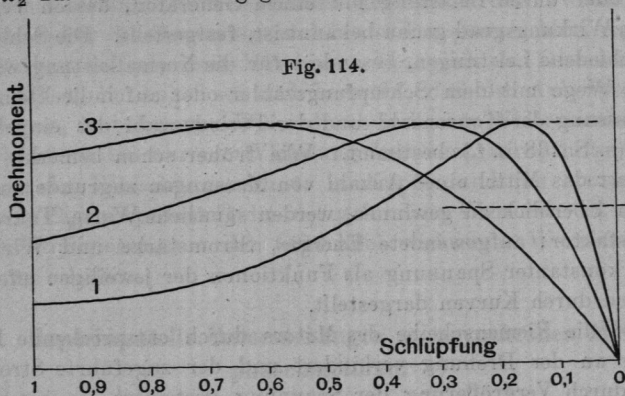


des Rotorstromkreises, die sich wie 1:2:4 verhalten. Das Drehmoment ist für einen gegebenen Motor lediglich eine Funktion des Verhältnisses:

$$\frac{\text{Schlüpfung } s}{\text{sekundären Widerstand } w_2},$$

und ist somit für gleiche Drehmomente die Schlüpfung proportional dem Widerstande  $w_2$ . Auf Grund dieser Beziehung gewinnt man aus einer Drehmomentkurve diejenige für ein anderes  $w_2$  durch entsprechende Veränderung der jeweiligen Abszissengrößen. In der Figur sind die beiden oberen Kurven 2 und 3 entsprechend der Zunahme des Widerstandes durch Verdoppelung bzw. Vervielfachung der Schlüpfungswerte der Kurve 1 erhalten. Die Anzugskraft (Schlüpfung  $s = 1$ ) nimmt mit dem Widerstande  $w_2$  zu. Der Wirkungsgrad des Motors dagegen ist bei hohem



sekundären Widerstände geringer, da in der sekundären Wickelung der Verlust durch Stromwärme bei dem höheren Widerstande bedeutender ist<sup>1)</sup>.

Von weiterem Werte für die Praxis sind ferner die Temperaturerhöhungen bei normalen und anderen Dauerbelastungen und bei intermittierendem Betriebe. Diese Temperaturwerte können als Funktion der Zeit für eine bestimmte Leistung oder auch bei Wahl der gemessenen Endtemperaturen als Funktion der Pferdestärken zur Darstellung gebracht werden. Alle weiteren für den Betrieb interessanten Faktoren lassen sich in ähnlicher Weise in Kurvenform graphisch wiedergeben.

#### Erstes Beispiel.

#### Prüfung an einem Drehstromgenerator der Union Elektrizitäts-Gesellschaft.

Die vorliegende Maschine war für eine (verkettete) Spannung von 230 Volt bei einer normalen Stromstärke von 314 Amp. (Sternschaltung) bestimmt; sie leistete bei induktionsfreier Belastung ( $\cos \varphi = 1$ ):

$$\sqrt{3} \cdot 230 \cdot 314 = 125000 \text{ Watt.}$$

<sup>1)</sup> Siehe auch: Kapp, Elektrische Kraftübertragung, 2. Aufl., Kap. IX.

Die Maschine wurde zunächst einer siebenstündigen Dauerprobe bei normaler, induktionsfreier Belastung unterworfen, worauf die nachfolgend beschriebenen Messungen vorgenommen wurden.

**Temperaturerhöhung und Widerstände.**

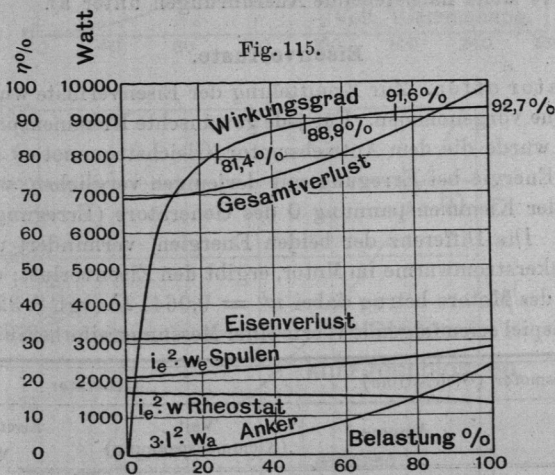
Die Temperaturerhöhungen, mit dem Thermometer gemessen, ergaben:

- 1. Statoreisen . . . . . + 3° C
- 2. Statorkupfer . . . . . + 9° C
- 3. Rotoreisen . . . . . + 2° C
- 4. Schleifringe . . . . . + 30° C
- 5. Rahmen . . . . . + 1° C

Die Widerstände waren:

	Kalt	Warm
1. Im Stator pro Wicklung . . . . .	—	0,00769 Ω
2. Im Feld ohne Bürsten . . . . .	8,66 Ω	9,45 Ω
3. Im Feld mit Bürsten . . . . .	—	9,69 Ω

Danach berechnet sich die Temperaturerhöhung in den Feldspulen zu + 23° C bei Annahme eines Temperaturkoeffizienten von 0,004.



Bei Berechnung der Stromwärmeverluste wurden die Widerstände im warmen Zustande zugrunde gelegt.

Zur Bestimmung des Wirkungsgrades (ohne Berücksichtigung der mechanischen Verluste) sind bei verschiedenen Belastungen folgende Verluste ermittelt worden:

- 1. Stromwärmeverlust im Anker,
- 2. " in den Spulen,
- 3. " im Rheostaten,
- 4. Eisenverlust (Hysteresis und Wirbelströme).

Der Wirkungsgrad wurde für induktionsfreie Belastung gerechnet und dementsprechend bei den Versuchen induktionsfreie Widerstandsbelastung verwendet.

Der Übersichtlichkeit halber seien hier gleich die Resultate der Verlust- und Wirkungsgradberechnung zusammengestellt. Die Besprechung der einzelnen Faktoren soll sich daran anschließen.

### Wirkungsgrad und Verluste (s. Fig. 115).

Belastung		$3 \cdot J^2 \cdot w_a$ (Anker)	$i_e^2 \cdot w_e$ (Spulen)	$i_e^2 \cdot w$ (Rheostat)	Eisenverlust	Gesamtverlust	$\eta$
Proz.	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt	Watt	Proz.
10 =	12 500	20	2145	1575	3190	6930	64,4
25 =	31 250	140	2225	1565	3210	7140	81,4
50 =	62 500	570	2405	1535	3240	7750	88,9
75 =	93 750	1300	2580	1515	3270	8665	91,6
100 =	125 000	2275	2820	1445	3300	9840	92,7

Die Stromwärmeverluste erhielt man, wie in der Tabelle angedeutet, jeweils aus Stromstärke und Widerstand. Bezüglich der Werte für die Eisenverluste siehe nachstehende Ausführungen unter a).

### Eisenverluste.

a) Stator offen. Zur Ermittlung der Eisenverluste wurden Leerlaufversuche vorgenommen. Für jede gewünschte Klemmenspannung des Generators wurde die dem Antriebsmotor (Gleichstrommotor) zugeführte elektrische Energie bei Erregung mit derjenigen verglichen, welche dem Motor bei der Klemmenspannung 0 des Generators (Erregung 0) zuzuführen ist. Die Differenz der beiden Energien, vermindert um die zusätzliche Ankerstromwärme im Motor, ergibt den Eisenverlust; der Ankerwiderstand des Motors betrug dabei  $w' = 0,0641 \Omega$  (vgl. S. 325 u. 326).

Als Beispiel seien folgende Werte einer Messungsreihe herausgegriffen:

Antriebsmotor (Gleichstrom)		Generator	
Volt	Ampere	Volt (Klemmenspannung)	Eisenverlust Watt
—	—	—	—
567,5	28,0	—	—
567,5	36,5	275	4785
—	—	—	—

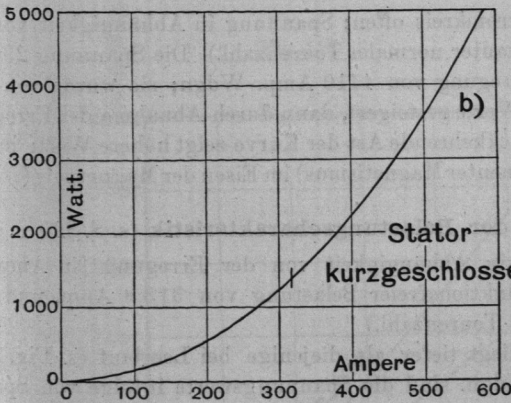
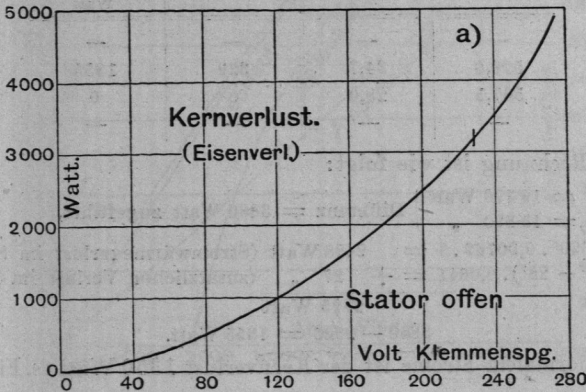
Die Rechnung ist nun folgende:

$$\begin{aligned}
 567,5 \text{ Volt} \times 8,5 \text{ Amp.} &= 4820 \text{ Watt, welche dem Motor zugeführt sind;} \\
 J^2 \cdot w' &= 36,5^2 \cdot 0,0641 = 85,2 \text{ Watt} \\
 - J^2 \cdot w' &= 28,0^2 \cdot 0,0641 = -50,2 \text{ „} \\
 \hline
 &35,0 \text{ Watt (zusätzlicher Ankerverlust)} \\
 4820 - 35 &= 4785 \text{ Watt Eisenverlust.}
 \end{aligned}$$

Sämtliche beobachteten Werte sind in einer Kurve (s. Fig. 116a) aufgetragen. — Bei 230 Volt Klemmenspannung und Leerlauf beträgt der Eisenverlust 3180 Watt. Bei Vollast wird die EMK  $234,2$  Volt [innerer Ohmscher Spannungsabfall =  $314 \cdot 0,00769 \cdot \sqrt{3} = 4,2$ ;  $230 + 4,2 = 234,2$ ]<sup>1)</sup>; dem entspricht ein Eisenverlust von 3300 Watt.

b) Stator kurzgeschlossen. Die Versuche und die Rechnung wurden in analoger Weise durchgeführt. An Stelle der Spannung ist

Fig. 116.



der Kurzschlußstrom zu messen. Die Messung bei Strom wurde wieder mit derjenigen bei stromlosem Stator (Feldstrom = 0) verglichen. Von

<sup>1)</sup> Streng genommen müßte man auch den induktiven Spannungsabfall im Inneren des Generators berücksichtigen, da der gesamte Spannungsabfall sich aus diesem und dem Ohmschen geometrisch zusammensetzt (s. bei „Impedanz“). Da jedoch nur dieser letztere in die Richtung des Stromes fällt, der induktive Spannungsabfall dagegen normal dazu gerichtet ist, so wird der ganze Spannungsabfall (in algebraischem Sinne) praktisch (induktionslose Belastung vorausgesetzt) fast nur durch den Ohmschen Abfall bedingt.

der vermehrten zugeführten Energie des Motors ist außer der zusätzlichen Ankerstromwärme desselben noch diejenige des Generators in Abzug zu bringen (s. hierzu auch S. 319 u. f.).

Als Beispiel aus den betreffenden Messungsreihen sollen folgende Werte dienen:

Antriebsmotor		Generator	
Volt	Ampere	Ampere	Kernverlust Watt
—	—	—	—
570,0	34,7	329	1355
567,5	28,0	0	0
—	—	—	—

Die Rechnung ist wie folgt:

$$\begin{array}{r}
 570,0 \cdot 34,7 = 19\,770 \text{ Watt} \\
 567,5 \cdot 28,0 = 15\,890 \text{ " } \\
 \hline
 \text{Differenz} = 3880 \text{ Watt zugeführt,} \\
 329^2 \cdot 0,00769 \cdot 3 = 2498 \text{ Watt (Stromwärmeverlust im Stator)} \\
 + 34,7^2 - 28^2 \cdot 0,0641 = + 27 \text{ " (zusätzlicher Verlust im Motor)} \\
 \hline
 2525 \text{ Watt} \\
 3880 - 2525 = 1355 \text{ Watt.}
 \end{array}$$

Bei normalem Strome ist der Kernverlust 1350 Watt (s. Fig. 116b).

#### Aufnahme der Leerlaufscharakteristik.

(Äußerer Stromkreis offen; Spannung in Abhängigkeit von der Erregung bei konstanter normaler Tourenzahl.) Die Spannung 230 Volt erforderte eine Erregung von 4410 Amp.-Wdgn.; sie wurde von 0 bis zu einem höchsten Werte gesteigert, dann durch Abnahme der Erregung vermindert. Der rückkehrende Ast der Kurve zeigt höhere Werte infolge von Hysterisis (remanenter Magnetismus) im Eisen der Magnetpole (s. Fig. 117).

#### Aufnahme der Belastungscharakteristik (s. S. 320 u. 321).

(Spannung in Abhängigkeit von der Erregung [in Amp.-Wdgn.] bei normaler induktionsfreier Belastung von 313,8 Amp. und bei konstanter normaler Tourenzahl.)

Die Kurve liegt tiefer als diejenige bei Leerlauf (s. Fig. 117); bei gleichen Amp.-Wdgn. sind die Spannungswerte infolge von Spannungsabfall im Anker, veranlaßt durch den Ankerstrom, kleiner, oder bei gleicher Spannung sind mehr Amp.-Wdgn. aufzuwenden, z. B. für volle Spannung von 230 Volt sind 5120 Amp.-Wdgn. erforderlich. Diese Erregung würde bei Leerlauf (offenem, äußeren Stromkreise) eine Spannung von 249 Volt ergeben; daher ist die Regulierung der Maschine  $249 - 230 = 19 \text{ Volt} = 8,26 \text{ Proz.}$

Einige weitere Messungen, die an der Maschine vorgenommen wurden, mögen, obschon sie mehr theoretisches wie praktisches Interesse haben, bei dieser Gelegenheit besprochen werden.

Fig. 117.

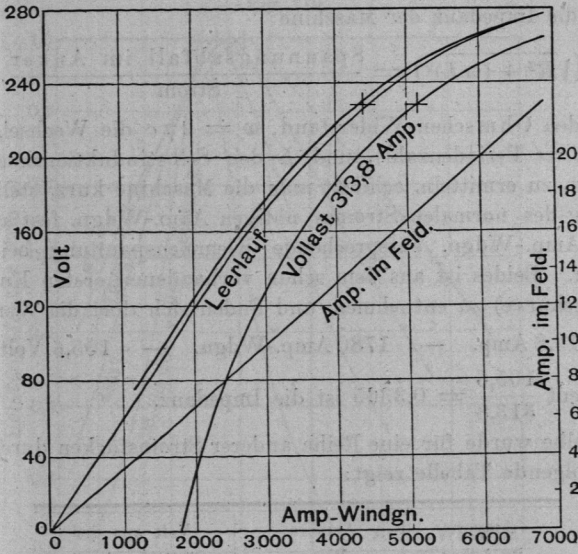
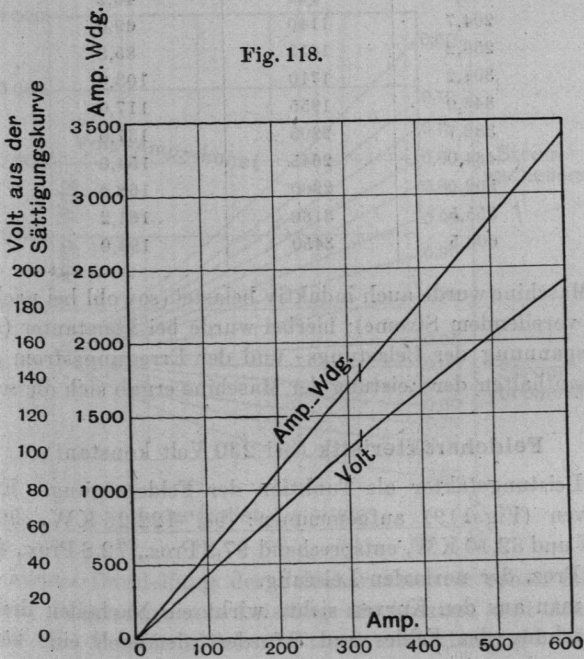


Fig. 118.



**Impedanz** (s. Fig. 118).

Um die Impedanz der Maschine

$$(\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}) = \frac{\text{Spannungsabfall im Anker}}{\text{Strom}},$$

worin  $R$  den Ohmschen Widerstand,  $\omega = 2\pi c$  die Wechselgeschwindigkeit ( $c =$  Periodenzahl), und  $L$  den Selbstinduktionskoeffizienten bezeichnen, zu ermitteln, schließt man die Maschine kurz, stellt die zur Erzeugung des normalen Stromes nötigen Amp.-Wdgn. fest und sucht die den Amp.-Wdgn. entsprechende Klemmenspannung bei offenem Stator auf. Beides ist aus dem schon vorhandenen ersten Kurvenbilde (Sättigungskurve) zu entnehmen, und finden sich dort die Werte:

313,8 Amp. — 1780 Amp.-Wdgn. — 105,6 Volt.

Der Quotient  $\frac{105,6}{313,8} = 0,3365$  ist die Impedanz.

Dasselbe wurde für eine Reihe anderer Stromstärken durchgeführt, wie nachfolgende Tabelle zeigt:

Ampere im Anker	Ampere- Wdgn.	Volt aus der Sättigungskurve
138,2	725	46,2
204,7	1140	69,0
256,2	1415	85,8
301,2	1710	103,0
346,0	1955	117,0
386,7	2205	131,0
464,0	2645	154,0
509,0	2900	168,0
555,5	3180	181,2
600,5	3450	194,0

Die Maschine wurde auch induktiv belastet (sowohl bei nacheilendem wie auch voreilendem Strome); hierbei wurde bei konstanter (normaler) Klemmenspannung der Belastungs- und der Erregungsstrom gemessen. Bei Konstanthalten der Leistung der Maschine ergab sich die sogenannte

**Feldcharakteristik** (bei 230 Volt konstant),

d. h. der Leistungsfaktor als Funktion der Felderregung. Es wurden vier Kurven (Fig. 119) aufgenommen: bei 122,25 KW, 90,92 KW, 61,57 KW und 32,10 KW, entsprechend 97,9 Proz., 72,8 Proz., 49,3 Proz. und 25,7 Proz. der normalen Leistung.

Wie man aus den Kurven sieht, wirkt ein Nacheilen des Stromes auf Schwächung des Feldes und erfordert demnach eine höhere Erregung — rechter Ast der Kurve, während bei Voreilen des Stromes

(Kapazitätsbelastung) der umgekehrte Fall eintritt — linker Ast der Kurve.

Fig. 119.

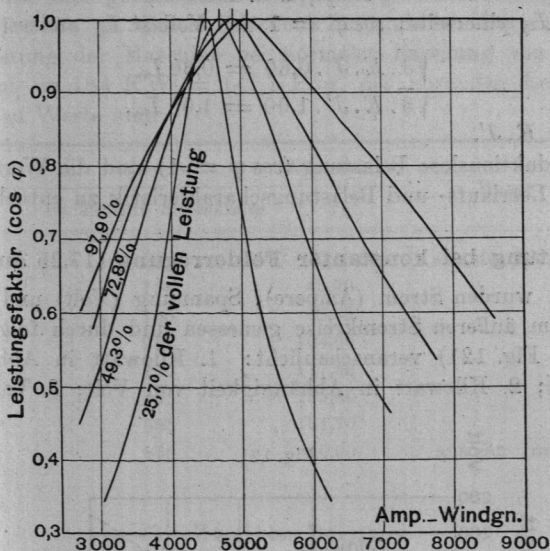
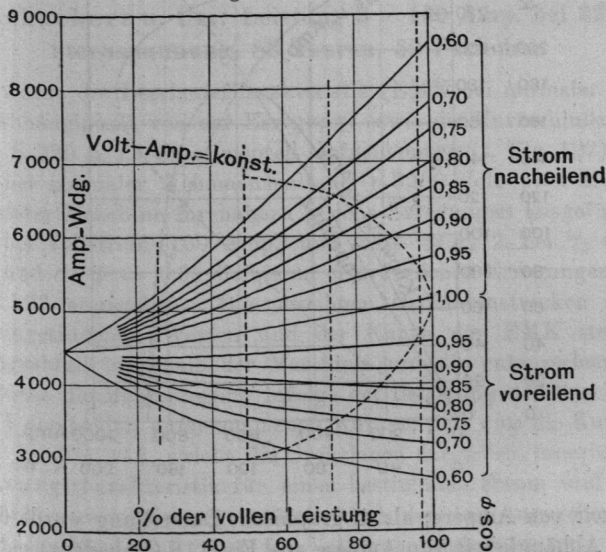


Fig. 120.



Eine andere Darstellung der Feldcharakteristik erhält man, wenn man in dem Diagramme aus Leistung als Abszisse und Amp.-Wdgn. als Ordinate die Punkte gleicher Phasenverschiebung (d. h. gleichen Leistungsfaktors) verbindet (Fig. 120).



In diesem letzteren Diagramme geben die Punkte, für welche Leistungsfaktor und prozentuale Leistung gleichen Wert haben, die Kurve der konstanten Volt-Amp.; z. B. für  $\cos \varphi = 0,60$  und 60 Proz. der Vollast  $L_0$  einerseits,  $\cos \varphi = 1$  und Vollast  $L_0$  andererseits gilt:

$$\sqrt{3} \cdot E \cdot J \cdot 0,60 = 0,60 L_0$$

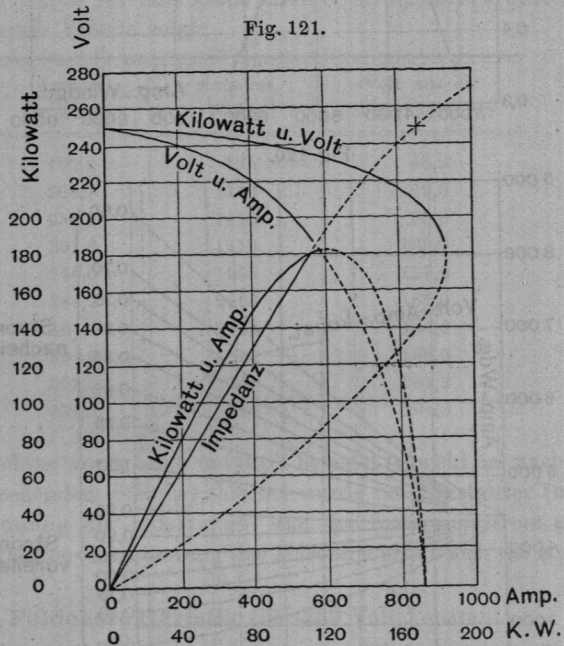
$$\sqrt{3} \cdot E \cdot J' \cdot 1,00 = 1,00 L_0,$$

d. h.  $EJ = E \cdot J'$ .

Für induktionslose Belastung ( $\cos \varphi = 1$ ) sind die Werte für Erregung der Leerlauf- und Belastungscharakteristik zu entnehmen.

### Belastung bei konstanter Felderregung (17,25 Amp.).

Hierbei wurden Strom (Ampere), Spannung (Volt) und Leistung (Kilowatt) im äußeren Stromkreise gemessen und durch folgende drei Kurven (s. Fig. 121) veranschaulicht: 1. Kilowatt in Abhängigkeit von Ampere; 2. Kilowatt in Abhängigkeit von Volt; 3. Volt in Ab-



hängigkeit von Ampere; als 4. graphische Darstellung wurde die Kurve Volt in Abhängigkeit von Ampere aus Fig. 118 (Impedanz) entnommen und nach Schätzung verlängert, in das Diagramm eingetragen.

Die oben genannten Messungen wurden nur bis zur Stromstärke 550 Ampere ausgeführt, da eine höhere Belastung nicht zulässig erschien. Die maximale Stromstärke würde eintreten, wenn die Maschine

kurz geschlossen würde; ihre Größe ergibt sich aus der Verlängerung der Impedanzkurve, entsprechend einem Voltwerte von 249, zu 850 Amp.; hierbei sind naturgemäß Klemmenspannung und Leistung Null. Die Kurven sind bis zu diesem (ideellen) Zustande verlängert. Die maximale Leistung der Maschine bei normaler Erregung von 17,25 Amp. ergibt sich zu 184 KW = 147,1 Proz. der normalen Leistung. Die gemessenen Werte sind

Volt	Ampere	Kilowatt	Bemerkungen
Im äußeren Stromkreise			
249	0	0,00	aus der Sättigungskurve
245	106	45,00	
243	105	63,05	
238	252	104,00	
234	290	117,50	
219	405	135,60	
189	555	181,70	
0	850	0,00	aus der Impedanzkurve

## Zweites Beispiel.

**Untersuchung an einem Drehstromgenerator der E.-A.-G.  
vorm. Schuckert u. Co.: Leistung  $3 \times 160$  Amp. bei 3200 Volt  
Sternspannung, 83 Touren, 50 Perioden.**

Es wurde die Leerlaufcharakteristik (EMK bei normaler Tourenzahl in Abhängigkeit von der Erregung) sowie die Kurzschlußcharakteristik (s. S. 320 u. f.) experimentell aufgenommen (s. Fig. 122); ferner wurden bei normaler Klemmenspannung<sup>1)</sup> 3200 Volt zwei Messungen bei belasteter Maschine für nahezu gleiche Erregungen ausgeführt, und zwar 1. bei Vollstrom (160 Amp.) und  $\cos \varphi = 1$ , 2. bei  $\frac{1}{3}$  des Vollstromes und  $\cos \varphi = 0,3$ ; die hierzu erforderlichen Erregungen sind in der Fig. 122 angegeben. Die jeweiligen Ordinatenstrecken zwischen diesen eingetragenen Werten und der Kurve der EMK stellen den Spannungsabfall innerhalb der Maschine und die entsprechenden Abszissenstücke die Mehrerregung infolge der Belastung der Maschine dar. An Hand der beiden aufgenommenen Kurven sind nun die Kurven  $E_{ka}$  und  $E'_{ke}$  der Fig. 113, welche die Grenzlagen darstellen, innerhalb deren die Belastungscharakteristik für einen bestimmten Strom und eine bestimmte Phasenverschiebung verläuft, nach der dort angegebenen Konstruktion bestimmt und zwar für Vollstrom und  $\cos \varphi = 1$  [Kurven  $E_{ka}^{(1)}$  und  $E'_{ke}^{(1)}$ ] und für  $\frac{1}{3}$  Vollstrom und  $\cos \varphi = 0,3$  [Kurven  $E_{ka}^{(2)}$

<sup>1)</sup> Sämtliche Spannungswerte sind hier, auch ohne daß dies ausdrücklich gesagt ist, als Sternspannungen zu verstehen.