

Badische Landesbibliothek Karlsruhe

Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe

**Experimentelle Untersuchung der Kommutation bei
Gleichstrommaschinen**

Arnold, Engelbert

Karlsruhe, [1908]

Versuche mit Wendepolen

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

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

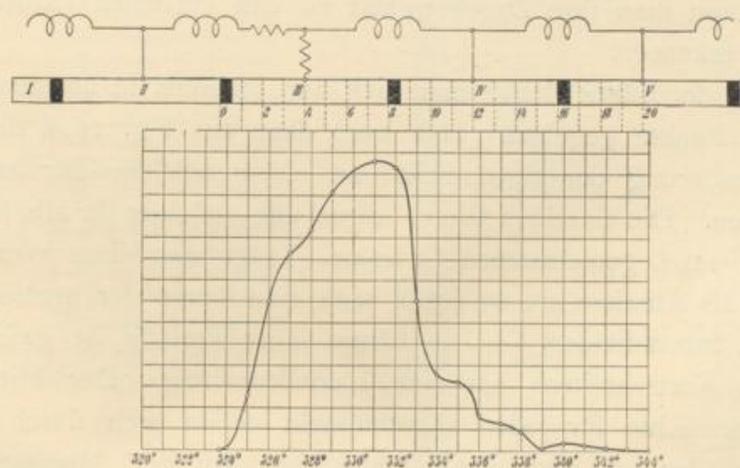


Fig. 19. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

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 $\frac{2}{8}$ der Lamellenteilung III, die ganze Lamelle II und $\frac{2}{8}$ Teile der Lamelle I. Den Strom, den jede dieser Lamellen führt und der sich gleichmässig auf den von der Bürste bedeckten Teil der Lamellen verteilt, stellen die Ordinaten 2, $2 + 8 = 10$ und $10 + 8 = 18$ der 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

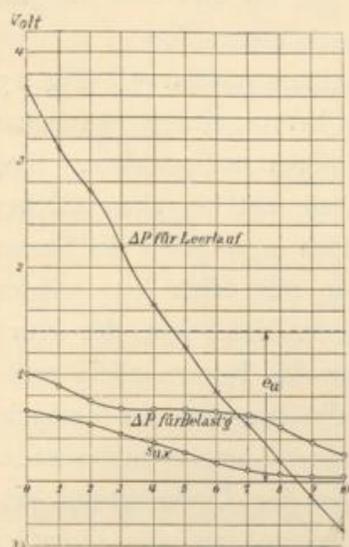


Fig. 20. ΔP -Kurven für Leerlauf und Belastung und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichte.

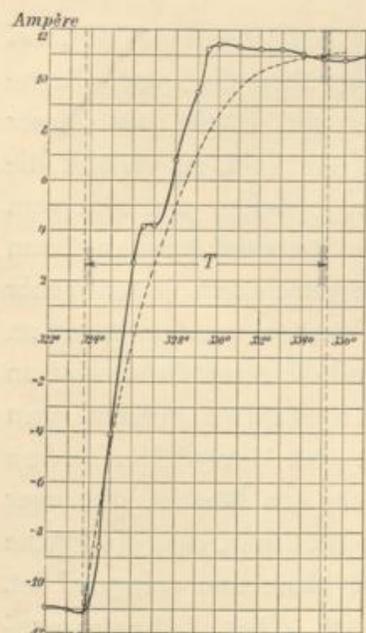


Fig. 22. Aufgenommene und konstruierte Kurzschlussstromkurve.

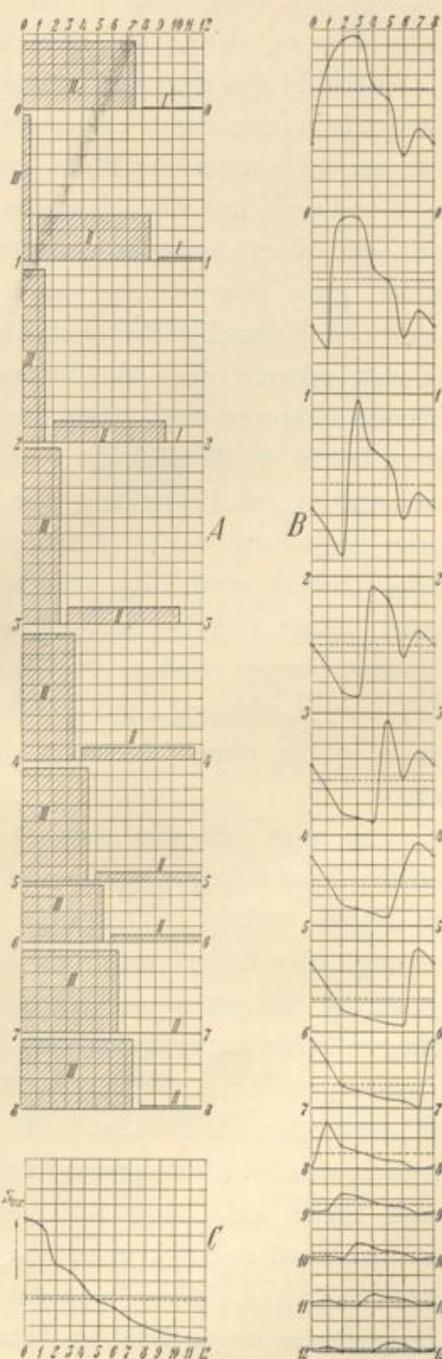


Fig. 21. A. Momentane örtliche Stromdichten
B. Zeitliche Variation der Stromdichten an verschiedenen Bürstenpunkten.
C. Mittlere örtliche Stromdichte.

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

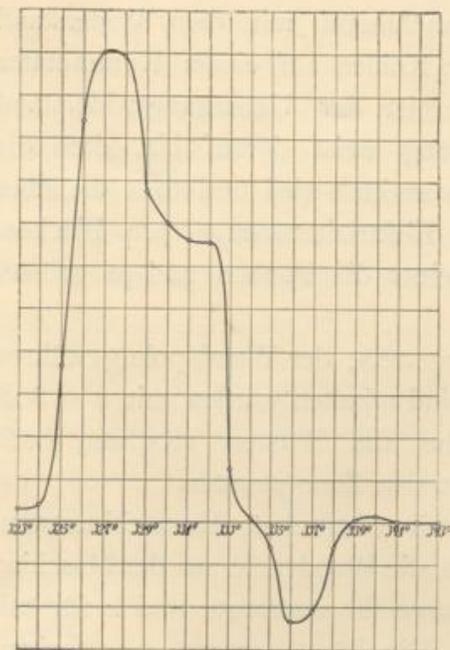


Fig. 23. Kurve des einer Lamelle zufließenden Stromes.

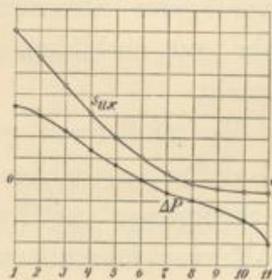


Fig. 24. J - P -Kurve und Kurve der mittleren örtlichen Stromdichten.

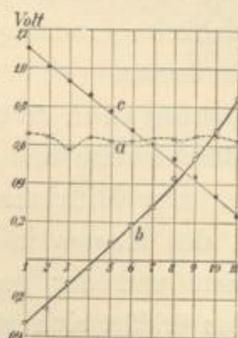


Fig. 27. J - P -Kurven: a. bei herausgenommenen Wendepolen, b. bei unerregten Wendepolen, c. bei mit 2,5 Ampère erregten Wendepolen.

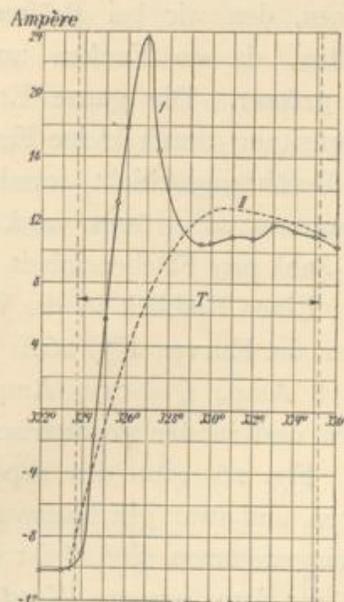


Fig. 25. I. Aufgenommene Kurzschlussstromkurve, II. aus der s_{max} -Kurve konstruierte Kurzschlussstromkurve.

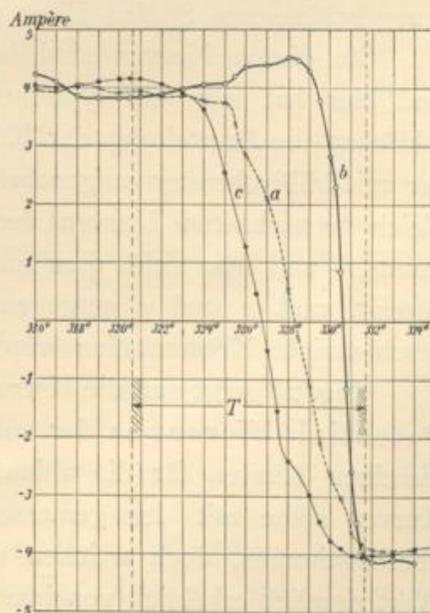


Fig. 26. Aufgenommene Kurzschlussstromkurven: a. bei herausgenommenen Wendepolen, b. bei unerregten Wendepolen, c. bei mit 2,5 Ampère erregten Wendepolen.

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

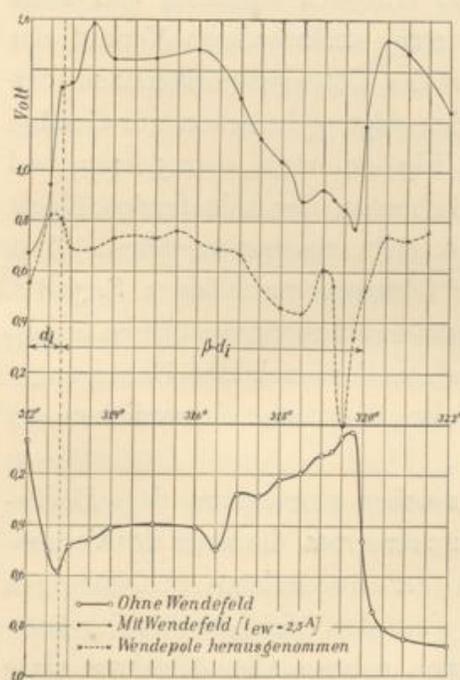


Fig. 28. Kurven der momentanen Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kommutator an der auflaufenden Kante.

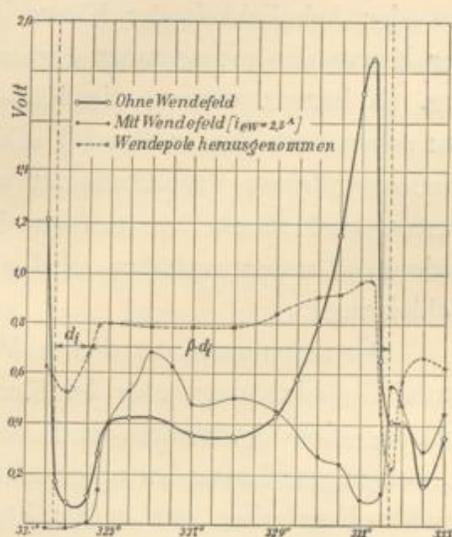


Fig. 29. Kurven der momentanen Potentialdifferenzen zwischen Bürste und Kommutator an der ablaufenden Kante.

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.