

# **Badische Landesbibliothek Karlsruhe**

## **Digitale Sammlung der Badischen Landesbibliothek Karlsruhe**

Die experimentelle Untersuchung eines Wechselstromserienmotors mit besonderer Berücksichtigung der Wendepole

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

# Die experimentelle Untersuchung eines Wechselstromserienmotors

mit besonderer Berücksichtigung der Wendepole.

Von Dr.-Ing. Edward Jonas.

In vorliegender Arbeit soll ein von den Siemens-Schuckert-Werken gebauter Wechselstromserienmotor mit Wendepolen untersucht werden.

Neben der allgemeinen Untersuchung, wie die Aufnahme der Arbeitskurven, die Bestimmung der Verluste usw., richtete der Verfasser sein Augenmerk hauptsächlich auf die Arbeitsweise und die Schaltungen der Wendepole und suchte die Vorteile und Nachteile der verschiedenen Schaltungen nachzuweisen.

## 1. Beschreibung des Motors.

Der untersuchte Motor ist gebaut für eine

Leistung von 10 PS  
bei einer Tourenzahl  $n = 1400$ ;  
die erforderliche Klemmenspannung beträgt 130 Volt  
und die Stromstärke 90 Amp.  
Periodenzahl des zugeführten Stromes  $c = 50$ .

Hauptabmessungen des Stators:

Eisenlänge  $l_1 = 165$  mm,  
Äußerer Eisendurchmesser = 410 mm,  
Bohrung 250 mm,  
Nutenzahl = 36,  
Polzahl = 6.  $p = 3$ . 6 Nuten pro Pol.  
Polteilung =  $\tau = 131$  mm,

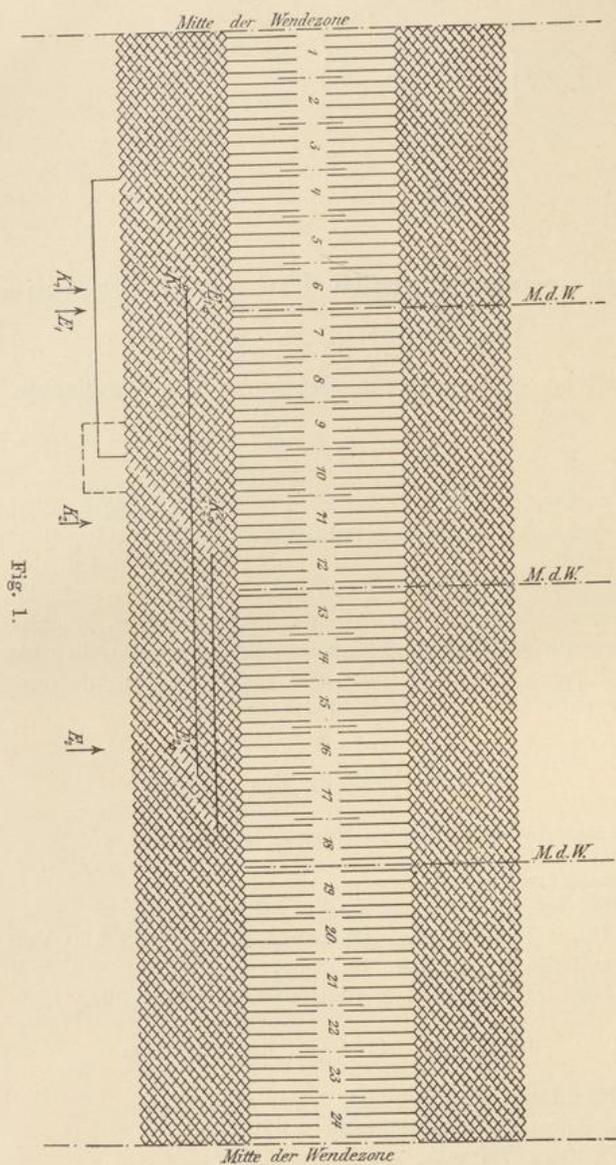


Fig. 1.

Nutenteilung = 21,8 mm, Nuttiefe  $\approx$  34 mm.  
 8 Stäbe pro Nut. Wicklung nach Schema Fig. 1.

Der Stator ist lamelliert und gleichmäßig genutet. Seine Wicklung ist fortlaufend und gleichmäßig verteilt und derart aufgeschnitten, daß sie zwei Erregerwicklungen und eine Kompensationswicklung bildet. Infolge der beiden Erregerwicklungen entspricht jeder Laufrichtung des Rotors eine derselben, wobei die andere stromlos bleibt.

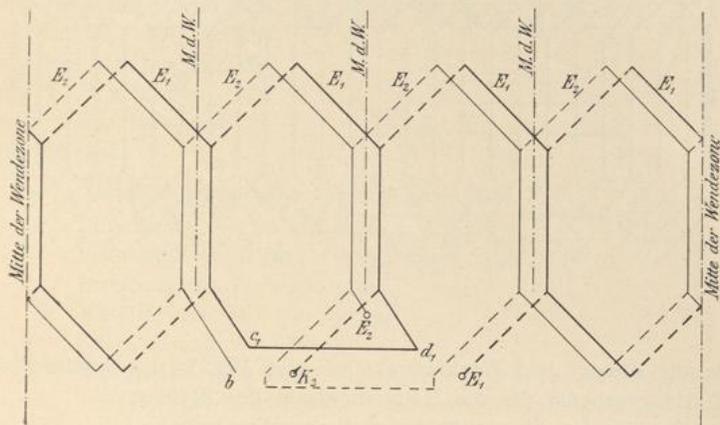


Fig. 2.

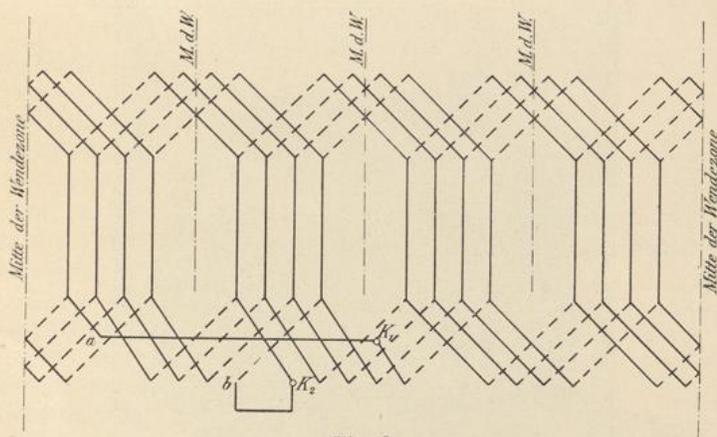


Fig. 3.

Zur näheren Erläuterung dienen die Fig. 2, 3 und 4, die den von Herrn R. Richter in der ETZ<sup>1)</sup> veröffentlichten Arbeiten entnommen sind. In Fig. 2 sind die beiden Erregerwicklungen sche-

<sup>1)</sup> R. Richter, ETZ 1907, S. 828 und 829.

matisch dargestellt. Fig. 3 zeigt ebenfalls die schematische Anordnung der Kompensationswicklung. Fig. 4 gibt die Zusammen-

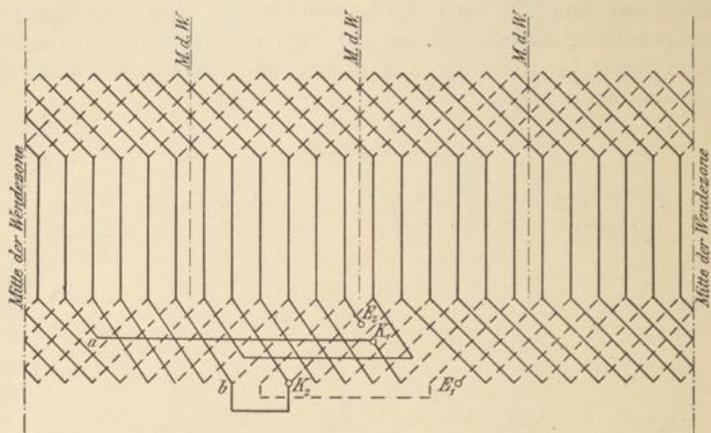


Fig. 4.

setzung dieser drei Wicklungen an und Fig. 1 das ausführliche Schaltungsschema für die Hauptwicklung des Stators.

Fig. 5 zeigt die Ausführung dieser Wicklung.

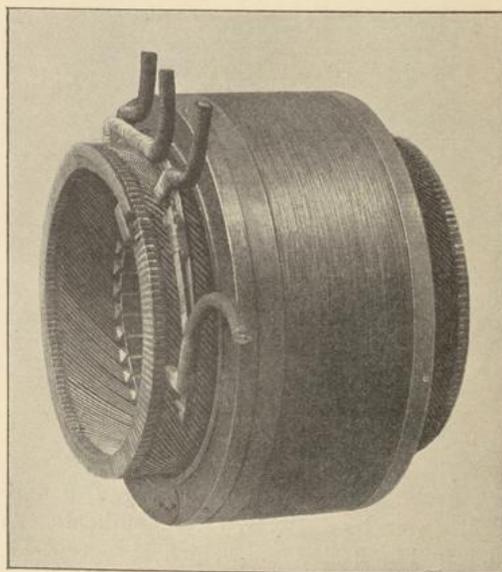


Fig. 5.

Die Wendepolwicklung ist unter der Hauptwicklung angeordnet und im Gegensatz zu den Erregerwicklungen in den Nuten gleichmäßig verteilt, wie aus Fig. 6 zu ersehen ist. Sie besteht aus drei Spulen pro Pol mit 7 Windungen pro Spule, also pro Pol 21 Windungen.

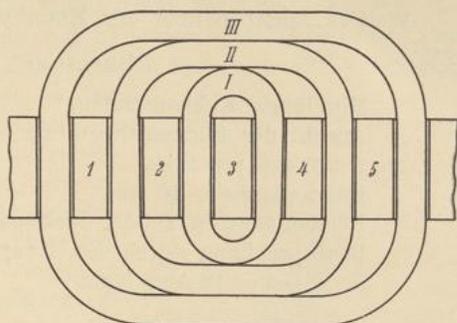


Fig. 6.

Die Hauptabmessungen des Rotors sind:

Eisenlänge  $= l_1 = 165$  mm,

Eisenhöhe  $= 30$  mm,

Durchmesser  $D = 249$  mm,

Nutenzahl  $= 46$ ,

Nutenteilung  $= 17$  mm,

Nutentiefe  $\approx 24$  mm,

6 Stäbe pro Nut (Stäbe  $2 \times 8$  mm<sup>2</sup>) und 3 Widerstandsverbindungen zum Kommutator: 2 mm  $\varnothing$ ,

Stabzahl  $= 6 \times 46 = 276 = 274 - 2$  (tote Stäbe).

Die Wicklung ist eine Wellenwicklung mit  $a = 1$  und  $p = 3$ . Zwischen Wicklung und Kommutator sind Widerstände eingebaut, welche durch die Nuten geführt werden. In jeder Nut befinden sich drei solche Widerstände.

In dem Moment, in dem Rotorwindungen durch die Bürsten kurzgeschlossen werden, befinden sich die Widerstandsverbindungen über der Polmitte, wie aus Fig. 7 hervorgeht.

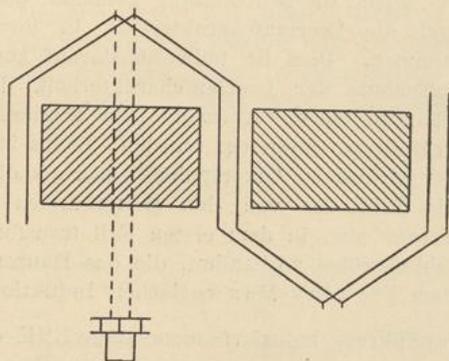


Fig. 7. Anordnung der Widerstandsdrähte auf dem Rotor nach dem Prinzip der Zusatzwicklung.

Dadurch, daß gleichzeitig der Hauptstrom durch diese Verbindungen fließt, werden sie effektive Leiter, die mit dem Hauptkraftfluß ein nützliches Drehmoment ausüben.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> R. Richter, ETZ 1906, S. 538 und 1907, S. 22.

Weitere Angaben über den Motor sind wie folgt:

Bürsten:

Mittelharte Kohlenbürsten,  
Anzahl der Bürstenstifte =  $2p = 6$ ,  
2 Bürsten pro Stift,  
Bürstenbreite = 10 mm,  
Bürstenlänge in axialer Richtung = 12,5 mm,  
Beanspruchung durch den Hauptstrom bei Voll-  
last = 12 Amp./qcm.

Kommutator:

Durchmesser  $D = 220$  mm,  
Lamellenzahl = 137,  
Lamellenbreite 4,2 mm,  
Isolation 0,8 mm,  
Kommutatorgeschwindigkeit bei  $n = 1400$ : 16,1 m/sec.

## 2. Aufnahme der charakteristischen Kurven bei ausgeschalteter Wendepolwicklung.

Um ein genaues Bild der Arbeitsweise des Motors zu erhalten, wurden zunächst die charakteristischen Kurven aufgenommen. Hierbei wurde die Beobachtung gemacht, daß die Magnetisierungskurve und die Leerlaufcharakteristik in ihrem Verlauf nicht übereinstimmen. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, daß bei der Aufnahme der Leerlaufcharakteristik die Hauptbürsten auflagen, während bei der Aufnahme der Magnetisierungskurve nur schmale Prüfbürsten aufgelegt wurden. Somit ist im zweiten Fall die Zahl der wirksamen Ankerspulen größer als die im ersten, und zwar um die Zahl der von den Hauptbürsten kurzgeschlossenen Spulen. Ferner sind in dem ersten Fall transformatorisch-induzierte Kurzschlußströme vorhanden, die das Hauptfeld schwächen, denn nach dem Faraday-Maxwellschen Induktionsgesetz ist die in einem Stromkreise induzierte momentane EMK  $e = -\frac{d\Phi}{dt}$ , worin das negative Vorzeichen aussagt, daß die induzierte EMK so gerichtet ist, daß ein Strom, der sich in Phase mit ihr befindet, der Variation des Kraftflusses entgegenwirkt.<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Vgl. Rudolf Goldschmidt, Electrician 1908, S. 710 (übersetzt): „Wären Widerstand und Streuung nicht vorhanden, so würde der Strom in der (kurzgeschlossenen) Ankerspule die Wirkung der Feldspulen fast neutralisieren und verhindern, daß der Kraftfluß durch den Anker fließt.“

Fig. 8 gibt uns ein Bild vom Verlauf der beiden Kurven. Die Magnetisierungskurve wurde auf zweierlei Arten gemessen. Nach der ersten Art wurde die Kurve I nach Schaltung Fig. 9 bei Stillstand des Rotors aufgenommen. Die Hauptbürsten waren abgehoben und durch schmale Hilfsbürsten, die gegenüber der Polmitte auflagen, ersetzt. Sehr schmale Hilfsbürsten wurden genommen, um die Entstehung von Kurzschlußströmen zu vermeiden. Bei einer bestimmten Stromstärke in der Erregerwicklung wurde die durch Transformatorwirkung induzierte Spannung  $P$ , bei Stillstand des Rotors, abgelesen und in Abhängigkeit von der Stromstärke aufgetragen. Auf diese Weise erhielt man die Kurve I.

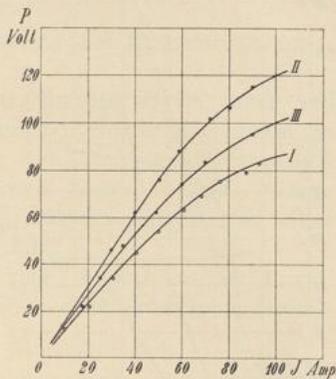


Fig. 8. Magnetisierungskurven und Leerlaufcharakteristik.

Die zweite Art unterscheidet sich von der ersten dadurch, daß man den Rotor mit normaler Tourenzahl  $n=1400$  antrieb, wobei die Hilfsbürsten in die neutrale Zone gestellt wurden (Fig. 10). Dies ergibt

Magne- } I  $n=0$  nach Schaltung Fig. 9  
 tisie- } II  $n=1400$  nach Schaltung Fig. 10  
 rungs- }  
 kurven }  
 Leerlaufcharakteristik III  
 $n=1400$  nach Schaltung Fig. 11.

Kurve II in Fig. 8. Den Zusammenhang der beiden Kurven erhält man, wenn man die Periodenzahl der Rotation und die Grundperiodenzahl, außerdem noch die Form- bzw. Wicklungsfaktoren für rotierende und statische Induktion berücksichtigt. Dies ergibt das Verhältnis der beiden Spannungen zu

$$\frac{E_{rot}}{E_{stat}} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{c_r}{c} = \frac{3}{\pi} \cdot \frac{70}{50} = 1,34,$$

was mit den beobachteten Spannungen ungefähr übereinstimmt. Die Leerlaufcharakteristik Kurve III in Fig. 8 wurde bei normaler Tourenzahl und mit aufliegenden Hauptbürsten aufgenommen (Fig. 11).

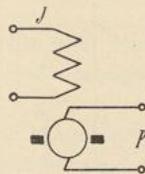


Fig. 9.

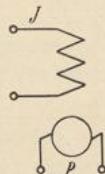


Fig. 10.

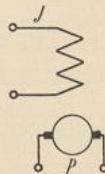


Fig. 11.

Die Aufnahme der äußeren Charakteristik und der Arbeitskurven erfolgte bei verschiedenen Tourenzahlen, indem die zu-

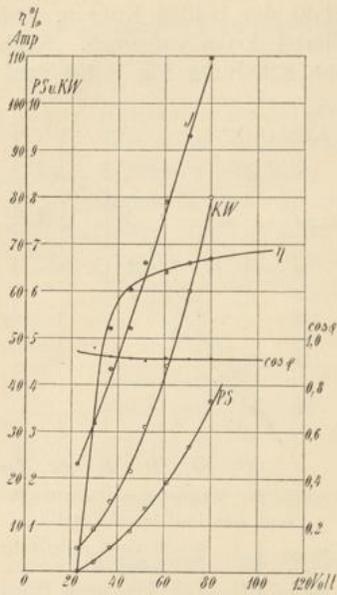


Fig. 12. Äußere Charakteristik und Arbeitskurven für  $n = 800$ .

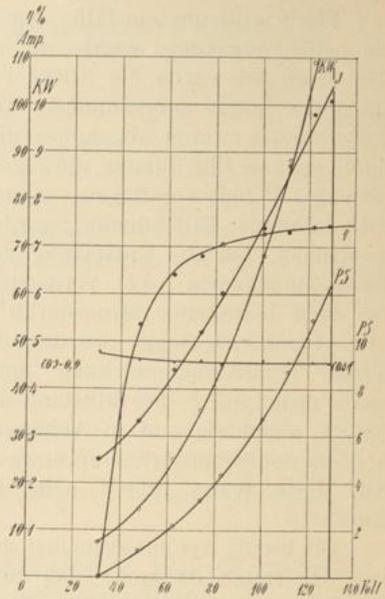


Fig. 13. Äußere Charakteristik und Arbeitskurven für  $n = 1200$ .

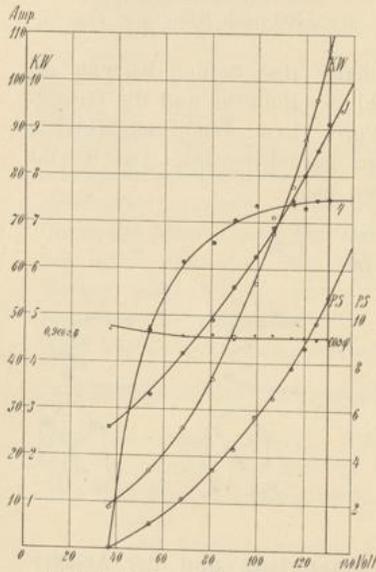


Fig. 14. Äußere Charakteristik und Arbeitskurven für  $n = 1400$ .

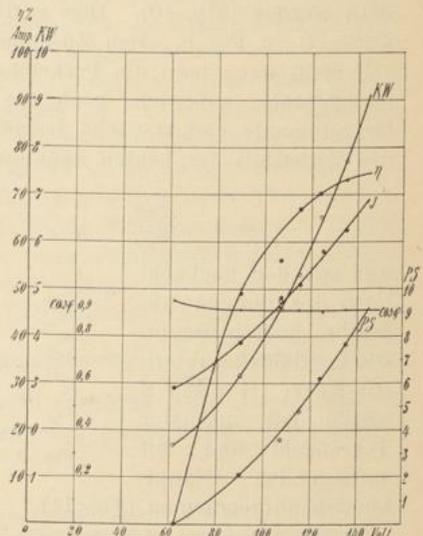


Fig. 15. Äußere Charakteristik und Arbeitskurven für  $n = 2000$ .

bzw. die abgeführte Leistung, der Strom und die aufgedrückte Klemmenspannung gemessen wurden. Auf bekannte Weise konnten hieraus der Wirkungsgrad und die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung berechnet werden.

Diese Werte sind alle als Funktionen der Klemmenspannung aufgetragen (Fig. 12 bis 15).

Die Belastungskurven wurden auf ähnliche Weise, aber mit veränderlicher Tourenzahl und konstanter normaler Klemmenspannung  $P=130$  Volt aufgenommen. Während dieser Versuche waren die Wendepole nicht eingeschaltet (Fig. 16).

Das Anlaufmoment wurde mit Hilfe eines Pronyschen Brems-

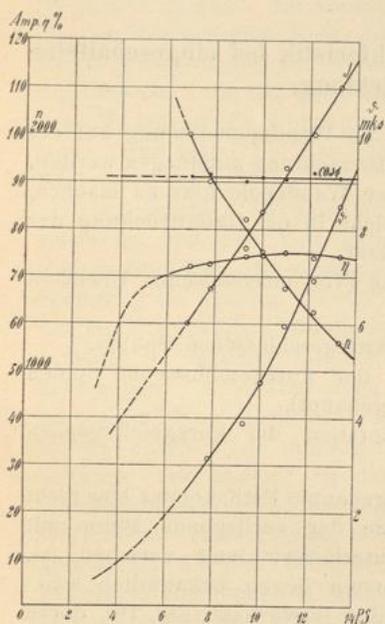


Fig. 16. Belastungskurven für 130 Volt.

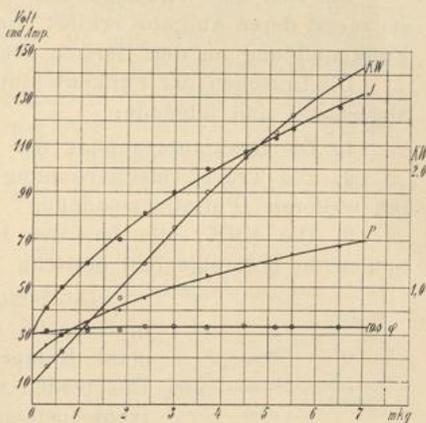


Fig. 17. Strom- und KW-Verbrauch bei Anlauf.

zaumes ermittelt. Es stellte sich hierbei heraus, daß die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung für verschiedene Drehmomente beinahe konstant blieb.

Das bei Vollast und normaler Tourenzahl zu entwickelnde Drehmoment berechnet sich zu

$$\vartheta = \frac{PS}{n} \cdot \frac{60 \cdot 75}{2 \cdot \pi} = 5,13 \text{ m/kg.}$$

Dasselbe muß natürlich überschritten werden, sobald der Motor unter Vollast angehen soll. Wie aus Fig. 17 ersichtlich ist, muß

hierbei der Stromstoß mindestens 113 Amp. betragen. Der KW-Verbrauch bei Vollast beträgt ungefähr

$$\frac{KW}{\vartheta} = \frac{10}{5,13} = 1,95 \text{ KW/mkg.}$$

Bei Anlauf und demselben Drehmoment erhalten wir

$$\frac{2,3}{5,13} = 0,45 \text{ KW/mkg.}$$

### 3. Aufnahme der äußeren Charakteristik bei eingeschalteter Wendepolwicklung.

Es soll nun der Einfluß, den die Wendepolwicklung auf die Arbeitskurven ausübt, einer näheren Betrachtung unterzogen werden.

Um sich die Wirkungsweise der Wendepole klar zu machen, sei zuerst deren Aufgabe erklärt, welche in der Unterdrückung der Funkenbildung an den Bürsten besteht.

Die Ursachen der Funkenbildung (von mechanischen Ursachen abgesehen) sind folgende:

1. Die Reaktanzspannung der kurzgeschlossenen Spulen.
2. Die Transformatorspannung der kurzgeschlossenen Spulen (im weiteren „Pulsationsspannung“ genannt).
3. Die EMK, die bei der Rotation der kurzgeschlossenen Spulen im Rotoreigenfeld entsteht.

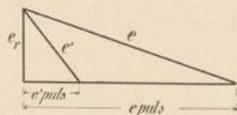


Fig. 18.

Die letztgenannte EMK kommt hier nicht in Betracht, da der vorliegende Motor mit einer Kompensationswicklung versehen ist. Die beiden ersten liegen bekanntlich senkrecht zueinander (etwa nach Fig. 18), deren Resultante  $e$  ist. Es ist dies jedoch mit Vorsicht aufzufassen, denn die Variation der

Reaktanzspannung  $e_r$  ist der Tourenzahl und die der Pulsationsspannung  $e_{puls}$  der Grundperiodenzahl proportional. Infolgedessen kann es vorkommen, daß, während z. B. die eine sich im Minimum befindet, die andere ihr Maximum erreicht hat. Um die resultierende Spannung  $e$  möglichst zu verringern, sucht man deren Komponenten folgendermaßen aufzuheben:

Die eine Komponente  $e_{puls}$  kann man in der Weise verringern, daß man mittels der Wendepole ein Feld erzeugt, worin sich die kurzgeschlossenen Spulen bewegen. Dadurch wird eine EMK induziert (im weiteren „Rotationsspannung“ genannt), welche  $e_{puls}$  teilweise aufhebt. Eine vollständige Aufhebung würde nur

dann eintreten, wenn in jedem Moment die beiden EMKe gleich und entgegengesetzt wären, was sehr unwahrscheinlich ist, da dies eine genau gleiche Kurvenform der Spannungskurven bedingen würde. Den nicht aufgehobenen Teil der Pulsationsspannung  $e_{puls}$  bezeichnen wir mit  $e'_{puls}$ , welcher mit  $e_r$  eine Resultierende  $e'$  bildet. Ist  $e_r$  nicht ungewöhnlich groß<sup>1)</sup>, so wird durch sie  $e'$  nur wenig größer als  $e'_{puls}$ . Aus diesem Grunde wird man sein Augenmerk hauptsächlich auf die Vernichtung von  $e_{puls}$  richten. Experimentell ist es nur möglich, die Änderung von  $e_{puls}$  und  $e'_{puls}$  zu beobachten.

Im vorliegenden Motor ist für die Aufhebung von  $e_r$  dadurch Sorge getragen, daß die Wendepole auch von dem Hauptstrom erregt werden. Um ein möglichst günstiges Wendefeld zu erzeugen, liegt die eigentliche Wendepolwicklung im Nebenschluß zum ganzen Motor, was später bei der näheren Betrachtung der Wendepole erläutert werden soll.

Wie bereits S. 161 erwähnt ist, ist der Motor für eine Klemmenspannung von 130 Volt gebaut. Da die Wendepolwicklung im Nebenschluß liegt, ist es möglich, die den Wendepolen aufgedrückte Spannung zu ändern. Durch besondere Versuche soll nun die für den Motor günstigste Wendepolspannung ermittelt werden. Wie oben gezeigt, ist es kaum möglich, die Pulsationsspannung vollständig aufzuheben. Es ist aber auch nicht durchaus nötig, denn offenbar wird der Wirkungsgrad des Motors durch einen unnötigen Aufwand von Energie in der Wendepolwicklung nur verschlechtert. Es zeigt sich, daß man die auf die Wendepole aufgedrückte Spannung in ziemlich weiten Grenzen verändern kann, ohne daß die Funkenbildung merklich zu- oder abnimmt. Es liegt jedoch auf der Hand, daß bei eingeschalteten Wendepolen die in den kurzgeschlossenen Spulen verbrauchte Energie verringert wird. Um die günstigste Spannung zu ermit-

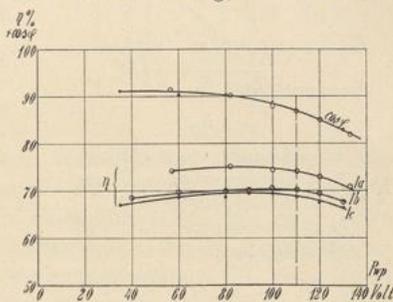


Fig. 19.

- Ia: Motorklemmenspannung 130 V.  
 $\vartheta = 5,13$  mkg
- Ib: Motorklemmenspannung 90 V.  
 $\vartheta = 3,6$  mkg
- Ic: Motorklemmenspannung 80 V.  
 $\vartheta = 3,0$  mkg.

<sup>1)</sup> Vgl. E. Arnold-J. L. la Cour, Die Kommutation bei Gleichstrom- und Wechselstromkommutatormaschinen, Sammlg. Elektrotechn. Vorträge Bd. IX, 1906, S. 62: „Von den beiden Komponenten  $e_p$  und  $e_n$  ist  $e_p$  im allgemeinen die weitaus größte.“  $e_p$  ist die Pulsationsspannung und  $e_n$  die Reaktanzspannung.

teln, läßt man den Motor mit konstanter Spannung und konstantem Drehmoment laufen und ändert dabei die auf die Wendepole aufgedrückte Spannung. Indem man den Wirkungsgrad  $\eta$  ausrechnet und in Abhängigkeit von der Wendepolspannung  $P_{wp}$  aufträgt, bekommt man die Kurven I Fig. 19. Man wird  $P_{wp}$  so groß nehmen, bis  $\eta$  merklich kleiner zu werden beginnt und die Funkenbildung beseitigt wird. Diese Spannung ergibt sich zu 110 V. Es wurde deswegen bei der Nachrechnung der Wendepolwicklung von dieser Spannung ausgegangen.

Es soll nun ein Vergleich angestellt werden zwischen den früher ohne Wendepole aufgenommenen Arbeitskurven und denjenigen, die wir erhalten, wenn wir die Wendepole einschalten und eine Spannung von 110 V. aufdrücken. Die Wende-

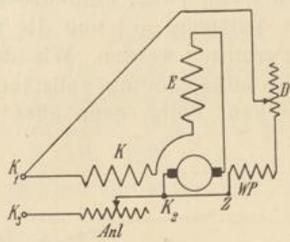


Fig. 20.

- $E$  = Haupterregwicklung
- $K$  = Kompensationswicklung
- $WP$  = Wendepolwicklung
- $D$  = Drosselspule
- $Anl$  = Anlasser.

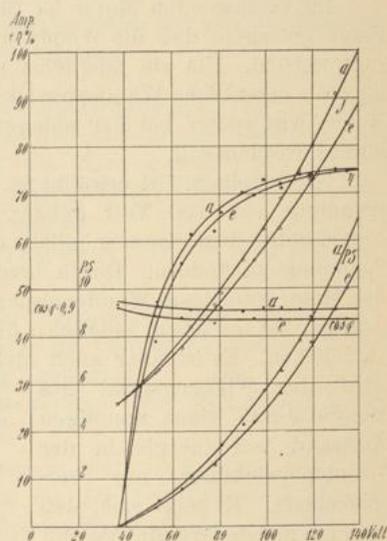


Fig. 21. Verhalten des Motors bei  
 $a$  = ausgeschalteten Wendepolen  
 $e$  = eingeschalteten Wendepolen.

pole wurden nach Fig. 20 geschaltet und die Kurven Fig. 21 aufgenommen. Wie daraus ersichtlich ist, vermochte der Motor bei ausgeschalteten Wendepolen bei derselben Motorklemmenspannung mehr Strom aufzunehmen, als wenn die Wendepole eingeschaltet waren. Es ist dies auf die transformatorische Wirkung, die die Wendepolwicklung auf den Hauptstromkreis ausübt, zurückzuführen. Denn, sollen sich diese Wicklungen nicht gegenseitig beeinflussen, so müssen sie räumlich senkrecht zueinander stehen. Daß dies nicht genau zutrifft, ist aus Fig. 22 ersichtlich, welche das Hauptfeld von rechteckiger Form und das von der verteilten Wendepolwicklung herführende Feld in ihrer gegenseitigen Lage zueinander darstellt.

$x$  ist die Verschiebung aus dem senkrechten der beiden Felder zueinander.

Bei derselben abgegebenen Leistung war der Wirkungsgrad gleich groß. Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung war bei ausgeschalteten Wendepolen etwas günstiger;  $\cos \varphi$  ergab sich zu 0,91 bzw. 0,87.

Zu den  $\eta$ -Kurven ist zu bemerken, daß die in den Wendepolen verbrauchte Leistung nicht inbegriffen ist, daß sie also nur mit der durch den Hauptstromkreis zugeführten Energie berechnet wurden. Es wäre daher vielleicht zu erwarten gewesen, daß infolge verringerter Kurzschlußverluste der Wirkungsgrad besser sein würde. Dagegen ist aber in Betracht zu ziehen, daß die Kurz-

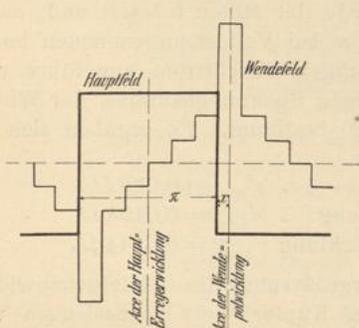


Fig. 22.

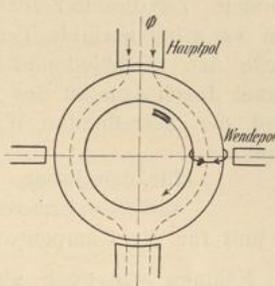


Fig. 23.

schlußströme zusammen mit dem Wendepolfluß eine bremsende Wirkung ausüben. Dies kann man sich an der Fig. 23 klar machen. Der Einfachheit halber nehmen wir einen Ringanker mit einer kurzgeschlossenen Windung. Der Hauptkraftfluß sei im Zunehmen begriffen. Die hierdurch in der kurzgeschlossenen Windung induzierte EMK wird dann die Richtung des stark ausgezogenen Pfeiles annehmen. Um diese EMK aufzuheben, muß durch die Wirkung der Wendepole eine entgegengesetzte EMK erzeugt werden, d. h. der Wendepol muß ein Südpol sein. Hat der Hauptkraftfluß sein Maximum erreicht, so beginnt er abzunehmen, und der Kurzschlußstrom kehrt seine Richtung um. Infolge der Schaltung der Wendepolwicklung eilt aber der Wendepolkraftfluß dem Hauptkraftfluß zeitlich um ca.  $90^\circ$  voraus, und der Wendepol wird jetzt zu einem Nordpol, so daß die in der kurzgeschlossenen Windung induzierten EMKe wieder entgegengesetzt gerichtet sind. Man sieht also, daß die Wendepole stets generatorisch wirken, d. h. auf den Rotor

bremsend. Auf diesen Umstand ist zurückzuführen, daß, wie beobachtet wurde, beim Einschalten der Wendepole sich die Tourenzahl und damit die abgegebene Leistung verringert.

#### 4. Verluste.

Die Verluste teilen wir in zwei Gruppen: in elektrische und mechanische.

##### a) Elektrische Verluste.

Zu diesen gehören: Kupferverluste, Eisenverluste und Kurzschlußverluste.

Wir gehen zunächst dazu über, die Kupferverluste zu bestimmen. Zu diesem Zwecke wurde der Motor belastet und, nachdem er seine normale Temperatur bei Vollast angenommen hatte, wurde den verschiedenen Wicklungen Gleichstrom zugeführt und hierbei durch Ablesen des jeweiligen Spannungsabfalles der Widerstand der betreffenden Wicklung bestimmt. Es ergaben sich im Mittel

$$\begin{aligned} \text{für den Rotor} & \dots \dots \dots r'_{rot} = 0,036 \Omega, \\ \text{für jede Erregerwicklung} & \dots \dots \dots r'_{errg} = 0,0104 \Omega, \\ \text{und für die Kompensationswicklung} & \dots \dots \dots r'_{komp} = 0,0144 \Omega. \end{aligned}$$

Nehmen wir noch eine Vergrößerung des Gleichstromwiderstandes durch Wirbelströme im Kupfer bei Wechselstrom von 15 % an, wobei sich der Wirbelstromkoeffizient  $k_r$  zu 1,15 ergibt, so erhalten wir die endgültigen Werte für Wechselstrom zu

$$\begin{aligned} r_{rot} &= 1,15 \cdot 0,036 = 0,0416 \Omega, \\ r_{errg} &= 1,15 \cdot 0,0104 = 0,012 \Omega, \\ r_{komp} &= 1,15 \cdot 0,0144 = 0,0166 \Omega. \end{aligned}$$

Durch Summation ergibt sich hieraus der Gesamtwiderstand des Motors zu  $0,0702 \sim 0,07 \Omega$ .

Die Eisenverluste bestimmen wir zunächst bei abgehobenen Bürsten und für verschiedene Tourenzahlen:  $n=0, 600, 950$  und  $1400$ . Es wurde der Erregerwicklung Strom zugeführt; die in derselben verbrauchte Energie wird teils in Stromwärme, teils in Eisenverluste umgesetzt. Wir erhalten somit die in Fig. 24 bis 27 angeführten Kurven 1. Da uns der Widerstand der Erregerwicklung bekannt ist, können wir die Stromwärmeverluste bestimmen. Tragen wir dieselben in eine Kurve 2 auf, so erhalten wir durch Subtraktion die Eisenverluste Kurve 3. Legen wir nun die Bürsten auf, so treten zu den vorigen Verlusten die Kurzschlußverluste hinzu. Hierbei ist in Betracht zu ziehen, daß infolge der Gegen-

wirkung der Kurzschlußströme für eine bestimmte Erregerstromstärke die Eisenverluste bei aufliegenden nicht dieselben sind wie bei abgehobenen Bürsten.

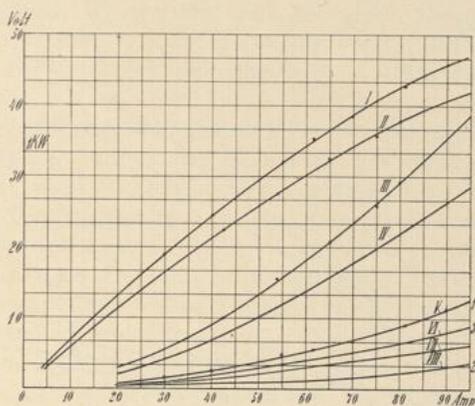


Fig. 24. Kurzschluß- und Eisenverluste für  $n = 0$ .

- I. Erregerspannung bei abgehobenen Bürsten.
- II. Erregerspannung bei aufliegenden Bürsten.
- III. Zugeführte Energie bei aufliegenden Bürsten.
- IV. Kurzschlußverluste  $W_k$ .
- V. Zugeführte Energie bei abgehobenen Bürsten.
- VI. Eisenverluste bei abgehobenen Bürsten.
- VII. Eisenverluste bei aufliegenden Bürsten  $W_e$ .
- VIII. Kupferverluste in der Erregerwicklung.

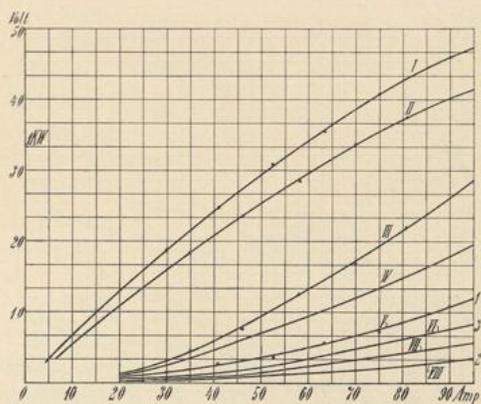


Fig. 25. Kurzschluß- und Eisenverluste für  $n = 600$ .

Eine Methode zur genauen Bestimmung wird von Prof. Bragstad und Stanley Smith im „Electrician“ 1906, S. 996 ff. an-

gegeben, die hier zur Verwendung kam. Ein hiernach ausgeführter Versuch diene zur näheren Erläuterung. Für eine Tourenzahl  $n=0$  betrage die Erregerstromstärke 90 Amp. Bei aufliegenden

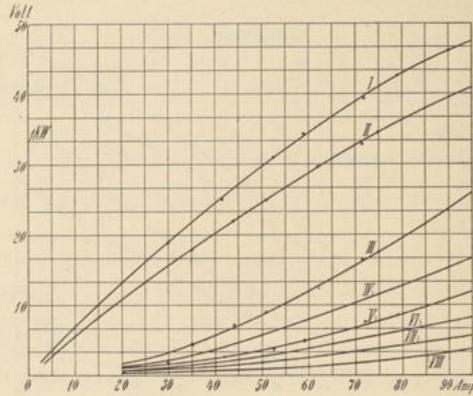


Fig. 26. Kurzschluß- und Eisenverluste für  $n=900$ .

- I. Erregerspannung bei abgehobenen Bürsten.
- II. Erregerspannung bei aufliegenden Bürsten.
- III. Zugeführte Energie bei aufliegenden Bürsten.
- IV. Kurzschlußverluste  $W_k$ .
- V. Zugeführte Energie bei abgehobenen Bürsten.
- VI. Eisenverluste bei abgehobenen Bürsten.
- VII. Eisenverluste bei aufliegenden Bürsten  $W_e$ .
- VIII. Kupferverluste in der Erregerwicklung.

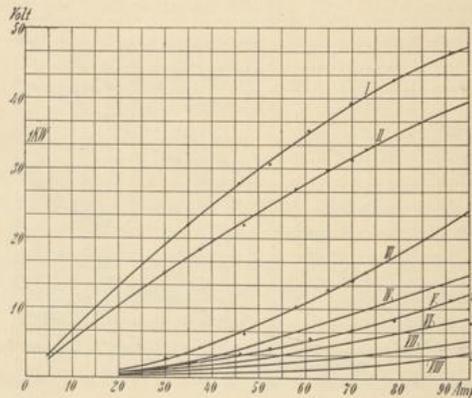


Fig. 27. Kurzschluß- und Eisenverluste für  $n=1400$ .

Bürsten erfordert dies eine aufgedrückte Spannung von 41 Volt, wobei die zugeführte Leistung 1060 Watt beträgt. Darunter be-

finden sich Kupferverluste  $J^2 \cdot r_{errg} = 90^2 \cdot 0,012 = 97$  Watt. Bei abgehobenen Bürsten ergibt diese Spannung einen Strom = 75 Amp. und die dabei gemessenen Eisenverluste betragen 175 Watt. Die Kurzschlußverluste  $W_k$  werden nun bei einer Erregerstromstärke von 90 Amp. =  $1060 - 97 - 175 = 788$  Watt. Auf diese Weise lassen sich die  $W_k$ -Kurve und Eisenverluste für jede Tourenzahl konstruieren.

Als Beweis für die Richtigkeit obiger Messungen diene folgende Gegenüberstellung. Auf S. 169 fanden wir bei Ermittlung des Anlaufmomentes, daß die bei der Stromstärke 90 Amp. zugeführte Leistung 1500 Watt betrug. Diese Leistung wird in dem Motor nur durch die elektrischen Verluste verzehrt, d. h. die Summe aller Verluste muß ungefähr 1500 Watt betragen. Die Kurzschlußverluste hatten wir oben für diese Stromstärke (90 Amp.) zu 788 Watt bestimmt und die Eisenverluste  $W_e = 175$  Watt. Die Kupferverluste betragen  $J^2 r_{tot} = 90^2 \cdot 0,07 = 567$  Watt. Also beträgt die Summe 1530 Watt, was mit Obigem gut übereinstimmt.

#### b) Mechanische Verluste.

Unter den mechanischen Verlusten unterscheiden wir diejenigen, die durch Ummagnetisierung des Rotoreisens durch Rotation im Hauptfelde entstehen („mechanisch - elektrische Verluste“), und die durch Reibung entstehenden Verluste. Erstere wurden mit Hilfe einer genau arbeitenden Bremse bestimmt, die nach Ausschaltung des Hauptfeldes an Stelle des zur Ummagnetisierung des Rotoreisens nötigen Drehmomentes trat. Auffällig ist hierbei, daß die elektrisch zugeführten Eisenverluste bedeutend geringer waren als die auf mechanischem Wege zugeführten. Diese Erscheinung dürfte auf die Pulsationen in den Zahnköpfen zurückzuführen sein.

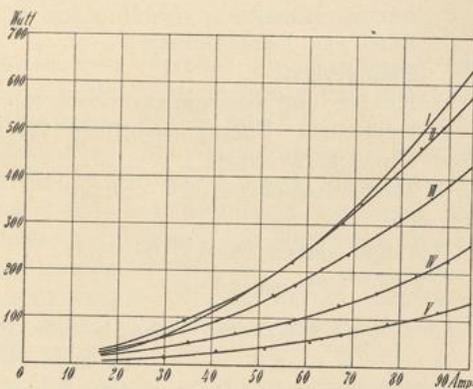


Fig. 28. Kupfer- und mechanisch-elektrische Verluste.

I. Gesamte Kupferverluste. II.—V. Mechanisch-elektrische Verluste (II. bei  $n=1400$ , III. bei  $n=1200$ , IV. bei  $n=900$ , V.  $n=600$ ).

In Fig. 28 sind die mechanisch-elektrischen Verluste für ver-

schiedene Tourenzahlen und Stromstärken aufgezeichnet. Bei Stillstand sind dieselben selbstverständlich Null und nehmen mit steigender Tourenzahl und Feldstärke zu.

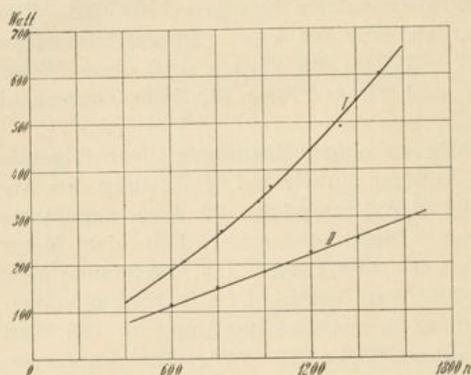


Fig. 29. Reibungsverluste.  
I. Luft- und Lagerreibungsverluste.  
II. Bürstenreibungsverluste.

Auf ähnliche Weise wurden die Bürsten-, Luft- und Lagerreibungsverluste bestimmt. Sie sind in Fig. 29 als Funktion der Tourenzahl aufgetragen.

Die Bürstenübergangsverluste bei Vollast und 1400 Touren zeigten eine Vergrößerung gegen die bei Stillstand um 135 Watt, was durch besonderen Versuch ermittelt wurde. Kontrolliert man

den Wirkungsgrad des Motors, z. B. für Vollast, mittels der erhaltenen Verlustkurven, so ergeben sich folgende Werte:

Bürstenreibung . . . . .	255 Watt
Luft- und Lagerreibung . . . . .	545 "
Eisenverluste . . . . .	150 "
Kupfer- und Übergangsverluste für $n=0$	567 "
Zusätzliche Übergangsverluste für $n=1400$	135 "
Kurzschlußverluste . . . . .	410 "
Mechanisch-elektrische Verluste . . . . .	520 "
	Sa. 2582 Watt.

Aufgenommen wurde 10,65 KW.

Der Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{\text{KW-Verl.}}{\text{KW}} = \frac{10,65 - 2,58}{10,65} = \frac{8,07}{10,65} = 0,757.$$

Tatsächlich ergab sich  $\eta = 0,75$ .

### 5. Streureaktanz des Rotors.

Um die Streureaktanz des Rotors zu messen, wurden Rotor- und Kompensationswicklung gegeneinander geschaltet, wie Schaltung Fig. 30 zeigt, und von demselben Strome durchflossen, um eine Ausbildung des Rotoreigenfeldes zu verhüten.

Die dem Rotor zugeführte Leistung wurde mittels eines Wattmeters  $W$  gemessen. Ferner wurden Strom und Rotorspannung beobachtet. Ein Hilfsmotor trieb den Rotor mit verschiedenen Geschwindigkeiten an, wobei jedesmal eine Reihe von Messungen gemacht wurden.

Die Reaktanz ist aus der wattlosen Spannungskom-

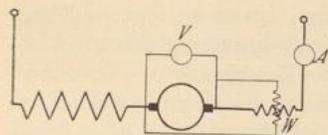


Fig. 30.

$V$  = Voltmeter,  $A$  = Ampere-  
meter,  $W$  = Wattmeter.

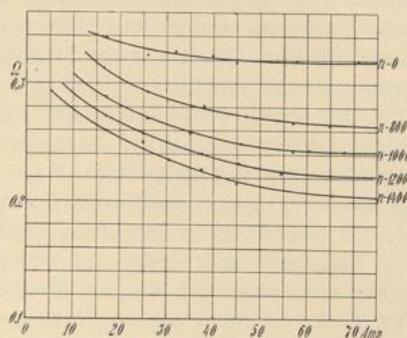


Fig. 31. Rotorreaktanz.

ponente berechnet worden. Auf diese Weise erhält man die Kurven Fig. 31. Mit zunehmender Stromstärke fallen dieselben und gehen allmählich in eine Horizontale über.<sup>1)</sup>

## 6. Untersuchung der Wendepole.

Bei den Gleichstrommaschinen erfüllen die Wendepole den Zweck, das Ankerfeld in der Kommutierungszone und die Reaktanzspannung der kurzgeschlossenen Spulen durch die vom Wendefeld induzierte EMK aufzuheben. Bei Wechselstromkommutatormotoren wird das Ankerfeld in der Regel durch eine Kompensationswicklung aufgehoben, und das Wendefeld hat somit den Zweck, eine EMK zu schaffen, die sowohl der Reaktanzspannung wie der Pulsationsspannung entgegenwirkt.

Um eine möglichst vollkommene Wirkung der Wendepole zu erreichen, muß neben der Stärke des Wendefeldes hauptsächlich dessen Phase berücksichtigt werden.

Da die Reaktanzspannung gegenüber der Pulsationsspannung weniger in Betracht kommt, so muß das Wendefeld derart gestaltet sein, daß es die letztere vernichtet.<sup>2)</sup> Man findet deswegen in der Literatur nur wenige Anordnungen, bei denen für die Aufhebung der Reaktanzspannung Sorge getragen wird. Über diese

<sup>1)</sup> Vgl. E. Arnold-J. L. la Cour, Kommutation bei Gleichstrom- und Wechselstrom-Kommutatormaschinen (Sammlung Elektrotechn. Vorträge 1906), S. 62, Fig. 51.

<sup>2)</sup> Vgl. Fußnote S. 171.

Komponenten der Funkenspannung schreibt Richter<sup>1)</sup>: „Daß es sehr wichtig ist, die Wendespannung (Reaktanzspannung) und die EMK der Ruhe jede für sich durch eine besondere Wicklung zu vernichten, davon überzeugt man sich leicht, wenn man bedenkt, daß sich bei unveränderlicher Motorspannung und bei ungesättigtem Eisen das Produkt aus Drehzahl und Strom und damit die Wendespannung mit der Belastung nicht ändert, während die EMK der Ruhe im geraden Verhältnis zum Motorstrom steht. Die Phase der resultierenden EMK in der kurzgeschlossenen Ankerspule wird sich demnach mit der Belastung ändern, und zwar im andern Sinne, als sich die Phase des Flusses  $f$  mit der Belastung ändert.“ ( $f$  ist der von der Wendepolwicklung erzeugte Kraftfluß.)

Um dieses zu erreichen, ist in dem Motor der Siemens-Schuckertwerke die Anordnung so getroffen, daß die Erregerwicklung (siehe Fig. 2, S. 163) nicht nur den Hauptpol, sondern auch den Wendepol umfaßt. Der Stator ist mit 36 gleichmäßig verteilten Nuten versehen. Die Polzahl beträgt 6, somit kommen auf jede Polteilung 6 Zähne. Die Erregerwindungen umschlingen alle 6 Zähne, wovon fünf als Hauptpol, der sechste als Wendepol zu betrachten sind. Der Wendepol erhält außerdem noch eine besondere Wicklung, um ein Wendefeld von solcher Größe und Phase zu erzeugen, daß die durch Rotation von diesem Feld in den Spulen induzierte EMK die Pulsationsspannung vernichtet. Die Wendepolwicklung ist in 5 Nuten verteilt, wie aus Fig. 6 hervorgeht. Infolge dieser Verteilung fließt durch den Wendepol etwa die Hälfte des von der Wendepolwicklung erzeugten Kraftflusses und durch die benachbarten 4 Zähne die andere Hälfte.<sup>2)</sup> Wir werden deshalb die Zusammenwirkung des Haupt- und des Wendepolflusses nur in dem Wendezahn betrachten und den Wendepolfluß in den übrigen Zähnen vernachlässigen. Da die Erregerwicklung 6 Zähne umschlingt, so beträgt der Hauptkraftfluß für jeden Zahn  $\Phi/6$ . Wäre keine Wendepolwicklung vorhanden, so würde auch durch den Wendezahn dieser Kraftfluß fließen. Infolge

<sup>1)</sup> ETZ 1906, S. 543, Anm.

<sup>2)</sup> Die Wendepolwicklung ist in drei gleiche Spulen I, II, III, Fig. 6, verteilt, die einen, bzw. drei, bzw. fünf Zähne umfassen. Der Kraftfluß, der von jeder Spule erzeugt wird, beträgt also ein Drittel des ganzen Kraftflusses.

Spule I umfaßt nur den Wendezahn Nr. 3, es fließt also durch den Wendezahn  $\frac{1}{3}$  des Ganzen.

Spule II umfaßt drei Zähne; durch den Wendezahn fließt also  $\frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} = \frac{1}{9}$  des Ganzen.

Spule III umfaßt fünf Zähne; durch den Wendezahn fließt also  $\frac{1}{3} \cdot \frac{5}{3} = \frac{5}{9}$  des Ganzen.

Totaler Kraftfluß durch den Wendezahn =  $\frac{1}{3} + \frac{1}{9} + \frac{5}{9} = \frac{7}{9} \sim \frac{1}{2}$  des ganzen von der Wendepolwicklung erzeugten Kraftflusses.

der Wendepolwicklung aber wird in dem Wendezahn ein Kraftfluß erzeugt, der mit dem Hauptkraftfluß  $\Phi/6$  den eigentlichen „resultierenden Wendefluß“ ergibt. Da nun dieser dem Hauptkraftfluß gegenüber klein und außerdem um fast  $90^\circ$  gegen ihn in der Phase verschoben ist, so kann man seine Wirkung als Teil des Hauptkraftflusses vernachlässigen. Somit ist der Hauptkraftfluß durch den Einfluß der Wendepolwicklung um  $\frac{1}{6}$  seiner Stärke geschwächt worden. Diesem Nachteil steht der Vorteil gegenüber, daß hierdurch nicht nur für die Aufhebung der Reaktanzspannung Sorge getragen wird, sondern auch, daß das Wendefeld zur Vernichtung der Pulsationsspannung eine geeignetere Phase erhält, als wenn die Wendepole allein von der Wendepolwicklung erregt wären. Dieses soll nun an einem Diagramm gezeigt werden. Das Diagramm gilt für den besonderen Fall, daß der Motor mit Vollast und normaler Tourenzahl arbeitet.<sup>1)</sup>

Zum Entwurf des Diagramms<sup>2)</sup> bedürfen wir des effektiven Kraftflusses, der sich aus der induzierten Rotorspannung berechnen läßt. Diese Spannung können wir aus der mit den Hauptbürsten aufgenommenen Leerlaufcharakteristik entnehmen (Kurve III, Fig. 8) und bekommen für die Stromstärke 90 Amp. eine induzierte EMK von 95 Volt. Hieraus erhalten wir den effektiven Kraftfluß:

$$\Phi_{eff} = P \cdot \frac{a}{N} \cdot \frac{60}{p \cdot n} \cdot 10^8 = 95 \cdot \frac{1}{274} \cdot \frac{60}{3 \cdot 1400} \cdot 10^8 = 0,495 \cdot 10^6$$

$$\Phi_{max} = \sqrt{2} \Phi_{eff} = \sqrt{2} \cdot 0,495 \cdot 10^6 = 0,7 \cdot 10^6.$$

Die größte Zahl der von einer Bürste kurzgeschlossenen Spulen ist<sup>3)</sup>:

$$S_k = \left( \frac{b_1}{\beta} \right)_+ \cdot \frac{p}{a} = \left( \frac{10}{4,2} \right) \cdot \frac{3}{1} = 9,$$

und da die Isolation zwischen je zwei Lamellen 0,8 mm beträgt, ist die kleinste Zahl der von einer Bürste kurzgeschlossenen Spulen:

$$2 \cdot \frac{p}{a} = 2 \cdot \frac{3}{1} = 6.$$

Wir wollen mit einem Mittelwert 7,5 rechnen. Somit ergibt sich der mittlere Wert für die in den kurzgeschlossenen Spulen durch Pulsation des Hauptfeldes induzierte EMK zu:

$$e_p = S_{k\text{mitt}} \pi \sqrt{2} \cdot c \cdot \Phi_{max} 10^{-8} = 7,5 \cdot \pi \sqrt{2} \cdot 50 \cdot 0,7 \cdot 10^6 \cdot 10^{-8} = 12 \text{ V.}$$

<sup>1)</sup> Schaltung des Motors nach Fig. 35, S. 187.

<sup>2)</sup> Fig. 32.

<sup>3)</sup> siehe E. Arnold, Die Gleichstrommaschine, 2. Aufl. Bd. I, S. 463.

Bei der Aufnahme der Kurve III (Fig. 8) waren die Wendepole nicht eingeschaltet. Die Bürsten konnten also in die neutrale Zone gestellt werden. Bei eingeschalteter Wendepolwicklung aber müßten die Bürsten unter den Wendezahn gestellt werden, und infolge des Einflusses der Wendepolwicklung, wie schon gezeigt, beträgt nun der Hauptkraftfluß nur noch  $\frac{5}{6}$  seiner vorherigen Stärke. Die oben berechnete EMK  $e_p$  wird also auch mit  $\frac{5}{6}$  zu multiplizieren sein:

$$e_{puls} = \frac{5}{6} e_p = \frac{5}{6} \cdot 12 = 10 \text{ Volt.}$$

Diese Spannung wird durch eine ihr entgegenwirkende EMK, die durch Rotation der kurzgeschlossenen Spulen in dem Wendefeld erzeugt wird, bis auf 2,6 Volt vernichtet. Dieses wurde experimentell durch Auflegen von Hilfsbürsten bestimmt.

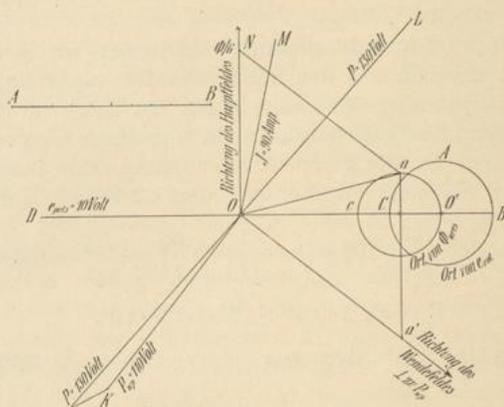


Fig. 32. Die Länge A—B ist ein Maß für Spannung an den Motorklemmen und an der Wendepolwicklung = 100 Volt, Hauptstrom = 100 Amp., Pulsation- und Rotationsspannung = 10 Volt.  $\Phi = 0,1 \cdot 10^6$  Kraftfluß.

Wir tragen<sup>1)</sup> in einem rechtwinkligen Koordinatensystem auf der Ordinate den in einem Zahn fließenden Hauptkraftfluß  $\Phi/6$  ab. Die durch den Hauptkraftfluß erzeugte Spannung von 10 Volt tragen wir auf der Abszisse  $OD$  ab. Die oben angeführte Spannung  $e_{res} = 2,6$  Volt ist die resultierende zweier Komponenten, von denen nur  $OD$  gegeben ist. Da  $e_{res}$  nur der Größe, aber nicht ihrer Richtung nach bekannt ist, so muß der Endpunkt der zweiten Komponente auf einem Kreis  $ABC$  mit dem Radius 2,6 Volt entsprechend liegen, dessen Mittelpunkt  $O'$  vom Anfangspunkt  $O$  um eine Strecke  $= OD$  entfernt ist.

<sup>1)</sup> Fig. 32.

Den Spannungen der zweiten Komponente, von  $O$  bis zu einem Punkt des Kreises  $ABC$ , entsprechen die durch den Kreis  $abc$  angedeuteten Kraftflüsse, die durch die nötige Luftinduktion ermittelt wurden. Für die zu vernichtende Spannung von 7,4 Volt ist z. B. eine Luftinduktion

$$B_{wl} = \frac{e_{rot} \cdot 10^6}{2 \cdot v \cdot l \cdot S_{kmitt}} = \frac{7,4 \cdot 10^6}{2 \cdot 18,3 \cdot 16,5 \cdot 7,5} = 1630$$

nötig und es ergibt sich hieraus der Wendefluß

$$\Phi_{wres} = B_{wl} \cdot l \cdot b = 1630 \cdot 16,5 \cdot 2,18 = 0,0586 \cdot 10^6.$$

Diesem Kraftfluß entspricht die Strecke  $Oc$ .

Durch Beobachten der sowohl dem Motor wie der Erregerwicklung zugeführten Leistung, Spannung und Stromstärke konnten wir die Phasenwinkel zwischen Hauptkraftfluß, Strom und Spannung festlegen. Wir erhalten also die Vektoren  $OM=J$  und  $OL=P$ . Hierdurch ist uns auch die Richtung der der Wendepolwicklung zugeführten Spannung gegeben, da diese Wicklung im Nebenschluß zum ganzen Motor liegt.

Da die Arbeitsweise des Motors bei 110 Volt Wendepolspannung am besten ist (s. S. 171), so wurde auf diese Spannung abgedrosselt, wobei zwischen Wendepolspannung und der ganzen Spannung eine kleine Phasenverschiebung eintrat. Wir erhalten somit den Vektor  $OK=110$  V. Das durch diese Spannung erzeugte Feld muß senkrecht hierzu liegen<sup>1)</sup>, d. h. in der Richtung  $Oa'$ .

Zieht man durch  $N$  eine Parallele zu  $Oa'$ , so schneidet sie den Kreis  $abc$  im Punkte  $a$ . In  $Oa$  haben wir nun ein Maß für den resultierenden Wendekraftfluß:

$$\Phi_{wres} = 0,082 \cdot 10^6.$$

Gehen wir von  $a$  senkrecht hinunter, so gibt uns  $Oa'$  den von der Wendepolwicklung zu erzeugenden Kraftfluß. Derselbe beträgt

$$\Phi_w' = 0,101 \cdot 10^6.$$

Für diesen Kraftfluß sind die nötigen Wendepolamperewindungen zu berechnen. Hierbei wurden nur die Luft- und Zahnampere windungen berücksichtigt, da die anderen sehr klein sind. Es ist

$$B_{wstatorzahn} = \frac{\sigma \Phi_w'}{l \cdot z_{stator}} = \frac{1,15 \cdot 0,101 \cdot 10^6}{16,5 \cdot 1,0} = 7000.$$

<sup>1)</sup> Vgl. ETZ 1906, S. 543.

Hierfür erhält man:  $aw = 1,4$ .

$$B_{w \text{ rotorzahn}}^2) = \frac{\Phi_w' \cdot z_{1 \text{ rot}}}{l \cdot z_{\text{rotor}}} = \frac{0,101 \cdot 10^6 \cdot 14}{16,5 \cdot 0,5} = 9350. \quad aw = 3.$$

Die Luftinduktion ist

$$B_{wl} = \frac{\Phi_w'}{l \cdot z_{1 \text{ stator}}} = \frac{0,101 \cdot 10^6}{16,5 \cdot 2,18} = 2810.$$

Die Länge eines Statorzahnes ist 3,4 cm und eines Rotorzahnes 2,4 cm. Folglich wird:

$$\begin{aligned} AW_{\text{Statorzahn}} &= 2 \cdot 1,4 \cdot 3,4 \dots\dots\dots = 9,5 \\ AW_{\text{Rotorzahn}} &= 2 \cdot 3 \cdot 2,4 \dots\dots\dots = 14,4 \\ AW_{\text{Luft}} &= 1,6 \cdot k_1 \cdot \delta \cdot B_{wl} = 1,6 \cdot 1,1 \cdot 0,05 \cdot 2810 = 247 \\ \hline AW_{ko} &= 270,9 \sim 271. \end{aligned}$$

Jeder Wendepol hat 21 Windungen. Die erforderliche Stromstärke wird also

$$\frac{AW_{ko}}{2 \cdot w_{wp}} = \frac{271}{2 \cdot 21} = 6,45 \text{ Ampere.}$$

Experimentell wurde 6,4 Amp. gefunden.

Durch Vorschalten einer Drosselspule war es möglich, der Wendepolspannung verschiedene Werte zu geben, wobei deren Phase fast dieselbe blieb. Mit der Spannung änderte sich auch der von der Wendepolwicklung erzeugte Kraftfluß  $\Phi_w'$ , der resultierende

<sup>2)</sup> Für die Induktion in den Rotorzähnen müssen wir zwei Stellungen annehmen, etwa nach Fig. 33 und 34, wobei die Induktion im Rotorzahn in der Stellung nach Fig. 33 kleiner ist als in dem anderen Fall.

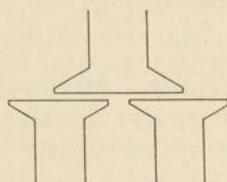


Fig. 33.

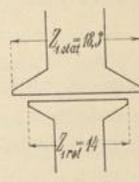


Fig. 34.

Wir erhalten hierfür einen Mittelwert, wenn wir mit dem Fluß  $\Phi_w' \frac{z_{1 \text{ rotor}}}{z_{1 \text{ stator}}}$  im Rotorzahn rechnen.

Wendekraftfluß war aber nicht nur in der Größe, sondern auch in der Phase einer Änderung unterworfen.

Da, wie nun gezeigt, der Wendekraftfluß eine Komponente vom Hauptkraftfluß hat, so liegt eine gewisse Kompoundierung vor. Diese ist aber insofern unvollkommen, als bei einer Änderung des Hauptkraftflusses der resultierende Wendefluß seine Phase nicht behält.

Wie man aus dem Diagramm Fig. 32 ersehen kann, wird die resultierende Lamellenspannung unter den Bürsten  $e_{res}$  so lange konstant bleiben, als der Endpunkt von dem resultierenden Wendefluß  $\Phi_{wres}$  auf dem Kreise  $abc$  bleibt. Fällt er aber innerhalb oder außerhalb des Kreises, so wird  $e_{res}$  kleiner bzw. größer als die beobachteten 2,6 Volt. Hieraus ist leicht zu ersehen, daß

1. bei einer Änderung der Tourenzahl der Endpunkt  $a$  nicht mehr auf dem Umfange des Kreises liegt, und infolgedessen wird  $e_{res}$  das zulässige Maximum übersteigen.

2. bei einer Änderung der Hauptstromstärke und damit des Hauptfeldes  $\Phi$  wird sich der Endpunkt  $a$  auf  $aa'$  bewegen. Gleichzeitig muß sich aber Größe und Lage des Kreises  $abc$  ändern, da  $e_{puls}$   $\Phi$  proportional ist. Der Punkt  $a$  wird auf  $aa'$  verschiedene Lagen einnehmen und teils innerhalb, teils außerhalb des Kreises  $abc$  liegen. Je nach der Lage von  $a$  wird  $\Phi_{wres}$  und, da sich  $e_{res}$  mit  $\Phi_{wres}$  ändert, auch  $e_{res}$  verschiedene Werte annehmen und darunter einen, dem ein Minimum von  $e_{res}$  entspricht.

## 7. Schaltung der Wendepolwicklung.

Wie man aus oben Erwähntem sehen kann, ist bei einem maximal zulässigen Wert von  $e_{res}$  — angenommen natürlich, daß an dem den Wendepolen zugeführten Strom nichts geändert wird — eine Änderung von  $\Phi$  und  $n$  nur in engen Grenzen möglich. Diesem Nachteile sucht man durch verschiedene Schaltungen abzuwehren. Diejenigen, die für den vorliegenden Motor in Betracht kommen, sollen hier näher erörtert werden.

Da im Betriebe der Hauptkraftfluß, die Tourenzahl und die auf die Wendepolwicklung aufgedrückte Spannung meistens gleichzeitig geändert werden, so wäre es umständlich, das Verhalten von  $e_{res}$  einem Diagramm zu entnehmen. Es wurde daher die  $e_{res}$ -Kurve experimentell aufgenommen. Das Charakteristische haben fast alle, daß sie ein Minimum besitzen. Aus der Lage des Minimums und der Krümmung der Kurve erhält man über die Zweckmäßigkeit der betreffenden Schaltung Aufschluß.

Die Messung der resultierenden Spannung  $e_{res}$  erfolgte mittels auf den Kommutatorlamellen schleifender Hilfsbürsten. Die Lage dieser Hilfsbürsten wurde so gewählt, daß die gemessene Spannung durch die Kurzschlußströme selbst so wenig wie möglich beeinflusst wurde. Zu diesem Zweck wurden sie um eine Lamelle vor die Hauptbürsten gelegt. Durch Vorversuche wurde festgestellt, daß diese Lage noch vollständig in dem Bereich des Wendeflusses lag, so daß die gemessene Lamellenspannung dieselbe war wie diejenige, die unter den Bürsten zur Wirkung kam. Je nach dem betreffenden Versuch wurden Strom, Spannung und Leistung des Haupt- und des Wendepolstromkreises sowie die Tourenzahl gemessen. In Fig. 36 sind einige Kurven verzeichnet, die uns ein Bild der Abhängigkeit der Lamellenspannung von der Tourenzahl oder der Stromstärke geben. Hierbei richteten wir das Augenmerk besonders auf die Funkenbildung.

Es wurde den Kurven immer die doppelte Lamellenspannung zugrunde gelegt, da eine Hauptbürste der zu untersuchenden Maschine eine Breite gleich der doppelten Lamellenteilung hatte. Es trat also unter einer Bürste ungefähr die doppelte Lamellenspannung auf.

Die Kurven sollen auch dazu dienen, einen Vergleich zwischen der Spannung unter einer Bürste und der Funkenbildung zu ziehen.

Einwandfrei sind aber die Vergleiche nicht, da einerseits nicht, wie sonst üblich, die Spannungsspitze, sondern eine mittlere doppelte Lamellenspannung zugrunde gelegt ist, andererseits die Reaktanzspannung überhaupt nicht in Betracht gezogen wurde. Wie aus den Kurven Fig. 36, 41 und 48 zu ersehen ist, zeigen sich tatsächlich Widersprüche. Bei der Aufnahme der Kurven waren wir genötigt, um ein vollständiges Bild ihres Verlaufes zu erhalten, auch Werte aufzunehmen, die für den funkenfreien Gang ungeeignet waren. Denn über die Zweckmäßigkeit der betreffenden Schaltung können wir uns nur dann ein Urteil bilden, wenn uns der ganze Verlauf der Kurve bekannt ist.

Wie schon erwähnt wurde (S. 185), sind mehrere Schaltungen für die Wendepole vorgeschlagen worden, die der Reihe nach untersucht wurden. Die Mehrzahl davon dient nur dazu, die Pulsationsspannung in den kurzgeschlossenen Spulen zu vernichten, nur einige sollen zugleich die Reaktanzspannung aufheben.

Die Schaltung Fig. 35, die dem Diagramm Fig. 32 zugrunde liegt, wird von den Siemens-Schuckert-Werken empfohlen.<sup>1)</sup> Experimentell wurden die Kurven der Fig. 36 aufgenommen, wobei

<sup>1)</sup> Mitteilung der Siemens-Schuckert-Werke.

die Lamellenspannung (doppelte Lamellenspannung!) in Abhängigkeit vom Hauptstrom bei konstanter Tourenzahl bzw. in Abhängigkeit von der Tourenzahl bei konstantem Hauptstrom für verschiedene Werte des Wendepolstromes aufgetragen wird. Aus deren Verlauf ist ersichtlich, daß die Pulsationsspannung nicht vollständig aufgehoben wird; es bleibt vielmehr immer eine resultierende Spannung übrig. Die Kurven zeigen die erwartete Krümmung.

Von einer automatischen Regulierung der Wendepolerregung kann hier nicht die Rede sein, weil die auf die Wendepole aufgedrückte Spannung ein für

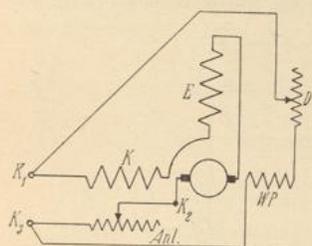


Fig. 35.

$E$  = Haupterregwicklung  
 $K$  = Kompensationswicklung  
 $WP$  = Wendepolwicklung  
 $D$  = Drosselspule  
 $Anl$  = Anlasser

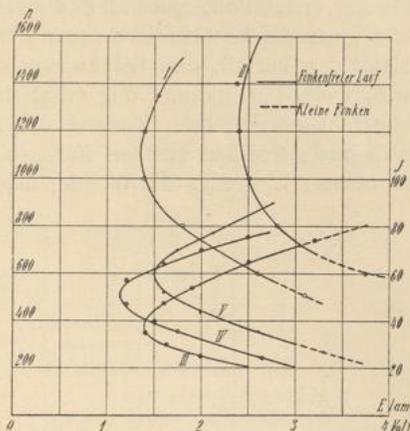


Fig. 36.

I.	$J = 70$ Amp.	$P_{wp} = 118$ V.	$E_{lam} = f(n)$
II.	"	$P_{wp} = 100$ V.	" "
III.	$n = 1400$	$P_{wp} = 80$ V.	$E_{lam} = f(J)$
IV.	"	$P_{wp} = 100$ V.	" "
V.	"	$P_{wp} = 118$ V.	" "

allemaal eingestellt und von der Motorklemmenspannung zwischen  $K_1$  und  $K_2$  Fig. 35 unabhängig ist.

Beurteilt man also die verschiedenen Einstellungen, so ist jedenfalls Kurve I der Kurve II vorzuziehen; denn, lassen wir eine gewisse Lamellenspannung zu, etwa wie im Beispiel 2,6 Volt, so wird der Motor von  $n = 600$  bis ungefähr  $n = 1800$  zufriedenstellend arbeiten, bei II aber unter  $n = 1000$  schon zu funken anfangen.

Da der Motor für  $n = 1400$  bestimmt war, so wäre I vorzuziehen. Wie schon bewiesen (S. 171), arbeitet aber der Motor bei dieser Wendepolspannung zu unwirtschaftlich. Man würde deswegen eine kleinere Spannung anlegen und sich mit einer geringeren Änderung der Tourenzahl begnügen. Von den anderen Kurven dieser Schaltung zeigt IV im allgemeinen den günstigsten Verlauf, obwohl V den Vorteil bietet, daß, wenn die Bürsten durch den Hauptstrom am meisten belastet sind, die Belastung durch Kurz-

schlußströme kleiner ist als in den beiden andern Fällen (Kurven III und IV), was wohl für das funkenfreie Arbeiten und Kühlbleiben des Kommutators vorteilhaft ist.

Eine kleine Änderung dieser Schaltung dadurch, daß die Klemme  $z$  wie in Fig. 20 hinter den Anlasser gelegt wird<sup>1)</sup>, bietet den Vorteil, daß man eine teilweise automatische Regulierung der Wendepole erreicht (allerdings nur beim Anlassen). Wie aus der Fig. 20 ersichtlich, wird den Wendepolen eine variable Spannung, und zwar die Motorklemmenspannung, aufgedrückt. Die Schaltung bietet den Vorteil, daß bei konstanter Tourenzahl die Belastung geändert werden kann. Wir erhalten deshalb für diesen Fall einen ungefähr geradlinigen Verlauf der Lamellenspannungskurve. Wie man aus derselben ersehen kann, eignet sich diese Anordnung um so besser, je größer die Wendepolspannung gewählt wird (Fig. 37).

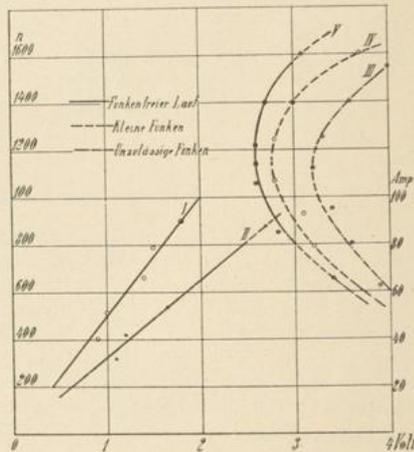


Fig. 37.

I.	$n = 1200$	$P_{wp} = 150$ V.	bei $J = 90$ Amp.	$E_{lam} = f(J)$
II.	"	$P_{wp} = 100$ V.	" $J = 90$ "	" "
III.	$J = 70$ Amp.	$P_{wp} = 80$ V.	" $n = 1400$	$E_{lam} = f(n)$
IV.	"	$P_{wp} = 100$ V.	" $n = 1400$	" "
V.	"	$P_{wp} = 110$ V.	" $n = 1400$	" "

Bei einer Spannung von 150 Volt z. B. beträgt bei Vollast die unter den Bürsten auftretende Spannung nur 1,8 Volt, wobei ein vollständig funkenfreier Lauf erreicht wird. Weiterhin werden bei dieser Schaltung die Kurzschlußströme sowie auch die Wendepolverluste bei Leerlauf sehr klein im Gegensatz zu der früheren

<sup>1)</sup> D. R. P. Oerlikon. Siehe R. Richter, ETZ 1906, S. 543.

Schaltung Fig. 35, wobei die letzteren bei Vollast und Leerlauf ungefähr gleich waren, während die ersteren bei Leerlauf wieder zunehmen.

Es kommt dies auch in den Wirkungsgradkurven zum Ausdruck (Fig. 38), indem die *a*-Kurve bei geringer Belastung höher liegt als die *b*-Kurve. Lassen wir nun die Belastung konstant, und ändern wir die Tourenzahl, so erhalten die Kurven wieder ihre charakteristische Form. Wie diese Kurven Fig. 37 zeigen, nimmt die Lamellenspannung mit Vergrößerung der Wendepolspannung ab.

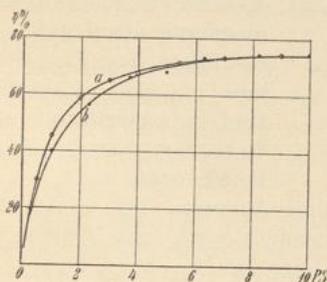
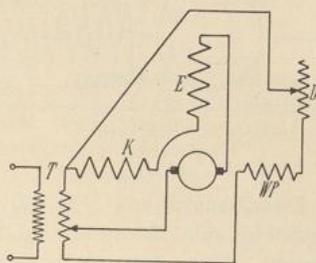
Fig. 38.  $\eta$ -Kurven.*a* nach Schaltung Fig. 20*b* nach Schaltung Fig. 35.

Fig. 39.

*E* = Haupterregwicklung  
*K* = Kompensationswicklung  
*WP* = Wendepolwicklung  
*D* = Drosselspule  
*T* = Transformator.

Eine andere Schaltung<sup>1)</sup> (Fig. 39) besteht darin, daß der Motor, anstatt mit einem gewöhnlichen Widerstandsanlasser, mittels eines Transformators reguliert wird. Die Wendepolwicklung erhält wieder eine konstante Spannung; im übrigen liegen, abgesehen von einer vom Transformator herrührenden Phasenverschiebung, die Verhältnisse genau wie bei der in Fig. 35 angeführten Schaltung. Infolgedessen fand keine weitere experimentelle Untersuchung statt.

Wie bei der Berechnung S. 182 ff. gezeigt wurde, spielt die Phase des Wendefeldes eine große Rolle; ferner ist aus dem Diagramm Fig. 32 ersichtlich, daß die Komponente des Wendeflusses, welche vom Hauptkraftfluß herrührt, nicht nur zur Aufhebung der Reaktanzspannung dient, sondern auch, um dem Kraftfluß, welcher die Pulsationsspannung vernichtet, eine günstigere Phase zu geben, als er von der Wendepolwicklung allein haben würde.

Hätte man also einen Motor, dessen Wendepole nicht von dem Hauptstrom oder dem Hauptkraftfluß beeinflusst wären, so müßte

<sup>1)</sup> Mitteilung der Siemens-Schuckert-Werke.

man danach streben, das Wendefeld und damit auch die Rotationsspannung auf andere Art und Weise in die entgegengesetzte Richtung von  $e_{puls}$  zu bringen; (es ist hier von der Reaktanzspannung abgesehen, denn in den meisten Motoren ist sie, wie schon S. 171 gezeigt, nur klein der Pulsationsspannung gegenüber).

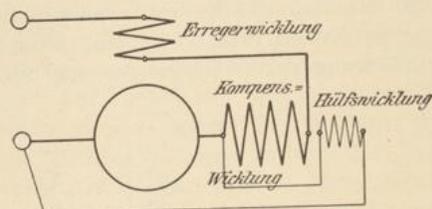


Fig. 40.

Um dieses möglichst vollkommen zu erreichen, wird vorgeschlagen<sup>1)</sup>, die Wendepole parallel zum Anker zu legen, d. h. eine Spannung anzulegen, die die Phase des Hauptstromes hat; denn bekanntlich sind im Anker Strom und Spannung fast in Phase miteinander.

Diese Anordnung (Fig. 40) wird bei Motoren, bei denen das Wendefeld vom Hauptfeld nicht beeinflusst wird, mit Vorteil angewandt. Für den vorliegenden Motor ist sie aber nicht von Wichtigkeit, weil durch den Einfluß des Hauptfeldes das Wende-

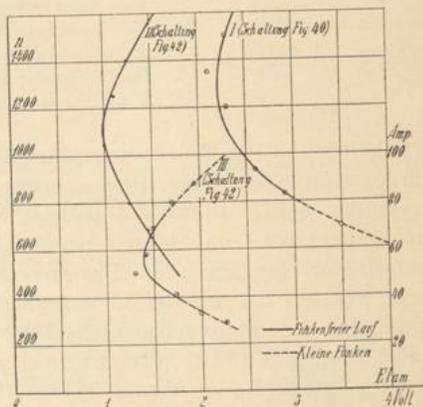


Fig. 41.

- I.  $J = 70$  Amp.  $P_{wp} = 100$  bei  $n = 1400$   $E_{lam} = f(n)$
- II. " "  $P_{wp} = 110$  "  $n = 1400$  " " "
- III.  $n = 1400$   $P_{wp} = 110$  "  $J = 90$  Amp.  $E_{lam} = f(J)$

feld schon in die richtige Phase gebracht war. Es würde sogar, wie aus dem Diagramm Fig. 32 ersichtlich ist, nachteilig sein, die

<sup>1)</sup> D. R. P. Oerlikon. Siehe R. Richter, ETZ 1906, S. 543.

Wendepolspannung weiter zu verdrehen, da hierdurch das resultierende Wendefeld eine ungünstigere Phase erhielt. Es wird infolgedessen hier keine Verringerung der Lamellenspannung zu erwarten sein, was auch experimentell bestätigt wurde (Fig. 41, Kurve I).

Eine Änderung dieser Schaltung besteht darin, daß die Wendepole nicht nur zum Anker allein, sondern auch zum Anlasser parallel gelegt werden (Fig. 42).

Dadurch erhalten die Wendepole eine Zusatzspannung, die im Moment des Anlaufs am größten und bei Belastung (bei ausgeschaltetem Anlaßwiderstand) gleich Null ist.

Es ist klar, daß eine vollkommene Regulierung der Wendepole unmöglich ist; denn bei  $n=0$  müßte die Luftinduktion unter den Wendepolen  $B_{tot}=\infty$  sein. Vermittels der Schaltung (Fig. 42) wurden die Kurven II und III Fig. 41 aufgenommen.

Ein Nachteil dieser Schaltung besteht darin, daß die Ströme im Anker und in der Kompensationswicklung nicht mehr gleich groß sind und somit eine Überkompensierung des Ankerfeldes eintritt. Um dieses zu vermeiden, mußte man die Wendepole parallel zum Anker und zu der Kompensationswicklung schalten (Fig. 43). Es hat jedoch dieses wiederum den Nachteil, daß die den Wendepolen aufgedrückte Spannung nicht dieselbe Phase hat wie die Ankerspannung, da Strom und Spannung in der Kompensationswicklung phasenverschoben sind.

Noch besser wäre es also, wenn wir für die Wendepole uns der Ankerspannung bedienen und die Kompensationswicklung in sich kurz schließen (Fig. 44).

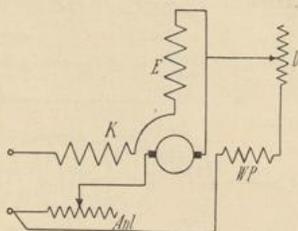


Fig. 42.

$E$  = Haupterregwicklung  
 $K$  = Kompensationswicklung  
 $WP$  = Wendepolwicklung  
 $D$  = Drosselspule  
 $Anl$  = Anlasser.

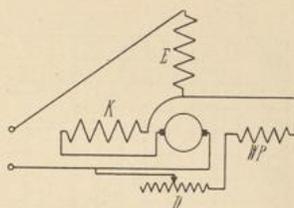


Fig. 43.

$E$  = Haupterregwicklung  
 $K$  = Kompensationswicklung  
 $WP$  = Wendepolwicklung  
 $D$  = Drosselspule.

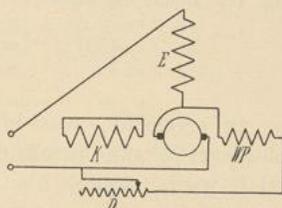


Fig. 44.

$E$  = Haupterregwicklung  
 $K$  = Kompensationswicklung  
 $WP$  = Wendepolwicklung  
 $D$  = Drosselspule.

Da die für die Wendepolwicklung erforderliche Spannung höher war als die Anker- und Anlasserspannung, so mußte sie durch einen kleinen Transformator erhöht werden und man konnte die

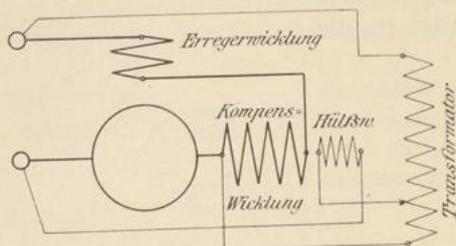


Fig. 45.

Beobachtung machen, daß das Parallelschalten des kleinen Transformators zum Anker insofern von Vorteil war, als erst bei einer Lamellenspannung von ungefähr 3,5 Volt Funkenbildung eintrat<sup>1)</sup>.

Eine Kombination zweier früher besprochenen Schaltungen Fig. 20 und 40 ist in Fig. 45 angegeben<sup>2)</sup>.

Diese Schaltung dient dazu, die Phase der Wendepolspannung zu regulieren. Auch hier sind die Ströme in der Kompensationswicklung und im Rotor nicht gleich groß. Die Kurven der Fig. 46 zeigen den Verlauf der Lamellenspannung bei dieser Schaltung.

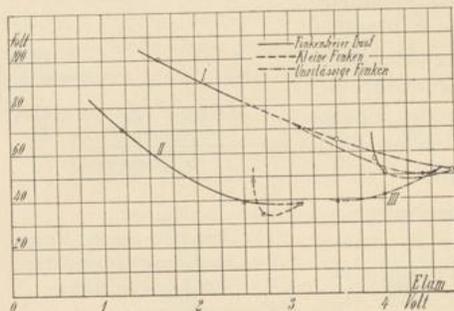


Fig. 46. Spannung an der Wendepolwicklung.

- I.  $J = 70$  Amp.  $n = 1400$
- II.  $J = 45$  „  $n = 1400$
- III.  $J = 70$  „  $n = 900$ .

Während die bis jetzt besprochenen Schaltungen nur dem Zwecke dienten, die Pulsationsspannung aufzuheben, wird durch folgende Anordnung<sup>3)</sup> versucht, das zu erreichen, was in dem untersuchten Motor der Siemens-Schuckert-Werke durch die gemischte Erregung der Wendepole erzielt wird, nämlich die Aufhebung der Reaktanzspannung.

Dies geschieht mittels eines Transformators, indem eine Komponente der Erregerspannung unabhängig von der gesamten Motorspannung den Wendepolen zugeführt wird (Fig. 47).

<sup>1)</sup> Vgl. ETZ 1906, S. 542, Fig. 19.

<sup>2)</sup> R. Richter, ETZ 1906, S. 543, Fig. 25.

<sup>3)</sup> R. Richter, ETZ 1906, S. 544, Fig. 32.

Die bei dieser Schaltung aufgenommenen Lamellenspannungskurven Fig. 48 zeigen die zu erwartende Form und haben einen günstigen Verlauf; der Wirkungsgrad ist infolge des Transformators nicht so gut wie im ersten Fall. Die Wirkungsgrade der einfachen (Fig. 35) und dieser letzten Anordnung sind zum Vergleich angegeben (Fig. 49).

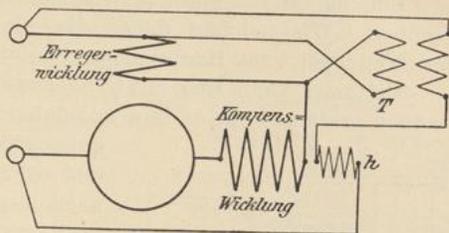


Fig. 47.

In obiger Schaltung Fig. 47 diente die Erreger-spannung zur Erzeugung eines Wendefeldes, welches die Reaktanzspannung aufheben sollte. Von den österreichischen Siemens-Schuckert-Werken wird eine Schaltung angegeben, wodurch die

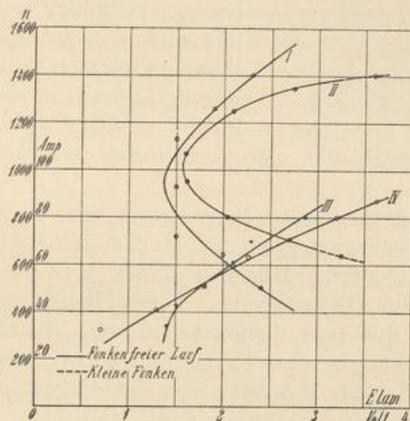


Fig. 48.

- I.  $J = 70$  Amp.  $P_{wp} = 120$  V.  $E_{lam} = f(n)$   
 II.  $J = 70$  "  $P_{wp} = 100$  V. " "  
 III.  $n = 1400$   $P_{wp} = 120$  V. bei  $J = 80$  Amp.  $E_{lam} = f(J)$   
 IV.  $n = 900$   $P_{wp} = 120$  V. " " "

Pulsationsspannung mittels eines von der Spannung an der Haupterregewicklung erzeugten Wendefeldes vernichtet wird. Hierüber wird geschrieben:

„Bei Wechselstromkollektormotoren schalten die österreichischen Siemens-Schuckert-Werke die regelbare Erregerwicklung der Wendepole im Nebenschluß zur Haupterregewicklung oder einem Teil derselben allein, oder im Nebenschluß zur Haupterregewicklung

und Kompensationswicklung zum Zwecke, ein Wendefeld von geeigneter Stärke und Richtung zu erhalten.“

Eine nähere Angabe über die Konstruktion des Motors ist nicht gegeben. Wir nehmen daher die gewöhnliche Bauart an, wobei der Wendepol vom Hauptpol getrennt ist.

Verfasser kann sich mit Obenerwähntem insofern nicht einverstanden erklären, als es ihm unmöglich erscheint, durch die angegebene Schaltung „geeignete Stärke und Richtung zu erhalten“. Denn nach dem allgemeinen Transformatoridiagramm ist die Erregerspannung um  $180^\circ$  gegenüber der in den kurzgeschlossenen Spulen induzierten Spannung verschoben. Ferner ist das Wendefeld  $90^\circ$  gegen die Wendepolspannung und somit auch gegen die Erregerspannung verschoben. Wendefeld und Rotationsspannung sind in Phase miteinander. Folglich ist die Rotationsspannung um  $90^\circ$  gegen die Pulsationsspannung verschoben. Daher ist es unmöglich, daß eine Vernichtung der Pulsationsspannung stattfindet.

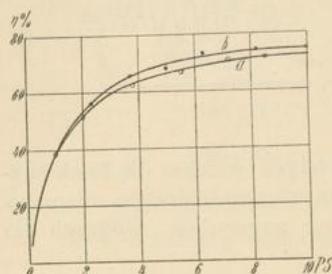


Fig. 49.  $\eta$ -Kurven.  
a nach Schaltung Fig. 47  
b nach Schaltung Fig. 35.

Über eine automatische Regulierung des Wendepolstromes ist in der Literatur sehr wenig zu finden, jedenfalls ist nur wenig bekannt gegeben worden. Dagegen findet man fast bei jeder Anordnung Apparate (Drosselspule, Vorschaltwiderstand, Autotransformator usw.), die dazu dienen sollen, den Wendepolstrom bzw. die Wendepolspannung der Phase und Größe nach einzustellen. Es müßte dann für jede Belastung eine neue Einstellung des Wendepolstromes stattfinden; praktisch wird man eine mittlere Einstellung wählen und, was die Funkenbildung und das Warmwerden des Kommutators anbelangt, eine große Toleranz gewähren.

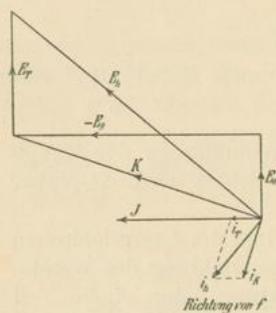


Fig. 50.

In dem auf S. 193 behandelten Fall (Fig. 47) war jedoch ein Schritt getan, die Wendepole selbstregulierend zu machen. Über diese Schaltung schreibt R. Richter<sup>1)</sup> (s. Fig. 50):

„Die Spannung  $E_h$ <sup>2)</sup> an der Hilfswicklung ist die Summe aus Klemmen-

<sup>1)</sup> ETZ 1906, S. 544.

<sup>2)</sup> Richtersche Bezeichnungen.

spannung  $K$  und Spannung  $E_T$  am Transformator  $T$ ; der Strom in der Hilfswicklung  $i_h$  (senkrecht zu  $E_h$ ) läßt sich in zwei Komponenten  $i_K$  (senkrecht zu  $K$ ) und  $i_T$  (senkrecht zu  $E_T$ ) zerlegen;  $i_T$  steht ungefähr im geraden Verhältnis zum Ankerstrom und vernichtet die Wendespannung fast für alle Belastungen.  $i_K$  vernichtet einen Teil der Wendespannung und die EMK der Ruhe.“

Eine teilweise automatische Regulierung der Wendepole ist von Latour vorgeschlagen worden. Die von ihm angeführte Schaltung ist in Fig. 51 angegeben und durch folgenden Text erläutert:

„Von Latour rührt eine Einrichtung zur Regelung der Stärke des Wendefeldes entsprechend der Geschwindigkeit des Rotors her. Eine Spannung  $V'$  größer als  $V$  wird angelegt.  $V'$  wirkt  $V$  entgegen. Der Strom in der Wendefeldwicklung entspricht der Spannung  $V' - V$ . Bei wachsender Motorgeschwindigkeit wächst  $V$ , und es sinkt  $V' - V$ . Die Hilfsspannung  $V'$  kann z. B. einem einphasigen Induktionsmotor entnommen werden. Der Stator muß dann zwei Wicklungen besitzen. Die eine wird von dem Strom des zu regelnden Motors, die andere vom Hilfsstrom durchflossen.“

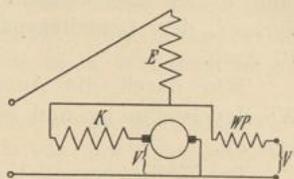
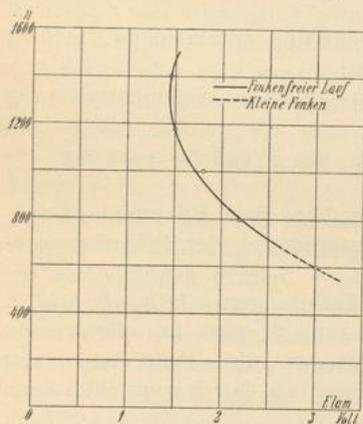


Fig. 51.

$E$  = Haupterregewicklung  
 $K$  = Kompensationswicklung  
 $WP$  = Wendepolwicklung.

Fig. 52.  $J = 70$  Amp.  $E_{lam} = f(s)$ .

$n$	$P_{wp}$	$J_{wp}$	$n$	$P_{wp}$	$J_{wp}$
600	150	9,2	1175	134	7,3
795	145	8,5	1400	130	6,6
1000	139	7,8			

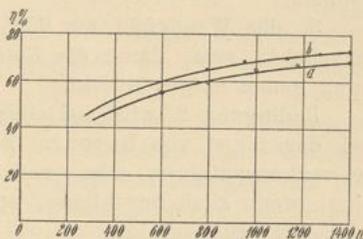


Fig. 53. Kurven des Wirkungsgrades.

$a$  nach Schaltung Fig. 51  
 $b$  nach Schaltung Fig. 35.

Da kein geeigneter Induktionsmotor zur Verfügung stand, mußte bei den vorliegenden Versuchen ein kleiner Transformator benutzt werden, obwohl hierbei die Spannung  $V'$  eine etwas andere

Phase erhielt. Fielen auch die erzielten Resultate nicht zur vollen Zufriedenheit aus, so war doch das Charakteristische dieser Schaltung daran zu erkennen. Tabelle und Kurve Fig. 52 zeigen den Verlauf der Lamellenspannung für eine Motorstromstärke von 70 Amp.

Wie durch die Anordnung bezweckt werden soll, nehmen Wendepolspannung und Strom bei zunehmender Rotorgeschwindigkeit ab.

Der Wirkungsgrad in diesem Fall ist ebenfalls wie bei Schaltung Fig. 47 kleiner als bei der einfachen Schaltung Fig. 35. Zum Vergleich sind die Wirkungsgrade in Fig. 53 angegeben.

### Zusammenfassung.

Bei keiner dieser verschiedenen Schaltungen wird also eine vollständige automatische Regulierung erreicht. Nur die Anordnung nach Latour und die Schaltungen Fig. 20 und 47 können insofern hierauf Anspruch machen, als durch diese wenigstens eine teilweise automatische Regulierung der Wendepole erzielt wird, wodurch die Pulsationsspannung in den kurzgeschlossenen Spulen möglichst aufgehoben werden soll.

Um eine vollständige Selbstregulierung zu erreichen, müßten folgende Bedingungen erfüllt werden:

1. Bei steigender Rotorgeschwindigkeit die Wendepolspannung abnehmen,
2. bei steigendem Motorstrom die Wendepolspannung zunehmen,
3. das Wendefeld um  $90^\circ$  gegenüber dem Hauptfeld phasenverschoben sein, damit die Rotationsspannung der Pulsationsspannung genau entgegenwirkt.

Bedingung 2. wird bei einigen Schaltungen erfüllt. 1. und 2. bei derjenigen von Latour. Bedingung 3. wird im allgemeinen schwer auszuführen sein, und deswegen wird man fast immer eine, wenn auch nur kleine, Spannung an den kurzgeschlossenen Lamellen erhalten.

Diese führt selbstverständlich zu Kurzschlußverlusten, aber nicht unbedingt zum Funken der Bürsten, da eine Spannung von 2 bis 3 Volt unter den Bürsten, wie aus den Versuchen hervorging, zu keinem unzulässigen Feuern Veranlassung gab.

Die Aufhebung der Reaktanzspannung bleibt bei fast allen Schaltungen unberücksichtigt, was jedenfalls seine Ursache darin hat, daß in den meisten Fällen die Reaktanzspannung gegenüber der Pulsationsspannung klein ist. Nach Richter ist die Reaktanz-

spannung unbedingt aufzuheben, und zwar dadurch, daß man dem Wendefeld eine Komponente in Phase mit dem Hauptkraftfluß gibt. Aus der Fig. 32 geht auch hervor, daß eine solche Komponente zur Vernichtung der Pulsationsspannung sehr wünschenswert ist, da erst hierdurch die Phase des resultierenden Wendefeldes geeignet wird.

Ohne weiteres kann man keiner dieser Schaltungen den Vorzug geben. Es hängt dies hauptsächlich von den Arbeitsverhältnissen und von der Konstruktion des betreffenden Motors ab.

Da der Wechselstromserienmotor meistens einen etwas geringeren Wirkungsgrad hat als ein Gleichstrommotor von gleicher Leistung, so wird man diejenige Schaltung bevorzugen, welche den Wirkungsgrad am wenigsten beeinträchtigt. Soll der Motor oft angelassen werden, so wird man diejenige Schaltung nehmen, welche bei geringer Rotorgeschwindigkeit das stärkste Wendefeld ergibt. Diese Gründe sprechen für die einfache Schaltung Fig. 35, S. 187.

Soll der Motor aber längere Zeit bei einer mittleren oder kleinen Belastung arbeiten, so wird es ökonomischer sein, die Wendepolwicklung direkt an die Motorklemmen zu legen. Wird der Wendefluß nur von der Wendepolwicklung erzeugt, so wäre es vorteilhaft, die Wendepole parallel zum Rotor zu schalten (Fig. 40), da hierdurch der Wendefluß eine günstigere Phase erhält, als wenn man sie parallel zum ganzen Motor legt.

Von den anderen Schaltungen ist die von Latour angegebene die vollkommenste. Sie erfordert aber besondere Einrichtungen, wodurch der Wirkungsgrad der ganzen Anordnung etwas verringert wird.

Wie man aus den obenerwähnten Schaltungen erschen kann, ist es unmöglich, eine Schaltung zu erreichen, die den angeführten drei Bedingungen genügt.

Im gewissen Sinne ist eine Kompoundierung der Wendepole schon dadurch erreicht, daß, wie auf S. 181 erwähnt, eine Komponente des Wendeflusses durch den Hauptkraftfluß gegeben ist. Diese Kompoundierung ist aber insofern unvollkommen, als sie nur für die Aufhebung der Reaktanzspannung geeignet ist. Auf das Wendefeld, welches die Pulsationsspannung vernichten soll, wird sie wenig, eventuell keinen Einfluß haben.