

**Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

**Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

**Experimentelle Untersuchung der Kommutation bei  
Gleichstrommaschinen**

**Arnold, Engelbert**

**Karlsruhe, [1908]**

Versuche ohne Wendepole

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

Da die mittleren Potentialdifferenzen  $\Delta P$  sich mit Hilfe eines Voltmeters an jeder Maschine rasch und einfach messen lassen, und die Kurzschlussstromkurve aus der  $\Delta P$ -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  $\Delta P$ -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  $\Delta P$ -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  $\Delta P$ -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  $\Delta P$  wohl ersehen, ob Ueber- oder Unterkommuation statthat, doch sind die Ergebnisse

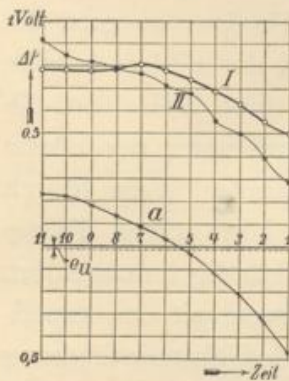


Fig. 5.  $\Delta P$ -Kurven:  
a. bei Leerlauf,  
I. bei 16,5 Ampère Belastung,  
II. bei 7,9                    »                    »

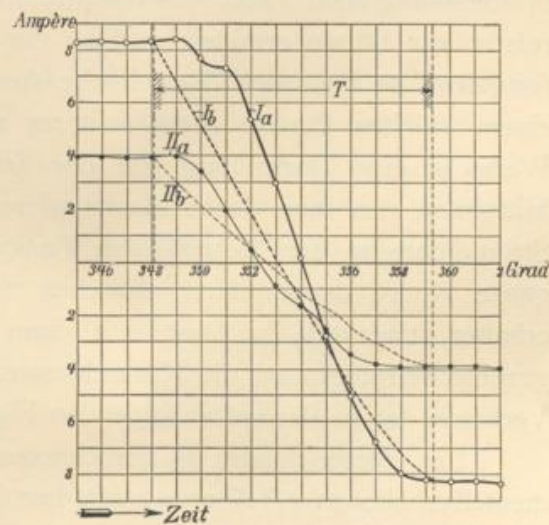


Fig. 6.  $I_a$  u.  $II_a$ : mit dem Kontaktgeber aufgenommene Kurzschlussstromkurven bei 16,5 u. 7,9 Ampère Belastung,  $I_b$  u.  $II_b$ : aus den  $\Delta P$ -Kurven I u. II Fig. 5 konstruierte Kurzschlusskurven.

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,



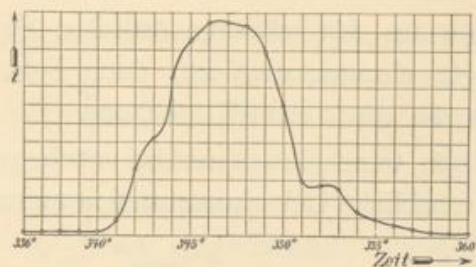


Fig. 8. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

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  $n = 800$ ,  $\mathcal{F} = 19$  Amp.,  $i_e = 0,79$  Amp. und einer

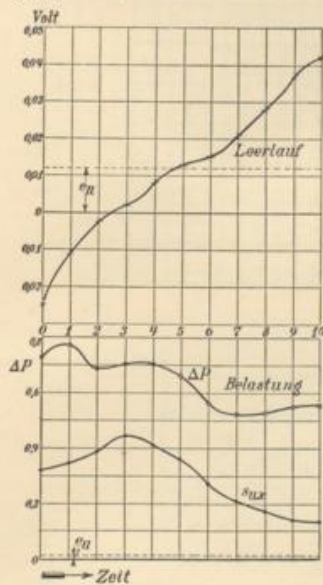


Fig. 7.  $\Delta P$ -Kurven bei Leerlauf und 13 Ampère Belastung und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte ( $s_{u,x}$ ).



Fig. 9. a: mit dem Kontaktgeber aufgenommene Kurzschlussstromkurve, b: aus der Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte konstruierte Kurzschlussstromkurve, c: desgl. aus der  $\Delta P$ -Kurve abgeleitet.

Bürstenverstellung von  $19,9^\circ$  aus der neutralen Zone gemacht sind. Die Maschine lief dabei ganz funkenfrei. Fig. 7 gibt die  $\Delta P$ -Kurven bei Leerlauf und Belastung und gleichzeitig die aus der Lamellenstromkurve abgeleitete  $s_{u,x}$ -Kurve. Die beiden Kurven für  $\Delta P$  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

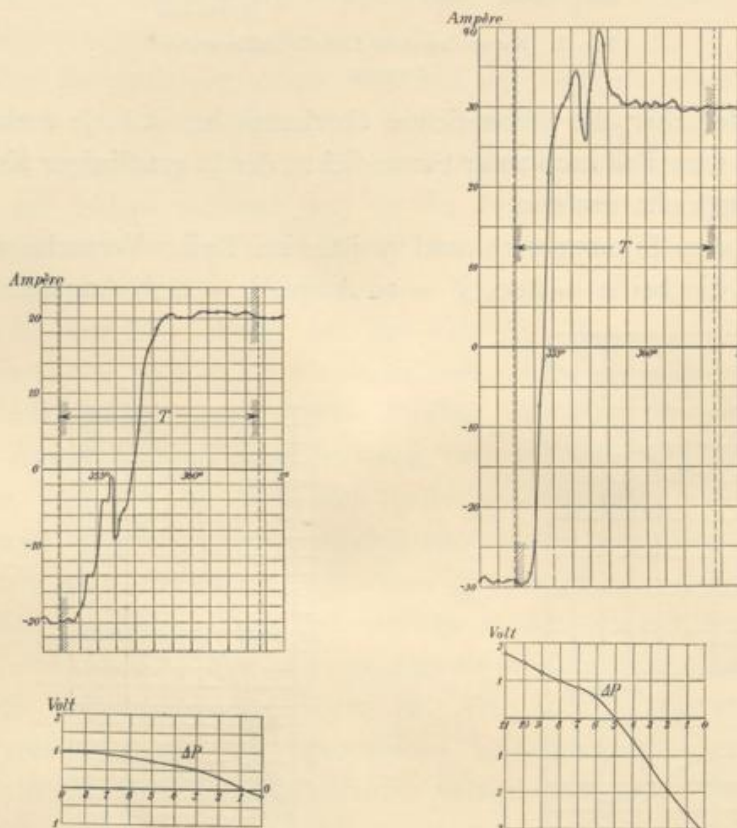


Fig. 10a u. 10b.  
Kurzschlussstromkurve und  $\Delta P$ -Kurve.  
 $\mathcal{I} = 19$  Ampère.

Fig. 11a u. 11b.  
Kurzschlussstromkurve und  $\Delta P$ -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  $\Delta P$  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

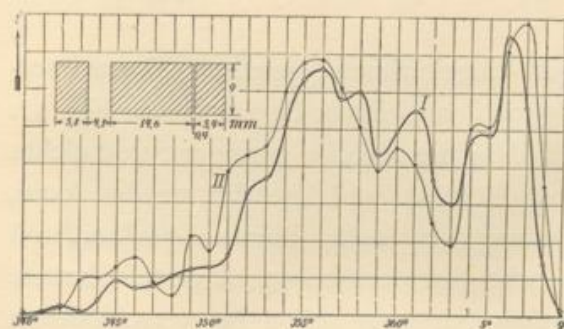


Fig. 12. Kurven des einer Lamelle zufließenden Stromes. Die Aufnahmen liegen mehrere Tage auseinander. (Kurve I wurde zur Bestimmung der  $S_{Max}$ -Kurve benützt.) Skizze der benützten geteilten Kohlenbürste.

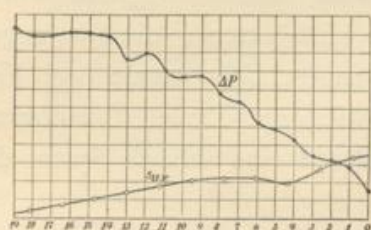


Fig. 14.  $\Delta P$ -Kurve und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten.

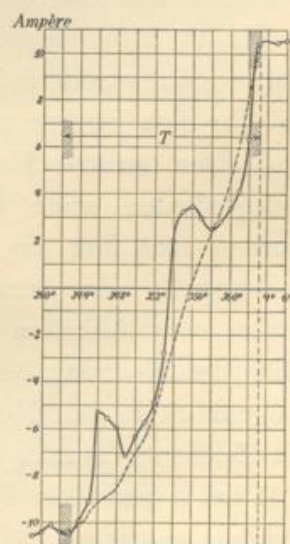


Fig. 13. Aufgenommene und aus der  $S_{Max}$ -Kurve konstruierte Kurzschlussstromkurve.

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.,  $i_e = 0,79$ , Bürsteverstellung  $= 25,9^\circ$ . 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  $\Delta P$ -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.



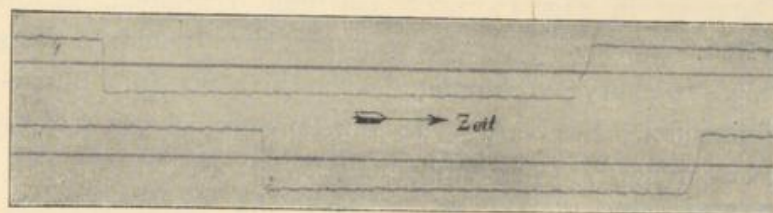


Fig. 15. Strom einer Spule. Tourenzahl  $n = 350$ . Erregung  $i_e = 1$  Ampère.  
Strom  $J = 15$  Ampère. Bürsten ( $b = 30$  mm) gegen die Drehrichtung um  $28,7^\circ$  verschoben.

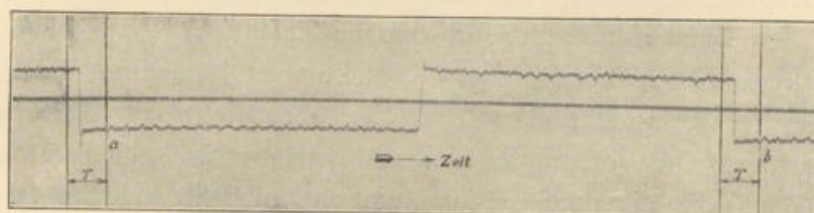


Fig. 16. Strom einer Spule. Tourenzahl  $n = 370$ . Erregung  $i_e = 1$  Ampère.  
Strom  $J = 31$  Ampère. Bürsten ( $b = 30$  mm) um  $62,5^\circ$  in der Drehrichtung verschoben.  
Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

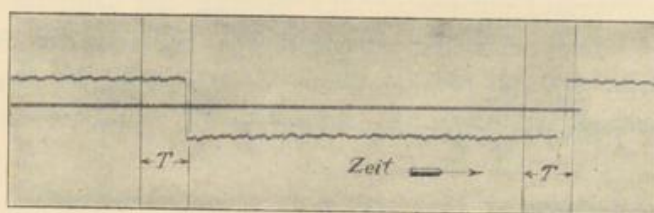


Fig. 17. Strom einer Spule. Tourenzahl  $n = 170$ . Erregung  $i_e = 1$  Ampère.  
Strom  $J = 24$  Ampère. Bürsten (30 mm breit) um  $10,9^\circ$  gegen die Drehrichtung verschoben.  
Kleine Funken an der ablaufenden Kante.

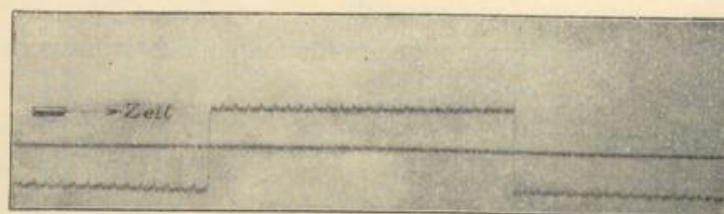


Fig. 18. Strom einer Spule. Tourenzahl  $n = 800$ . Erregung  $i_e = 0,79$  Ampère.  
Strom  $J = 59$  Ampère. Bürsten (10,3 mm breit) um  $58,8^\circ$  in der Drehrichtung verstellt.  
Kleine Funken an der ablaufenden Kante.



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 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 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.