

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

**Experimentelle Untersuchung der Kommutation bei
Gleichstrommaschinen**

Arnold, Engelbert

Karlsruhe, [1908]

[urn:nbn:de:bsz:31-289939](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-289939)

Experimentelle
Untersuchung
der Kommutation bei
Gleichstrommaschinen

1908

IVE

1360

IV E 1360

Schwarzmann

Festschrift

zur

Feier des einundfünfzigsten Geburtstages
Seiner Königlichen Hoheit des Grossherzogs

FRIEDRICH II.

herausgegeben von der

Grossherzoglichen Technischen Hochschule

FRIDERICIANA

unter dem Rektorate von Th. Rehbock

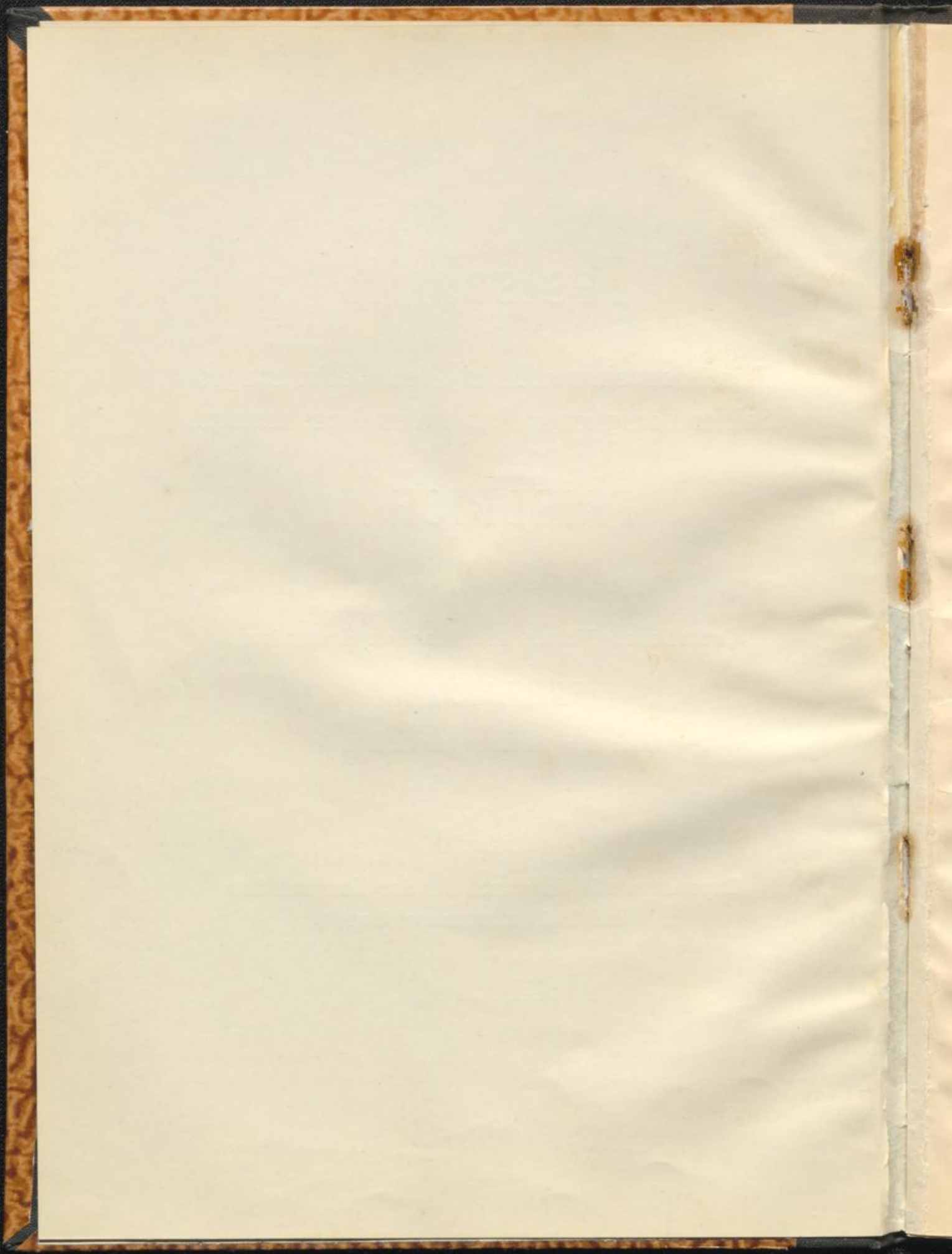
INHALT:

Experimentelle Untersuchung der Kommutation
bei Gleichstrommaschinen

von

Dr.-Ing. E. Arnold

hln



Festschrift

zur

Feier des einundfünfzigsten Geburtstages
Seiner Königlichen Hoheit des Grossherzogs

FRIEDRICH II.

herausgegeben von der

Grossherzoglichen Technischen Hochschule

FRIDERICIANA

unter dem Rektorate von Th. Rehbock

INHALT:

Experimentelle Untersuchung der Kommutation
bei Gleichstrommaschinen

von

^[Ingeburd]
Dr.-Ing. E. Arnold

Karlsruhe [1908]



TV F 1360

G. Braunsche Hofbuchdruckerei
Karlsruhe i. B.

Zum ersten Male darf der Lehrkörper der Großherzoglichen Technischen Hochschule Fride-riciana in diesem Jahre huldigend Euerer Königlichen Hoheit als dem Herrscher des Badischen Volkes in Verehrung und Liebe seine Glückwünsche zum Geburtsfeste darbringen.

In Ehrfurcht und Anhänglichkeit erleben wir, daß das neue Lebensjahr unserem verehrten und geliebten Landesherrn ein gesegnetes sein möge, und daß wir eine lange Reihe von Jahren hindurch bei der Wiederkehr dieses Freudentages uns mit dem ganzen badischen Volk in freudiger Huldigung vereinigen dürfen.

Ein schweres und ereignisvolles Jahr liegt hinter uns. Wurde doch Euerer Königlichen Hoheit der unvergeßliche Vater, dem Badischen

Volke die ehrwürdige Gestalt seines Führers während einer glänzenden über ein halbes Jahrhundert umfassenden Entwicklung, dem Deutschen Reiche der Letzte der Großen aus unvergeblicher Zeit, der Fridericiana ihr Schirmherr, ihr warmerherziger Förderer und Freund entrissen.

Unauslöschlich steht die hehre Gestalt Großherzog Friedrichs I. für alle Zeit vor unserem Auge, unvergänglich ist der Dank, den die Fridericiana Allerhöchstdemselben durch die Jahrhunderte bewahren wird.

Euerer Königlichen Hoheit aber naht sich der Lehrkörper der Fridericiana am heutigen Tage mit der untertänigsten Bitte, daß Euere Königliche Hoheit unserer Hochschule das schon früher so oft erwiesene Wohlwollen bewahren

und unsere Entwicklung mit der gleichen landesväterlichen Huld und Fürsorge verfolgen mögen, die Großherzog Friedrich I. uns in so reichem Maße erwiesen hat.

Unserem erlauchten Fürsten und Herrn und Seinem ganzen Hohen Hause gelobt die Fridericiana heute erneut treue Anhänglichkeit und unwandelbare Hingebung.

Gott schütze unsern geliebten Großherzog!

Gott segne Seine Regierung!

Gott schirme
das Großherzogliche Haus!

Experimentelle Untersuchung der Kommutation bei Gleichstrommaschinen.

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

In einer Gleichstrommaschine wird in jeder Ankerspule ein Strom von wechselnder Richtung induziert. Um im äusseren Stromkreis einen Gleichstrom zu erhalten, muss der Strom einer Ankerspule während der Zeit, in der die in ihr induzierte elektromotorische Kraft ihre Richtung wechselt, für den äusseren Stromkreis kommutiert werden. Die Kommutierung bedingt die Anwendung eines Kommutators, mit dessen Lamellen die Enden der Ankerspulen verbunden sind und Bürsten, welche auf dem Kommutator schleifen. Während der Kommutation ist die Spule über die mit ihr verbundenen Lamellen des Kommutators und die Bürste kurz geschlossen.

Die elektromotorischen Kräfte, die in der 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 hiefür

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 Uebergangswiderstand zwischen Bürste und Kommutator, der Oberflächenbeschaffenheit des Kommutators und den Erschütterungen der Bürsten. Namentlich der Uebergangswiderstand 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 Ankerspulen 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, EMK'en 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 können*, 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 Uebergangswiderstandes der Bürsten oder doch mit einer Aenderung 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 rechnermässig 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 Uebereinstimmung tritt nur in besonderen Fällen auf, d. h. dort, wo die wirklichen Verhältnisse den bei der Rechnung angenommenen annähernd entsprechen.

* Siehe E.T.Z. 1899 E. Arnold und G. Mie, Theorie der Kommutation.

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

Die grosse technische und wirtschaftliche Bedeutung, welche eine gute Kommutierung für den Dynamobau besitzt, rechtfertigt es aber, dass dem in seinen Grundzügen zwar einfachen, in seinen Erscheinungsformen aber sehr mannigfaltigen Problem so viel Aufmerksamkeit zugewendet wird. Die überraschend grossen Fortschritte, die im Bau von Gleichstrommaschinen im Laufe der letzten Jahre gemacht worden sind, beruhen ausschliesslich auf der Verbesserung der Kommutierung. Eine bedeutende Steigerung der Leistungsfähigkeit der Gleichstrommaschinen sowie der Bau von Maschinen für grosse Leistungen und hohe Umdrehungszahlen, für rasch wechselnde Drehrichtungen und grosse Ueberlastungen sind erst in den letzten Jahren gelungen, nachdem neue Anordnungen für die Kommutierung erprobt waren.

Ohne eine vorzügliche Kommutierung wäre es z. B. nicht möglich gewesen, Gleichstrommotoren für den Antrieb von Walzenzugmaschinen zu bauen, deren maximal erforderliche Leistung 8000 bis 10000 Pferdestärken beträgt und deren Drehrichtung in der Minute bis 10 mal umgesteuert wird. Das gleiche gilt von grossen, rasch laufenden Gleichstromgeneratoren, die heute zahlreich in Verbindung mit Dampfturbinen gebaut werden.

Versuchsanordnung.

Das Schema der Versuchsanordnung mit der alle in Betracht kommenden Messungen vorgenommen wurden, ist in Fig. 1 dargestellt.

Eine Ankerspule s_1 ist aufgeschnitten und die beiden Schnittenden a, b sind durch einen Widerstand r_1 von 0,02 Ohm mit einander und durch zwei Schleifringe mit den Bürsten b_2, b_3 verbunden. Der Widerstand einer Spule beträgt etwa 0,025 Ohm. Der in der Spule s_1 fliessende Kurzschlussstrom kann dann durch Messung des Spannungs-

abfalls 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

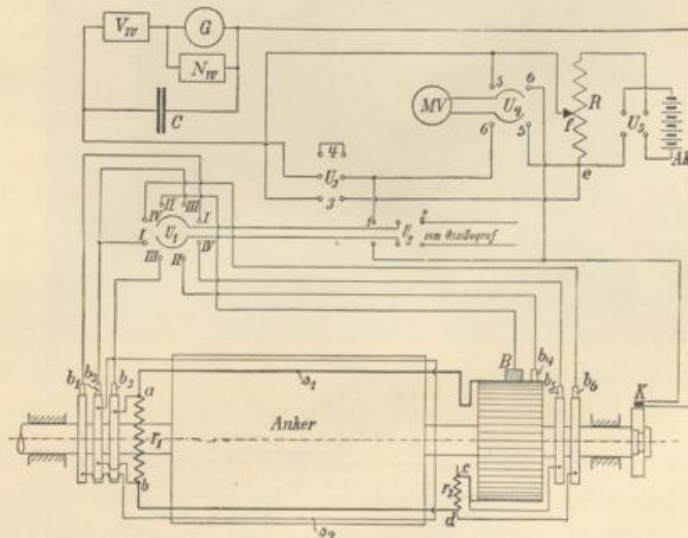


Fig. 1. Messanordnung zur Untersuchung der Kommutation.

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. 2 a und b). Bei ihm sind nicht wie bei den üblichen Konstruktionen Schleifkontakte, sondern Druckkontakte angewandt, und die Dauer des Kontaktes ist soweit

herabgedrückt, dass der Apparat auch bei sehr schnellen Stromwechsellern 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.

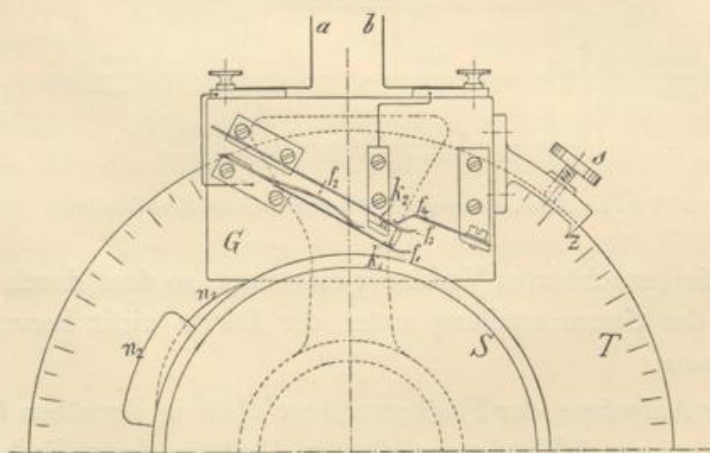
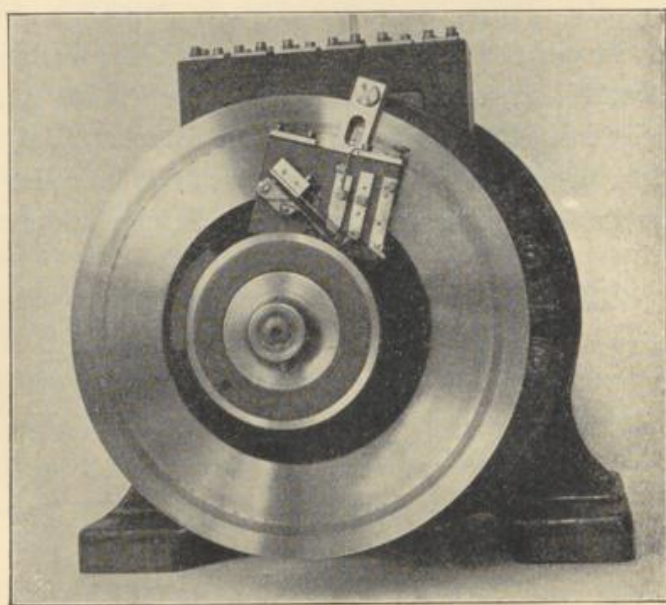


Fig. 2a und b. Kontaktgeber.

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_1 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 pro Umdrehung gegebenen Momentanspannungen annähernd gleich, so kann der Galvanometer als Nullinstrument benützt werden, indem man die Gleichstromspannung zwischen f_e durch Aenderung 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 Aenderung der Potentialdifferenz zwischen dem Kommutator und einem Bürstenpunkt). U_1 in II, U_2 in I, 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. u. b.

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

f. Weiter ist noch eine in der Fig. 1 nicht gezeichnete Hilfs-

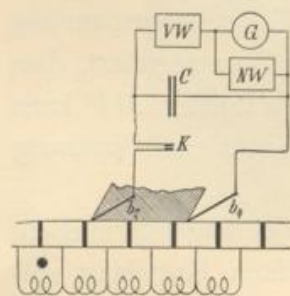


Fig. 3. Schema der Versuchsordnung zur Messung der Kurzschlussspannung.

bürste 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° 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
Wicklung:	zweipolig
	Leiterzahl $N = 270$
	Nutzenzahl $Z = 45$
	Windungszahl pro Spule $w = 3$
	Leiterabmessungen: 4 Drähte parallel 1,3 mm nackt
	Spulenseiten pro 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
 Polbogen $b_p = 24$ cm
 Luftspalt für den Hauptpol $\delta = 2$ mm
 „ „ „ Wendepol $\delta_w = 2$ mm

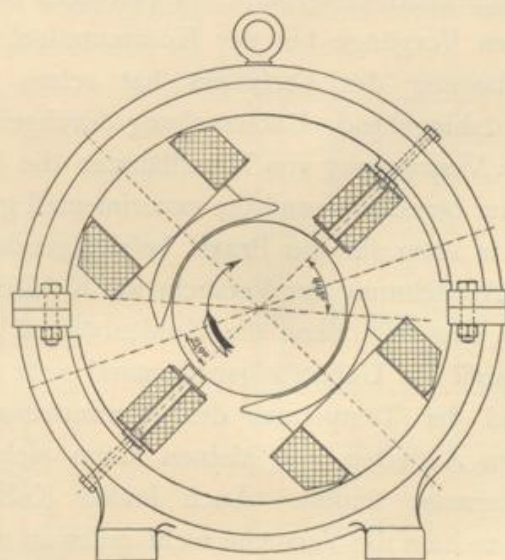


Fig. 4. Skizze der Versuchsmaschine I.

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 Fall 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. 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 Uebereinstimmung 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. Czeija* 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 Uebergangswiderstand sehr 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 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 experimentelle Untersuchung der Kommutierungsvorgänge in Gleichstrommaschinen. Sammlung elektrotechnischer Vorträge. 1903.

die Belastungsströme $\mathcal{Y} = 0$, $\mathcal{Y} = 7,9$ und $\mathcal{Y} = 16,5$ 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 Uebereinstimmung ist recht mangelhaft. Ebenso wenig findet sich in den anderen Figuren, in denen die konstruierte Kurzschlussstromkurve gegeben ist, eine bessere Uebereinstimmung. Es lässt sich aus den Kurven des mittleren örtlichen Bürstenpotentials ΔP wohl ersehen, ob Ueber- oder Unterkommuation statthat, doch sind die Ergebnisse

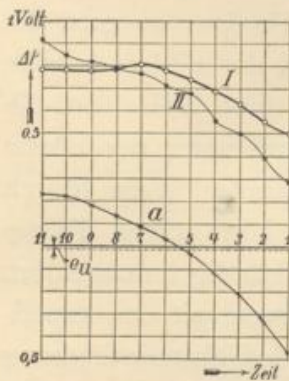


Fig. 5. ΔP -Kurven:
a. bei Leerlauf,
I. bei 16,5 Ampère Belastung,
II. bei 7,9 » »

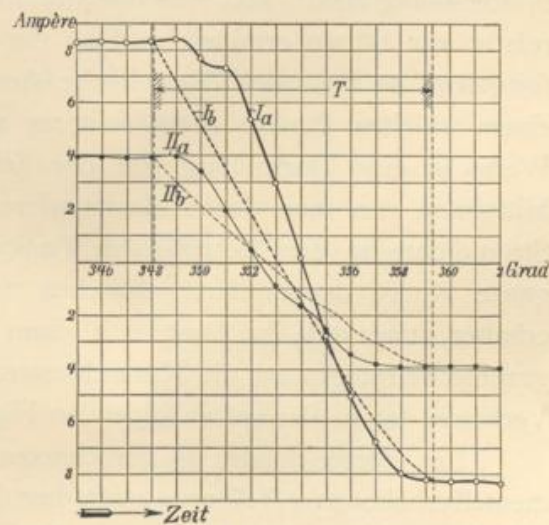


Fig. 6. I_a u. II_a : mit dem Kontaktgeber aufgenommene Kurzschlussstromkurven bei 16,5 u. 7,9 Ampère Belastung, I_b u. II_b : aus den ΔP -Kurven I u. II Fig. 5 konstruierte Kurzschlusskurven.

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 da-

mit 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 Aenderung 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 AP -Kurven zeigt, dass die erhoffte Uebereinstimmung zwischen beiden nicht vorhanden ist. Die Ursache hiervon ist in der Veränderlichkeit des spezifischen Uebergangswiderstandes zu suchen; er ist über die Bürstenbreite veränderlich und daher ist s_{ux} nicht proportional AP . Die Abweichungen sind jedoch nicht gross, wenn die Kommutation gut verläuft.

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,

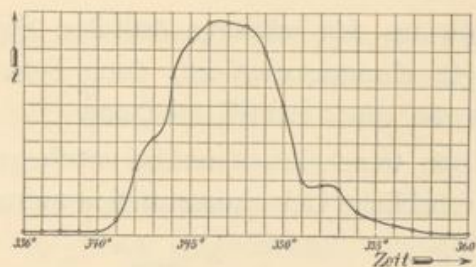


Fig. 8. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

je veränderlicher die Stromdichte überhaupt ist, d. h. je mehr man sich von dem Fall konstanter Stromdichte, der ja gradliniger Kommutation entspricht, entfernt.

In den Figuren 7, 8 und 9 ist eine Reihe Versuche wiedergegeben, die bei $n = 800$, $\mathcal{I} = 19$ Amp., $i_e = 0,79$ Amp. und einer

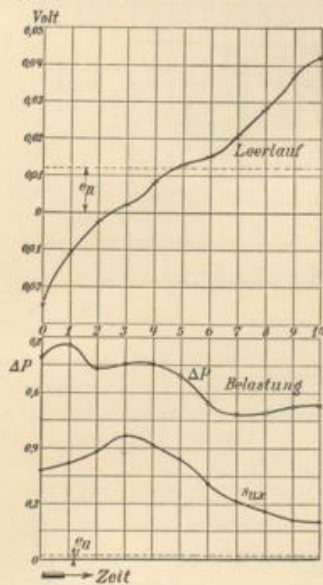


Fig. 7. ΔP -Kurven bei Leerlauf und 13 Ampère Belastung und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte ($s_{u,x}$).



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.

Bürstenverstellung von $19,9^\circ$ aus der neutralen Zone gemacht sind. Die Maschine lief dabei ganz funkenfrei. Fig. 7 gibt die ΔP -Kurven bei Leerlauf und Belastung und gleichzeitig die aus der Lamellenstromkurve abgeleitete $s_{u,x}$ -Kurve. Die beiden Kurven für ΔP und $s_{u,x}$ verlaufen ziemlich ähnlich, doch sieht man aus Fig. 9, dass wieder die Integralkurve (c), die aus der Kurve der mittleren Uebergangsspannungen 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 Ueberkommutation auftreten würde, doch

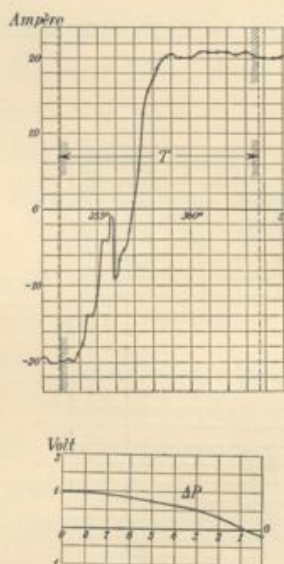


Fig. 10a u. 10b.
Kurzschlussstromkurve und ΔP -Kurve.
 $\mathcal{I} = 19$ Ampère.

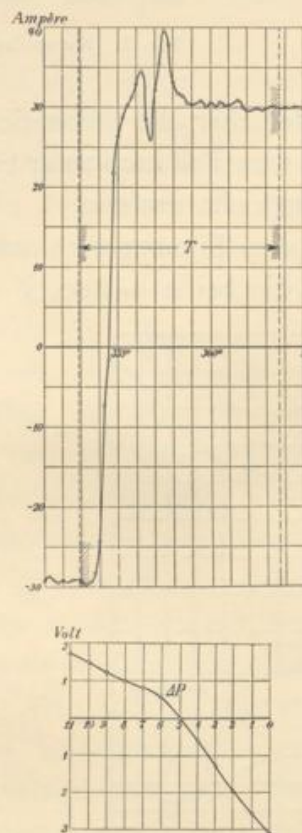


Fig. 11a u. 11b.
Kurzschlussstromkurve und ΔP -Kurve.
 $\mathcal{I} = 30$ Ampère.

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 Ueberkommutation 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 Potential-

differenz ΔP an der ablaufenden Bürstenkante die Stromdichte klein ist. Die Ursache dazu ist in der starken Vergrößerung des Uebergangswiderstandes 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

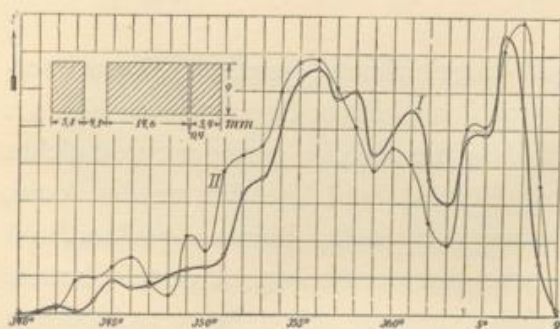


Fig. 12. Kurven des einer Lamelle zufließenden Stromes. Die Aufnahmen liegen mehrere Tage auseinander. (Kurve I wurde zur Bestimmung der s_{Max} -Kurve benützt.)
Skizze der benützten geteilten Kohlenbürste.

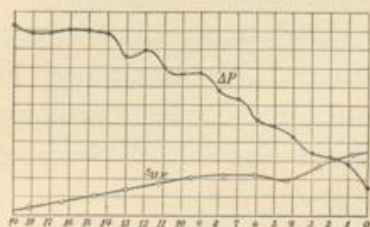


Fig. 14. ΔP -Kurve und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten.

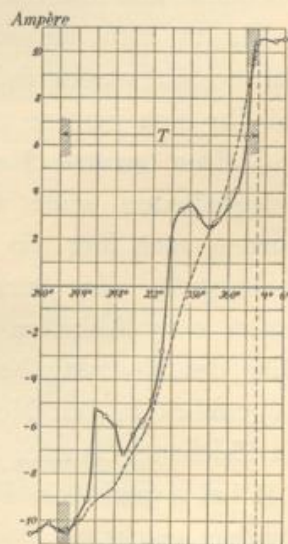


Fig. 13. Aufgenommene und aus der s_{Max} -Kurve konstruierte Kurzschlussstromkurve.

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 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 $n = 800$, $\mathcal{I} = 21$ 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_{ux} -Kurve erhaltene Integralkurve mit der experimentellen Kurzschlussstromkurve gut überein, während, wie Fig. 14 zeigt, die ΔP -Kurve und die s_{ux} -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.

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 Auflaufen oder Ablaufen der betreffenden Lamelle beginnt, wurde mit Hilfe des Kontaktgebers und einer Hilfsbatterie, die im gegebenen Augenblick in den Messtromkreis 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 Drehrichtung verschoben. Die Tourenzahl betrug nur 350 i. d. M., um den Kontakt zwischen Bürsten und Lamellen durch schädliche Schwingungen nicht zu stören. Der Belastungsstrom war $\mathcal{I} = 15$ 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.

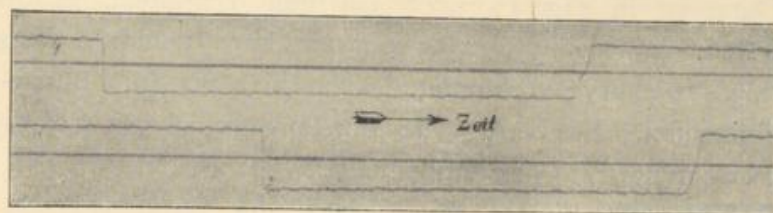


Fig. 15. Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 350$. Erregung $i_e = 1$ Ampère.
Strom $J = 15$ Ampère. Bürsten ($b = 30$ mm) gegen die Drehrichtung um $28,7^\circ$ verschoben.

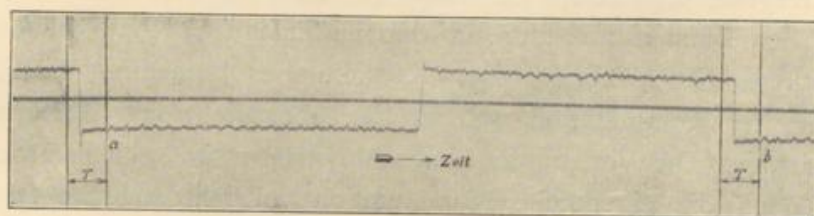


Fig. 16. Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 370$. Erregung $i_e = 1$ Ampère.
Strom $J = 31$ Ampère. Bürsten ($b = 30$ mm) um $62,5^\circ$ in der Drehrichtung verschoben.
Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

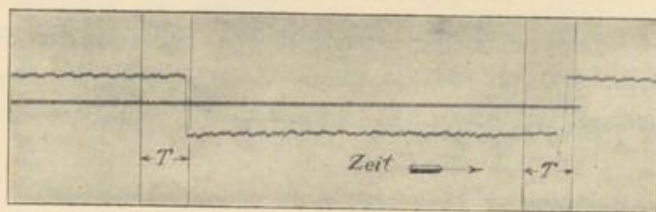


Fig. 17. Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 170$. Erregung $i_e = 1$ Ampère.
Strom $J = 24$ Ampère. Bürsten (30 mm breit) um $10,9^\circ$ gegen die Drehrichtung verschoben.
Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

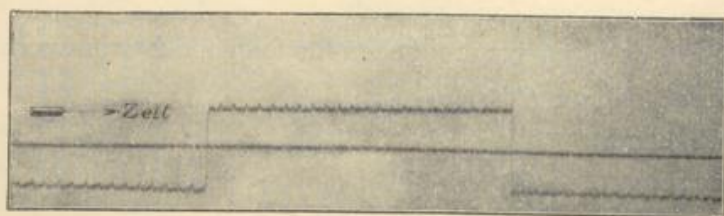


Fig. 18. Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 800$. Erregung $i_e = 0,79$ Ampère.
Strom $J = 59$ Ampère. Bürsten (10,3 mm breit) um $58,8^\circ$ in der Drehrichtung verstellt.
Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

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, $\mathcal{I} = 24$ Amp. und $n = 170$ i. d. M.

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 $\mathcal{I} = 59$ 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 bemerkenswert, 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 Ueberkommutation tritt nicht ein, sondern der Strom hält sich konstant auf der Grösse des Ankerzweigtromes, 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 von einander 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 Figuren 19 bis 22 gelten für folgende Betriebsverhältnisse:

Tourenzahl $n = 800$

Belastungsstrom $\mathcal{I} = 22$ 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 i. d. Drehrichtg.

Fig. 19 gibt die Lamellenstromkurve und aus ihr ist die in Fig. 20 dargestellte Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte s_{max} 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

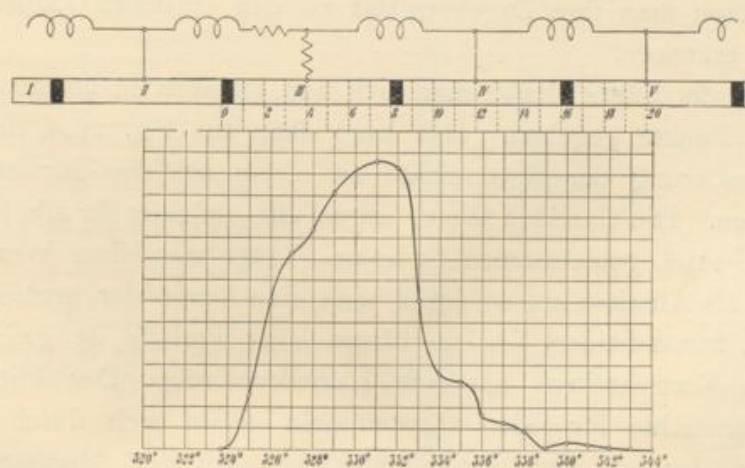


Fig. 19. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

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 8 Teile geteilt. Da eine Bürste 1,5 Lamellen bedeckt, erhalten wir im ganzen 12 Teile, deren Summe gleich der Bürstenbreite ist. Denkt man sich nun zum Beispiel die auflaufende Bürstenspitze an dem Teilpunkt 2 der Lamelle III in Fig. 19 stehend, so überdeckt die Bürste in diesem Augenblick $\frac{3}{8}$ 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 Lamellenstromkurven 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 Uebergang 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 Ueberdeckung muss man dann die entsprechenden Stromordinaten mit dem umgekehrten Verhältnis der Ueberdeckung multiplizieren. Diese so gewonnenen momentanen örtlichen Stromdichten sind in Fig. 21 A. für die angenommenen 8 Zeiteile 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 12 feste Punkte gegeben. Man kann dann aus Fig. 21 A. die zeitliche Aenderung 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 Kurve der momentanen örtlichen Stromdichten. — 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 (12) 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 Verhältnisse bestehen, wie sie beim vorigen Versuch waren, so zeigen die Fig. 23 bis 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

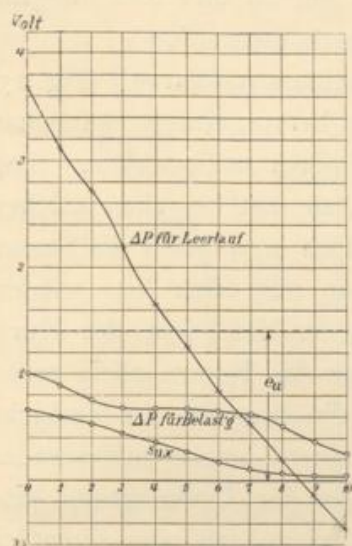


Fig. 20. ΔP -Kurven für Leerlauf und Belastung und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte.



Fig. 22. Aufgenommene und konstruierte Kurzschlussstromkurve.

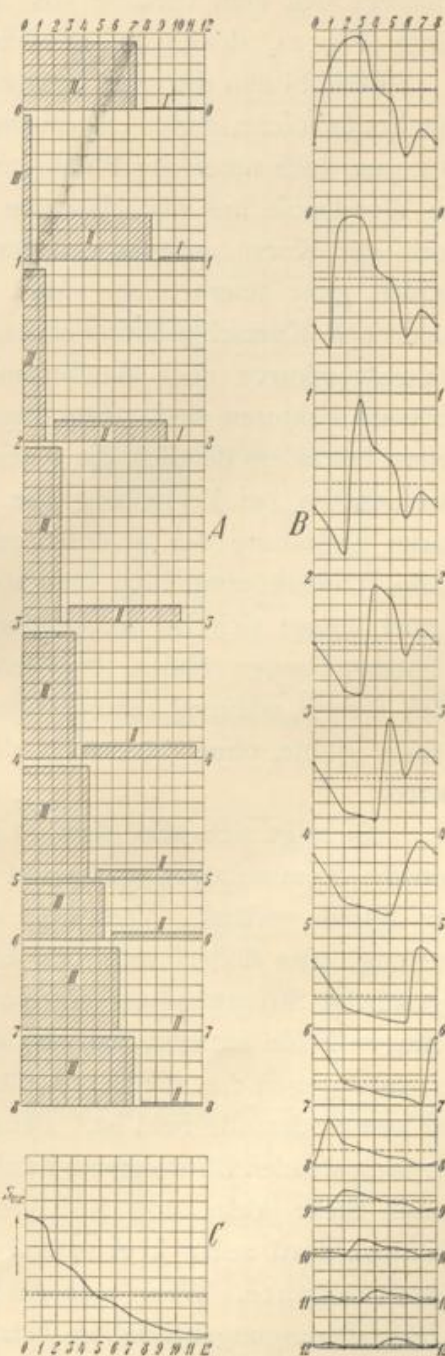


Fig. 21. A. Momentane örtliche Stromdichten
B. Zeitliche Variation der Stromdichten an verschiedenen Bürstenpunkten.
C. Mittlere örtliche Stromdichte.

schmiegt sich dem Verlaufe von \mathcal{AP} recht gut an und ihre Integralkurve (Fig. 24) deutet auf erhebliche Ueberkommutation.

Obwohl nun die experimentelle Kurzschlussstromkurve I (Fig. 25) eine beträchtliche, durch Ueberkommutation 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 Drehrichtung eine starke Entlastung der ablaufenden Kante zeigen, wo man eigentlich starke Ueberkommutation 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 auch die geringsten Funken zu bemerken waren.

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 Ueberkommutation 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 Uebergangswiderstand ändert sich an der Berührungsstelle beider Flächen fast sprungweise. Da, wo die Fläche blank ist, haben

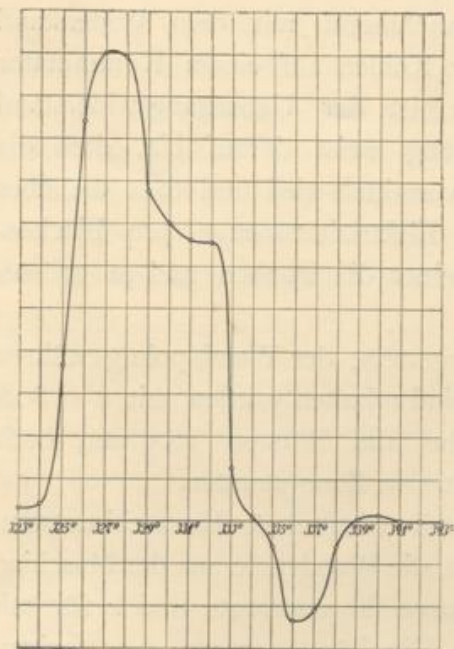


Fig. 23. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

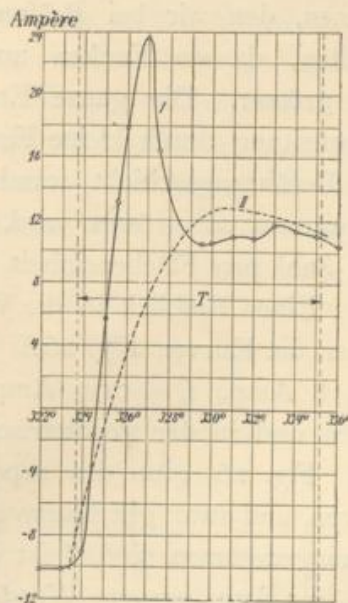


Fig. 25. I. Aufgenommene Kurzschlussstromkurve, II. aus der s_{max} -Kurve konstruierte Kurzschlussstromkurve.

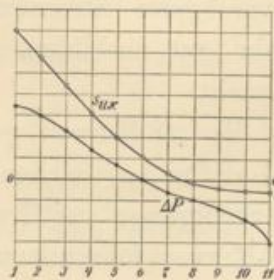


Fig. 24. J - P -Kurve und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten.

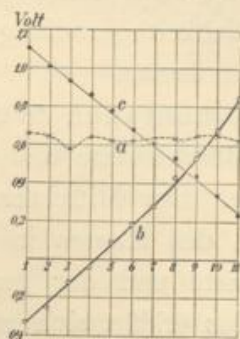


Fig. 27. J - P -Kurven: a. bei herausgenommenen Wendepolen, b. bei unerregten Wendepolen, c. bei mit 2,5 Ampère erregten Wendepolen.

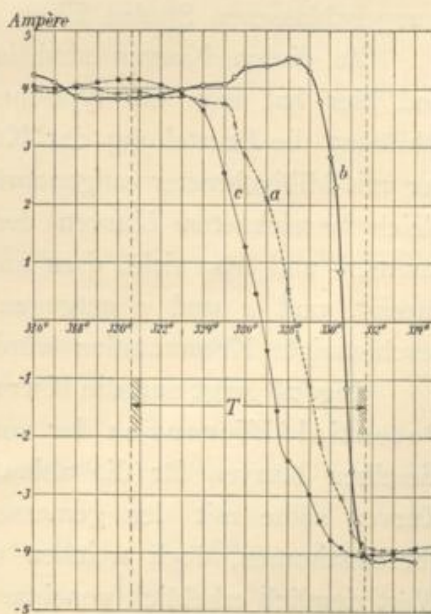


Fig. 26. Aufgenommene Kurzschlussstromkurven: a. bei herausgenommenen Wendepolen, b. bei unerregten Wendepolen, c. bei mit 2,5 Ampère erregten Wendepolen.

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 Uebergangswiderstand viel grösser. Die ganze Erscheinung weist darauf hin, 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 $n = 800$, $\mathcal{J} = 8$ 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 kann. Die gleich bezeichneten Kurven der Figuren 26 bis 29 gehören zusammen, und man sieht, dass nur Kurve b Fig. 29 Unterkommuation anzeigt, und a und c entgegen der Wirklichkeit geradlinige bzw. beschleunigte Kommuation würden 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 Uebergangsspannung 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 abwichen, was auch bei allen Rechnungen vorausgesetzt wurde. Bessere Uebereinstimmung 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

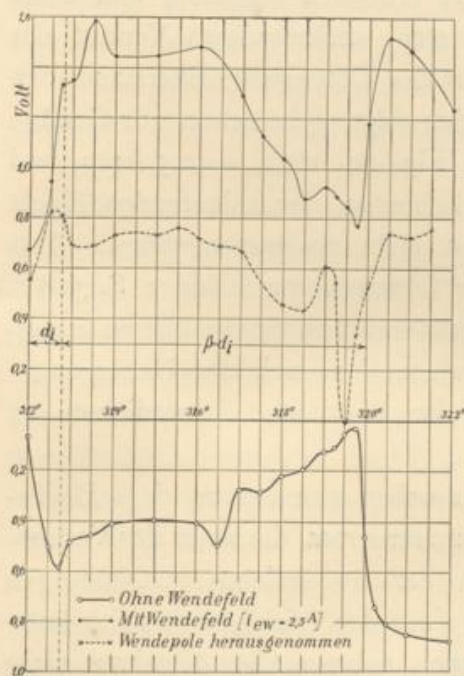


Fig. 28. Kurven der momentanen Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kommutator an der auflaufenden Kante.

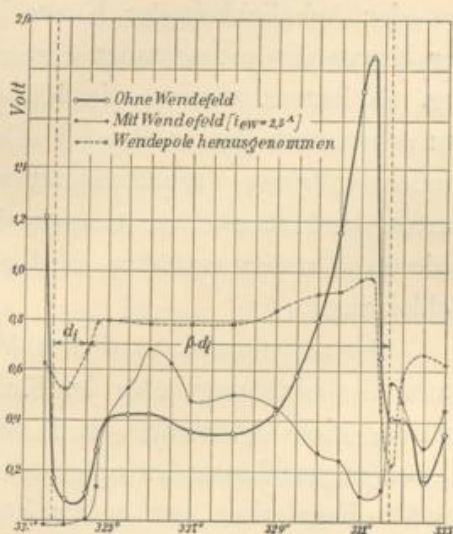


Fig. 29. Kurven der momentanen Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kommutator an der ablaufenden Kante.

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. 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

bezw. die Energiedichte die eigentliche Ursache der Funkenbildung ist, dadurch gestützt. Dazu kommt noch die Beobachtung, dass ΔP hohe Werte annimmt, wenn tatsächlich Funken auftreten. Dass zur Aufrechterhaltung der Funken grössere Spannungen nötig sind, geht schon aus der Tatsache hervor, dass Funken auch da übergehen, wo die Bürste nicht gut auf dem Kollektor aufliegt. 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 Aenderungen der Stromdichte folgt, geht schon zur Genüge aus der Aehnlichkeit der Kurve in Fig. 29 mit $i_w = 2,5$ Amp. und der Kurve der momentanen Stromdichte an der ablaufenden Kante Fig. 19 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 nun hervor, dass Differentialgleichungen für den Kurzschlussstrom, die unter der Voraussetzung eines konstanten und von der Stromdichte unabhängigen Übergangswiderstandes aufgestellt sind, der Wirklichkeit nahe kommende 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 Aenderung 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_s am Ende der Kurzschlusszeit erst der Maximal- und dann der Mittelwert der in den kurzgeschlossenen, zwischen den Bürstenkanten liegenden Spulen induzierten EMK, der sogenannten 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 Messtromkreis unterbrochen, die Spannung geht aber wegen mangelhafter Isolierung durch Verunreinigungen des Kommutators nicht ganz auf Null zurück. Diese Unterbrechung erfolgt zweimal während des Durchlaufens einer Lamelle. In den Figuren 30 bis 33 lassen sich diese Stellen gut erkennen. Sie sind mit a , b , c 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 Funkengrenze, 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

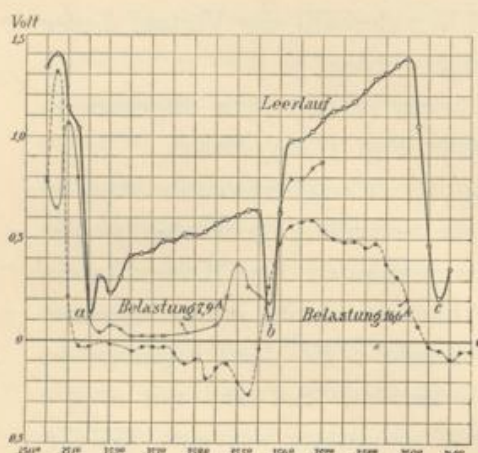


Fig. 30. Kurzschlussspannung Δe für Leerlauf und Belastung.

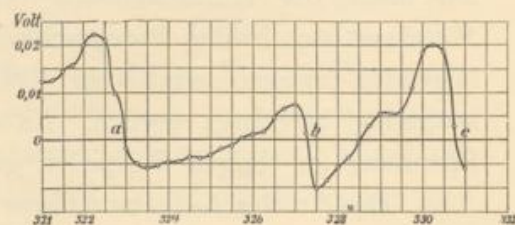


Fig. 32. Kurzschlussspannung bei Stellung der Bürsten in der geom. neutr. Zone und Leerlauf.

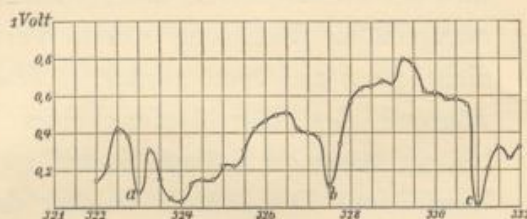


Fig. 33. Kurzschlussspannung Δe bei Stellung der Bürsten in der geometrisch neutralen Zone und 23,5 Ampère Belastung.

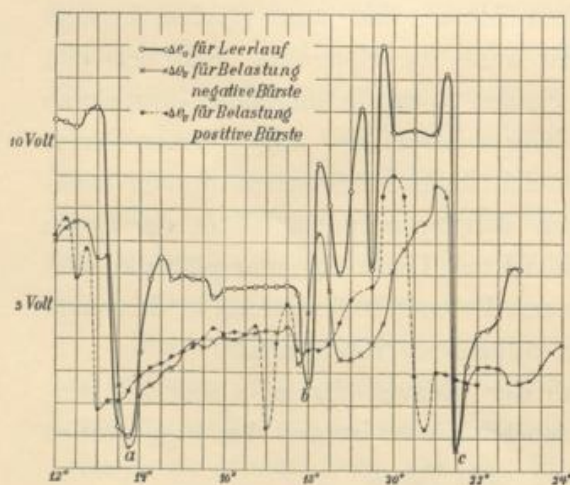


Fig. 31. Kurzschlussspannung Δe . Bürsten um $49,8^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. 30 Amp. Belastung.

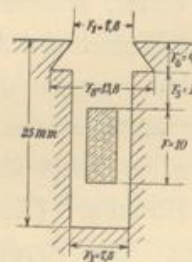


Fig. 34. Nut der Versuchsmaschine I.

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:*

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

$$\lambda_{ks} = 0,92 \log \frac{\pi \cdot l_1}{2r_1} = 0,513$$

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

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

Weiter ist die Zahl der kurzgeschlossenen Spulen höchstens

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

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

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

λ_{qo} 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.

* s. E. Arnold: »Die Gleichstrommaschine«, zweite Auflage, S. 273.

Hier nicht wiedergegebene Messungen zeigen, dass Erreger und Ankerfeld auf einem grossen Teil der Pollücke sehr klein sind und dass man hier $\lambda_{q_0} \cong 0,5$ zu setzen hat.

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

$$\Delta e_0 = 0,51 \text{ Volt.}$$

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

$$\Delta e_0 = 0,57 \text{ Volt,}$$

der Mittelwert für die ganze Kurzschlusszeit ist

$$\Delta e_0 = 0,38 \text{ Volt.}$$

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 Uebereinstimmung 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_1 bezeichneten Hilfsspule erhalten worden sind. Diese Spule liegt mit der betrachteten Spule, in die der Widerstand eingebaut ist, in einer Nut und ist also mit ihr magnetisch gekuppelt.

Fig. 35 gibt die Feldkurve bei Leerlauf und abgehobenen Bürsten. Die Polform ist mit Rücksicht auf die nachfolgende Figur 36 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 und die Belastung betrug 30 Amp. Die Zacken in der Feldkurve bei Belastung rühren hauptsächlich von der Änderung der Ankerampèrewindungen 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 Wendepolllänge gleich der Ankerlänge und die Breite betrug 47 mm, also 2,7 Zahn-teilungen. Die Wendepole waren fremderregt, und zwar in diesem

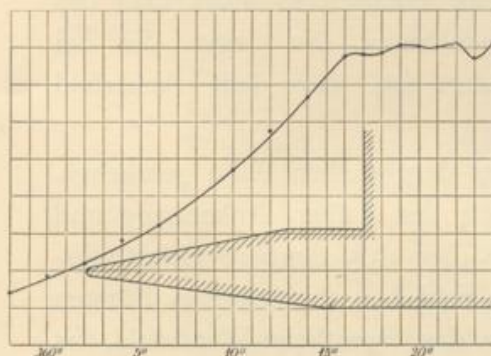


Fig. 35. Feldkurve bei Leerlauf und abgehobenen Bürsten.

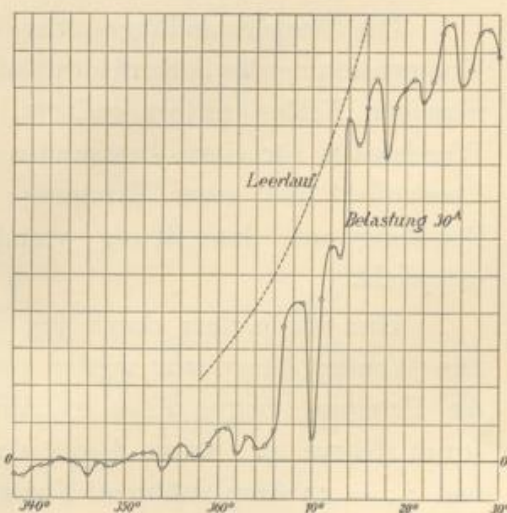


Fig. 36. Feldkurve bei 30 Ampère Belastung. Bürsten um $49,8^\circ$ in der Drehrichtung verschoben.

Falle mit 4 Amp. Kurve *a* ist bei abgehobenen Bürsten erhalten worden und Kurve *b* bei Belastung der Maschine mit 22 Amp.

Der magnetischen Kupplung wegen entspricht die in der Hilfsspule induzierte Spannung nicht dem Kraftfluss der Wendepole, sondern der Differenz zwischen kommutierender EMK und einem Teil der Reaktanzspannung. Bei reiner Widerstandskommulation wäre die Differenz immer annähernd gleich Null, sofern die Momentanwerte dieser EMKe die gleichen Funktionen der Zeit wären. Da dies nicht der Fall sein kann, so kann diese Differenz nur in einzelnen Momenten Null sein. Hier bleibt im Mittel noch ein positives Feld übrig und man muss Ueberkommulation haben. Die entsprechende Kurzschlussstromkurve findet sich in Fig. 22. Gleichwohl verläuft der Kommutierungsvorgang vollständig funkenfrei.

Für die nächsten Kurven in Fig. 38 betrug die Wendepollänge nur noch die Hälfte der Ankerlänge und der Polschuh war nur 35 mm breit, er überdeckte also zwei Zahnteilungen. Die Erregung der Wendepole betrug 6 Amp. und die Belastung $\mathcal{I} = 22$ Amp. Kurve *a* gibt das Feld bei Leerlauf und abgehobenen Bürsten und *b* das Belastungsfeld. Dieses ist wieder gezackt und jetzt negativ geworden. Die entsprechende Kurzschlussstromkurve zeigte dagegen nur im Anfang etwas verzögerte Kommutation, die gegen Ende wieder beschleunigt ist.

Die Ampèrewindungen der Wendepole werden in solche zur Kompensierung des Ankerfeldes und solche zur Erregung des kommutierenden Feldes zerlegt gedacht. Will man nun die Form des Wendefeldes für einen bestimmten Fall erhalten, so muss man das Leerlaufsfeld mit einer Erregung aufnehmen, die gegen die bei Belastung um den Betrag vermindert ist, der dem Ankerfeld entspricht.

Dies ist in dem durch Fig. 39 dargestellten Falle geschehen. Die Wendepollänge war wieder gleich der halben Ankerlänge und die Erregung betrug $i_{ew} = 23$ Amp. bei 13,5 Ampère Belastungsstrom (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.

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

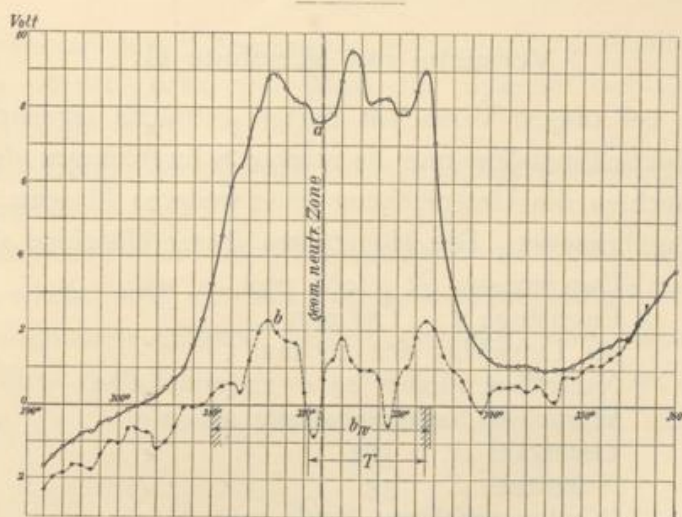


Fig. 37. Feldkurve in der Kommutierungszone: a. bei Leerlauf, b. bei Belastung: $J = 22$ Ampère. $i_{ew} = 4$ Ampère.

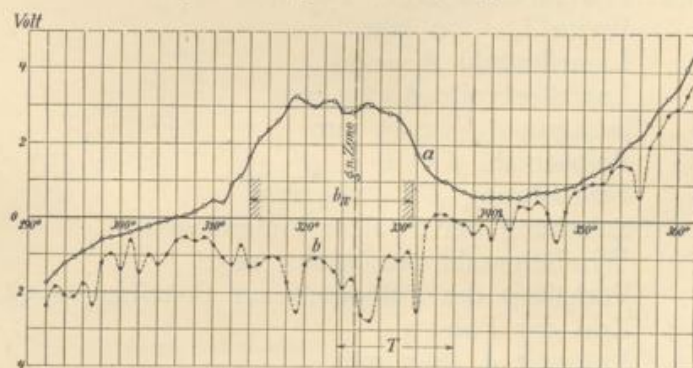


Fig. 38. Feld in der Kommutierungszone: a. bei Leerlauf, b. bei Belastung: $J = 22$ Ampère. $i_{ew} = 6$ Ampère. Wendepollänge = $\frac{1}{2}$ Ankerlänge.

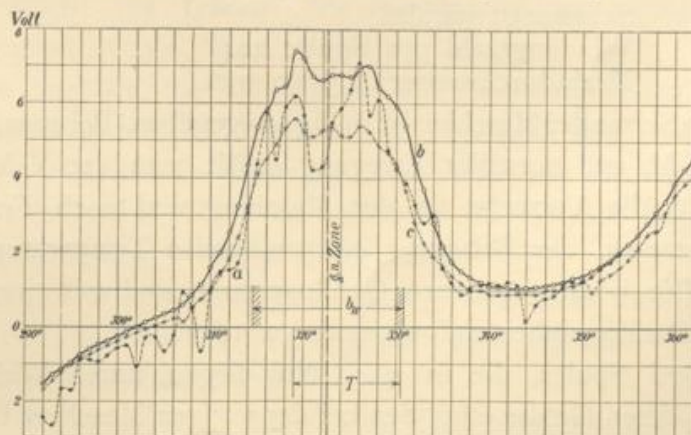


Fig. 39. Feldkurven in der Kommutierungszone: a. bei Belastung: $J = 13,5$ Ampère Erregung der Wendepole $i_{ew} = 23$ Ampère, b. Leerlauf bei abgehobenen Bürsten $i_{ew} = 23$ Ampère, c. Leerlauf bei abgehobenen Bürsten $i_{ew} = 12,5$ Ampère.

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 pro Spule $w = 3$ Leiterabmessungen: 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 pro 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 cm ² Polschuhfläche = 60 × 25 mm Schaltung: parallel Windungszahl pro Spule: 224 Drahtdurchmesser: 2,5/2,9 mm.

Eine Skizze der Maschine ist in Fig. 40 gegeben. Bei etwa 450 Umdreh. i. d. M. 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 Dudel'schen 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

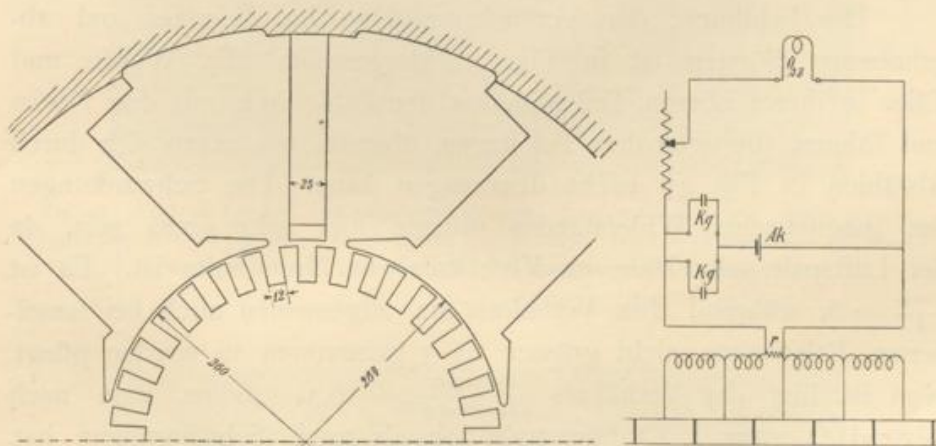


Fig. 40 Skizze der Maschine II.

Fig. 41.

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. Bemerkenswert soll noch werden, dass alle Aufnahmen bei derselben Tourenzahl der als fremderregter Generator laufenden Maschine (nämlich 500 in der Minute) 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 bis Fig. 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 $\frac{\text{Polbogen}}{\text{Zahnteilung}} = 6,3$, sodass man nach Worall*) sowohl Kraftflusspulsation als auch Schwingungen hat. 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

*Wie kann
dieses nicht
stimmern!
In dubio
nunc möglich,
wenn Feld vor-
handen (z. B.
Wp. erregt)*

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

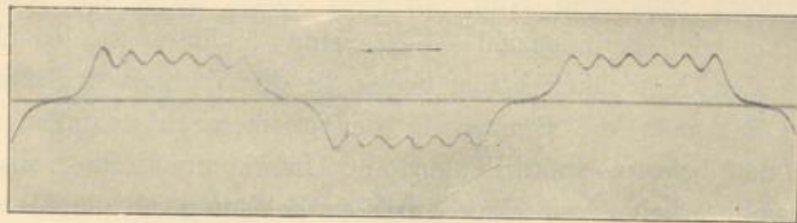


Fig. 42. Feld bei Leerlauf mit abgehobenen Bürsten. Erregung $i_e = 1,15$ Ampère.
Tourenzahl $n = 500$.

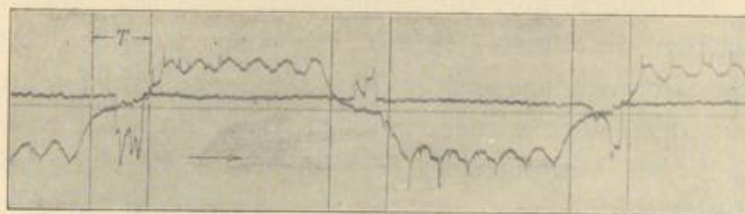


Fig. 43. Feld bei Leerlauf und aufgelegten Bürsten. Tourenzahl $n = 500$. Strom $J = 0$.
Spannung $E = 115,5$ Volt. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Bürsten in der neutralen Zone.
Starkes Funken. (Die Nullachse der Stromkurve ist verschoben.)

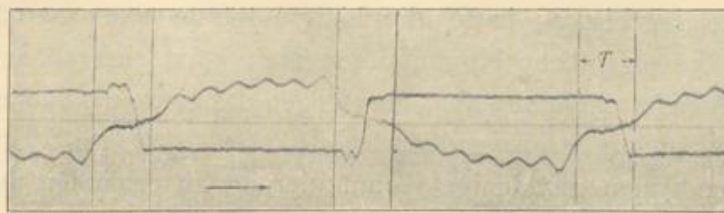


Fig. 44. Feldkurve und Strom einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,13$ Ampère.
Strom $J = 50$ Ampère. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone.
Funkenfrei.



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

Wendepolen annähernd Null. In dem Anker fließt ein Wechselstrom von der Periodenzahl $\frac{K \cdot n}{60}$. Seine Nulllinie ist jedoch in Fig. 43 der Deutlichkeit halber gegen die der Feldkurve verschoben.

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

Wie Fig. 44 zeigt, sind bei einer Belastung, die ungefähr der normalen entspricht, Unterkommütierung 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 Kommütierung 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 Kommütierungszeit kürzt sich ab, und man hat anfangs Unterkommütation, aber gegen das Ende der Kurzschlusszeit beschleunigte Stromwendung.

Eine genau geradlinige Kommütierung 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 Uebergangswiderstandes mit der Stromrichtung ändert.

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 Ueberkommütation erhalten. In dem in Fig. 49 dargestellten Falle ist an der durch die Kontaktgeber-



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

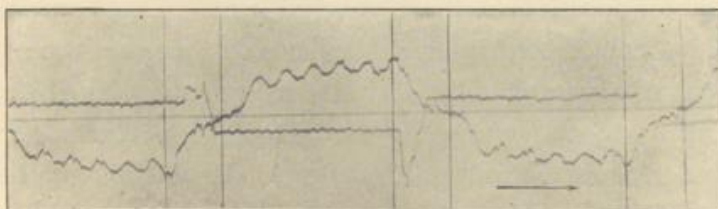
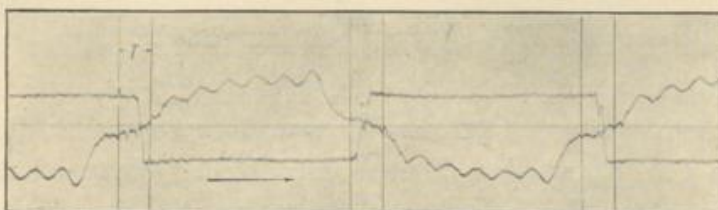


Fig. 47. Feldkurve und Strom in einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampère. Strom $J = 50$ Ampère. Spannung $E = 92$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone. Funkenfrei.



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

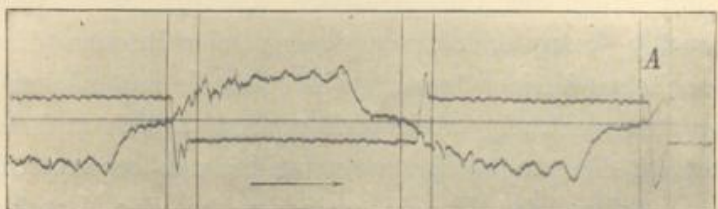


Fig. 49. Feldkurve und Strom in einer Spule. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampère. Strom $J = 32$ Ampère. Spannung $E = 82$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten um $16,6^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Starke Funken.

marken 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 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 Ueberkommutation 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 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 Uebergangswiderstandes 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 ein erträgliche Stromwendung stattfindet, die Stromdichte an den ablaufenden Bürstenkanten kleine Werte erhält.

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 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 Uebergangswiderstände 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 Pulstationen überall, besonders innerhalb den Pollücken, deutlich zum Ausdruck, auch in den Fällen, wo gute oder

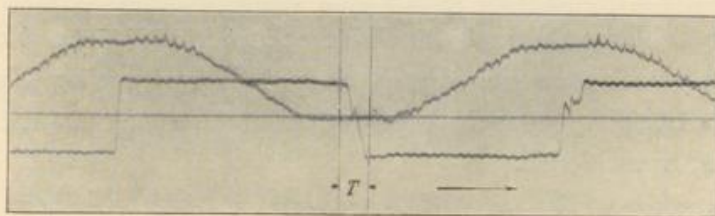


Fig. 50. Strom einer Spule und Potentialkurve zwischen negativer Bürste und einer Lamelle. Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampère. Strom $J = 70$ Ampère. Spannung $E = 75$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten um $16,6^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Funkenfrei.

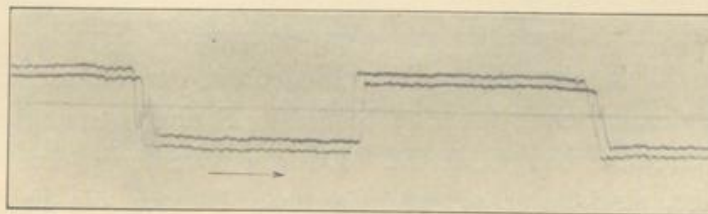


Fig. 51. Strom der ersten und zweiten Spule einer Nut (der Ordinatenmasstab der Kurven ist verschieden). Tourenzahl $n = 500$. Erregung $i_e = 1,15$ Ampère. Strom $J = 70$ Ampère. Spannung $E = 75$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm. Bürsten um $16,6^\circ$ in der Drehrichtung verschoben. Funkenfrei.

geradlinige Kommutation stattfindet, denn auch dann hat man eine Kraftflussänderung von $+\Phi$ auf $-\Phi$.

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 Aenderung 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 gegen einander 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 Ordinatenmasstab 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 Kurz-

schlussstromes 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 Unterkommution, die hier wieder in der charakteristischen Weise verläuft,

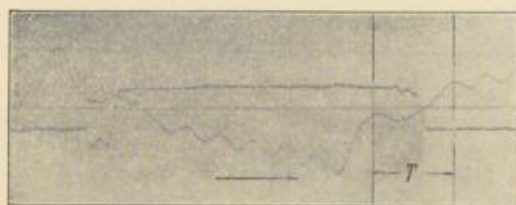


Fig. 52. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$. Erregung des Feldes $i_e = 1,2$ Ampère. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 0$. Strom $J = 20$ Ampère. Spannung $E = 67$ Volt. Bürsten in der geometrisch neutralen Zone. Bürstenbreite $b = 30$ mm. Funkenfrei.

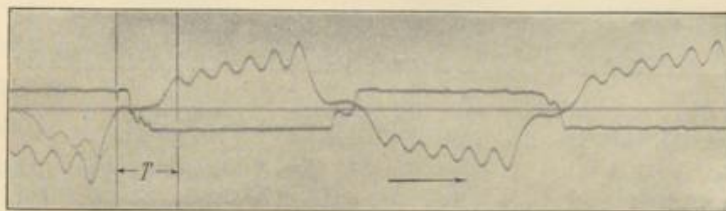


Fig. 53. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$. Erregung des Feldes $i_e = 1,2$ Ampère. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 2$ Ampère. Strom $J = 20$ Ampère. Spannung $E = 67$ Volt. Funken an den ablaufenden Kanten der Bürsten. Kontaktgebermarken an der positiven Bürste. Bürstenbreite $b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

funkenfreie Stromwendung stattfand, während bei der gegen das Ende wenig beschleunigten Kommution, wie sie Fig. 53 zeigt, schon Funken an den ablaufenden Kanten der Bürsten auftraten. Allerdings ist hier $\frac{\text{Wendepolampèrewindungen}}{\text{Ankerampèrewindungen}} = 0,6$.

Bei Anwendung von schmalen Bürsten ($b = 15$ mm Fig. 54) war bei gleichem Belastungsstrom und schwächerer Erregung des Hauptfeldes für funkenfreien Gang dieses Verhältnis

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

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

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

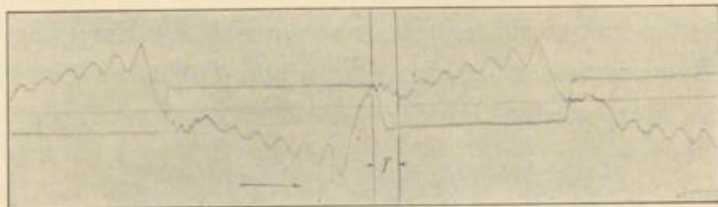


Fig. 54. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$.
Erregung des Feldes $i_e = 0,95$ Ampère. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 7$ Ampère.
Strom $J = 20$ Ampère. Spannung $E = 65$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm.
Bürsten in der neutralen Zone. Funkenfrei.

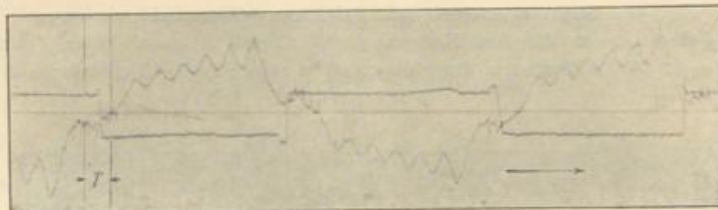


Fig. 55. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$.
Erregung des Feldes $i_e = 1$ Ampère. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 0$.
Strom $J = 20$ Ampère. Spannung $E = 67$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm.
Bürsten in der neutralen Zone. Kleine Funken an den ablaufenden Kanten beider Bürsten.

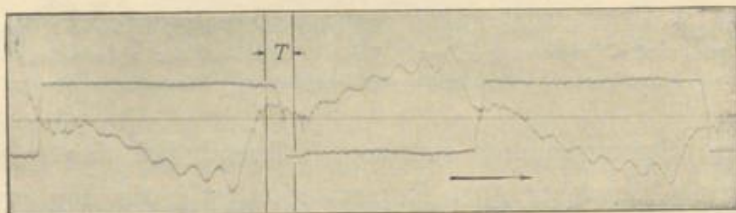


Fig. 56. Strom einer Spule und Feldkurve. Tourenzahl $n = 500$.
Erregung des Feldes $i_e = 1,2$ Ampère. Erregung der Wendepole $i_{ew} = 7$ Ampère.
Strom $J = 45$ Ampère. Spannung $E = 65$ Volt. Bürstenbreite $b = 15$ mm.
Bürsten in der geometrisch neutralen Zone. Kleine Funken an den ablaufenden Kanten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

tierungsvorgängen beeinflusst wird. Die Schwingungen sind auch 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 vorliegenden 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, Ing. E. Pfiffner und Dipl. Ing. 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 Uebergangswiderstand 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 (ΔP) an der Uebergangsschicht und die $\sqrt{\text{Energiedichte}}$ massgebend.

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

5. Die aus der Kurve der mittleren örtlichen Potentialdifferenz (ΔP -Kurve) bzw. der mittleren örtlichen Stromdichte (s_{ux} -Kurve) berechnete Kurzschlussstromkurve stimmt nur dann annähernd mit der experimentell ermittelten überein, wenn die Kommutation annähernd geradlinig verläuft. In andern 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 Uebergangswiderstandes beim Auftreten von Funken, tritt sowohl eine Ueberkommutation als eine Unterkommutation in geringerem Maße und in zeitlich verkürzter Weise auf.

8. Die zeitlich verkürzte Stromwendung bzw. die beschleunigte Aenderung des Kurzschlussstromes erzeugt starke Feldpulsationen, die

örtliche!
V

sich in der Feldkurve und der Potentialkurve des Kommutators bemerkbar machen. Diese Feldpulsationen sind die Hauptursache der Erwärmung der Polschuhe.

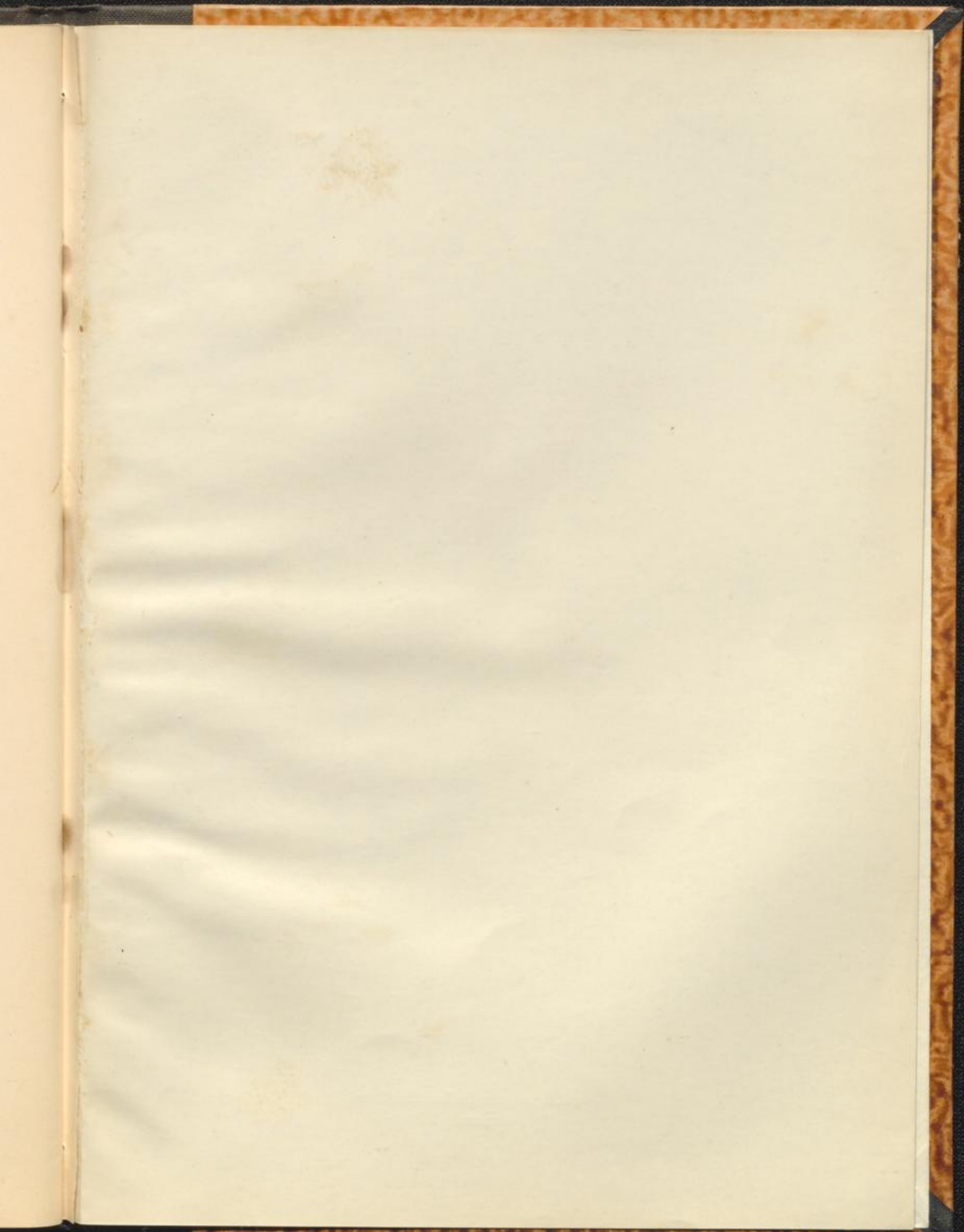
9. Die bekannten Differenzialgleichungen für den Kurzschlusskreis gelten nur zwischen den Grenzen, innerhalb welcher ein Funken nicht auftritt, annähernd richtige Werte für den im betrachtenden Moment bestehenden Kurzschlussstrom.

10. Die Faktoren, welche den zeitlichen Verlauf der vom Wendefeld induzierten EMK und die Faktoren, welche den zeitlichen Verlauf der EMK der Selbstinduktion der kurz geschlossenen 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 sogenannte Kurzschlussspannung ist nur so lange ein brauchbarer Masstab 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.

Faint, illegible text, likely bleed-through from the reverse side of the page.



G. Braunsche Hofbuchdruckerei
Karlsruhe i. B.



N11< 52721768 090

KIT-Bibliothek

