses Verfahren ist in der später folgenden Fig. 21 vollständig durchgeführt.

Ein Vergleich der so berechneten s_{ux} -Kurven mit den experimentell erhaltenen ΔP -Kurven zeigt, daß die erhoffte Übereinstimmung zwischen beiden nicht vorhanden ist. Die Ursache hiervon ist in der Veränderlichkeit des spezifischen Übergangswiderstandes zu suchen; er ist über die Bürstenbreite veränderlich, und es

ist s_{ux} nicht proportional ΔP . Die Abweichungen sind jedoch nicht groß, wenn die Kommutation gut verläuft.

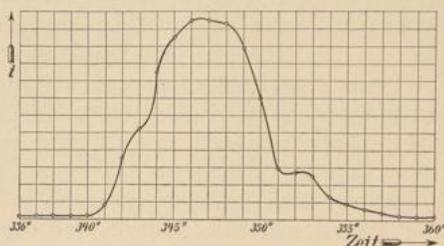


Fig. 8. Kurve des einer Lamelle zuffießenden Stromes.

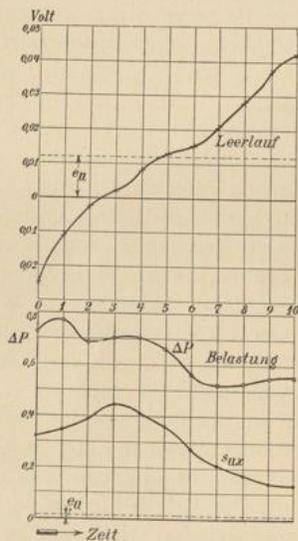


Fig. 7. ΔP -Kurven bei Leerlauf und 13 Ampere Belastung und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte (s_{ux}).

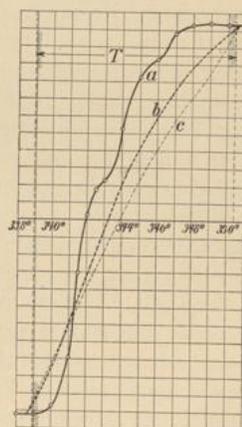


Fig. 9. a: mit dem Kontaktgeber aufgenommene Kurzschlußstromkurve, b: aus der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte konstruierte Kurzschlußstromkurve, c: desgl. aus der ΔP -Kurve abgeleitet.

Aber auch die Integralkurven der s_{ux} -Kurven nähern sich den wirklichen Verhältnissen nur schlecht und lassen uns um so mehr im Stich, je ungünstiger die Kommutation verläuft. Es läßt sich aber wenigstens mit Sicherheit auf die Art der Stromwendung

schließen, und direkte Widersprüche kommen hier nicht vor. Der Grund dieser Abweichungen ist nun aus dem zeitlichen Verlauf der momentanen Stromdichten zu ersehen, denn entgegengesetzt der bei der Berechnung gemachten Annahme weicht die mittlere örtliche Stromdichte s_{ux} von den örtlichen Momentanwerten s_{ut} ganz beträchtlich ab. Diese Schwankungen von s_{ut} werden nun um so größer, je veränderlicher die Stromdichte überhaupt ist, d. h. je mehr man sich von dem Fall konstanter Stromdichte, der ja geradliniger Kommutation entspricht, entfernt.

In den Fig. 7, 8 und 9 ist eine Reihe Versuche wiedergegeben, die bei $n=800$, $J=19$ Amp., $i_e=0,79$ Amp. und einer Bürstenverstellung von $19,9^\circ$ aus der neutralen Zone gemacht ist. Die Maschine lief dabei ganz funkenfrei. Fig. 7 gibt die ΔP -Kurven bei Leerlauf und Belastung und gleichzeitig die aus der Lamellenstromkurve abgeleitete s_{ux} -Kurve. Die beiden Kurven für ΔP und s_{ux} verlaufen ziemlich ähnlich, doch sieht man aus Fig. 9, daß wieder die Integralkurve (c), die aus der Kurve der mittleren Übergangsspannungen gewonnen ist, der Wirklichkeit am wenigsten nahe kommt; die Integralkurve (b) aus den mittleren örtlichen Stromdichten zeigt richtig beschleunigte Kommutation an, doch liegt auch sie noch erheblich tiefer als die experimentell erhaltene.

Man sollte nun annehmen, daß bei noch größerer Bürstenverschiebung eine erhebliche Überkommutation auftreten würde, doch zeigt Fig. 10 bei genau denselben Versuchsbedingungen und $49,8^\circ$ Bürstenverschiebung nichts dergleichen, nur der annähernd geradlinige Teil der Kurve ist noch steiler geworden. Steigert man die Belastung auf 30 Amp., so entsteht, wie Fig. 11 zeigt, als Überkommutation eine kurze Spitze, und die Kurve wird sofort wieder wagrecht. Man befindet sich hier an der Funkengrenze, denn jede weitere Steigerung der Belastung ruft kleine Funken hervor. Es ist bemerkenswert, daß trotz der großen Potentialdifferenz ΔP an der ablaufenden Bürstenkante die Stromdichte klein ist. Die Ursache dazu ist in der starken Vergrößerung des Übergangswiderstandes zu suchen, welche in der Nähe der Funkengrenze sich einstellt.

Bei diesen Versuchen betrug die Bürstenbreite 16,5 mm, und die Bürste war sorgfältig eingeschliffen. Trotz alledem liegt bei diesem Aussehen der Kurven die Vermutung nahe, daß der Kontakt an der ablaufenden Bürstenkante schlecht war. Da nun bei aller Sorgfalt andere Ergebnisse nicht zu erhalten waren, wurde eine geteilte Bürste aufgesetzt. Die Bürste bestand aus drei Teilen, und jeder Teil saß für sich in einem Bürstenhalter. Die Abmessungen der Schleifflächen sind in Fig. 12 zu finden. Die Figur

14 Experimentelle Untersuchung der Kommutation bei Gleichstrommaschinen.

enthält weiter die Kurve des bei der geteilten Bürste einer Lamelle zufließenden Stromes, und zwar sind zwei Aufnahmen wiedergegeben, die mehrere Tage auseinander liegen. Man sieht, daß die Kurven dem Charakter nach gut übereinstimmen, wenn sie sich in den Einzelheiten auch nicht decken. Die äußeren Bedingungen waren scheinbar ganz gleich, und zwar war $n = 800$, $J = 21$ Amp., $i_e = 0,79$, Bürstenverstellung = $25,9^\circ$. Die Bürsten waren ganz und gar funkenfrei, und man hat fast geradlinige Kommutation, wie die Kurzschlußstromkurve zeigt (Fig. 13). Hier stimmt denn auch die aus der $s_{u\omega}$ -Kurve erhaltene

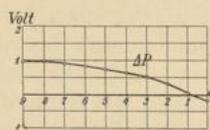
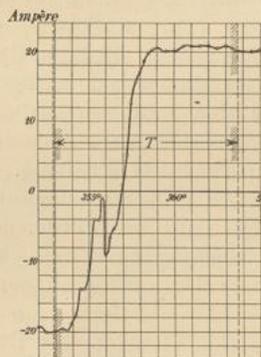


Fig. 10a und 10b.
Kurzschlußstromkurve u. ΔP -Kurve.
 $J = 19$ Ampere.

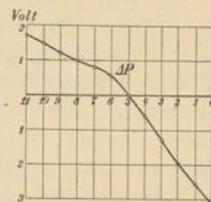
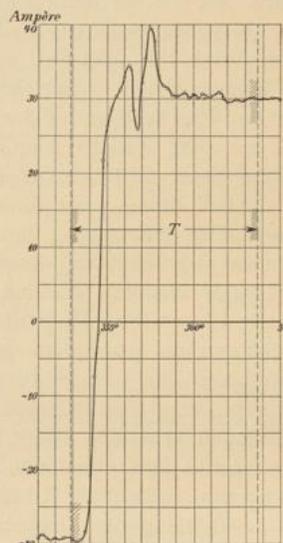


Fig. 11a und 11b.
Kurzschlußstromkurve u. ΔP -Kurve.
 $J = 30$ Ampere.

Integralkurve mit der experimentellen Kurzschlußstromkurve gut überein, während, wie Fig. 14 zeigt, die ΔP -Kurve und die $s_{u\omega}$ -Kurve gerade entgegengesetzt verlaufen und aus ersterer auf eine ziemlich beschleunigte Stromwendung geschlossen werden müßte.

Andere mit dieser gut eingelaufenen, geteilten Bürste aufgenommenen Kurven zeigten ganz den gleichen Charakter wie Fig. 11.

Nachdem nun festgestellt war, daß die Strecke geringer Stromdichte in Fig. 11 nicht auf schlechten Kontakt zurückgeführt werden kann, wurde von der weiteren Verwendung der geteilten Bürste abgesehen, weil mit ihr sich gewisse mechanische Schwierigkeiten eingestellt hatten.

Dabei ist jedoch nicht ausgeschlossen, daß kleine Unebenheiten des Kommutators doch auf den Verlauf der Kurzschlußstromkurve

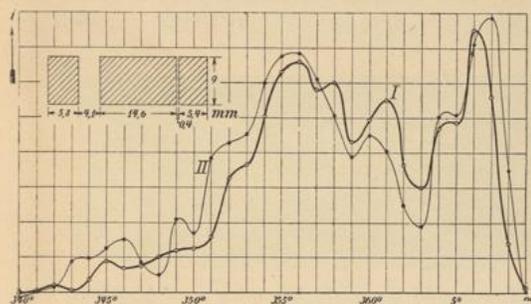


Fig. 12. Kurven des einer Lamelle zufließenden Stromes. Die Aufnahmen liegen mehrere Tage auseinander. (Kurve I wurde zur Bestimmung der $s_{u,x}$ -Kurve benutzt). Skizze der benutzten geteilten Kohlenbürste.

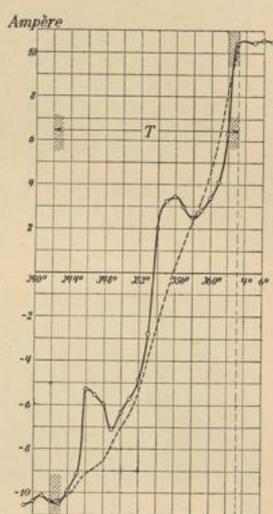


Fig. 13. Aufgenommene und aus der $s_{u,x}$ -Kurve konstruierte Kurzschlußstromkurve.

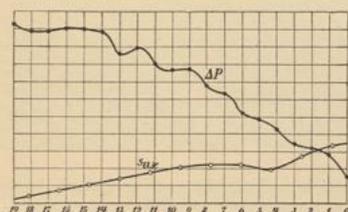


Fig. 14. ΔP -Kurve und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten.

einen Einfluß hatten. Dieser ist aber auf den kleinstmöglichen Betrag vermindert worden, und er wird praktisch immer mehr oder weniger vorhanden sein.

Der benutzte Kontaktgeber hat zwar schon bei verschiedenen Gelegenheiten seine vollkommene Zuverlässigkeit bewiesen, doch wurden auch hier die auffälligen Ergebnisse mit dem Oszillographen nachgeprüft. Zur Bezeichnung des Momentes, in welchem das Auf-
laufen oder Ablaufen der betreffenden Lamelle beginnt, wurde mit Hilfe des Kontaktgebers und einer Hilfsbatterie, die im gegebenen

Augenblick in den Meßstromkreis eingeschaltet wurde (vgl. Fig. 41), ein Zeichen gemacht, das in den wiedergegebenen Oszillogrammen z. B. bei *a* und *b* in Fig. 16 sich durch eine scharfe Spitze deutlich sichtbar macht.

In Fig. 15 ist eine Stromwendung zweimal dargestellt. Einmal ist in der angegebenen Weise bei 1 der Anfang und bei 2 das Ende der Stromwendung markiert. Die 30 mm breite Bürste war um $28,7^\circ$ entgegen der Stromrichtung verschoben. Die Tourenzahl betrug nur 350 pro Min., um den Kontakt zwischen Bürsten

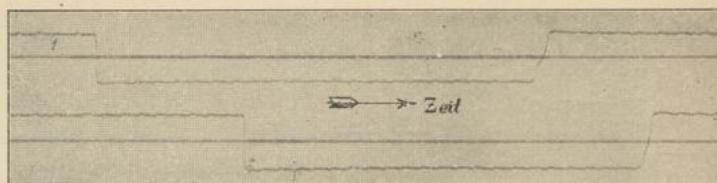


Fig. 15. Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 350$. Erregung $i_c = 1$ Ampere. Strom $J = 15$ Ampere. Bürsten ($b = 30$ mm) gegen die Drehrichtung um $28,7^\circ$ verschoben.

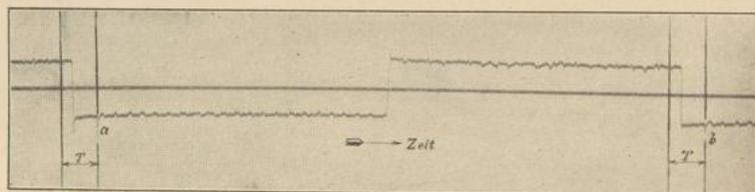


Fig. 16. Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 350$. Erregung $i_c = 1$ Ampere. Strom $J = 31$ Ampere. Bürsten ($b = 30$ mm) $62,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

und Lamellen durch schädliche Schwingungen nicht zu stören. Der Belastungsstrom war $J = 15$ Amp., die Bürsten waren funkenfrei.

Bei Aufnahme des Oszillogramms Fig. 16 waren bei derselben Tourenzahl (350) die Bürsten um $62,5^\circ$ im Sinne der Drehrichtung verschoben, und der Strom betrug 31 Amp. Dabei traten an der ablaufenden Kante kleine Funken auf.

Dann ist in Fig. 17 noch ein Fall dargestellt, in dem an einer Bürste eine kleine, aber wieder nur kurz dauernde Spitze der Kurzschlußstromkurve vorkommt. Auch hier war die Bürste nicht mehr funkenfrei. Es betrug die Bürstenverschiebung $10,9^\circ$ gegen die Drehrichtung, $J = 24$ Amp. und $n = 170$ pro Min.

Weiter stellt Fig. 18 den Verlauf des Stromes einer Spule dar bei einer Bürstenbreite, die genau gleich der Lamellenbreite ist. Die Bürstenverschiebung war groß und betrug $57,8^\circ$ in der Drehrichtung, die Tourenzahl 800, die Stromstärke $J=59$ Amp. und die Erregung 0,79 Amp. Es traten bei dem Versuch kleine Funken unter den Bürsten auf, nur an der auflaufenden Kante blieb ein funkenfreies Stück übrig. Der Kontaktgeber bezeichnet hier den Anfang der Kommutation, welcher hier aber nicht sehr deutlich zu erkennen ist. Der Verlauf des Kurzschlußstromes ist sehr be-

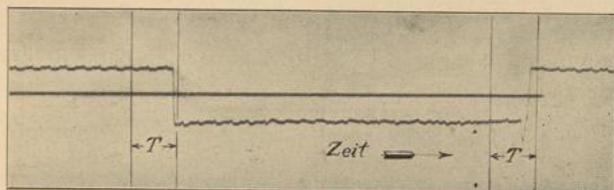


Fig. 17. Strom einer Spule. Tourenzahl $n=170$. Erregung $i=1$ Ampere. Strom $J=24$ Ampere. Bürsten (30 mm breit) um $10,9^\circ$ gegen die Drehrichtung verschoben. Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

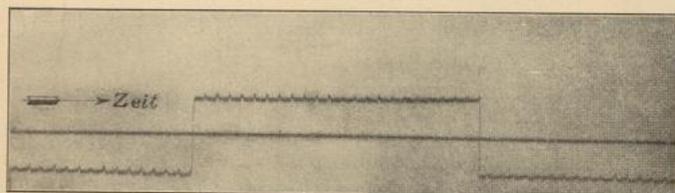


Fig. 18. Strom einer Spule. Tourenzahl $n=800$. Erregung $i_e=0,79$ Ampere. Strom $J=59$ Ampere. Bürsten (10,3 mm breit) um $58,8^\circ$ in der Drehrichtung gestellt. Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

merkenswert, denn die eigentliche Kommutation vollzieht sich wegen des starken kommutierenden Feldes außerordentlich rasch, sowie die Bürste kaum die betrachtete Spule kurzgeschlossen hat. Die zu erwartende Überkommutation tritt nicht ein, sondern der Strom hält sich konstant auf der Größe des Ankerzweigstromes, und eben auf der diesem Stromverlauf entsprechenden Strecke der Bürsten treten die Funken auf. Die sehr klar ausgeprägten Spitzen der Stromkurve stehen um die Zeit des Fortschreitens um eine Lamelle voneinander ab, und ihre größte Amplitude entspricht 5,5 Amp.

Versuche mit Wendepolen.

Es sollen nun weiter einige für das Arbeiten der Maschine mit Wendepolen charakteristische Versuche vorgeführt werden. Die Wendepole waren fremd erregt und die Bürsten nur wenig aus der geometrisch neutralen Zone verstellt.

Die Fig. 19—22 gelten für folgende Betriebsverhältnisse:

Tourenzahl $n = 800$,

Belastungsstrom $J = 22$ Amp.,

Erregung $i_e = 0,79$ Amp.,

Erregung der Wendepole $i_w = 4$ Amp.,

Bürstenbreite $b = 16,5$ mm,

Bürstenverschiebung $4,7^\circ$ aus der neutralen Zone in der Drehrichtung.

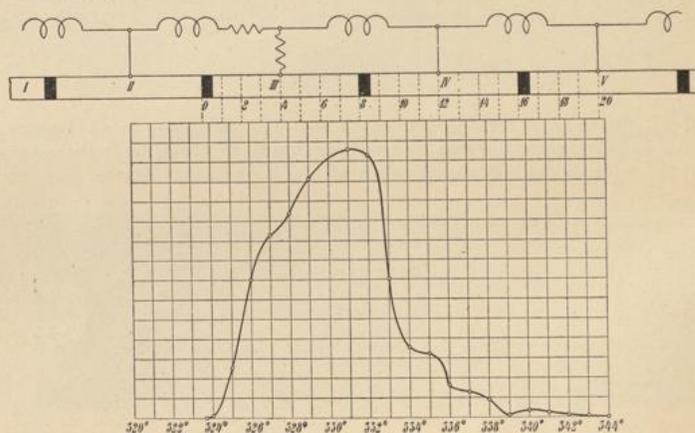


Fig. 19. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

Fig. 19 gibt die Lamellenstromkurve, und aus ihr ist die in Fig. 20 dargestellte Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte s_{wx} konstruiert. Der Gang der Konstruktion ist aus Fig. 21 zu erkennen.

Die Grundlagen der Konstruktion wurden schon weiter oben kurz gestreift. Wenn der Zustand der Maschine vollkommen stationär ist, folgt aus Symmetriegründen, daß aus einer Lamellenstromkurve alle Stromstärken abgegriffen werden können, die eine beliebige Lamelle in beliebiger Lage zu der Bürste führt. In der Figur ist eine Lamellenteilung, oder genauer ausgedrückt, die Zeit des Fortschreitens um eine Lamellenteilung, in acht Teile geteilt. Da eine Bürste 1,5 Lamellen bedeckt, erhalten wir im ganzen zwölf Teile,

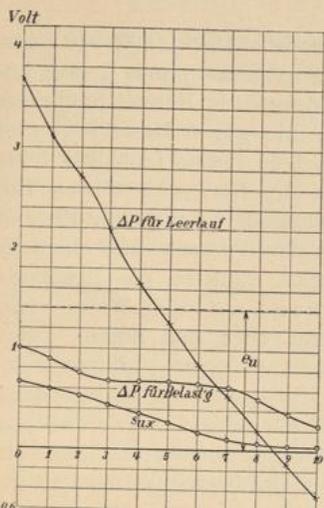


Fig. 20. ΔP -Kurven für Leerlauf und Belastung und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte.

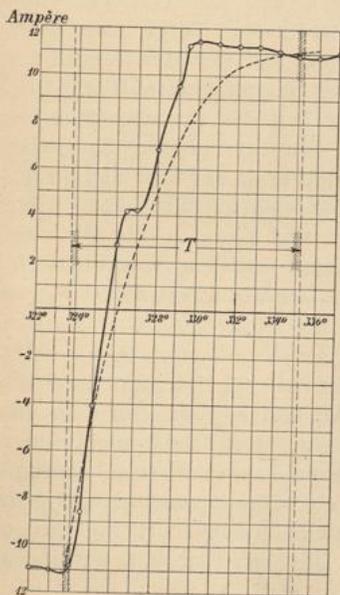


Fig. 22. Aufgenommene und konstruierte Kurzschlußstromkurve.

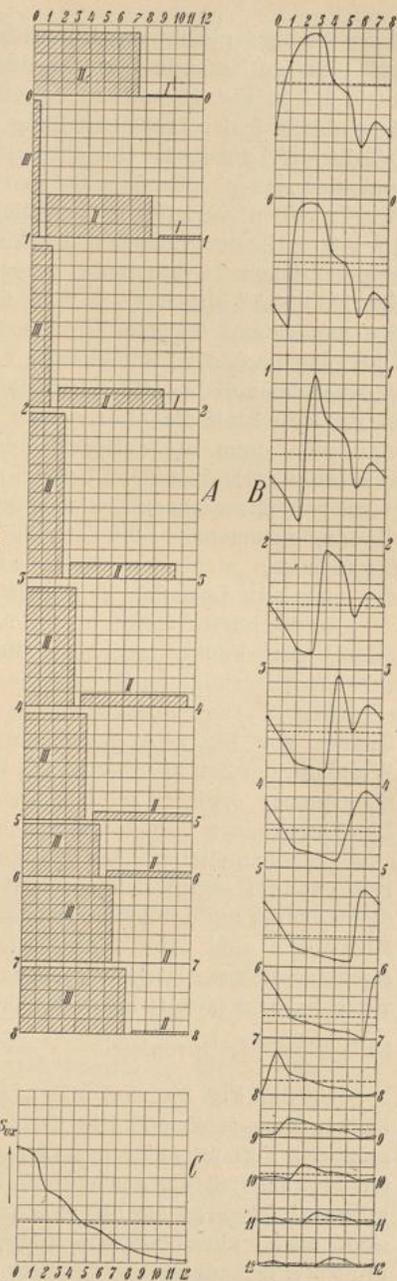


Fig. 21. A. Momentane örtl. Stromdichten. B. Zeitliche Variation der Stromdichte an versch. Bürstenpunkten. C. Mittlere örtliche Stromdichte.

deren Summe gleich der Bürstenbreite ist. Denkt man sich nun z. B. die auflaufende Bürstenspitze an dem Teilpunkt 2 der Lamelle III in Fig. 19 stehend, so überdeckt die Bürste in diesem Augenblick $\frac{2}{8}$ der Lamellenteilung III, die ganze Lamelle II und $\frac{2}{8}$ Teile der Lamelle I. Den Strom, den jede dieser Lamellen führt und der sich gleichmäßig auf den von der Bürste bedeckten Teil der Lamellen verteilt, stellen die Ordinaten 2, $2 + 8 = 10$ und $10 + 8 = 18$ der Lamellenstromkurve dar. Durch die ebenfalls eingeschriebene Gradteilung ausgedrückt, sind es die Ordinaten $325,7^\circ$, $333,7^\circ$ und $341,7^\circ$. Man findet also auf diese Weise leicht die momentane örtliche Stromverteilung über der Bürste. Den Übergang auf die Stromdichten vollzieht man am einfachsten so, daß man bei voll bedeckter Lamelle die Stromordinate als die dann herrschende Stromdichte betrachtet. Bei nur teilweiser Überdeckung muß man dann die entsprechenden Stromordinaten mit dem umgekehrten Verhältnis der Überdeckung multiplizieren. Diese so gewonnenen momentanen örtlichen Stromdichten sind in Fig. 21 A für die angenommenen acht Zeitteile eingetragen. Aus den bei den Stromdichten stehenden Zahlen kann man ihre Zugehörigkeit zu den einzelnen Lamellen in Fig. 19 erkennen.

An der Bürste denke man sich nun mehrere, in unserem Falle zwölf, feste Punkte gegeben. Man kann dann aus Fig. 21 A die zeitliche Änderung der Stromdichte an einem solchen Bürstenpunkt entnehmen. Die einzelnen Werte liegen alle auf einer für alle Kurven der Fig. 21 A gemeinsamen Ordinate. Trägt man diese Werte mit der Zeit als Abszisse an, so erhält man eine der Kurven der momentanen örtlichen Stromdichten eines Bürstenpunktes (Fig. 21 B). Die Länge einer Periode ist gleich der Zeit des Fortschreitens um eine Lamellenteilung. Der Mittelwert der Stromdichte für jeden Bürstenpunkt ergibt sich durch Planimetrieren der von den Stromdichtekurven mit der Abszissenachse eingeschlossenen Flächen. Diese Mittelwerte sind jeweils eingezeichnet und dann in Fig. 21 C zusammengefaßt zur Darstellung der mittleren örtlichen Stromdichte in verschiedenen (zwölf) Bürstenpunkten. Der Mittelwert dieser Kurve

ist gleich der Stromdichte $s_u = \frac{2i_a}{F_u}$.

In die Fig. 20 sind die ΔP -Kurven für Leerlauf und Belastung eingezeichnet. Die Kurven ΔP und s_{ux} stimmen dem ungefähren Verlauf nach ziemlich überein, doch sieht man wieder aus Fig. 22, daß die aus s_{ux} erhaltene punktierte Kurzschlußstromkurve tiefer liegt als die experimentell aufgenommene, und man sieht auch, ohne daß die Konstruktion durchgeführt zu werden braucht, daß die Integralkurve der ΔP -Kurve noch tiefer liegen

und der Wirklichkeit noch weniger entsprechen würde. Obwohl man hier stark beschleunigte Stromwendung hat, treten an den Bürsten keinerlei Funken auf.

Steigert man nun die Erregung der Wendepole auf 7,5 Amp. und läßt im übrigen die Veränderungen bestehen, wie sie beim vorigen Versuch waren, so zeigen die Fig. 23—25 die eintretenden Veränderungen. Die Lamellenstromkurve hat jetzt auch negative Werte, und die entsprechende ΔP -Kurve wechselt auch an den betreffenden Stellen ihren Richtungssinn.

Die aus Fig. 23 konstruierte s_{ux} -Kurve schmiegt sich dem Verlaufe von ΔP recht gut an (Fig. 24), und ihre Integralkurve (Fig. 25) deutet auf erhebliche Überkommutation.

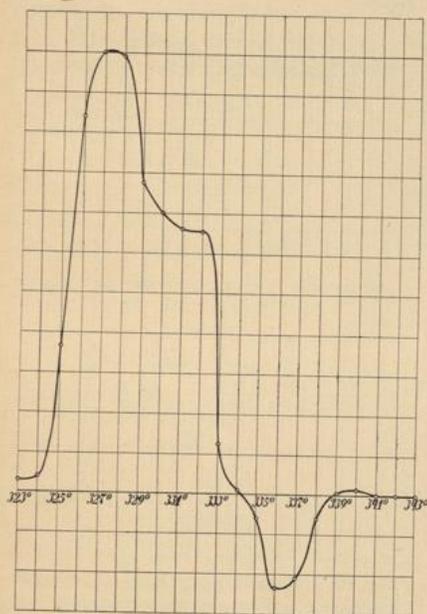


Fig. 23. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

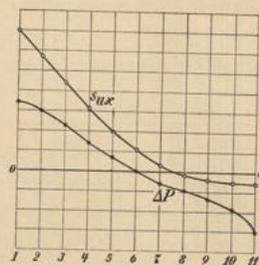


Fig. 24. ΔP -Kurve und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten.

Obwohl nun die experimentelle Kurzschlußstromkurve I (Fig. 25) eine beträchtliche, durch Überkommutation hervorgerufene Spitze hat, so waren doch unter der Bürste keinerlei Funken zu bemerken. Sind die Wendepole aus der Maschine entfernt, so tritt bei einer solchen Form der Kurve unbedingt Feuern auf, doch sind dabei die Stromdichten ganz unerheblich. Man sieht also aus allen hier wiedergegebenen Kurzschlußstromkurven, daß weder die Form der Kurzschlußstromkurve noch die Stromdichte für das Feuern allein maßgebende Faktoren sind. Den Beweis für die letztgenannte Tatsache liefern besonders deutlich die Kurven des einer Lamelle zufließenden Stromes, die bei Verstellung der Bürsten in der Dreh-

richtung eine starke Entlastung der ablaufenden Kante zeigen, wo man eigentlich starke Überkommutation und hohe Stromdichten erwarten müßte. Ferner ließen sich bei Verwendung der geteilten Bürste sehr leicht Bürstenstellungen finden, bei denen die vordere ablaufende Bürste stark feuerte, während die Mittelbürste funkenfrei war und die hintere Bürste glühte, ohne daß an ihr die geringsten Funken zu bemerken waren.

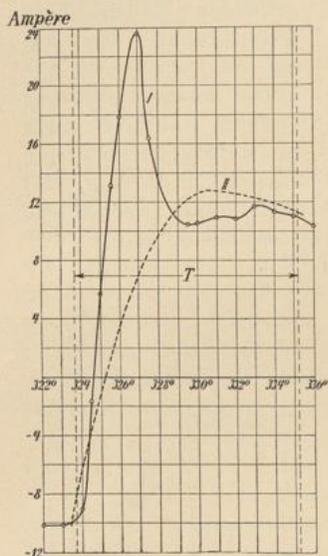


Fig. 25. I. Aufgenommene Kurzschlußstromkurve, II. aus der $s_{u,x}$ -Kurve konstruierte Kurzschlußkurve.

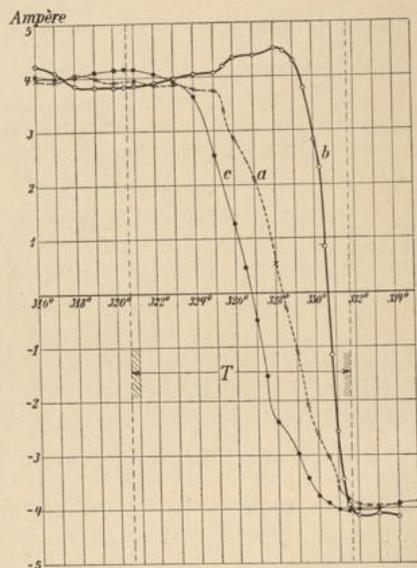


Fig. 26. Aufgenommene Kurzschlußstromkurven: a. bei herausgenommenen Wendepolen, b. bei unerregten Wendepolen, c. bei mit 2,5 Ampère erregten Wendepolen.

Es zeigt sich also, daß es wohl eine Bürstenstellung gibt, bei der die Kommutation annähernd geradlinig über die ganze Breite der Bürste verläuft. Verschiebt man aber die Bürste aus dieser Stellung, oder ändert sich das kommutierende Feld, so verläuft die eigentliche Stromwendung um so schneller, je weiter man sich vom richtigen Felde entfernt, und die eigentliche Stromwendung wird um so mehr gegen die ablaufende Bürstenkante verschoben, je schwächer das kommutierende Feld ist. Bei starker Unterkommutation treten an der auflaufenden Bürstenkante Funken auf, und die Stromdichte wird an dieser Stelle klein, und bei Überkom-

mutation erhält man Funken und sehr kleine Stromdichte an der ablaufenden Bürstenkante. Wenn man die Schleiffläche von Bürsten, die unter solchen Bedingungen arbeiten, betrachtet, so sieht man, daß die Fläche an den Stellen, wo keine Funken auftreten, blank und spiegelnd ist, während sie da, wo Funken auftreten, matt ist. Der Übergangswiderstand ändert sich an der Berührungsstelle beider Flächen fast sprunghaft. Da, wo die Fläche blank ist, haben wir guten Kontakt und dürfen annähernd mit dem Widerstand rechnen, den wir bei Prüfung der Kohlen auf einem Kommutator erhalten, da, wo Funken auftreten, ist der Übergangswiderstand viel größer. Die ganze Erscheinung weist darauf hin,

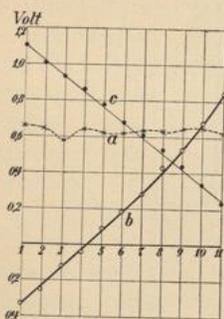


Fig. 27. ΔP -Kurven: a. bei herausgenommenen Wendepolen, b. bei unerregten Wendepolen, c. bei mit 2,5 Ampere erregten Wendepolen.

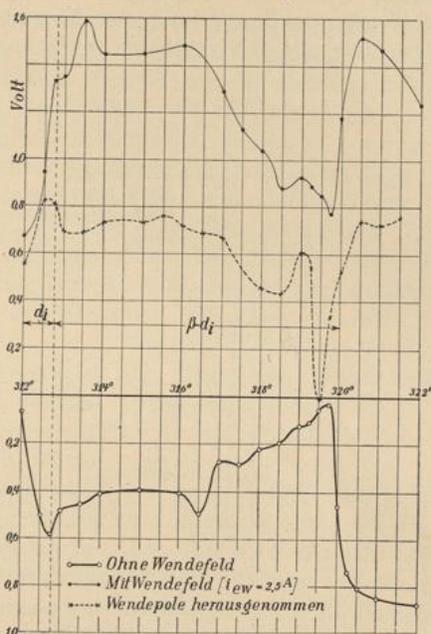


Fig. 28. Kurven der momentanen Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kommutator an der auflaufenden Kante.

daß die Stromleitung durch kleine Funken vermittelt wird und daß die über die Berührungsschicht wandernde Elektrizitätsmenge pro Flächeneinheit um so größer wird, je kleiner die Funken und je größer ihre Zahl pro Flächeneinheit ist.

Einen Einblick in die Wirkungsweise der Wendepole gewähren ferner die Kurven Fig. 26 ff. Sie sind erhalten worden mit $n = 800$, $J = 8$ Amp., $i_e = 0,79$ Amp., wobei die Bürsten 16,5 mm breit waren und in der geometrisch neutralen Zone standen.

Fig. 26 gibt die experimentell ermittelten Kurzschlußstromkurven, und zwar gilt Kurve a, wenn die Wendepole aus der

Maschine herausgenommen sind, b ist die Kurve für unerregte und c für mit $i_w = 2,5$ Amp. erregte Wendepole. Die Bürsten waren ganz funkenfrei, nur bei der Aufnahme der Kurve b traten manchmal ganz kleine Funken auf. Diese Kurve zeigt stark verzögerte Stromwendung, denn es kann sich das Ankerfeld hier sehr gut ausbilden, da den kurzgeschlossenen Spulen Eisen gegenübersteht.

Zu diesen Kurven sind in Fig. 27 die ΔP -Kurven gegeben, und hier hat man ein typisches Beispiel dafür, zu welchen Trugschlüssen die Beurteilung der Kommutationsvorgänge auf Grundlage der mit Millivoltmeter aufgenommenen ΔP -Kurven führen

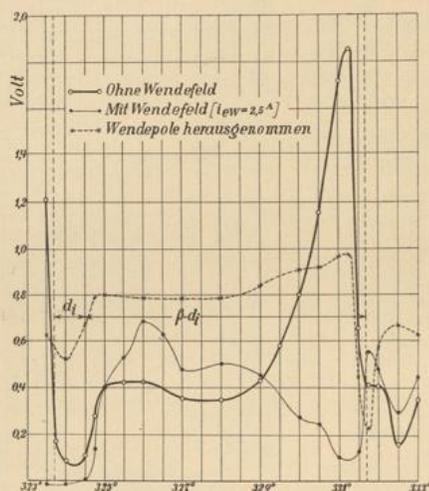


Fig. 29. Kurven der momentanen Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kommutator an der ablaufenden Kante.

kann. Die gleich bezeichneten Kurven der Figuren 26 bis 29 gehören zusammen, und man sieht, daß nur Kurve b , Fig. 27, Unterkommutation anzeigt, und a und c entgegen der Wirklichkeit geradlinige bzw. beschleunigte Kommutation würde vermuten lassen.

Fig. 28 zeigt nun die Kurven der momentanen örtlichen Potentialdifferenz an der auflaufenden Bürstenkante und Fig. 29 dieselben Kurven für die ablaufende Kante. Der Mittelwert dieser Kurven sollte mit den gemessenen ΔP an den Kanten in Fig. 27 übereinstimmen, doch weichen der berechnete und der gemessene Wert ziemlich erheblich voneinander ab. Das erklärt sich zum Teil aus dem Umstand, daß zur Messung der Übergangsspannung

in Fig. 27 ein Millivoltmeter benutzt worden ist, wodurch Meßfehler bedingt sind, da es sich um wellenförmig verlaufende Spannungen von $\frac{K \cdot n}{60} = \frac{45 \cdot 800}{60} = 600$ Perioden handelt. Der Fehler wäre

kleiner, wenn die Kurven nicht so sehr von den Mittelwerten abweichen, was auch bei allen Rechnungen vorausgesetzt wurde. Bessere Übereinstimmung müßte sich bei Aufnahme der ΔP -Kurven mit einem Hitzdrahtinstrument oder einem Elektrometer ergeben.

Man sieht auch aus diesen Kurven, (d_i bezeichnet die Stärke der Isolierschicht zwischen zwei Lamellen) besser noch als aus den Kurzschlußstromkurven, welchen Einfluß die Wendepole auf die Kommutation haben. Vor allem sind, wie Fig. 29 zeigt, an der ablaufenden Kante die Potentialdifferenzen erheblich verringert, während sie an der auflaufenden Kante zugenommen haben (Fig. 28), und diese Umstände müssen natürlich die Funkenbildung sehr beeinflussen. Sieht man hier, wie trotz niedriger Mittelwerte doch sehr hohe Spannungsspitzen auftreten können und bedenkt man, daß in allen hier wiedergegebenen Kurven, auch wo nur geringe Stromdichten vorhanden sind, die gemessenen ΔP erheblich waren, so wird der schon früher ausgesprochene Gedanke, daß die Energieverteilung bzw. die Energiedichte die eigentliche Ursache der Funkenbildung ist, dadurch gestützt. Dazu kommt noch die Beobachtung, daß ΔP hohe Werte annimmt, wenn tatsächlich Funken auftreten.

Der Übergangswiderstand muß an den Stellen, an denen Funken übergehen oder die Stromkurve abgeflacht ist, erheblich wachsen, und seine Zunahme scheint auch den beobachteten merkwürdigen Verlauf der Kurzschlußströme zu bedingen. Daß der Übergangswiderstand den schnellen Änderungen der Stromdichte folgt, geht schon zur Genüge aus der Ähnlichkeit der Kurve in Fig. 28 mit $i_w = 2,5$ Amp. und der Kurve der momentanen Stromdichte an der auflaufenden Kante Fig. 21 hervor, obwohl die Kurven nicht zusammengehören. Das war schon nach den in Band I „Die Gleichstrommaschine“ S. 348 ff. wiedergegebenen Versuchen mit veränderlichen Stromdichten zu erwarten, und man erkennt auch daraus, daß sich der Übergangswiderstand anders verhalten wird als bei konstanten Stromdichten an Schleifringen.

Als sicher geht aus diesen Versuchen hervor, daß Differentialgleichungen für den Kurzschlußstrom, die unter der Voraussetzung eines konstanten und von der Stromdichte unabhängigen Übergangswiderstandes aufgestellt sind, der Wirklichkeit nahekommende Ergebnisse nur liefern können, solange die Annahme eines konstanten Übergangswiderstandes zutrifft. Die Einführung

der Veränderlichkeit der Übergangswiderstände schließt aber die Integration der Differentialgleichungen aus, solange wenigstens nicht das Gesetz der Änderung erkannt ist.

Macht nun schon bei praktisch ganz funkenfreier Kommutation das Verhalten des Übergangswiderstandes eine Vorausberechnung der Vorgänge so gut wie unmöglich, so fallen die aufgestellten Gleichungen vollends zusammen, wenn man die Funkengrenze überschreitet, denn hier ändert sich der Übergangswiderstand und die Stromverteilung fast sprunghaft. Das Verhalten der Maschine in allen Betriebszuständen läßt sich also in der bisher versuchten Weise nicht vorausberechnen.

Die Spannung (Δe) zwischen den Bürstenkanten.

Als Kriterium für die Güte der Kommutation ist in Band I und II der „Gleichstrommaschine“ neben der Reaktanzspannung e_r ,

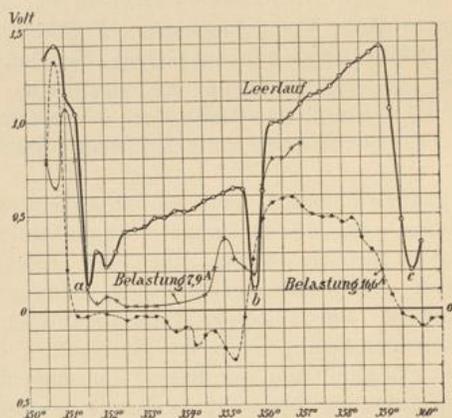


Fig. 30. Kurzschlußspannung Δe für Leerlauf und Belastung.

am Ende der Kurzschlußzeit erst der Maximal- und dann der Mittelwert der in den kurzgeschlossenen, zwischen den Bürstenkanten liegenden Spulen induzierten EMK, der sog. Kurzschlußspannung, berechnet worden. Es soll hier deshalb der Verlauf dieser Spannung an einigen Beispielen gezeigt werden.

Die Art der Aufnahme dieser Kurven ist aus dem allgemeinen Schema Fig. 1 nicht zu sehen, sie ist in Fig. 3 angedeutet.

Läuft eine der Hilfsbürsten auf die Lamellenisolation auf, so wird der Meßstromkreis unterbrochen, die Spannung geht aber

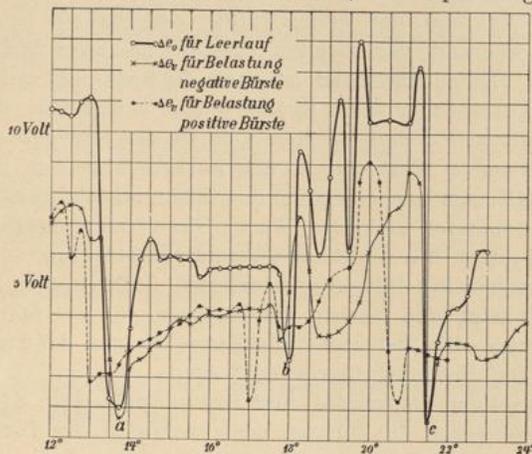


Fig. 31. Kurzschlußspannung Δe . Bürsten um $49,8^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. 30 Ampere Belastung.

wegen mangelhafter Isolierung durch Verunreinigungen des Kommutators nicht ganz auf Null zurück. Diese Unterbrechung erfolgt

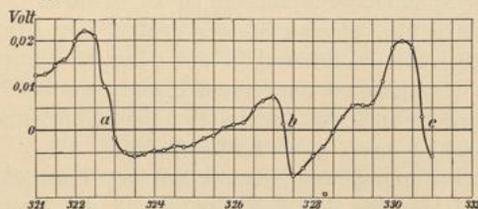


Fig. 32. Kurzschlußspannung bei Stellung der Bürsten in der geom. neutr. Zone und Leerlauf.

zweimal während des Durchlaufens einer Lamelle. In den Fig. 30 bis 33 lassen sich diese Stellen gut erkennen. Sie sind mit a, b, c

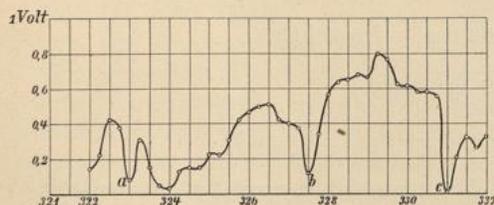


Fig. 33. Kurzschlußspannung Δe bei Stellung der Bürsten in der geometrisch neutralen Zone und 23,5 Ampere Belastung.

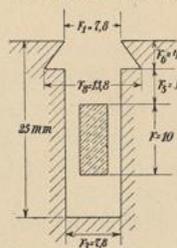


Fig. 34. Nut der Versuchsmaschine I.

bezeichnet. Die Zeit, in welcher der Kommutator um eine Teilung fortschreitet, entspricht der Dauer einer Periode der Kurzschlußspannung. Während der ersten Hälfte der Periode ist nur eine Spule und während der zweiten Hälfte sind zwei Spulen kurzgeschlossen. Dementsprechend ist auch die Spannung zwischen den Enden der kurzgeschlossenen Spulen b und c ungefähr doppelt so groß wie zwischen a und b . Man mißt in der angegebenen Weise nicht den genauen Wert der in den kurzgeschlossenen Spulen induzierten EMK, sondern einen um den Spannungsabfall in der Spule und am Kommutator kleineren Wert. Diese Spannungsabfälle sind jedoch klein gegen die gemessenen Potentialdifferenzen, so daß man ein sehr annäherndes Bild der induzierten EMK erhält.

Fig. 30 zeigt den Verlauf der Kurven für $n=800$ bei verstellten Bürsten. Die Bedeutung der Kurve ist aus der Figur selbst zu sehen. Die Erregung betrug 0,79 Amp.

Bei derselben Tourenzahl und Erregung ist Fig. 31 erhalten worden, doch waren die Bürsten noch weiter in der Drehrichtung verschoben, und zwar um $49,8^\circ$. Die Belastung betrug 30 Amp. Man ist dabei an der Funkengrenze¹, doch waren Funken noch nicht zu sehen. Der Verlauf der Kurzschlußspannung unterscheidet sich für die Bürsten verschiedener Polarität nicht wesentlich, wie es ja auch für symmetrische Maschinen zu erwarten ist.

Weiter ist in Fig. 32 und 33 der Verlauf der Kurven für den Fall dargestellt, daß die Bürsten in der geometrisch neutralen Zone sich befinden. Die Kurven der ersten Figur sind bei Leerlauf aufgenommen worden und die der zweiten bei 23,5 Amp. Belastung, wobei die Maschine noch ganz funkenfrei lief.

Da die Berechnung des Mittelwertes der Kurzschlußspannung einfach ist, soll hier für den Fall der Fig. 33 die Rechnung durchgeführt werden. Die Nut der Maschine ist in Fig. 34 dargestellt und die Maße sind eingeschrieben. Es ergeben sich also die Leitfähigkeiten zu:¹⁾

$$\lambda_n = 1,25 \left[\frac{r}{3r_3} + \frac{r_5}{r_3} + \frac{2r_6}{r_1 \cdot r_8} \right] = 1,8$$

$$\lambda_{ks} = 0,92 \log \frac{\pi \cdot t_1}{2r_1} = 0,513$$

$$\lambda_s \simeq 0,8 \text{ (geschätzt)}$$

$$\lambda_{Ns} = \lambda_n + \lambda_{ks} + 0,5 \frac{l_s}{l_i} \cdot \lambda_s = 3,87.$$

Weiter ist die Zahl der kurzgeschlossenen Spulen höchstens

¹⁾ s. E. Arnold: „Die Gleichstrommaschine“, 2. Aufl. S. 273.

$$S_k = \left(\frac{b_1}{\beta}\right) \cdot \frac{p}{a} = 2$$

und die auf den Umfang reduzierte Bürsten- und Lamellenbreite

$$b_D = b_1 \frac{D}{D_k} = 2,45 \text{ cm}$$

$$\beta_D = \beta \frac{D}{D_k} = 1,74 \text{ cm.}$$

Das Stromvolumen für 1 cm Ankerumfang wird AS

$$AS = \frac{N \cdot i_a}{\pi \cdot D} = 40,5 \text{ Amp./cm.}$$

Die Ankerkonstante ist

$$\frac{N}{K} l_i \cdot v \cdot AS \cdot 10^{-6} = 0,039.$$

Die Kurzschlußspannung Δe_o für die Bürstenstellung in der neutralen Zone berechnet sich zu

$$\Delta e_o = 2S_k \left(\frac{N}{K} \cdot l_i \cdot v \cdot AS\right) \left(\frac{t_1 \lambda_{N_s}}{t_1 + b_D - \frac{a}{p} \beta_D} + \lambda_{q0}\right) 10^{-6}$$

λ_{q0} kann aus Band II der „Gleichstrommaschine“ Fig. 343, S. 291 entnommen werden. Da die Versuchsmaschine, was Pollücke und Jochabstand vom Anker anlangt, von den gebräuchlichen Formen abweicht, so ist hier eine kleinere Leitfähigkeit λ_q zu erwarten. Hier nicht wiedergegebene Messungen zeigen, daß Erreger und Ankerfeld auf einem großen Teil der Pollücke sehr klein sind und daß man hier $\lambda_{q0} \cong 0,5$ zu setzen hat.

Setzt man die erhaltenen Werte in obige Formel ein, so wird

$$\Delta e_o = 0,51 \text{ Volt.}$$

Für die Zeit, in der zwei Spulen kurzgeschlossen sind, ergibt sich aus Fig. 33 der Mittelwert

$$\Delta e_o = 0,57 \text{ Volt,}$$

der Mittelwert für die ganze Kurzschlußzeit ist

$$\Delta e_o = 0,38 \text{ Volt.}$$

Der für zwei Spulen gemessene und der berechnete Wert stimmen der Größenordnung nach überein. Wenn man bedenkt, daß der gemessene Wert der Meßanordnung wegen zu klein ist, wozu dann noch kommt, daß der berechnete Wert unter der Voraussetzung erhalten ist, daß die Bürsten abgehoben sind und der Kurzschlußstrom annähernd geradlinig verläuft, so muß man die Übereinstimmung sogar gut nennen.

Aus den wiedergegebenen Versuchen sieht man, wie verschieden die Größe der Kurzschlußspannung bei den verschiedenen

Feldern sein kann, und daß man in starken kommutierenden Feldern höhere Mittelwerte zulassen kann als in schwachen. Auch ist der Unterschied zwischen Mittel- und Maximalwert der Kurven recht groß, so daß in Fällen, wo die Rechnung hohe Mittelwerte ergibt, Vorsicht geboten scheint.

Feldkurven.

Nun seien auch noch einige Feldkurven wiedergegeben, die mit der in Fig. 1 mit s_2 bezeichneten Hilfsspule erhalten worden sind. Diese Spule liegt mit der betrachteten Spule, in die der Widerstand eingebaut ist, in einer Nut. Sie ist also mit ihr magnetisch gekuppelt.

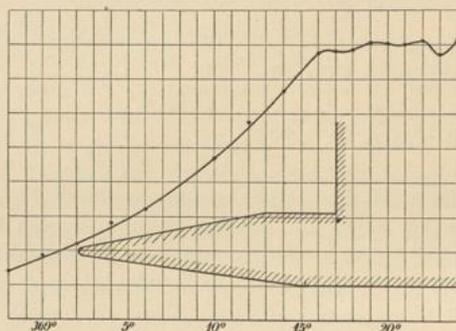


Fig. 35. Feldkurve bei Leerlauf und aufgehobenen Bürsten.

Fig. 35 gibt die Feldkurve bei Leerlauf und abgehobenen Bürsten und Fig. 36 die Feldkurve bei belasteter Maschine. Die Polform ist in Fig. 35 eingezeichnet. Die Tourenzahl war $n=800$ und die Erregung in beiden Fällen $i_e=0,79$ Amp. Die Bürsten waren um $49,8^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Die Zacken in der Feldkurve bei Belastung (Fig. 36) rühren hauptsächlich von der Änderung der Ankeramperewindungen während der Kurzschlußzeit her.

Die weiteren Aufnahmen sollen den Verlauf der Feldkurve in der Kommutierungszone bei Anwendung von Wendepolen zeigen.

Bei der Aufnahme der Kurven Fig. 37 war die Wendepollänge gleich der Ankerlänge und die Breite betrug 47 mm, also 2,7 Zahnteilungen. Die Wendepole waren fremderregt, und zwar in diesem Falle mit 4 Amp. Kurve a ist bei abgehobenen Bürsten erhalten worden und Kurve b bei Belastung der Maschine mit 22 Amp.

*Wann Wendepole
angewendet und
wie von gleicher
Länge wie
der Anker.*

Der magnetischen Kupplung wegen entspricht die in der Hilfspule induzierte Spannung nicht dem Kraftfluß der Wendepole,

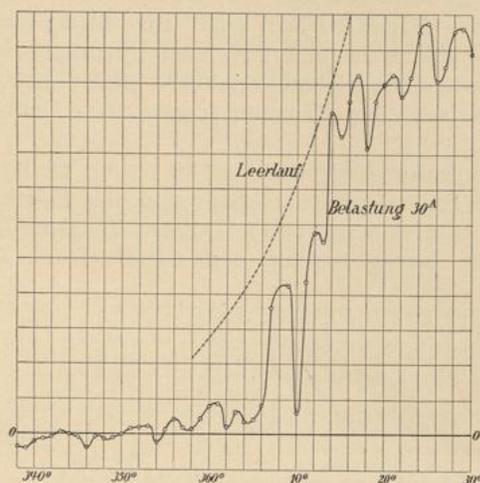


Fig. 36. Feldkurve bei 30 Ampere Belastung. Bürsten um $49,8^\circ$ in der Drehrichtung verschoben.

sondern der Differenz zwischen kommutierender EMK und einem Teil der Reaktanzspannung. Bei reiner Widerstandskommulation

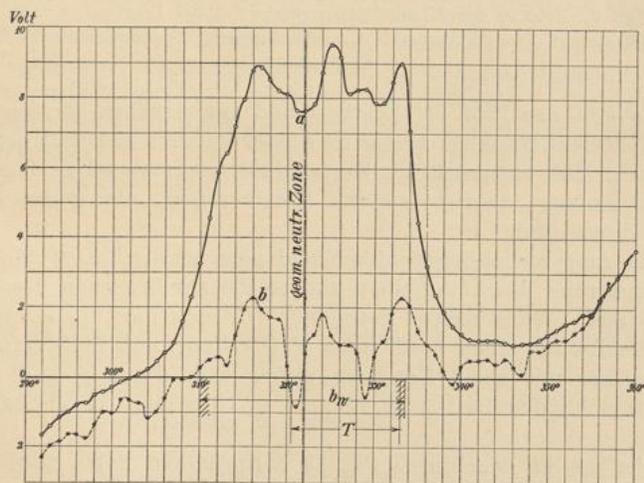


Fig. 37. Feldkurve in der Kommutierungszone: a. bei Leerlauf, b. bei Belastung: $J = 22$ Ampere. $i_{cw} = 4$ Ampere.

strom (Kurve *a*). Kurve *b* gibt das Feld bei abgehobenen Bürsten und $i_{ew} = 23$ Amp., während Kurve *c* das eigentliche Wendefeld, das im Falle *a* bestand, gibt. Die Erregung der Wendepole mußte im Falle *a* $i_{ew} = 12,5$ Amp. betragen. Wie man sieht, stimmt das Feld mit dem bei Belastung resultierenden Feld (*a*) überein, doch ist es nicht wie jenes durch Kurzschlußströme verzerrt.

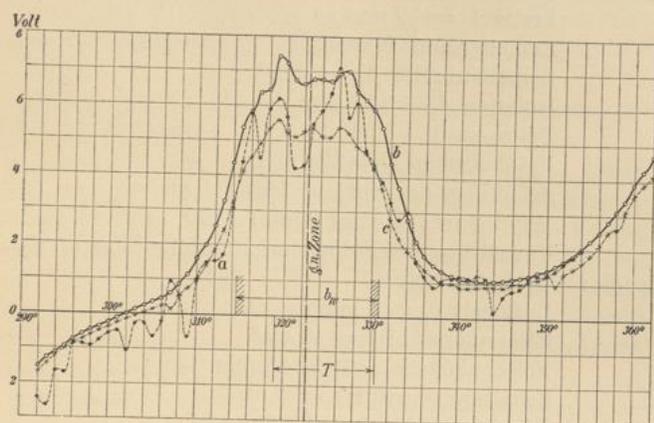


Fig. 39. Feldkurven in der Kommutierungszone: a. bei Belastung: $J = 13,5$ Ampere, Erregung der Wendepole $i_{ew} = 23$ Ampere, b. Leerlauf bei abgehobenen Bürsten, $i_{ew} = 23$ Ampere, c. Leerlauf bei abgehobenen Bürsten, $i_{ew} = 12,5$ Ampere.

In allen diesen Figuren sind als Ordinaten die in der Hilfspule induzierten Spannungen in Volt und als Abszissen die am Kontaktgeber abgelesenen Grade eingeschrieben. Ferner sind Wendepolbreite b_w , Kurzschlußzeit T und geometrisch neutrale Zone eingezeichnet.

Versuche mit Maschine II.

Der bei obigen Versuchen zutage getretene eigenartige Verlauf der Kurzschlußströme und die starken Schwankungen des Ankerstromes machten die Untersuchung einer weiteren Maschine anderer Bauart wünschenswert. Die Hauptdaten dieser Maschine sind:

Anker: Durchmesser $D = 260$ mm
Eisenlänge $l = 120$ mm
ein Luftschlitz von 10 mm
Nutendimensionen 24×12 mm (offen)

- Wicklung: Vierpolige Reihenschaltung $a = 1$
 Leiterzahl $N = 594$
 Nutenzahl $Z = 33$
 Windungszahl einer Spule $w = 3$
 Drahtdurchmesser: $2,5/3$ mm
- Kommutator: Durchmesser $D_k = 150$ mm
 Breite $b_k = 70$ mm
 Lamellenzahl $K = 99$
 Lamellenbreite $\beta = 4$ mm
 Isolation $\delta_i = 0,75$ mm
- Feld: Polpaarzahl $p = 2$
 Feldbohrung $D = 264$ mm
 Schaltung der Spulen: hintereinander
 Windungszahl einer Spule: 1430
 Verhältnis des Polbogens zur Polteilung $\alpha_i \cong 0,75$
- Wendepole: Zahl der Pole: 4
 Luftspalt $\delta_w \cong 5$ mm
 Eisenquerschnitt = 10 cm²
 Polschuhfläche = 60×25 mm
 Schaltung: parallel
 Windungszahl einer Spule: 224
 Drahtdurchmesser: $2,5/2,9$ mm.

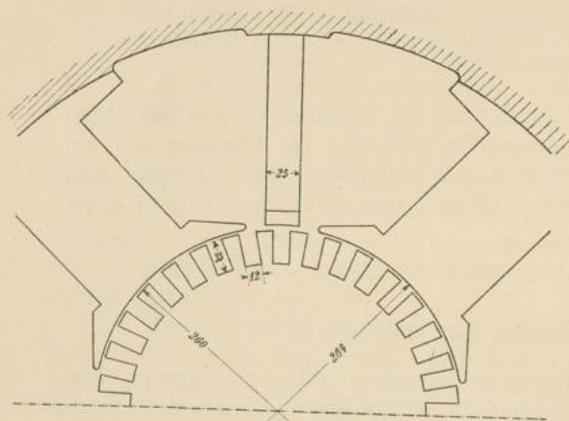


Fig. 40. Skizze der Maschine II.

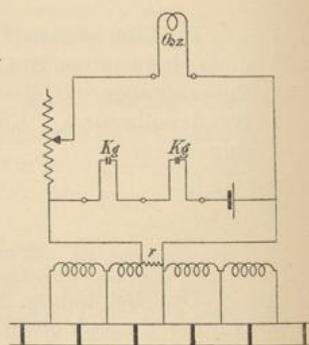


Fig. 41.

Eine Skizze der Maschine ist in Fig. 40 gegeben. Bei etwa 450 Umdrehungen pro Min. und normaler Erregung erhält man 110 Volt an den Klemmen. Alle Versuche an der Maschine sind nach Erreichung einer konstanten, der Belastung entsprechenden

Temperatur durchgeführt. Die wiedergegebenen Oszillogramme sind mit einem Duddelschen Oszillographen aufgenommen worden.

In drei Spulen, die in einer Nut liegen, waren Widerstände eingebaut, deren Größe etwa den bei der vorigen Maschine benutzten Widerständen entspricht; untereinander waren sie etwas verschieden. Von ihren Enden führten Drähte zu Schleifringen, so daß der mit dem Oszillographen gemessene und aufgezeichnete Spannungsabfall in diesen Widerständen ein Maß für den in der Ankerspule fließenden Strom ist.

Die Feldkurve wurde mit einer Prüfspule gemessen, die in der betreffenden Nut lag.

Anfang und Ende der Kurzschlußzeit der Spule, deren Strom gemessen wurde, sind durch kurze Stromstöße bezeichnet, die von einem Akkumulator geliefert werden, der über einen Kontaktgeber und den Strip des Oszillographen geschlossen wird. Die Schaltung ist in Fig. 41 dargestellt. Diese Stromstöße zeigen sich in den Oszillogrammen als scharfe Spitzen an den Stellen, wo die dickeren Striche, welche die Grenze des Kommutierungsvorganges kennzeichnen, unterbrochen sind.

Alle Angaben, die sich auf die einzelnen Aufnahmen beziehen, sind in den Figuren selbst zu finden. Bemerkt soll noch werden, daß alle Aufnahmen bei derselben Tourenzahl der als fremderregter Generator laufenden Maschine (nämlich 500 pro Min.) und konstanter Erregung gemacht worden sind.

Da die Maschine Reihenwicklung hat, sind nur 2 Bürsten aufgelegt worden, um der bei Auflage aller Bürsten vorhandenen selektiven Stromabnahme vorzubeugen.

Die Bürsten waren mittelharte Kohlebürsten. Es sind zwei verschiedene Bürstenbreiten benutzt worden. Die breiten Bürsten von $b=30$ mm, die 6 Lamellen bedeckten, bestanden aus zwei gestaffelten Bürsten von je 15 mm Breite. Durch Abheben der hinteren Bürste sind dann die schmäleren $b=15$ mm messenden Bürsten entstanden, mit denen die Oszillogramme Fig. 47—51 erhalten worden sind. Weiter sind noch schmalere Bürsten benutzt worden, doch sind davon keine Aufnahmen wiedergegeben, weil nichts Neues aus ihnen zu sehen ist. Die dargestellten Kurven sind auch nur eine Auswahl aus einer sehr viel größeren Zahl. Die Bürsten waren bei den Versuchen gut eingelaufen und der Kollektor glatt und gut rund.

Versuche ohne Wendepole.

Die Feldkurve der Versuchsmaschine bei Leerlauf und abgehobenen Bürsten ist in Fig. 42 dargestellt. Die Wellen und Täler in ihrem oberen Teil stimmen der Zahl nach mit den Nuten und Zähnen, die unter dem Pol liegen, überein, wie man sich durch Abzählen in Fig. 40 leicht überzeugen kann. Die Schwankungen des magnetischen Widerstandes müssen hier sehr groß sein, da der Luftspalt sehr klein im Verhältnis zur Nutenweite ist. Es ist $\frac{t_1 - z_1}{\delta} = 6$, während dies Verhältnis im allgemeinen auch bei lamellierten Polschuhen nicht größer als 3 genommen zu werden pflegt. Nun ist hier das Verhältnis $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Zahnteilung}} = 6,3$, so daß man nach Worall¹⁾ sowohl Kraftflußpulsation als auch Schwingungen hat.

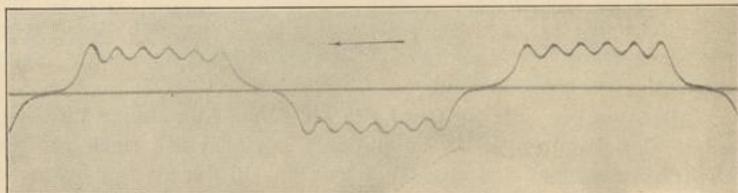


Fig. 42. Feld bei Leerlauf mit abgehobenen Bürsten.
Erregung $i_e = 1,15$ Ampere. Tourenzahl $n = 500$.

In den Oszillogrammen war jedoch nirgends etwas von Pulsationen des Ankerstromes oder der Spannung von der Periodenzahl der Zähne zu sehen. Dies ist auch erklärlich, denn der Einfluß der Kraftflußpulsationen kann nur sehr klein sein. Da die Zähnezahl ungerade ist, ist die relative Lage der Zähne zu den Polen überall verschieden. Die Wirkung der Kraftflußpulsation muß sich also fast ganz verwischen. Die in den Stromkurven noch bemerkbaren Schwankungen rühren sämtlich von den Kommutationsvorgängen her.

Legt man nun die Bürsten in der neutralen Zone auf, so feuert die Maschine bei Leerlauf sehr stark, ganz gleichgültig, wie breit die Bürsten sind. In den kurzgeschlossenen Spulen werden sehr große Kurzschlußströme induziert, deren Form aus Fig. 43 zu erkennen ist. Die Stromdichten unter den auf- und ablaufenden Bürstenkanten sind aber in allen Fällen, auch bei Verwendung von Wendepolen annähernd Null. In dem Anker fließt ein Wechsel-

¹⁾ Worall, Journal of the Institution of Electrical Engineers, 1908, Vol. XL.

strom von der Periodenzahl $\frac{K \cdot n}{60}$. Seine Nulllinie ist jedoch in Fig. 43 der Deutlichkeit halber gegen die der Feldkurve verschoben.

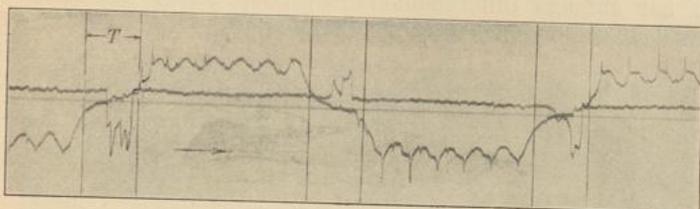


Fig. 43. Feld bei Leerlauf und aufgelegten Bürsten. Tourenzahl $n = 500$. Strom $J = 0$. Spannung $E = 115,5$ Volt. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Bürsten in der neutralen Zone. Starkes Funken. (Die Nullachse der Stromkurve ist verschoben.)

Läßt man die Bürsten in der geometrisch neutralen Zone stehen und belastet, so wird man eine Unterkommutierung erhalten. Gleichwohl arbeitet von einer gewissen Belastung ab die Maschine funkenfrei.

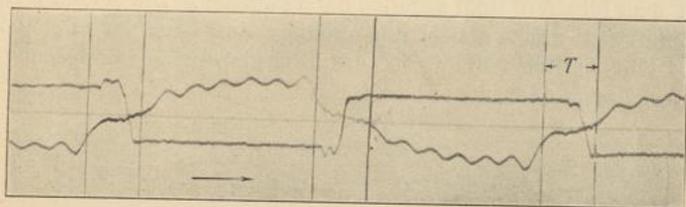


Fig. 44. Feldkurve und Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,13$ Ampere. Strom $J = 50$ Ampere. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone. Funkenfrei.

Wie Fig. 44 zeigt, sind bei einer Belastung, die ungefähr der normalen entspricht, Unterkommutierung und zusätzliche Ströme noch ziemlich beträchtlich, aber die Stromänderung in der Spule beginnt erst, nachdem die Bürste ein bis zwei Lamellen überdeckt. Die eigentliche Stromwendung geht in der Nähe der ablaufenden Kante vor sich, unter der jedoch wieder eine sehr kleine Stromdichte herrscht.

Auch bei Verschiebung der Bürsten in der Drehrichtung ($16,6^\circ$) bleibt bei funkenlosem Gang eine verzögerte Kommutierung bestehen (Fig. 45).

Die Erscheinungen bleiben auch noch ganz dieselben, wenn man die Bürsten entgegen der Drehrichtung verschiebt (Fig. 46).

Hebt man bei dem Betriebszustand, den die Maschine bei Aufnahme der Fig. 44 hatte, die hintere Bürste ab, so erhält man Fig. 47. Die eigentliche Kommutierungszeit kürzt sich ab, und man hat anfangs Unterkommuation, aber gegen das Ende der Kurzschlußzeit beschleunigte Stromwendung.

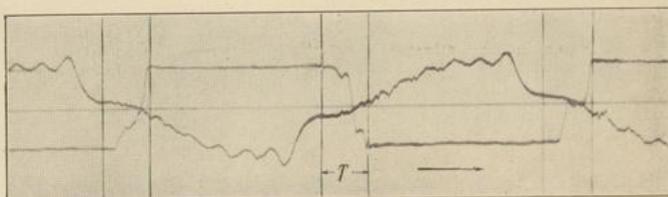


Fig. 45. Feldkurve und Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampere. Strom $J = 37,5$ Ampere. Spannung $E = 69,5$ Volt. Bürsten $16,6^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Funkenfrei.

Eine genau geradlinige Kommutierung zu erreichen, ist praktisch unmöglich, (und ein Verlauf des Stromes, wie ihn Fig. 45 zeigt, wird dem Idealfall wohl ziemlich nahe kommen). Die beiden Bürsten kommutieren nicht gleich und können das auch im allgemeinen nicht tun, weil sich die Größe des Übergangswiderstandes mit der Stromrichtung ändert.

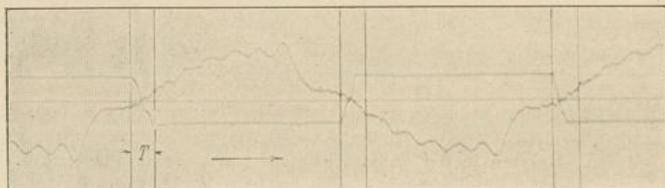


Fig. 46. Feldkurve und Strom in einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampere. Strom $J = 32$ Ampere. Spannung $E = 97$ Volt. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Bürsten um $16,6^\circ$ gegen die Drehrichtung verstellt. Funken unter der auflaufenden Kante der positiven Bürste.

Die Funkengrenzen der Maschine bei der Bürstenstellung und -breite von Fig. 48 liegen bei 60 und 74 Amp. Belastungsstrom. An den Funkengrenzen sind die Kurzschlußstromkurven kaum merklich von denjenigen bei funkenfreiem Lauf verschieden.

Entlastet man in der letzten Bürstenstellung die Maschine mehr und mehr, so wird man wegen der Zunahme des Wendefeldes im

Verhältnis zum Ankerfeld eine Überkommation erhalten. In dem in Fig. 49 dargestellten Falle ist an der durch die Kontaktgebermarken bezeichneten negativen Bürste *A* der Verlauf des Kurzschlußstromes gegen Ende der Kurzschlußzeit hin so, wie man ihn bisher anzunehmen pflegte. Ein Betrieb der Maschine in diesem Zustand

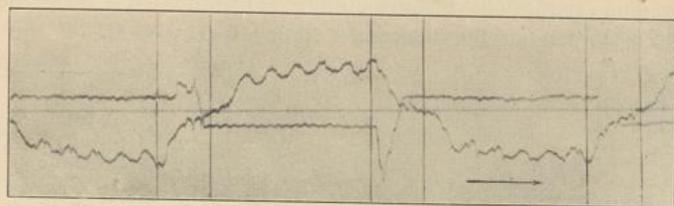


Fig. 47. Feldkurve und Strom in einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampere. Strom $J = 50$ Ampere. Spannung $E = 92$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone.

ist aber nur für einige Minuten möglich, denn das Feuern ist so stark, daß sowohl Kohle als Kommutator bald ernstlich beschädigt würden. Bei weniger starker Überkommation hat man gegen Ende der Kurzschlußzeit stets ein ganz wagrechtes Stück in der Kurzschlußstromkurve. Das heißt also, daß dieser Teil der Kurzschlußzeit, in welcher der Strom in der Spule schon konstant und

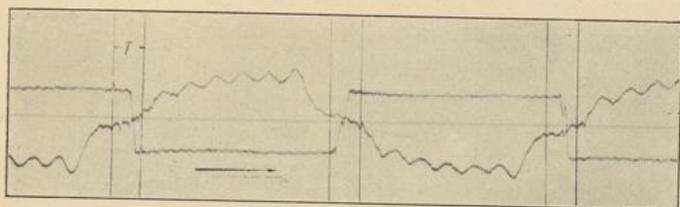


Fig. 48. Feldkurve und Strom in einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampere. Strom $J = 70$ Ampere. Spannung $E = 75$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten in der Drehrichtung um $16,6^\circ$ verschoben. Funkenfrei.

die Größe des Ankerzweigstromes erreicht hat, eigentlich nicht mehr zur Kommutationszeit gerechnet werden kann. Die Lamellenstromkurve konnte bei dieser Maschine leider nicht aufgenommen werden, sie würde aber zeigen, daß die Lamelle nahezu stromlos abläuft. Die Funken treten jedoch gerade an der ablaufenden Kante der Bürste auf und erstrecken sich über das Stück der Bürste, welches dem wagrechten Teile der Kurzschlußstromkurve entspricht.

Dieser bisher unbeobachtet gebliebene Verlauf der

Stromkurve läßt sich nur aus einer starken Vergrößerung des spezifischen Übergangswiderstandes an den Funkenstellen erklären. Seine Erhöhung zwingt einen Teil der zusätzlichen Ströme, sich über den Anker und den äußeren Stromkreis zu schließen. Auf diese Weise wird es erreicht, daß, solange überhaupt eine erträgliche Stromwendung stattfindet, die Stromdichte an den ablaufenden Bürstenkanten kleine Werte erhält.

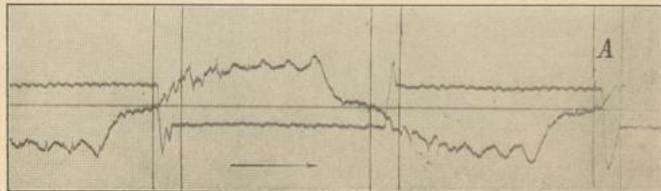


Fig. 49. Feldkurve und Strom in einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampere. Strom $J = 32$ Ampere. Spannung $E = 82$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten um $16,6^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Starke Funken.

Im Anker fließen zusätzliche Ströme von der Periodenzahl der Kommutation, und diese Ströme, deren Größe bei minder guter Stromwendung nicht unerheblich ist, sind in den wiedergegebenen

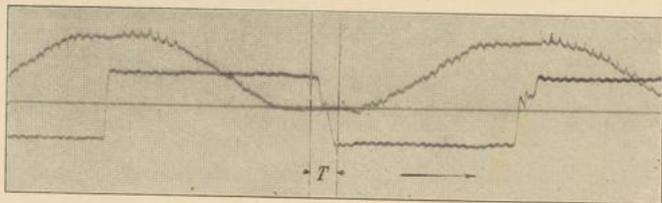


Fig. 50. Strom einer Spule und Potentialkurve zwischen negativer Bürste und einer Lamelle. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampere. Strom $J = 70$ Ampere. Spannung $E = 75$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten um $16,6^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Funkenfrei.

Oszillogrammen deutlich zu sehen. Auch im äußeren Stromkreis sind sie mit Hilfe des Oszillographen nachzuweisen. Würden in den gleichzeitig kurzgeschlossenen Spulen aller Bürsten die Ströme gleichen zeitlichen Verlauf haben, so würden die zusätzlichen Ströme, die in der Ankerwicklung allein sich schließen, sich aufheben. Im allgemeinen ist dies wegen den unvermeidlichen Unsymmetrien auch bei bestem Aufbau der Maschine und wegen der Verschiedenheit

der Übergangswiderstände der Bürsten verschiedener Polarität nicht möglich. Kommutieren die Bürsten nicht gleichzeitig, so treten Ströme und Pulsationen entsprechend höherer Periodenzahl auf.

Die Kurzschlußströme erzeugen ein pulsierendes Längsfeld, das entgegengesetzt zu der herrschenden Ansicht nicht auf einen konstanten Mittelwert abgedämpft wird. Dieses Längsfeld erzeugt eine rasch pulsierende Wechsel-EMK, die sich über die induzierte EMK E_a lagert. Ein Teil der schon besprochenen pulsierenden Ströme wird auf dieses Feld zurückzuführen sein. In den Feldkurven kommen diese Pulsationen überall, besonders innerhalb den Pollücken, deutlich zum Ausdruck, auch in den Fällen, wo gute oder geradlinige Kommutation stattfindet, denn auch dann hat man eine Kraftfußänderung von $+\Phi$ auf $-\Phi$.

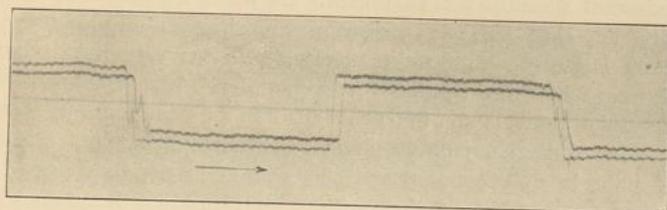


Fig. 51. Strom der ersten und zweiten Spule einer Nut (der Ordinatenmaßstab der Kurven ist verschieden). Tourenzahl $n=500$. Erregung $i_e=1,15$ Ampere. Strom $J=70$ Ampere. Spannung $E=75$ Volt. Bürstenbreite $b=15$ mm. Bürsten um $16,6^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Funkenfrei.

Der große Einfluß dieser Pulsationen auf die Potentialkurve ist aus Fig. 50 zu ersehen. Dort ist die Spannung einer Bürste gegen einen Schleifring aufgezeichnet, der mit einer Lamelle verbunden war. Obwohl nur kleine zusätzliche Ströme vorhanden sind, ergeben sich infolge der raschen Änderung des Kurzschlußstromes bedeutende Schwankungen der EMK, die bis zu 16 Volt sich erheben. Da diese Spitzen sich, wenn auch abgeschwächt, bis unter die Bürsten fortsetzen, so finden hiermit die früher beobachteten Spitzen der Potentialkurven unter den Bürsten ihre einfache Erklärung. Es ist wohl anzunehmen, daß sie auf die Funkenbildung nicht ohne Einfluß sind.

Es ist dann noch untersucht worden, ob sich im Verlauf der Kurzschlußströme der verschiedenen Spulen einer Nut Abweichungen gegeneinander zeigen. Da die Lage der Spulen relativ zum Feld verschieden ist und die letzte Spule der Nut unter ungünstigeren Umständen aus dem Kurzschluß tritt, so wären solche Abweichungen

wohl erklärlich. Aus den gemachten Aufnahmen geht aber hervor, daß der zeitliche Verlauf der Kurzschlußströme einer Nut nicht wesentlich verschieden ist. Es ist deshalb hier nur eine solche Aufnahme als Beispiel gegeben (Fig. 51). Der Ordinatenmaßstab beider Kurven ist verschieden.

Versuche mit Wendepolen.

Wie man aus den bisher besprochenen Oszillogrammen ersehen kann, ist der mechanische Aufbau der benutzten Maschine sehr unsymmetrisch. Abgesehen von den elektrischen Ursachen bedingt dies schon allein eine große Verschiedenheit der Kurzschlußströme gegeneinander, obschon für eine bestimmte Stellung einer Spule sich jedesmal dieselbe Kurve ergibt. Da die Wicklung eine Reihewicklung ist, sind bei zwei weggelassenen Bürsten die Felder aller Pollücken für die Kommutation maßgebend, denn es liegen immer zwei kurzgeschlossene Spulen hintereinander. Das erschwert hier die Diskussion der Kurven beträchtlich. Bei Anwendung von Wendepolen treten diese Unsymmetrien am deutlichsten hervor. Die Pole stehen nicht in den Symmetrieachsen und auch die Größe des Luftspaltes scheint bei jedem eine andere zu sein. Es ist daher kein Feld einer Kommutationszone wie das einer anderen.

Hier ist auch die axiale Länge des Wendepols kürzer, als es gut und allgemein üblich ist, sie beträgt nur die Hälfte der Ankerlänge. Die Breite ist gleich der Zahnteilung. Die Wendepole sind fremd erregt. Bei leerlaufender Maschine, also unerregten Wendepolen, feuert die Maschine stark. Das ist auch nicht anders zu erwarten, da sich ja das Ankerfeld, dem in der Kommutiernußzone Eisen gegenübersteht, stark ausbilden kann. Der Verlauf des Kurzschlußstromes ist ganz derselbe wie in Fig. 43, so daß hier auf die Wiedergabe verzichtet werden kann.

In Fig. 52 und 53 sind zwei Aufnahmen dargestellt, die unter gleichen Bedingungen erhalten sind, nur waren im ersten Fall die Wendepole unerregt, während im zweiten Fall die Erregung 2 Amp. betrug. Bemerkenswert ist, daß im ersten Fall trotz Unterkommuation, die hier wieder in der charakteristischen Weise verläuft, funkenfreie Stromwendung stattfand, während bei der gegen das Ende wenig beschleunigten Kommutation, wie sie Fig. 53 zeigt, schon Funken an den ablaufenden Kanten der Bürsten auftraten.

Allerdings ist hier $\frac{\text{Wendepolamperewindungen}}{\text{Ankeramperewindungen}} = 0,6$.

Bei Anwendung von schmalen Bürsten ($b = 15$ mm Fig. 54)

war bei gleichem Belastungsstrom und schwächerer Erregung des Hauptfeldes für funkenfreien Gang dieses Verhältnis

$$\frac{2AW_w}{N \cdot i_a} = 2,12.$$

Die Stromwendung ist, wie man sieht, nur wenig beschleunigt und im Anfang sogar leicht verzögert (Fig. 54).

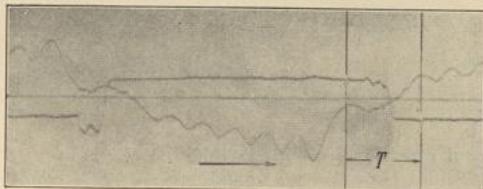


Fig. 52. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$. Erregung des Feldes $i_e = 1,2$ Ampere. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 0$. Strom $J = 20$ Ampere. Spannung $E = 67$ Volt. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Funkenfrei.

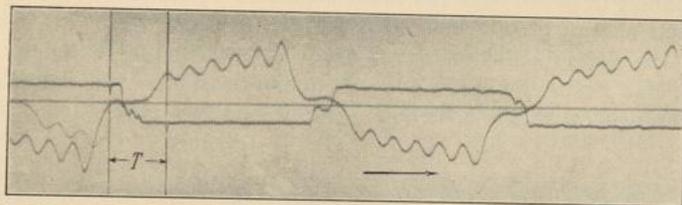


Fig. 53. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$. Erregung des Feldes $i_e = 1,2$ Ampere. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 2$ Ampere. Strom $J = 20$ Ampere. Spannung $E = 67$ Volt. Funken an den ablaufenden Kanten der Bürsten. Kontaktgebermarken an der positiven Bürste. Bürstenbreite $b = 30$ mm.

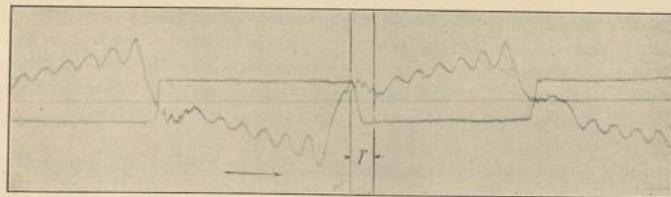


Fig. 54. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$. Erregung des Feldes $i_e = 0,95$ Ampere. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 7$ Ampere. Strom $J = 20$ Ampere. Spannung $E = 65$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten in der neutralen Zone. Funkenfrei.

Sind die Wendepole unter diesen Umständen unerregt, so bedingt das überwiegende Ankerfeld so starke Unterkommulation, daß leichtes Feuern eintritt (Fig. 55).

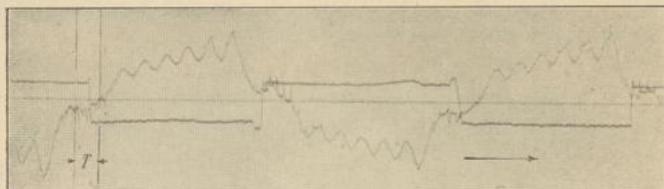


Fig. 55. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$. Erregung des Feldes $i_c = 1$ Ampere. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 0$. Strom $J = 20$ Ampere. Spannung $E = 67$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten in der neutralen Zone. Kleine Funken an den ablaufenden Kanten beider Bürsten.

Auch wo zu Anfang der Kurzschlußzeit die Stromwendung beschleunigt (Fig. 56) und am Ende verzögert ist, haben sich Funken an den ablaufenden Kanten der Bürsten gezeigt.

Aus diesen Aufnahmen mit Wendepolen sieht man wieder, wie stark das resultierende Feld unter den Wendepolen von den Kommutierungsvorgängen beeinflusst wird. Die Schwingungen sind auch

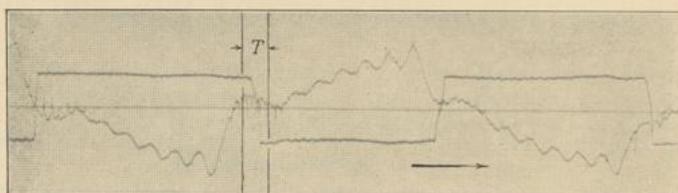


Fig. 56. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$. Erregung des Feldes $i_c = 1,2$ Ampere. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 7$ Ampere. Strom $J = 45$ Ampere. Spannung $E = 65$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone. Kleine Funken an den ablaufenden Kanten beider Bürsten.

hier nicht abgedämpft, sondern gegen den Fall, daß keine Wendepole vorhanden sind, noch wesentlich verstärkt. Die starken Spitzen der Feldkurve stehen genau um die Zeit des Fortschreitens einer Lamelle auseinander und fallen zeitlich mit dem eigentlichen Richtungswechsel des Stromes in den Ankerspulen zusammen.

Die erlangten Ergebnisse sind zunächst nur für die vorliegen-

den Verhältnisse, insbesondere für die verwendeten Polformen und Nutenformen gültig und nicht alle Ergebnisse dürfen verallgemeinert werden. Bemerkenswert ist jedoch, daß fast ausnahmslos die Zeit der Stromwendung viel kürzer ist, als sie sich aus der Bürstenbreite ergibt und daß das charakteristische Abflachen der Kurzschlußstromkurve bei den verschiedensten Stromdichten und Bürstenbreiten und sowohl bei Wendepolen als ohne Wendepole auftritt. Die Form der Kurzschlußstromkurve weist darauf hin, daß die Bürste über ihre Breite sehr verschieden beansprucht wird und daß eine richtige Schichtung der Bürste aus Kohle verschiedener Härte und Leitfähigkeit oder verschiedenem Material auf die Kommutierung von großem Einfluß sein kann. Versuche über die Verteilung der Energiedichte unter der Bürste bei verschiedenen Kommutationsbedingungen und verschiedenen Bürstenmaterialien können hierüber Aufklärung bringen.

Die besprochenen Versuche wurden im Elektrotechnischen Institut der Hochschule während der letzten $2\frac{1}{2}$ Jahre durchgeführt. Die Herstellung von brauchbaren Meßvorrichtungen und die Ausrüstung der Maschinen mit den erforderlichen Hilfseinrichtungen nahmen viel Zeit in Anspruch und die Versuche mußten oft längere Zeit unterbrochen werden. Die Einheitlichkeit der Versuche hat durch diese lange Zeit, über welche sie sich verteilen, etwas gelitten. Nachdem die Versuchseinrichtung nun besteht, werden sie in direktem Zusammenhange weiter fortgesetzt und auch auf die Energieverteilung und die Vorgänge in der Berührungsschicht von Bürste und Kommutator ausgedehnt.

Bei der Ausführung der Messungen haben mich die Herren Dr. J. Pollack, Ingenieur E. Pfiffner und Diplomingenieur F. Jordan in dankenswerter Weise unterstützt.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

(Für Kommutierung mit Kohlenbürsten.)

1. Die Stromdichte unter der Bürste ist nicht proportional der vorhandenen Potentialdifferenz. Der aus Stromdichte und Potentialdifferenz berechnete Übergangswiderstand wächst, sobald kaum sichtbare Funken unter der Bürste auftreten, rasch auf ein Vielfaches des Wertes bei ganz funkenfreiem Lauf an.
2. Treten unter einer Bürste Funken auf, so ist die Stromdichte an den funkenfreien Stellen am größten und da, wo sichtbare Funken auftreten, sehr klein.
3. Für das Funken einer Bürste ist nicht die Stromdichte,

sondern es sind die auftretende Potentialdifferenz (AP) an der Übergangsschicht und die Energiedichte maßgebend.

4. Die momentane örtliche Stromdichte der Bürste ist im allgemeinen eine stark schwankende. Der Übergangswiderstand ändert sich infolgedessen an jedem Bürstenpunkt von Moment zu Moment.

5. Die aus der Kurve der mittleren örtlichen Potentialdifferenz (AP -Kurve) bzw. der mittleren örtlichen Stromdichte (s_{uv} -Kurve) berechnete Kurzschlußstromkurve stimmt nur dann annähernd mit der experimentell ermittelten überein, wenn die Kommutation annähernd geradlinig verläuft. In anderen Fällen ist die Abweichung um so größer, je unregelmäßiger die Kommutation verläuft.

6. Eine geradlinige Kommutation über die ganze Kurzschlußzeit tritt nur ausnahmsweise auf. Die Zeit, in der die Kommutation sich vollzieht, ist im allgemeinen kürzer und oft erheblich kürzer als die der Bürstenbreite entsprechende Kurzschlußzeit. Je schwächer das kommutierende Feld ist, um so mehr wird die Zeit der eigentlichen Stromwendung gegen die ablaufende Bürstenkante verschoben.

7. Wegen dem raschen Anwachsen des Übergangswiderstandes beim Auftreten von Funken, tritt sowohl eine Überkommulation als eine Unterkommulation in geringerem Maße und in zeitlich verkürzter Weise auf.

8. Die zeitlich verkürzte Stromwendung bzw. die beschleunigte Änderung des Kurzschlußstromes erzeugt starke Feldpulsationen, die sich in der Feldkurve und der Potentialkurve des Kommutators bemerkbar machen. Diese Feldpulsationen sind die Hauptursache der Erwärmung der Polschuhe.

9. Die bekannten Differentialgleichungen für den Kurzschlußkreis gelten nur zwischen den Grenzen, innerhalb welcher ein Funken nicht auftritt, annähernd richtige Werte für den im betrachtenden Moment bestehenden Kurzschlußstrom.

10. Die Faktoren, welche den zeitlichen Verlauf der vom Wendefeld induzierten EMK und die Faktoren, welche den zeitlichen Verlauf der EMK der Selbstinduktion der kurzgeschlossenen Spule bestimmen, sind derart verschieden, daß eine vollkommene Kompensation der EMK der Selbstinduktion in keinem Fall erreichbar ist.

11. Die zwischen den Bürstenkanten gemessene oder als Mittelwert berechnete sog. Kurzschlußspannung ist nur so lange ein brauchbarer Maßstab für die Güte der Kommutierung, als die Momentanwerte derselben nicht erheblich vom Mittelwert abweichen.

Treten starke Feldpulsationen in der Kommutierungszone auf, welche große Momentanwerte der Kurzschlußspannung zur Folge haben, so kann eine funkenfreie Kommutierung unmöglich werden.

12. Geschwindigkeit und Selbstinduktion einer Ankerspule dürfen um so größer sein, je besser der zeitliche Verlauf der vom äußeren Feld in der kurzgeschlossenen Spule induzierten EMK mit dem zeitlichen Verlauf der EMK der Selbstinduktion übereinstimmt. Die Form und Stärke des Wendefeldes, die Breite, das Material und die Schichtung der Bürsten haben hierbei den wesentlichsten Einfluß.