



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000299088



11-352031

Der Einfluss der Kurvenform auf die Wirkungsweise des Synchronmotors.

Von

Dr.-Ing. Leopold Bloch, Frankfurt a./M.

Mit 34 Abbildungen.

Einleitung.

Das Problem des Synchronmotors ist schon vielfach und seit langem Gegenstand der Untersuchung gewesen. Während die Wirkungsweise des Synchronmotors zunächst auf rechnerischem Wege dem Verständnis erschlossen wurde (Hopkinson, Mordey, Behn-Eschenburg), erkannte man bald, dass auch auf diesem Gebiete die graphische Behandlung der Wechselstromprobleme sich mit grossem Vorteil einführen lässt. So wurde das Verhalten des Synchronmotors weiterhin an Hand von Diagrammen untersucht und weiter aufgeklärt (Blakesley, Kapp, Blondel).

Diese Diagramme beruhen alle auf einer gemeinsamen Grundlage: der Zusammensetzung der zwei vorhandenen elektromotorischen Kräfte mit ihrer Resultierenden, dem Spannungsabfall in Widerstand und Reaktanz des Synchronmotorstromkreises; sie unterscheiden sich nur durch ihre Anordnung voneinander, derzufolge sie in mehr oder weniger bequemer Weise zu benützen sind.

Die Untersuchung des Synchronmotorproblems wird wesentlich vereinfacht durch zwei Voraussetzungen, welche dabei gemacht werden.

Erstens wird angenommen, dass die Reaktanz des Synchronmotorstromkreises eine konstante und von der Erregung und Belastung unabhängige Grösse sei. In der Reaktanz ist die Wirkung der Armaturrückwirkung und der Armaturstreuung zusammengefasst. Nun ist aber besonders die erstere bei einem Synchronmotor ebensowohl wie bei einem Wechselstromgenerator von der Erregung bzw. der Sättigung des Eisens abhängig. Bei der Untersuchung des Spannungsabfalls von Wechselstromgeneratoren wird daher in neuerer Zeit der Einfluss der in der Reaktanz zusammengefassten Grössen getrennt

untersucht und im Diagramm berücksichtigt. Die dafür erhaltenen Ergebnisse lassen sich unmittelbar auch für das Synchronmotordia-gramm anwenden.

Die zweite Voraussetzung ist diejenige, welche man bei der graphischen und rechnerischen Behandlung von Wechselstromproblemen immer wieder antrifft, dass nämlich die zur Anwendung kommenden Wechselströme und -spannungen reine Sinusform haben. In den meisten Fällen, z. B. bei Wechselstromgeneratoren und bei Transformatoren, dürfen auch schon beträchtliche Abweichungen von der Sinusform vorkommen, ohne dass man denselben Rücksicht zu tragen braucht, und ohne dass dieselben besonders schädlich die Wirkungsweise dieser Apparate beeinflussen.

Gerade beim Synchronmotor äussert sich dagegen der Einfluss der höheren Harmonischen in besonders deutlich und unter Umständen unangenehm bemerkbarer Weise.

Wird ein Synchronmotor bei konstanter zugeführter Spannung und konstanter abgegebener Leistung betrieben, so ändert sich bekanntlich der Strom und der Leistungsfaktor $\cos \varphi$ mit der Erregung des Synchronmotors, und der Theorie nach ergibt sich bei einer bestimmten Erregung ein minimaler Strom und zugleich der Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$. Bei stärkerer bzw. schwächerer Erregung wächst der Strom und eilt der Spannung vor bzw. nach, so dass sich für den Wechselstrom in Abhängigkeit vom Erregerstrom die bekannte „V-Kurve“ ergibt.

Es ist nun schon oft beobachtet worden, dass in einem solchen Falle beim Minimalstrom nicht der Leistungsfaktor 1 erhalten wurde, sondern nur ein maximaler Leistungsfaktor, mehr oder weniger weit von 1 entfernt, und dies Verhalten wurde mit Recht dem Einfluss der höheren Harmonischen zugeschrieben.

Da es gerade einer der Hauptvorteile des Synchronmotors vor dem asynchronen ist, dass er mit dem Leistungsfaktor 1 arbeitet, so ergab sich daraus alsbald auch die Forderung, dass der Synchronmotor und der ihn antreibende Generator eine möglichst der Sinusform nahekommende Kurvenform haben sollen, oder, wenn dies nicht erreicht werden kann, dass wenigstens Synchronmotor und Generator übereinstimmende Kurvenform haben sollen. Diese Thatsachen sind schon seit längerer Zeit bekannt und auch in dem Hauptwerk über Synchronmotoren: „Moteurs Synchrones à courants alternatifs“ von A. Blondel (erschienen 1901 Paris, Encyclopédie Léauté) in Kap. III, S. 167 ff. des näheren besprochen.

Dagegen scheint es mir noch an eingehenderen, insbesondere experimentellen Untersuchungen über den Einfluss der Kurvenform auf den Synchronmotor zu fehlen und hierzu soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag bilden.

Da in neuerer Zeit der Synchronmotor besonders für Motor-Generatoren und als rotierender Umformer wieder mehr als bisher in Aufnahme zu kommen scheint, und da auch heute noch zahlreiche Wechselstrommaschinen gebaut werden, deren Kurvenform von der Sinusform erheblich abweicht, so dürfte dieser Untersuchung wohl auch eine gewisse praktische Bedeutung zukommen.

Theoretischer Teil.

Das Synchronmotordiagramm.

Zunächst soll das für reine Sinusströme geltende Synchronmotordiagramm und seine wesentlichsten Eigenschaften in Kürze hier entwickelt werden, und zwar erscheint mir hierzu und für die späteren Betrachtungen das Diagramm am geeignetsten, welches von Blondel in seiner älteren Schrift „Théorie des Moteurs Synchrones“ (Paris, 1895) benützt wird. In dem oben erwähnten neueren Werk desselben Verfassers ist dies Diagramm als Diagramm zweiter Art bezeichnet. Auch dem Vortrag von A. Heyland, „Beitrag zur graphischen Behandlung der Wechselstromprobleme“ (E.T.Z. 1896, Heft 40, S. 618) liegt dieses Diagramm zu Grunde.

Es bezeichne:

- E_g die primäre, dem Synchronmotor zugeführte elektromotorische Kraft. Je nach dem Bereich des Stromkreises, der für das Diagramm in Betracht gezogen wird, ist hierunter die Klemmenspannung am Synchronmotor oder die am Generator oder die elektromotorische Kraft des Generators zu verstehen. In den beiden letzteren Fällen sei
- E_k die Klemmenspannung am Synchronmotor,
- E_m die sekundäre elektromotorische Kraft des Synchronmotors, d. i. diejenige, welche derselbe als Generator leerlaufend bei gleicher Tourenzahl und Erregung ergeben würde.

J Strom im Synchronmotorstromkreise.

E_g , E_m und J sollen zunächst reine Sinusform haben.

r effektiver Widerstand des in Betracht gezogenen Stromkreises.

x Reaktanz des in Betracht gezogenen Stromkreises. Die Reaktanz des Synchronmotors enthält die Wirkung der Selbstinduktion, der Quer- und Entmagnetisierung der Armatur in sich vereinigt und soll als konstant und unabhängig von der Erregung und Belastung angesehen werden.

$z = \sqrt{r^2 + x^2}$ Impedanz des gesamten Stromkreises.

φ Winkel der Phasenverschiebung zwischen E_g und J .

ψ Winkel der Phasenverschiebung zwischen E_m und J .

ϑ Winkel der Phasenverschiebung zwischen E_g und E_m .

$P_g = E_g \cdot J \cdot \cos \varphi$ die mit der elektromotorischen Kraft E_g zugeführte elektrische Leistung.

$P_m = E_m \cdot J \cdot \cos \psi$ die im Synchronmotor in mechanische Leistung umgesetzte elektrische Leistung, wobei $P_m = P_g - J^2 r$.

Um die vom Synchronmotor nutzbar abgegebene mechanische Leistung zu erhalten, müssen von P_m noch die Eisenverluste im Motor und die mechanische Reibung desselben in Abzug gebracht werden.

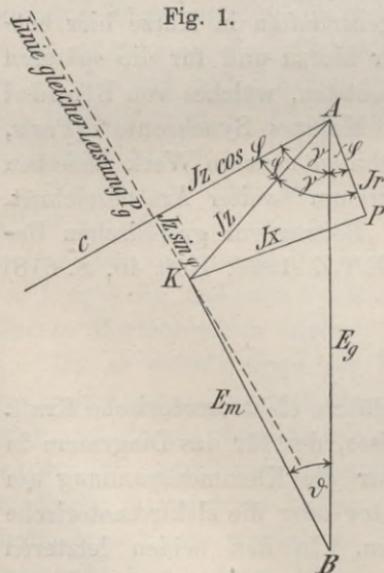
Da, wo weiterhin E oder P kurzweg genannt wird, soll jeweils E_g und P_g darunter verstanden und auf die Klemmenspannung am Synchronmotor bezogen werden.

Es bedeute ferner noch γ einen Winkel, den in einem aus r und x als Katheten und z als Hypotenuse gebildeten rechtwinkligen Dreieck r und z miteinander bilden, so dass $\cos \gamma = \frac{r}{z}$.

Unter Anwendung dieser Bezeichnungen ergibt sich das Diagramm als ein Dreieck ABK aus den Seiten $AB = E_g$, $BK = E_m$ und der Resultierenden $AK = Jz$ (Fig. 1). In diesem Dreieck ist wohl der Winkel ϑ enthalten, aber nicht der Winkel φ , auf den es im folgenden hauptsächlich ankommt.

Derselbe ergibt sich als $\sphericalangle PAB$, wenn Jz in seine beiden auf-

Fig. 1.



einander senkrecht stehenden Komponenten $J_r = AP$ und $J_x = PK$ zerlegt wird. In dem Hilfsdreieck PAK ist der $\sphericalangle \gamma = \sphericalangle PAK$ enthalten. Das Hilfsdreieck lässt sich auch vermeiden, wenn man durch A den Strahl c unter dem Winkel $\gamma = BA c$ zieht; dann ist $\sphericalangle K A c = \varphi$.

E_g und J sind in Phase, wenn K auf dem Strahl c liegt. Unterhalb $A c$ ist Phasennacheilung, oberhalb $A c$ Phasenvoreilung des Stromes J gegenüber der Spannung E_g .

Linien gleicher Leistung P_g .

Soll die zugeführte Leistung P_g konstant sein, so muss $J \cos \varphi$ konstant sein, da E_g durchweg als konstant vorausgesetzt werden soll. Es kann sich daher der Punkt K nur auf einer Senkrechten bewegen, die auf $A c$ im Abstand $Jz \cdot \cos \varphi = \frac{P_g \cdot z}{E_g}$ von A errichtet ist. Dann ist die Wattkomponente $Jz \cos \varphi$ von Jz konstant und nur die wattlose Komponente $Jz \sin \varphi$ ändert sich mit der Phasenverschiebung φ .

Linien gleicher Leistung P_m .

Soll die abgegebene Leistung P_m konstant sein, so muss $E_m \cdot J \cos \psi$ konstant sein. Es soll hier zunächst der Ort der Punkte P , der Endpunkte von J_r , ermittelt werden, der dieser Bedingung genügt.

In Fig. 2 (S. 242) ist ebenso wie in Fig. 1 das Synchronmotordiagramm als Linienzug $ABKPA$ eingezeichnet. Fällt man in dieser Figur von B aus die Senkrechte BQ auf PK , so ist $BQ \parallel AP$ in Phase mit dem Strom J und daher $\sphericalangle QBK = \psi$ und $BQ = E_m \cos \psi$. Da $AP = J_r$ ist, so muss

$AP \cdot BQ = E_m \cdot J_r \cdot \cos \psi = P_m r = \text{konstant}$
sein.

Zieht man durch P und den Mittelpunkt O von AB die Gerade POP' , so schneidet diese BQ im Punkte P' und $BP' = AP$, da die Dreiecke APO und $BP'O$ kongruent sind. Man erhält also für konstante Leistung P_m die Bedingung

$$BP' \cdot BQ = \text{konstant.}$$

Dieser Bedingung genügt ein Kreis um O mit dem Durchmesser PP' . Auf diesem Kreise liegt auch Q als Scheitel eines rechtwinkligen Dreiecks über dem Durchmesser PP' .

Der Ort der Punkte P für gleiche Leistung P_m ist also ein Kreis um O mit dem Radius $\rho = OP$. Der Radius ρ ergibt sich aus der Beziehung:

$$BP' \cdot BQ = (BO - \rho)(BO + \rho)$$

oder

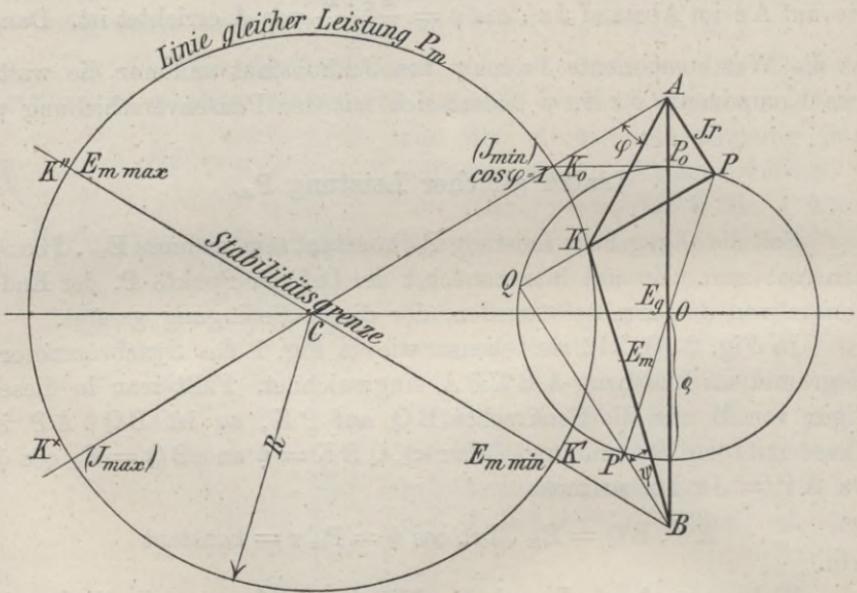
$$P_m \cdot r = \left(\frac{E_g}{2} - \rho\right) \left(\frac{E_g}{2} + \rho\right)$$

und hieraus

$$\rho = \sqrt{\frac{E_g^2}{4} - P_m \cdot r}$$

Der Ort der Punkte K für konstante Leistung P_m ergibt sich nun aus dem Ort der Punkte P aus folgender Ueberlegung:

Fig. 2.



Jedem Punkte P entspricht ein Punkt K im Diagramm derart, dass AK mit AP den Winkel γ bildet und $AK = \frac{AP}{\cos \gamma}$.

Nach den Gesetzen über ähnliche Figuren ist daher der Ort der Punkte K für konstante Leistung P_m gleichfalls ein Kreis mit dem Radius $R = \frac{\rho}{\cos \gamma}$ und sein Mittelpunkt C liegt auf einer von A

ausgehenden, um γ gegen A O verschobenen Geraden A C, wobei

$$A C = \frac{A O}{\cos \gamma}.$$

C liegt also auf der Mittelsenkrechten von A B, und R kann erhalten werden als C K₀, wenn man den Punkt P₀ (auf A B und dem P-Kreis) nach K₀ auf A C parallel zu O C projiziert.

Der Kreis mit dem Radius R um C ergibt die Darstellung der V-Kurve für konstante abgegebene Leistung im Diagramm. Im Punkte K₀ auf A C wird der minimale Strom J_{min} und $\cos \varphi = 1$ erhalten; der Ast für Uebererregung und Phasenvoreilung des Stromes geht von K₀ bis K'', der für Untererregung und Phasennacheilung von K₀ bis K'.

In K'' wird die maximale und in K' die minimale sekundäre elektromotorische Kraft E_m, bzw. Erregung des Synchronmotors erreicht und in diesen Punkten fällt der Synchronmotor praktisch ausser Tritt. Rein theoretisch betrachtet, schliesst sich die V-Kurve über die andere Kreishälfte, auf der in K^x der maximale Strom auftritt, doch ist dieser Teil der V-Kurve praktisch nicht realisierbar.

Maximale Leistung P_{m max}.

Dieselbe wird erhalten, wenn in der Gleichung

$$P_m r = \frac{E_g^2}{4} - \rho^2$$

$\rho = 0$ wird und ist daher

$$P_{m \max} = \frac{E_g^2}{4 r}.$$

Der Kreis für konstante Leistung P_m ist für P_{m max} in den Punkt C zusammengeschrumpft und es kann daher die maximale

Leistung nur bei der elektromotorischen Kraft $E_m = \frac{E_g}{2 \cos \gamma} = \frac{E_g \cdot z}{2 r}$

und dem Strom $J = \frac{E_g}{2 r}$ erreicht werden. Doch ist diese Spannung

und der Strom meist so hoch, dass sie praktisch nicht mehr zu ermöglichen sind, und daher ist die thatsächlich erreichbare maximale Leistung wesentlich geringer. Je grösser das Verhältnis von P_{m max} zur normalen Leistung ist, desto grössere Ueberlastung verträgt der Synchronmotor, ohne ausser Tritt zu fallen.

Theoretischer Leerlauf.

Beim theoretischen Leerlauf ist $P_m = 0$, also

$$\rho = \sqrt{\frac{E_g^2}{4} - P_m r} = \frac{E_g}{2};$$

$$R = \frac{E_g}{2 \cos \gamma} = A C \text{ (Fig. 2).}$$

Hiernach ist der Ort für $P_m = 0$ ein Kreis um C, der durch A und B geht.

Bei einem Synchronmotor ist der theoretische Leerlauf nur dann zu erreichen, wenn der Motor von aussen angetrieben wird, da immer die Eisenverluste und die Reibung des Motors gedeckt werden müssen.

Jenseits des Kreises für theoretischen Leerlauf wird P_m negativ und der Synchronmotor wird daher zum Wechselstromgenerator. Das Diagramm kann hierfür als Generatordiagramm in ungeänderter Form zur Anwendung kommen.

Berücksichtigung der höheren Harmonischen.

Weicht die Kurvenform der elektromotorischen Kräfte E_g und E_m von der Sinusform ab, so lassen sich dieselben durch Fouriersche Reihen mit lauter ungeraden Gliedern bis zu beliebiger Genauigkeit darstellen.

Bedeutet $E_{g_1}, E_{g_3}, E_{g_5} \dots$ und $E_{m_1}, E_{m_3}, E_{m_5} \dots$ die Maximalwerte der ersten, dritten, fünften ... Harmonischen, so sind die Momentanwerte:

$$e_g = E_{g_1} \sin(\omega t + \alpha_1) + E_{g_3} \sin(3\omega t + \alpha_3) + E_{g_5} \sin(5\omega t + \alpha_5) + \dots$$

$$e_m = E_{m_1} \sin(\omega t + \beta_1) + E_{m_3} \sin(3\omega t + \beta_3) + E_{m_5} \sin(5\omega t + \beta_5) + \dots$$

Die im Diagramm enthaltene Phasenverschiebung ϑ zwischen E_g und E_m ergibt sich aus den obigen Gleichungen für die einzelnen jeweils gleichhohen Harmonischen als

$$\vartheta_1 = \beta_1 - \alpha_1, \quad \vartheta_3 = \beta_3 - \alpha_3, \quad \vartheta_5 = \beta_5 - \alpha_5 \dots$$

Als Phasenverschiebung zwischen der Grundwelle und z. B. der dritten Harmonischen von E_g bezw. E_m ist $\alpha_3 - 3\alpha_1$ bezw. $\beta_3 - 3\beta_1$ zu bezeichnen, im Winkelmassstab der dritten Harmonischen gemessen. Dabei ist zu beachten, dass diese Phasenverschiebung nur beim Nulldurchgang der Grundwelle thatsächlich auftritt, während die beiden

Vektoren sonst, entsprechend ihrer verschiedenen Winkelgeschwindigkeit, alle möglichen Phasenverschiebungen durchmachen.

Aus der Theorie der Wechselströme beliebiger Kurvenform ist bekannt, dass nur Strom- und Spannungswellen gleicher Ordnung eine Arbeitsleistung hervorzubringen im stande sind. Die Beziehungen der verschiedenen Harmonischen der Spannung bezw. des Stromes untereinander werden durch die Fouriersche Reihe dargestellt und ausser dieser und der geometrischen Zusammensetzung der Effektivwerte der einzelnen Harmonischen zum Effektivwert des Gesamtstroms, bezw. der Gesamtspannung, kommen keine Beziehungen der verschiedenen höheren Harmonischen untereinander in Betracht. Für Wechselströme von beliebiger nicht sinusförmiger Kurvenform zerfällt hiernach die Untersuchung eines jeden Betriebsfalls in lauter Einzeluntersuchungen für jede einzelne Harmonische.

Wird die Untersuchung mit Hilfe eines Diagramms durchgeführt, so erhält man je ein besonderes Diagramm für die erste, dritte, fünfte . . . Harmonische. Aus den Diagrammen für die einzelnen Harmonischen ergeben sich alsdann die gesuchten Momentanwerte des Gesamtstroms, bezw. der Gesamtspannung durch einfache Superposition unter entsprechender Berücksichtigung der Phasenverschiebungen.

Die Effektivwerte ergeben sich als geometrische Summe (Wurzel aus der Summe der Quadrate) der Effektivwerte der einzelnen Harmonischen, die Leistungen als algebraische Summe der Einzelleistungen.

In gleicher Weise werden auch bei Anwendung der Rechnungsweise mit komplexen Grössen die verschiedenen Harmonischen getrennt behandelt (siehe Steinmetz, Theorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen, Berlin 1900, Anhang IV, S. 487 f.). Als Symbol für die getrennte Behandlungsweise gibt Steinmetz der Grösse $j = \sqrt{-1}$ für jede Harmonische einen besonderen Index (n), der besagen soll, dass nur komplexe Grössen mit dem gleichen j_n kombiniert werden dürfen.

Mit Benützung dieser Rechnungsmethode hat Steinmetz in dem eben erwähnten Buche (Anhang IV, S. 500 f.) ein Beispiel für den Betrieb eines Synchronmotors beim Vorhandensein höherer Harmonischer durchgerechnet. Es ist dabei die vereinfachende Annahme gemacht, dass die Reaktanz der Periodenzahl proportional ist. Für die n^{te} Harmonische wird also die Reaktanz $n x$ eingesetzt, wenn die Reaktanz für die Grundwelle $= x$ ist. Streng genommen gilt dies natürlich nur dann, wenn die in Frage kommende Reaktanz eine reine Selbstinduktion ohne Eisen ist. In der sogen. synchronen Reaktanz des

Synchronmotors und des stromliefernden Generators ist dagegen ausser der Selbstinduktion der Armatur auch noch die quer- und entmagnetisierende Wirkung derselben enthalten und diese wächst nicht proportional mit der Periodenzahl. Ausserdem üben die induzierten Wirbelströme eine Schirmwirkung aus, die mit wachsender Periodenzahl immer mehr in Betracht kommt und eine Verkleinerung der Reaktanz bewirkt.

Als weitere Annahme liegt dem Beispiel noch zu Grunde, dass die Kurvenform der elektromotorischen Kraft des Generators und des Synchronmotors von der Belastung unabhängig ist. Um die Zuverlässigkeit dieser beiden Annahmen zu prüfen, sollen die Ergebnisse der später zu beschreibenden Versuche im Diagramm untersucht werden.

Methoden zur angenäherten Bestimmung des Stromes der höheren Harmonischen.

A. Aus dem Minimalstrom.

Kommt es weniger auf die exakte Kenntnis des Verhaltens eines Synchronmotors an, sondern will man nur Aufschluss über die absolute Grösse des Stromes der höheren Harmonischen erhalten, so kann man hierzu durch einfache Strom-, Spannungs- und Wattmessung gelangen.

Der Strom J im Synchronmotorstromkreise setzt sich zusammen aus der Grundwelle J_1 und den höheren Harmonischen $J_3, J_5 \dots$ und zwar ist

$$J = \sqrt{J_1^2 + J_3^2 + J_5^2 + \dots}$$

Die höheren Harmonischen kann man zu einem gemeinsamen Strom der höheren Harmonischen zusammenfassen:

$$J_n = \sqrt{J_3^2 + J_5^2 + \dots}, \text{ so dass } J = \sqrt{J_1^2 + J_n^2}.$$

Ebenso ist die primäre Spannung E_g zusammengesetzt aus der Grundwelle E_{g_1} und den zusammengefassten höheren Harmonischen E_{g_n} :

$$E_g = \sqrt{E_{g_1}^2 + E_{g_n}^2}.$$

Ist P_g die gemessene zugeführte Leistung, so ist der Leistungsfaktor oder die scheinbare Phasenverschiebung $\cos \varphi = \frac{P_g}{E \cdot J}$.

Thatsächlich hat die Grundwelle die Phasenverschiebung φ_1

zwischen Strom und Spannung und die zusammengefassten höheren Harmonischen φ_n , so dass

$$P_g = E_{g_1} \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 + E_{g_n} \cdot J_n \cdot \cos \varphi_n = E_g \cdot J \cdot \cos \varphi.$$

Solange die Abweichungen der Spannung von der Sinusform sich in mässigen Grenzen halten — und das ist praktisch meist der Fall —, kann man bei einer angenäherten Berechnungsweise $E_{g_n}^2$ gegenüber $E_{g_1}^2$ vernachlässigen und $E_g = E_{g_1}$ setzen.

Ausserdem kann man in diesen Fällen dann auch annehmen, dass die zugeführte Leistung nur von der Grundwelle geliefert wird. Dann ist

$$P_g = E_g \cdot J_1 \cdot \cos \varphi_1 = E_g \cdot J \cdot \cos \varphi,$$

also

$$\frac{J_1}{J} = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi_1}.$$

Wird nun die Messung von P_g , E_g und J für eine bestimmte Belastung bei derjenigen Erregung ausgeführt, bei welcher J ein Minimum wird, so wird hierfür auch J_1 nahezu ein Minimum, wenn obige Voraussetzungen erfüllt sind. Für diesen Punkt ist dann entsprechend der Theorie des Synchronmotors für Sinusströme $\cos \varphi_1 = 1$, wenn auch $\cos \varphi$ nicht $= 1$ ist, sondern nur ein Maximum hier hat.

In diesem Falle ist

$$J_{1,\min} = J_{\min} \cdot (\cos \varphi)_{\max} \quad \text{und} \quad (\cos \varphi)_{\max} = \frac{P_g}{E_g \cdot J_{\min}},$$

$$J_n = \sqrt{J_{\min}^2 - J_1^2_{\min}} = J_{\min} \sqrt{1 - (\cos \varphi)_{\max}^2}.$$

Der so erhaltene Strom J_n ist, wie sich später zeigen wird, von der Belastung des Synchronmotors nur wenig abhängig. Infolgedessen macht er sich um so schwächer bemerkbar, je stärker die Belastung ist, da er dann der Grundwelle gegenüber immer weniger zur Geltung kommt. Bei Benützung dieser Methode bestimmt man daher J_n am genauesten bei leerlaufendem Synchronmotor.

B. Aus der Charakteristik für $\cos \varphi = 0$.

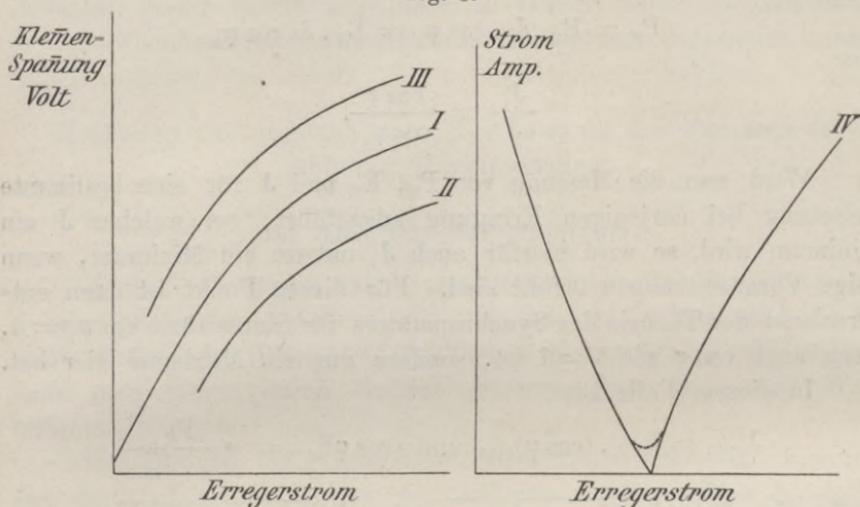
Der Strom J_n der höheren Harmonischen lässt sich angenähert auch direkt aus einer einfachen Messung erhalten, nämlich mit Hilfe der Charakteristik für $\cos \varphi = 0$.

Diese Charakteristik hat in neuerer Zeit zur Bestimmung des Spannungsabfalls in der Reaktanz der Wechselstrommaschinen eine

erhöhte Bedeutung gewonnen. Während nämlich bei $\cos \varphi = 1$ der Spannungsabfall einer Wechselstrommaschine in der Hauptsache vom Ohmschen Widerstand herrührt, und der Spannungsabfall in der Reaktanz senkrecht auf den Hauptspannungen steht, ist bei $\cos \varphi = 0$ gerade das Umgekehrte der Fall und daher aus dem Spannungsabfall die Reaktanz einfach und genau bestimmbar.

Die Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ zeigt entweder die Abhängigkeit der Klemmenspannung von der Erregung bei konstantem, um 90° der Spannung vor- oder nacheilenden Strom, oder aber die Ab-

Fig. 3.



I. Leerlaufcharakteristik,

II. Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei konstantem nacheilenden Strom,

III. " " $\cos \varphi = 0$ " " voreilenden "

IV. " " $\cos \varphi = 0$ " konstanter Klemmenspannung.

hängigkeit des Stroms von der Erregung bei konstanter Klemmenspannung.

Durch Belastung einer Wechselstrommaschine mit stark induktiven Widerständen lässt sich der $\cos \varphi = 0$ nur annähernd erreichen und es ist umständlich und kompliziert, bei verschiedenen Spannungen konstanten Strom herzustellen. Auf diese Weise lässt sich auch nur die Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei nacheilendem Strom erhalten.

Viel einfacher ist die Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei vor- und nacheilendem Strom aufzunehmen, wenn ausser der zu untersuchenden Wechselstrommaschine noch eine zweite von annähernd gleicher Span-

nung und gleicher oder grösserer Stromstärke zur Verfügung steht. Man lässt dann jede Maschine von einem Motor mit regulierbarer Tourenzahl, z. B. einem Gleichstrommotor antreiben und schaltet beide Maschinen unter Zwischenschaltung eines Wattmeters und Ampèremeters parallel. Dann reguliert man die Erregung beider Gleichstrommotoren unter Beibehaltung der normalen Tourenzahl so ein, dass von der einen Wechselstrommaschine zur anderen keine Arbeit übertragen wird, das Wattmeter also dauernd auf Null steht. Es muss also jeder Gleichstrommotor die Verluste der Maschine decken, die er antreibt.

Will man nun die Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei konstantem Strom aufnehmen, so stellt man die Erregung der zu untersuchenden Maschine auf den jeweils gewünschten Wert ein und kann durch Verändern der Erregung der anderen Maschine den verlangten konstanten Strom herstellen und zwar voreilenden bei stärkerer Erregung der Hilfsmaschine, nacheilenden bei schwächerer Erregung derselben; hierauf wird jeweils die Klemmenspannung bemessen.

Soll die Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei konstanter Spannung aufgenommen werden, so wird die Erregung der Hilfsmaschine bei verschiedenen Erregungen der zu untersuchenden Maschine so eingestellt, dass die normale Klemmenspannung erhalten wird, und hierauf wird der Strom gemessen.

Wie die Charakteristiken für $\cos \varphi = 0$ verlaufen, ist in Fig. 3 gezeigt.

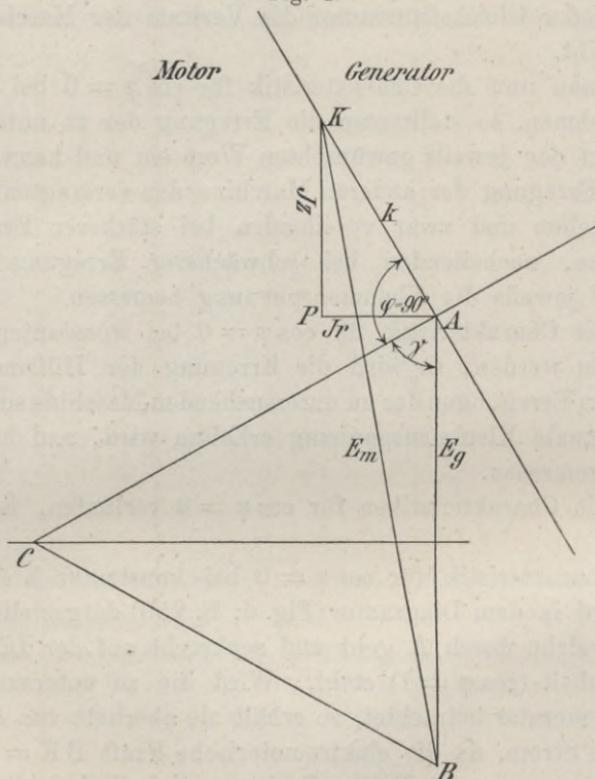
Die Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei konstanter Klemmenspannung E_g wird in dem Diagramm (Fig. 4, S. 250) dargestellt durch die Gerade k , welche durch A geht und senkrecht auf der Linie AC für Phasengleichheit ($\cos \varphi = 1$) steht. Wird die zu untersuchende Maschine als Generator betrachtet, so erhält sie oberhalb von AC um 90° nacheilenden Strom, da die elektromotorische Kraft $BK = E_m$ grösser als die Klemmenspannung $BA = E_g$ ist; unterhalb AC eilt der Strom der Klemmenspannung um 90° vor.

Die Linie k ist die Begrenzungslinie für alle sogenannten Regulierungskurven des Generators, welche bei konstanter Klemmenspannung und bei konstantem $\cos \varphi$ die Abhängigkeit der Erregung bzw. elektromotorischen Kraft vom Ankerstrom angeben. Diese Kurven stellen sich im Diagramm als von A ausgehende Gerade dar, welche für den Generator nach der rechten Seite der durch k in den Generatorbereich und Motorbereich getrennten Fläche verlaufen. Andererseits ist die Linie k auch für den Synchronmotor die Be-

grenzungslinie aller V-Kurven bei konstanter zugeführter Leistung (Senkrechte auf AC).

Wenn die elektromotorische Kraft der untersuchten Maschine gleich der konstant gehaltenen Klemmenspannung ist, so ist bei $\cos \varphi = 0$ nach dem Diagramm auch der Strom (proportional AK) = 0. Dies trifft aber nur dann zu, wenn keine höheren Harmonischen vorhanden sind. Sind dagegen höhere Harmonische vorhanden, so erhält

Fig. 4.



man bei der Aufnahme der Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei konstanter Spannung nicht mehr den Strom 0 bei einer bestimmten Erregung, sondern nur einen Minimalwert des Stromes, der um so höher liegen wird, je stärker die höheren Harmonischen auftreten. Aus der Grösse dieses Minimalwertes lässt sich direkt auf die Stärke der höheren Harmonischen schliessen. Natürlich muss dabei der zu untersuchende Synchronmotor entweder mit dem zu ihm gehörigen Generator parallel geschaltet sein oder mit einer Maschine, deren Kurvenform von der des Generators nicht allzusehr abweicht.

Der Beweis, dass der auf diese Weise aufgenommene Minimalwert des Stromes nur ein Strom höherer Harmonischer ist, soll auch aus den späteren Versuchen durch Aufnahme der Kurvenform experimentell erbracht werden.

Experimenteller Teil.

Beschreibung der Maschinen und Apparate, Schaltung und Messmethode.

Bei den Versuchen diente als Synchronmotor eine vierpolige Einphasenwechselstrommaschine von Schuckert & Cie. Type WAC 3¹/₂. Normale Angaben: 3,5 Kilowatt, 110 Volt, 32 Ampère, 1500 Touren.

Dieselbe Maschine war zu den in der Schrift von Prof. E. Arnold und J. L. la Cour: „Beitrag zur Vorausberechnung und Untersuchung von Ein- und Mehrphasengeneratoren“ (Stuttgart 1901) beschriebenen Versuchen verwendet worden und daselbst ist auch (S. 46) ihre Konstruktion näher angegeben. Als Wechselstromquelle konnte eine der Versuchsmaschine genau gleiche Maschine benützt werden, welche mit ihr auf gemeinsamer Grundplatte stand.

Beide Maschinen haben glatten Anker mit verteilter Wickelung und Aussenpole mit abnehmbaren Polschuhen aus Gusseisen.

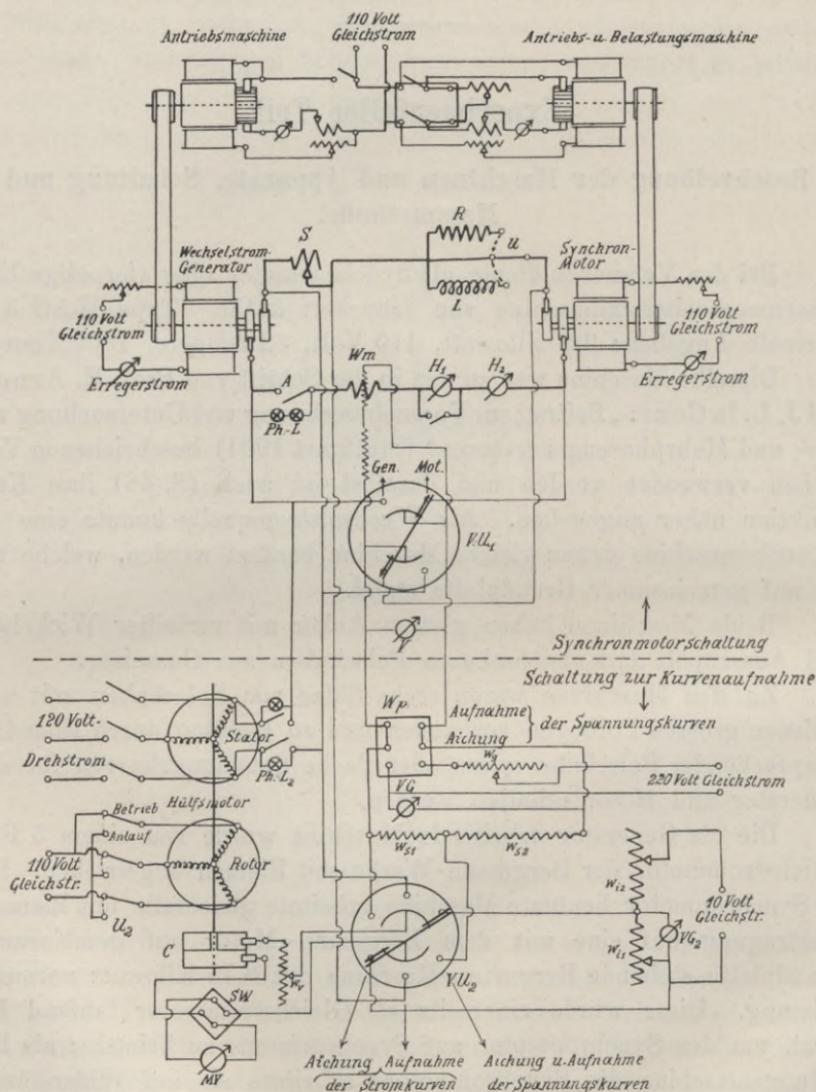
Zu den Maschinen waren sechs Sätze von Polschuhen mit verschieden grossen Polbögen vorhanden und so konnten durch Einsetzen entsprechender Polschuhe spitze oder flache Spannungskurven für den Generator und Motor erhalten werden.

Die als Generator arbeitende Maschine wurde von einem 5 PS.-Gleichstrommotor der Bergmann-Werke mit Riemen angetrieben. Die als Synchronmotor benützte Maschine arbeitete gleichfalls mit Riemenübertragung auf eine mit dem Bergmann-Motor auf gemeinsamer Grundplatte stehende Bergmann-Maschine mit 3,75 Kilowatt normaler Leistung. Diese wurde einerseits als Gleichstrommotor laufend benützt, um den Synchronmotor auf Synchronismus zu bringen; als Belastungsmaschine des Synchronmotors arbeitete sie auf Widerstände.

Die Versuche wurden, wofern nicht die Tourenzahl besonders angegeben ist, mit Rücksicht auf die normale Tourenzahl des Antriebsmotors mit 1600 Touren pro Minute ausgeführt, also wurde mit Wechselströmen von 53,3 Perioden pro Sekunde gearbeitet.

Die gesamte Schaltungsanordnung ist in Fig. 5 gezeichnet.
Die beiden Wechselstrommaschinen wurden mit dem Ausschalter A beim Erlöschen der Phasenlampen Ph.-L. parallel geschaltet. In ihrem

Fig. 5.



Stromkreis lag dann das Wattmeter W_m (Präzisionswattmeter von Siemens & Halske für 25 und 50 Ampère) und die beiden Hitzdrahtampèremeter H_1 und H_2 (von Hartmann & Braun), H_1 für 30 Ampère

mit Kurzschlussvorrichtung und H_2 für 100 Ampère. In demselben Stromkreis lag noch der induktionsfreie Widerstand S , der zur Aufnahme der Stromkurven diente, und mit dem Umschalter U konnte an Stelle eines direkten Leitungsstücks ein induktionsfreier Widerstand R oder ein stark induktiver Widerstand L in den Stromkreis eingeschaltet werden.

Von den Klemmen des Generators und Motors führen Leitungen zu dem Voltmeterumschalter VU_1 , an den das Voltmeter V (Weston-Voltmeter für Gleich- und Wechselstrom, Messbereich 75 und 150 Volt) angeschlossen ist, so dass mit diesem die Generator- und die Motorspannung gemessen werden kann. Gleichzeitig mit dem Voltmeter wird auch die Wattmeter Spannungsspule mit Vorschaltwiderstand an den Generator oder Motor angeschlossen.

Aichung der Instrumente.

Die Ampèremeter und das Voltmeter wurden mit Gleichstrom geaicht durch Vergleichung mit Präzisionsnormalinstrumenten von Siemens & Halske, welche mit dem Kompensator geaicht waren. Bei der Aichung des Voltmeters wurde der Gleichstrom jeweils kommutiert und bei beiden Stromrichtungen abgelesen und aus beiden Ablesungen jeweils der Mittelwert genommen.

Die Aichung, die im Lauf der Versuche mehrmals wiederholt wurde, ergab Uebereinstimmung der Instrumente mit den Normalinstrumenten bis auf $\pm 1/2\%$, und es war daher nicht nötig, die Korrekturen zu berücksichtigen.

Nach der Aichung der Ampèremeter und des Voltmeters wurden dieselben zur Aichung des Wattmeters benützt.

Hierzu konnte die Schaltung (S. 252) direkt benützt werden, nur wurde an Stelle des Synchronmotors ein regulierbarer Glühlampfenwiderstand angeschlossen. So konnte das Wattmeter mit der gleichen Kurvenform und der gleichen Periodenzahl geaicht werden, wie sie bei den Versuchen gebraucht wurde. Es ergaben sich aus der im Lauf der Versuche mehrmals wiederholten Aichung Korrekturen der Wattmeterangaben im Betrage von 1 bis 2%, welche bei den Versuchen jeweils berücksichtigt wurden.

Methode der Kurvenaufnahme und Schaltung hierzu.

Beim Betrieb eines Synchronmotors sind mehr oder weniger starke Pendelungen der Spannung und besonders des Stromes unver-

meidlich. Hierdurch ist die übliche Methode der Aufnahme der Strom- und Spannungskurven mittels Spiegelgalvanometer sehr erschwert und für Aufnahme von Stromkurven wohl ganz unmöglich gemacht.

Es war daher erforderlich, ein weniger empfindliches Instrument zur Kurvenaufnahme zu benützen, und es schien mir gerade für diesen Fall die Anwendung des Gleichstrommillivoltmeters (von Siemens & Halske oder Weston) besonders geeignet. Die Kurvenaufnahme mittels Millivoltmeter ist in Amerika vielfach im Gebrauch; bei uns wird sie dagegen verhältnismässig wenig angewendet; sie ist jedoch besonders für den technischen Gebrauch in Fabriken und elektrischen Zentralen sehr gut geeignet.

Die Schaltungsanordnung ist hierbei sehr vereinfacht gegenüber der sonst gebräuchlichen. Siehe Fig. 5 (S. 252). Der Stromkreis des Millivoltmeters MV (von Siemens & Halske, Widerstand 1Ω , Messbereich 150 Millivolt), das an einen Stromwender SW angeschlossen ist, enthält den synchron rotierenden Kontaktgeber C und einen Regulierwiderstand w_v von ca. 10Ω zum Einstellen eines passenden Ausschlags. Der Kontaktgeber sitzt auf der Welle eines kleinen Synchronmotors (von Siemens & Halske). Dieser läuft von Drehstrom gespeist bei kurzgeschlossenem Rotor zunächst als Asynchrondrehstrommotor an und hierauf wird dem Rotor durch Umlegen des Umschalters U_2 Gleichstrom zugeführt, wobei noch zwei Rotorphasen zur Dämpfung von Pendelungen in sich geschlossen bleiben. Nachdem so der Motor als Drehstromsynchronmotor weiterläuft, werden beim Erlöschen der Phasenlampen $Ph.-L_2$ zwei Phasen des Stators mit dem Wechselstromgenerator parallel und dann der Drehstrom abgeschaltet, worauf der Motor als Wechselstromsynchronmotor weiterläuft und die Kurvenaufnahme erfolgen kann.

Die Schleifbürsten des Kontaktgebers können mittels einer über einem Zahnrad beweglichen Klinke von 5 zu 5° fest eingestellt werden. Im allgemeinen genügte es jedoch, die Kurven von 10 zu 10° aufzunehmen. Der Kontaktgeber erzeugt durch den pro Periode einmal erfolgenden Stromschluss einen konstanten Ausschlag im Millivoltmeter, dessen Grösse durch den Vorschaltwiderstand (w_v) einreguliert werden kann. Die Anwendung eines Kondensators erwies sich als unnötig, da das Millivoltmeter einen ganz ruhigen Ausschlag ergab, wenn man sich mit einem maximalen Ausschlag von ca. 40 Skalenteilen (= Millivolt) begnügte. Bei grösseren Ausschlägen erhält man unsichere Werte, da dann der vom Kontaktgeber unterbrochene Strom zu stark wird.

Die Kurven lassen sich jedoch schon bei einem Maximalwert von 30 Skalenteilen mit genügender Genauigkeit aufnehmen.

Auf einen guten Zustand des Kontaktgebers ist besonders Wert zu legen, da beim Auftreten von Fünkchen an demselben keine guten Resultate mehr erhalten werden.

Aus diesem Grunde kann man auch nicht bei der Aufnahme von Spannungskurven am Kontaktgeber die ganze Spannung unterbrechen, sondern muss dieselbe durch Widerstände teilen, wie in der Schaltungsskizze Fig. 5 angegeben. Vom Voltmeterumschalter $V U_1$ wird die aufzunehmende Spannung abgenommen und über die Wippe W_p an die Klemmen von zwei hintereinandergeschalteten induktionsfreien Widerständen w_{s_1} und w_{s_2} von ca. 10 bzw. 110 Ω geführt, und die Spannung am kleineren Widerstand wird über den Voltmeterumschalter $V U_2$ dem Kontaktgeberstromkreis zugeleitet. So wird nur eine Spannung von ca. 10 Volt unterbrochen, wenn die aufzunehmende Spannung am Generator oder Motor 120 Volt beträgt.

Da die Widerstände zur Spannungsteilung Eisenkonstruktions- teile enthielten, wurden sie mit Gleichstrom und Wechselstrom unter Benützung der gleichen Hitzdrahtinstrumente gemessen und ergaben übereinstimmende Werte des Widerstands, waren also induktionsfrei.

Die Stromkurven ergaben sich aus der Aufnahme der Kurvenform der Spannung an dem im Hauptstromkreis eingeschalteten Starkstromwiderstand S , von dem zwei Zuleitungen nach dem Voltmeterumschalter $V U_2$ führen. Der Widerstand S ist regulierbar und wurde im Bereiche von 0,05 bis 0,16 Ω benützt. Es wurde gleichfalls die Induktionsfreiheit des Widerstands durch Messung desselben mit Gleichstrom und Wechselstrom konstatiert.

Aichung zur Aufnahme von Spannungskurven.

Um die Spannungskurven in absoluten Werten zu erhalten, wurde das zur Kurvenaufnahme dienende Instrument unter Benützung von Gleichstrom geaicht. An Stelle der aufzunehmenden Wechselstromspannung wurde durch Umlegen der Wippe W_p eine durch den regulierbaren Vorschaltwiderstand w_g veränderliche Gleichstromspannung von maximal 220 Volt an die zur Spannungsteilung dienenden Widerstände w_s gelegt.

Die mit dem Präzisionsvoltmeter für Gleichstrom $V G_1$ gemessene Gleichstromspannung $E=$ wurde mit dem Ausschlag des Millivoltmeters α verglichen, wobei der Kontaktgeber dieselbe Tourenzahl hatte wie bei der Aufnahme der zu aichenden Kurve.

Tabelle 1.

Aichung des Millivoltmeters MV zur Kurvenaufnahme von Spannungen.

α	$E_{=}$	$c = \frac{E_{=}}{\alpha}$
5,5	24,4	4,45
10,2	42,0	4,1
15,3	61,6	4,05
20,4	80,0	3,9
25,2	96,5	3,85
30,2	115,0	3,8
34,7	129,5	3,75
41,0	149,0	3,65

In Tabelle 1 sind die Werte einer solchen Aichung eingetragen. Wie sich aus den Werten von $c = \frac{E_{=}}{\alpha}$ für die Ausschläge von 5 bis 40 Skalenteilen ergibt, besteht zwischen dem Ausschlag α und der Spannung keine direkte Proportionalität, sondern die Konstante c nimmt mit wachsendem Ausschlag um ca. 20 % ab. Dies Verhalten scheint mit dem Uebergangswiderstand der Schleifbürsten des Kontaktgebers zusammenzuhängen, da die Abnahme der Konstanten je nach dem Zustand des Kontaktgebers verschieden gross war. Es wurde daher vor und nach jeder Messungsreihe von gleichzeitig aufgenommenen Kurven die Aichung vorgenommen und kontrolliert, die erhaltenen Werte in eine Aichungskurve eingetragen und aus dieser die Spannungen zu den aufgenommenen Ausschlägen für die betreffende Messungsreihe entnommen.

Aichung zur Aufnahme von Stromkurven.

Für die Aufnahme der Stromkurven begnügte ich mich mit relativen Werten. Die Aichung musste jedoch auch hier vorgenommen werden wegen der Veränderlichkeit der Konstanten mit wachsendem Ausschlag und es zeigte sich, dass diese Veränderlichkeit hier eine andere und zwar geringere war wie bei der Aufnahme der Spannungskurven. Zur Aichung wurde durch die hintereinandergeschalteten Widerstände w_{i_1} und w_{i_2} (Fig. 5) ein Gleichstrom von veränderlicher Stärke bis zu dem Maximalwert des aufgenommenen Stromes geschickt. Die Spannung E_i an den Klemmen des Widerstands w_{i_1} , welcher annähernd so gross wie der Widerstand S war, wurde mit dem Gleich-

strompräzisionsvoltmeter $V G_2$ gemessen und über den Voltmeterumschalter $V U_2$ nach dem Kontaktgeberstromkreis geleitet und hier der Ausschlag α des Millivoltmeters MV beobachtet, wobei der Kontaktgeber dieselbe Tourenzahl hatte wie bei der Kurvenaufnahme.

Aus Tabelle 2 ist eine solche Aichung zu ersehen. Die Konstante $c = \frac{E_i}{\alpha}$ nimmt hier nur um ca. 6% ab, wenn der Ausschlag α von 5 auf 35 Skalenteile steigt. Ebenso wie für die Spannungskurven wurde auch für die Stromkurven die Aichung für jede Reihe von gleichzeitig aufgenommenen Kurven neu vorgenommen und in eine Aichungskurve eingetragen.

Tabelle 2.

Aichung des Millivoltmeters MV zur Kurvenaufnahme von Strömen.

α	E_i	$c = \frac{E_i}{\alpha}$
5,2	0,42	0,081
10,5	0,83	0,079
15,5	1,2	0,078
21,0	1,62	0,077
25,0	1,92	0,077
31,0	2,37	0,076
35,0	2,67	0,076

Für die bei der betreffenden Messungsreihe erhaltenen Ausschläge α wurden die entsprechenden Werte aus der Aichungskurve entnommen und dann dieselben noch so reduziert, dass die Maximalwerte aller Stromkurven zum besseren Vergleich derselben = 80 wurden.

Erste Versuchsreihe.

Uebereinstimmende Kurvenform von Generator- und Motorspannung.

Bei der ersten Versuchsreihe hatten Generator und Motor gleiche Polschuhe von dem normalen Polbogen $b = 120$ mm mit nicht abgerundeten Ecken (3b bezeichnet in dem oben citierten Buch von Arnold und La Cour).

Hiernach mussten auch Generator und Motor gleiche Kurvenform der Spannung haben, was auch durch die Aufnahme beider Kurvenformen bei Leerlauf und 120 Volt bestätigt wurde. Siehe die Kurven in Fig. 6.

Für die Kurvenform der Spannung der bei den Versuchen als Synchronmotor laufenden Maschine ist die Analyse in Tabelle 3 als Beispiel vollständig eingetragen und ergibt als Gleichung dieser Kurve

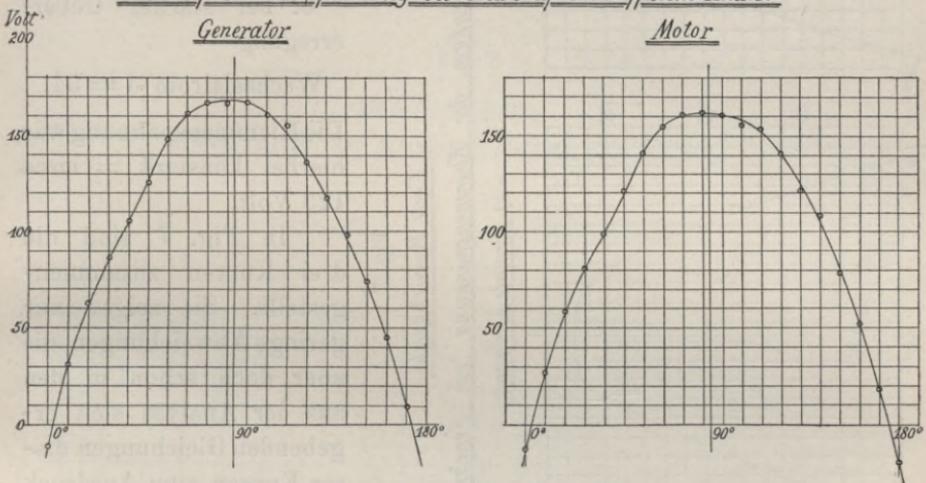
$$e = 169 \sin x + 7,3 \sin 3x + 2,4 \sin (5x + 63^\circ 30')$$

Die fünfte Harmonische ist, wie auch die noch höheren, schon kleiner als 2% der Grundwelle und kann daher weiterhin vernachlässigt werden.

Fig. 6.

Erste Versuchsreihe.

Kurvenform der Spannung bei Leerlauf und offenem Anker.



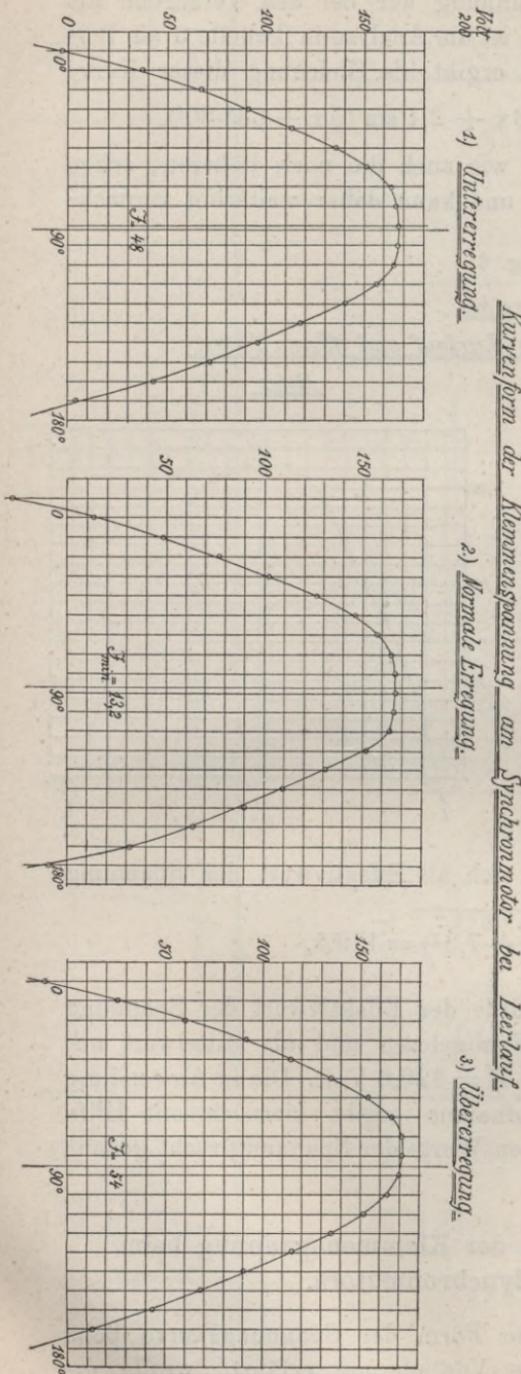
Aus dieser Gleichung ergibt sich als Effektivwert der Spannung

$$E = \sqrt{\frac{1}{2} (169^2 + 7,3^2)} = 119,5.$$

Während der Kurvenaufnahme wurde der Effektivwert der Spannung bei jedem Punkt am Voltmeter V abgelesen und als Mittelwert aus sämtlichen Ablesungen ergab sich $E = 120,2$ Volt. Die in Anwendung gebrachte Methode der Kurvenaufnahme ergibt hiernach mit Hilfe der Aichung auch für die absoluten Werte der Spannung recht genaue Resultate.

Aufnahme der Kurvenform der Klemmenspannung beim Betrieb des Synchronmotors.

Um zu untersuchen, ob die Form der Spannungskurve beim Betrieb des Synchronmotors eine Veränderung erfährt, wurde die



Kurvenform der Klemmenspannung bei leerlaufendem Synchronmotor aufgenommen:

1. bei starker Unterregung

Wechselstrom $J = 48$,

2. beim Minimalstrom

Wechselstrom $J = 13,2$,

3. bei starker Ueberregung

Wechselstrom $J = 54$.

Die Klemmenspannung war hierbei konstant = circa 123 Volt.

Fig. 7.

In Fig. 7 sind die drei Kurven zusammengestellt. Sie zeigen nur geringe Abweichungen, die aber doch schon in den aus der Analyse sich ergebenden Gleichungen dieser Kurven zum Ausdruck kommen. Diese sind:

1. $e = 175 \sin x + 4,9 \sin 3x$,
2. $e = 176,5 \sin x + 8,1 \sin 3x$,
3. $e = 176 \sin x + 4,2 \sin (3x - 84^\circ)$.

Für Minimalstrom (2.) stimmt die Gleichung fast überein mit der bei Leerlauf als Generator erhaltenen (S. 259), wenn man auf den Effektivwert 120 Volt reduziert. Bei

Untererregung (1.) wird die dritte Harmonische schwächer; ebenso auch bei Uebererregung (3.) und hier erhält sie ausserdem noch eine Phasenverschiebung von fast 90° gegenüber der Grundwelle.

Aufnahme der Stromkurven.

I. Bei direktem Betrieb.

Bei direktem Betrieb waren zwischen Generator und Motor nur die Messinstrumente und der zur Aufnahme der Stromkurven dienende Widerstand S geschaltet. Letzterer betrug hierbei ca. $0,05 \Omega$.

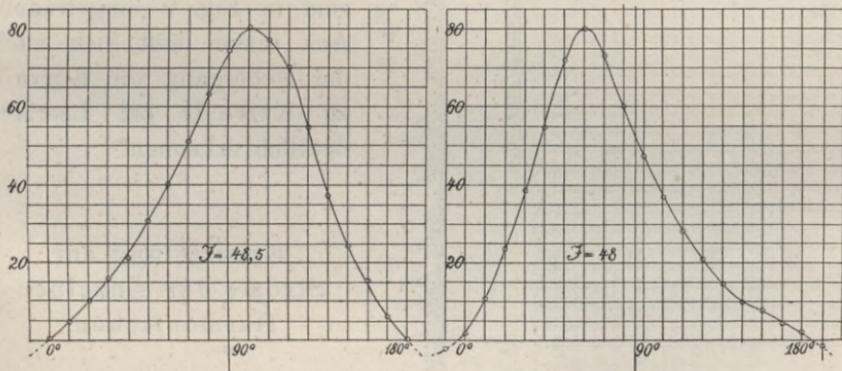
Fig. 8.

Erste Versuchsreihe.

Stromkurven bei direktem Betrieb und Leerlauf.

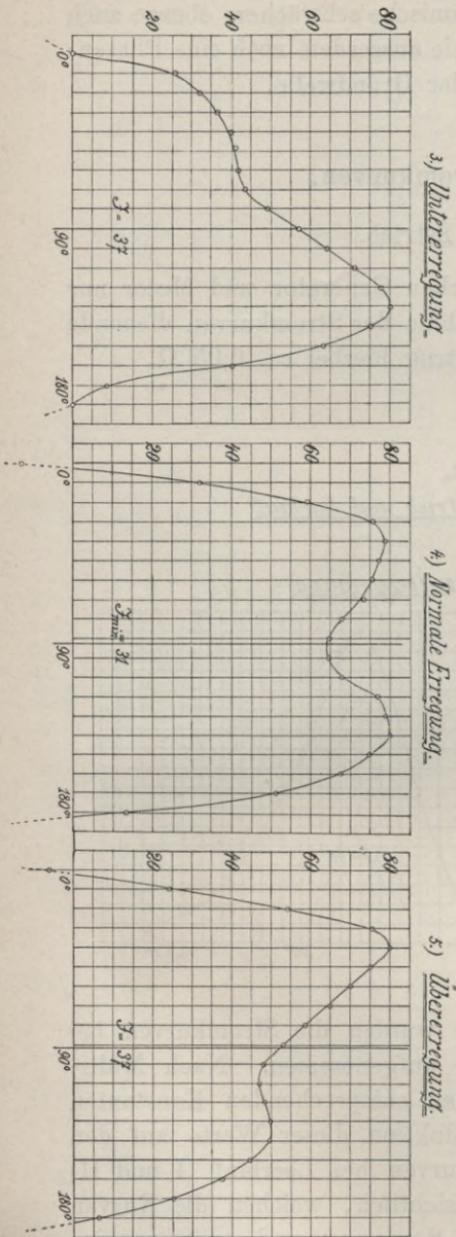
1) Untererregung.

2) Übererregung.



Bei leerlaufendem Synchronmotor wurden die Stromkurven bei Uebererregung und bei Untererregung aufgenommen. Nach Multiplikation der Einzelwerte mit der ihnen entsprechenden Konstanten (mit Hilfe der Aichungskurve) und Reduktion dieser Werte auf den Maximalwert 80 mm sind die Stromkurven bei Leerlauf (I und II) in Fig. 8 eingetragen. Wie hieraus ersichtlich, weichen die Kurven beträchtlich von der Kurvenform der Spannung und auch voneinander ab.

Besonders interessant wäre es gewesen, aus der Kurvenform des Minimalstroms bei Leerlauf den Uebergang von Kurve I zu Kurve II zu ersehen. Jedoch konnte diese Kurve hier leider nicht aufgenommen



Erste Versuchsreihe.

Stromkurven bei direktem Betrieb und Belastung.

Fig. 9.

werden, weil sich wegen Auftretens von Pendelungen der Minimalstrom nicht dauernd konstant halten liess. Bei Unter- und Uebererregung und bei Belastung auch bei Minimalstrom konnten diese Pendelungen vermieden werden. Statt des Minimalstroms bei Leerlauf wurde daher bei einer konstant gehaltenen Belastung des Synchronmotors die Kurvenform des Minimalstroms und des Stroms bei zwei benachbarten Erregungen aufgenommen. Diese Kurven (III, IV, V) sind in Fig. 9 eingetragen. Aus ihnen lässt sich auch der Uebergang von Kurve I zu Kurve II bei Leerlauf deutlich erkennen.

Ermittlung der Ströme der einzelnen Harmonischen.

Für die weitere Untersuchung der verschiedenen Stromkurven ist die Analyse derselben erforderlich, die für sämtliche ebenso, wie in dem Beispiel S. 258 gezeigt, durchgeführt wurde.

Der Gang der weiteren Untersuchung soll hier all-

gemein und an dem Beispiel der Kurve V angegeben werden. Die entsprechenden Werte für die übrigen Kurven sind aus Tabelle 4 (S. 269) zu entnehmen.

Kurve V wurde aufgenommen bei: $J_e = 1,95$ Ampère Erregung,
 Spannung am Motor . . . $E = 119$ Volt,
 Wechselstrom $J = 37$ Ampère,
 Zugeführte Leistung $P = 3600$ Watt.

Hieraus der Leistungsfaktor $\cos \varphi = \frac{P}{E \cdot J} = 0,817,$
 $\varphi = 35^\circ 10'.$

Die Analyse der Stromkurven ergibt für dieselben allgemein die Gleichung:

$$y = a_1 \sin x' + a_3 \sin 3x' + a_5 \sin 5x' + \dots$$

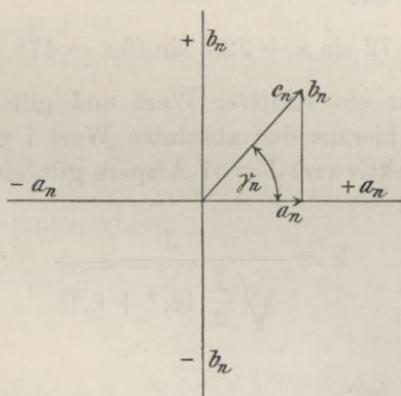
$$+ b_1 \cos x' + b_3 \cos 3x' + b_5 \cos 5x' + \dots$$

Für Kurve V:

$$y = 70,8 \sin x' + 21,4 \sin 3x' + 3,2 \sin 5x'$$

$$+ 13,2 \cos x' - 6,2 \cos 3x' - 3,2 \cos 5x'.$$

Fig. 10.



Die Sinus- und Cosinusglieder gleich hoher Harmonischer lassen sich vereinigen nach der Formel:

$$a_n \cdot \sin nx' + b_n \cos nx' = c_n \sin (nx' + \gamma_n),$$

worin $c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$ und $\text{tg } \gamma_n = \frac{b_n}{a_n},$

Hierbei ist:

- $\gamma_n = 0$ bis 90° , wenn $a_n > 0$ und $b_n > 0$
- $\gamma_n = 90^\circ$ „ 180° , „ $a_n < 0$ „ $b_n > 0$
- $\gamma_n = 0$ „ -90° , „ $a_n > 0$ „ $b_n < 0$
- $\gamma_n = -90^\circ$ „ -180° , „ $a_n < 0$ „ $b_n < 0$,

wie sich aus obenstehendem Koordinatensystem (Fig. 10) ergibt.

So wird allgemein die Kurvengleichung erhalten:

$$y = c_1 \sin(x' + \gamma_1) + c_3 \sin(3x' + \gamma_3) + c_5 \sin(5x' + \gamma_5) + \dots$$

Für Kurve V:

$$y = 72 \sin(x' + 10^\circ 30') + 22,3 \sin(3x' - 16^\circ 10') + 4,5 \sin(5x' - 45^\circ).$$

Die fünfte Harmonische kann bei dieser Versuchsreihe ebenso wie die noch höheren weiterhin vernachlässigt werden, da sie auch in der Spannungskurve vernachlässigt wird.

Der übrigbleibende Ausdruck wird nun so umgeformt, dass für $x = 0$ der Momentanwert des Grundtons auch zu 0 wird, und so wird erhalten, wenn man $x' + \gamma_1 = x$, bezw. $x' = x - \gamma_1$ setzt:

$$y = c_1 \sin x + c_3 \sin(3x + \alpha_3),$$

wobei $\alpha_3 = \gamma_3 - 3\gamma_1$ die Phasenverschiebung der dritten Harmonischen des Stroms gegenüber der Grundwelle ist.

Für Kurve V ist:

$$y = 72 \sin x + 22,3 \sin(3x - 47^\circ 40').$$

Der Wert y ist nur ein relativer Wert und gilt für den Maximalwert 80 mm. Um hieraus den absoluten Wert i zu erhalten, der für den gemessenen Effektivwert $J = 37$ Ampère gilt, sind die Amplituden c mit dem Verhältnis

$$k = \frac{J}{\sqrt{\frac{1}{2}(c_1^2 + c_3^2)}}$$

zu multiplizieren.

Für Kurve V ist:

$$\sqrt{\frac{1}{2}(c_1^2 + c_3^2)} = 53,3, \quad k = \frac{37}{53,3} = 0,693.$$

So wird erhalten:

$$\text{allgemein: } i = i_1 \sin x + i_3 \sin(3x + \alpha_3),$$

$$\text{für Kurve V: } i = 50 \sin x + 15,5 \sin(3x - 47^\circ 40').$$

Der Effektivwert der ersten Harmonischen ist $J_1 = \frac{i_1}{\sqrt{2}} = 35,3$ Amp.

„ „ „ dritten „ „ $J_3 = \frac{i_3}{\sqrt{2}} = 11$ Amp.

Ermittlung der Phasenverschiebungen und Leistungen der einzelnen Harmonischen.

Die eben vorgenommene Umformung der Gleichung der Stromkurven hatte den Zweck, auch die Leistungen und Phasenverschiebungen der einzelnen Harmonischen auf möglichst einfache Weise ermitteln zu können. Man kann hierzu auf zwei verschiedenen Wegen gelangen.

I. Methode. Die erste Methode kann als wattmetrische bezeichnet werden. Dieselbe ergibt die Einzelleistungen und -phasenverschiebungen mit Hilfe der mit dem Wattmeter gemessenen gesamten zugeführten Leistung P.

Wenn die Grundwelle des Stromes der Grundwelle der Spannung um den Winkel φ_1 nach- bzw. voreilt, ist die Gleichung der Spannungskurve:

$$e = e_1 \sin(x \pm \varphi_1) + e_3 \sin(3x \pm 3\varphi_1 + \lambda_3),$$

wenn λ_3 die Phasenverschiebung zwischen Grundwelle und dritter Harmonischen der Spannung ist.

Für Kurve V ist bei $E = 119$ Volt nach Gleichung (S. 259) $\lambda_3 = 0$ und

$$e = 168,5 \sin(x - \varphi_1) + 7,2 \sin(3x - 3\varphi_1),$$

da wir hier Voreilung des Stromes haben.

Die zugeführte Leistung ergibt sich so aus der Gleichung der Strom- und der Spannungskurve:

$$P = \frac{e_1 i_1}{2} \cos \varphi_1 + \frac{e_3 i_3}{2} \cos(\pm 3\varphi_1 + \lambda_3 - \alpha_3).$$

Für Kurve V:

$$P = \frac{168,5 \cdot 50}{2} \cos \varphi_1 + \frac{7,2 \cdot 15,5}{2} \cos(-3\varphi_1 + 47^\circ 40'),$$

$$3600 = 4210 \cos \varphi_1 + 56 \cos(3\varphi_1 - 47^\circ 40'),$$

da $P = 3600$ mit Wattmeter gemessen wurde.

Durch Auflösung dieser Gleichung liesse sich φ_1 erhalten. Während jedoch die exakte Auflösung sehr kompliziert ist, kommt man mit einem Näherungsverfahren viel rascher zum Ziel.

Das Glied der dritten Harmonischen ist in der Gleichung für P gegenüber den beiden anderen sehr klein, und der Winkel φ_1 ist im allgemeinen nicht sehr stark von dem aus $\cos \varphi = \frac{P}{E \cdot J}$ erhaltenen Werte φ verschieden. Es kann daher näherungsweise im Glied der

dritten Harmonischen für φ_1 der Wert φ eingesetzt werden und so ergibt sich durch Auflösung der obigen Gleichung:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P - \frac{e_3 i_3}{2} \cdot \cos (\pm 3 \varphi + \lambda_3 - \alpha_3)}{\frac{e_1 i_1}{2}},$$

$$\cos \varphi_1 = \frac{3600 - 56 \cos (3 \cdot 35^\circ 10' - 47^\circ 40')}{4210} = \frac{3600 - 56 \cdot \cos 57^\circ 50'}{4210},$$

$$\cos \varphi_1 = 0,848, \quad \varphi_1 = 32^\circ.$$

Da bei Einsetzung dieses Wertes φ_1 statt φ in das Glied der dritten Harmonischen dasselbe sich nur wenig (hier von 30 auf 37 Watt) ändert, so ist diese erste Annäherung meist schon genügend genau zur Ermittlung von φ_1 . Anderenfalls kann dasselbe Verfahren noch einmal wiederholt werden, wobei statt φ der eben erhaltene Wert φ_1 in das Glied der dritten Harmonischen eingesetzt wird. Man kommt dann dem wahren Wert von φ_1 noch näher.

Aus dem auf diese Weise berechneten Wert von φ_1 , der Phasenverschiebung der Grundwelle, ergibt sich die Phasenverschiebung der dritten Harmonischen:

$$\varphi_3 = \pm 3 \varphi_1 + \lambda_3 - \alpha_3 = 48^\circ 20' \text{ (für Kurve V).}$$

Die Gesamtleistung $P = 3600$ setzt sich aus den Einzelleistungen der Grundwelle $P_1 = 3563$ und der dritten Harmonischen $P_3 = 37$ Watt zusammen, wird also bis auf 1 % nur von der Grundwelle geliefert, obwohl im Effektivwert des Stromes ein Strom höherer Harmonischer von 30 % des Effektivwertes enthalten ist.

II. Methode. Die zweite Methode zur Ermittlung der Einzelleistungen und -phasenverschiebungen ist mehr experimentell und benützt die bei der Aufnahme der Spannungs- und Stromkurven an der Kreisteilung des Kontaktapparats abgelesenen absoluten Werte der Winkelgrade.

Dies Verfahren ist nur dann ganz einwandfrei, wenn der Kontaktgeber zwangsläufig mit der Maschine, deren Kurven aufgenommen werden sollen, gekuppelt ist. Bei elektrischer Kuppelung des Kontaktgebers mittels Hilfsynchronmotor kann bei verschiedener Erregung des Synchronmotors die aufzunehmende Kurve auf der Gradteilung etwas verschoben werden. Da jedoch der für den Kontaktgeber benützte Synchronmotor als asynchroner Motor gebaut ist und infolgedessen grosse Reaktanz hat, so ist seine Phasenverschiebung von der Erregung

nur wenig abhängig, und ich konnte konstatieren, dass bei kleinen Veränderungen der Erregung die Lage der aufzunehmenden Kurve auf der Gradteilung unverändert blieb.

Nach Aufzeichnung der aufgenommenen Spannungs- und Stromkurven mit den absoluten auf der Gradteilung abgelesenen Werten als Abscissen ergibt sich hieraus der Nullpunkt der Spannungskurve bei 210° , der Nullpunkt der Stromkurve (V) bei 192° . Aus der Analyse der Spannungskurve ergab sich, dass die erste und dritte Harmonische keine Phasenverschiebung gegeneinander haben, also der Nullpunkt der aufgenommenen Kurve mit dem Nullpunkt der Grundwelle und der dritten Harmonischen zusammenfällt.

Für die Stromkurve hatte sich die Gleichung herausgestellt:

$$y = 72 \sin(x + 10^\circ 30') + 22,3 \sin(3x - 16^\circ 10').$$

Wenn der Nullpunkt der Stromkurve bei 192° liegt, so besagt diese Gleichung, dass der Nullpunkt der Grundwelle schon bei

$$192^\circ - 10^\circ 30' = 181^\circ 30'$$

und der Nullpunkt der dritten Harmonischen bei

$$192^\circ + \frac{16^\circ 10'}{3} = 197^\circ 20'$$

liegen muss. So ergeben sich die Phasenverschiebungen

$$\varphi_1 = 210^\circ - 181^\circ 30' = 28^\circ 30',$$

$$\varphi_3 = (210^\circ - 197^\circ 20') \cdot 3 = 3 \cdot 12^\circ 40' = 38^\circ,$$

gegenüber $\varphi_1 = 32^\circ$ und $\varphi_3 = 48^\circ 20'$ bei der ersten Methode.

Die Leistung P kann aus den oben ermittelten Produkten von Strom und Spannung der einzelnen Harmonischen und den hier erhaltenen Phasenverschiebungen ganz ohne Wattmeter bestimmt werden. Es ist (nach S. 265)

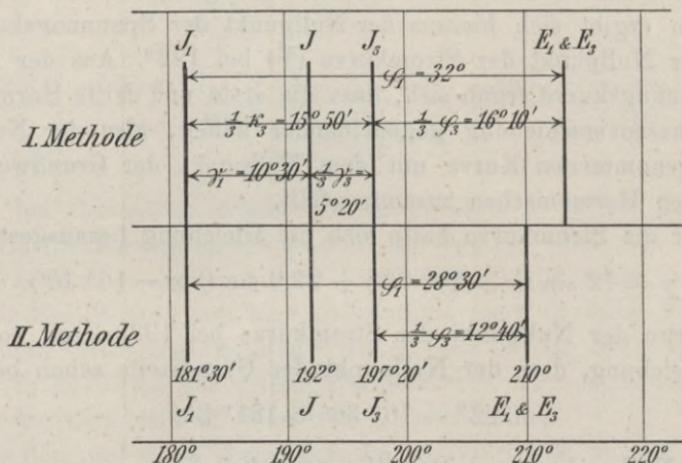
$$\begin{aligned} P &= 4210 \cos \varphi_1 + 56 \cos \varphi_3 \\ &= 4210 \cos 28^\circ 30' + 56 \cos 38^\circ \\ &= 3700 + 44 = 3744. \quad (\text{Gemessen: } 3600.) \end{aligned}$$

Diese Bestimmung der Leistung ist natürlich nicht genau, aber hier z. B. immerhin bis auf 4% richtig.

Wie ersichtlich, stimmen die Ergebnisse der zweiten Methode annähernd mit denen der ersten überein. Die einzelnen Phasenverschiebungen können durch graphische Darstellung deutlicher zum Ausdruck gebracht werden (Fig. 11).

Bei den Untersuchungen der ersten Versuchsreihe wurde zur Ermittlung der Phasenverschiebungen die erste (wattmetrische) Methode angewandt. Bei einer späteren Versuchsreihe, bei der kompliziertere

Fig. 11.



Verhältnisse in den Phasenverschiebungen auftraten, wurde dagegen der zweiten Methode wegen ihrer besseren Uebersichtlichkeit der Vorzug gegeben.

Zusammenstellung der Ergebnisse der ersten Versuchsreihe bei direktem Betrieb.

In der vorstehend erläuterten Weise wurden die fünf aufgenommenen Stromkurven sämtlich untersucht, und die Ergebnisse der Untersuchung sind in Tabelle 4 (S. 269) zusammengestellt. Aus dieser lässt sich folgendes entnehmen:

Der Strom der höheren Harmonischen, der hier fast ausschliesslich aus der dritten Harmonischen besteht, ist bei Leerlauf und Belastung annähernd derselbe, sein Effektivwert durchweg = ca. $10 \infty 11$ Ampère, nur bei Uebererregung und Leerlauf wächst er auf 15 Ampère an.

Die Phasenverschiebung des Stromes der dritten Harmonischen variiert zusammen mit der der Grundwelle und ist hier annähernd dieser gleich, sowohl bei Voreilung als auch bei Nacheilung des Stromes vor der Spannung. Die Ströme der ersten und der dritten Harmonischen liegen also jeweils auf annähernd dem gleichen Teil der V-Kurve, was auch zu erwarten war, da in der Klemmenspannung

Tabelle 4.

Ergebnisse der ersten Versuchsreihe bei direktem Betrieb.

	Leerlauf		Belastung			$\cos \varphi = 0$
J_e	1,33	2,39	1,6	1,82	1,95	1,33/2,35
E	120	120	120	120	119	120
J	48,5	48	37	31	37	47
P	1560	1660	3560	3520	3600	0
$\cos \varphi$	0,268	0,288	0,801	0,945	0,817	0
φ	74° 30'	— 73° 20'	36° 50'	— 19°	— 35° 10'	90°
c_1	63	55,5	70,4	89,8	72	60
c_3	14,9	18,4	20,1	29,8	22,3	15,9
c_5	2,7	4,6	2,9	6	4,5	2,4
γ_1	— 7°	16° 20'	— 9° 10'	0°	10° 30'	5° 50'
γ_3	139° 20'	— 105° 10'	45° 20'	0°	— 16° 10'	— 153°
γ_5	— 90°	151° 10'	90°	— 4° 50'	— 45°	41° 40'
α_3	160° 20'	— 154° 10'	72° 50'	0°	— 47° 40'	— 170° 30'
J_1	47,2	45,6	35,6	29,5	35,3	45,5
J_3	11,2	15,1	10,2	9,8	11	12
$\cos \varphi_1$	0,272	0,297	0,821	0,983	0,848	0
$\varphi_1^1)$	74° 10'	— 72° 40'	34° 50'	— 10° 30'	— 32°	— 90°
$\varphi_3^1)$	62° 20'	— 63° 50'	31° 40'	— 31° 30'	— 48° 20'	— 80° 30'
P_1	1533	1625	3515	3478	3563	0
P_3	27	35	45	42	37	0
Kurve Nr.	I	II	III	IV	V	

und in der elektromotorischen Kraft die Grundwelle und die dritte Harmonische miteinander in Phase sind.

Die Leistung der dritten Harmonischen ist annähernd konstant und beträgt bei den Leerlaufversuchen ca. 2%, bei den Belastungsversuchen nur ca. 1% der gesamten zugeführten Leistung.

Die Phasenverschiebung der Grundwelle φ_1 stimmt um so besser mit der gemessenen scheinbaren Phasenverschiebung φ überein, je grösser dieselbe ist, da bei grossen Phasenverschiebungen der Strom der höheren Harmonischen von geringerem Einfluss auf die Grösse des Gesamtstroms ist.

1) + bedeutet Nacheilung des Stromes, — bedeutet Voreilung des Stromes.
Sammlung elektrotechnischer Vorträge. V. 18

Ermittlung des Stromes der höheren Harmonischen nach der angenäherten Methode.

Mit den Ergebnissen vorstehender Untersuchung sind nun die Resultate zu vergleichen, die für den Strom der höheren Harmonischen nach der auf S. 246 f. beschriebenen angenäherten Methode erhalten werden.

Dieser Methode liegen die Annahmen zu Grunde, dass der Effektivwert der Grundwelle der Spannung gleich dem gesamten Effektivwert gesetzt werden kann, und dass die gesamte zugeführte Leistung von der Grundwelle geliefert wird.

Wie sich aus der Kurvenaufnahme ergibt, trifft die erstere Annahme bis auf 1 0/0 Unterschied zu, die letztere bis auf $1 \approx 2\%$. Es sind also beide Annahmen zulässig.

Der Minimalstrom J_{\min} und die bei demselben zugeführte Leistung P wurde bei Leerlauf und drei verschiedenen Belastungen aufgenommen und nach der oben abgeleiteten Formel ist aus J_{\min} und

$$(\cos \varphi)_{\max} = \frac{P}{E \cdot J_{\min}} \text{ der Strom der höheren Harmonischen}$$

$$J_n = J_{\min} \sqrt{1 - (\cos \varphi)_{\max}^2}$$

berechnet.

Tabelle 5.

Ermittlung von J_n bei direktem Betrieb nach der angenäherten Methode.

J_e	E	J_{\min}	P	$(\cos \varphi)_{\max}$	J_n
1,73	120,3	13,6	1060	0,648	10,3
1,78	120	23,3	2440	0,873	11,3
1,78	120,8	27,2	3040	0,927	10,3
1,72	119,3	32	3620	0,948	10,2

Die aus Tabelle 5 zu ersiehenden Werte von J_n stimmen gut mit den aus der Kurvenaufnahme erhaltenen überein und auch hier zeigt sich die Unabhängigkeit des Stroms der höheren Harmonischen von der Belastung.

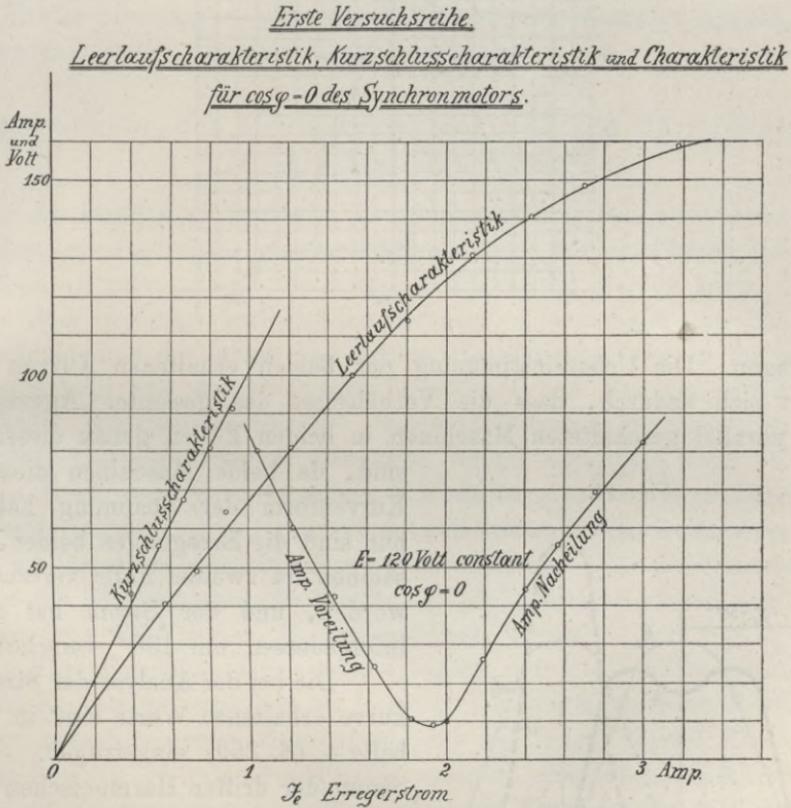
Verhalten bei $\cos \varphi = 0$.

In der auf S. 248 f. bereits beschriebenen Weise wurde die Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ bei konstanter Spannung $E = 120$ Volt aufgenommen. Dieselbe ist in Fig. 12 eingetragen und ergibt, wie

hieraus zu ersehen ist, einen Minimalstrom von 9 Ampère. Dieser Strom ist als Strom der höheren Harmonischen bei $\cos \varphi = 0$ zu bezeichnen, da der Strom der Grundwelle für einen Punkt der Charakteristik $\cos \varphi = 0$ nahezu verschwinden muss.

Wegen der Pendelungen des Minimalstroms gelang es bei dieser Aufnahme nicht, die Kurvenform desselben aufzunehmen; der ex-

Fig. 12.

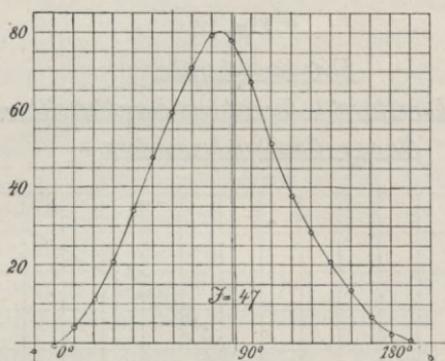


perimentelle Beweis, dass dieser Strom nur aus höheren Harmonischen besteht, wird bei einer weiter unten folgenden Aufnahme erbracht werden.

Dagegen wurde hier bei $\cos \varphi = 0$ und $E = 120$ Volt die Kurvenform des Stromes $J = 47$ Ampère aufgenommen und zwar sowohl bei Untererregung ($J_0 = 1,33$) der Versuchsmaschine wie bei Uebererregung ($J_0 = 2,35$) derselben. Die Werte beider Kurven stimmten sowohl ihrer Phase als auch ihrer absoluten Grösse nach fast genau

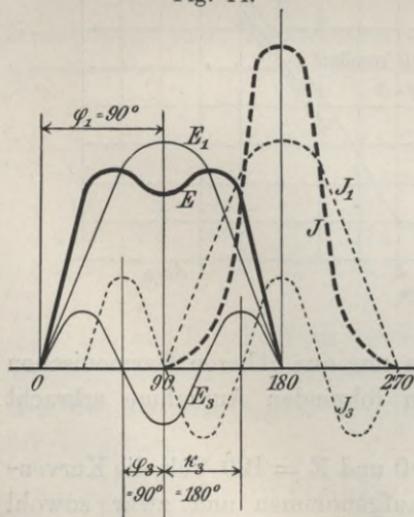
überein und es wurde daher für die weitere Untersuchung das Mittel aus beiden Kurven genommen, und diese Kurve ist in Fig. 13 ein-

Fig. 13.

Erste Versuchsreihe.Stromkurve bei direktem Betrieb und $\cos \varphi = 0$ 

getragen. Die Übereinstimmung der beiden erhaltenen Kurven erklärt sich dadurch, dass die Verhältnisse des gesamten Aggregats der parallel geschalteten Maschinen in beiden Fällen genau dieselben sind, da beide Maschinen dieselbe Kurvenform der Spannung haben; nur sind die Erregungen beider Maschinen im zweiten Falle vertauscht worden, und der Strom hat sich infolgedessen um 180° verschoben.

Fig. 14.



Die bei der Analyse der Stromkurve erhaltenen Werte sind in Tabelle 4 (S. 269) eingetragen. Der Strom der dritten Harmonischen beträgt 12 Ampère und ist also etwas grösser als der Strom der höheren Harmonischen, der sich aus dem Minimalstrom bei $\cos \varphi = 0$ ergeben hatte, stimmt dagegen mit den anderen Werten von J_3 in der Tabelle besser überein.

Die Verschiebung des Nulldurchgangs der dritten Harmonischen gegenüber der Grundwelle ist $\alpha_3 = -170^\circ 30'$, also nahezu 180° .

Letzterer Wert muss erhalten werden, wenn sowohl Grundwelle wie dritte Harmonische des Stroms eine Phasenverschiebung von 90° gegenüber ihren Spannungen haben, welche in Phase sind. Aus Fig. 14 ist dies deutlich zu ersehen.

Haben Generator und Motor gleiche Spannungskurven und ist in derselben ein positiver dritter Oberton vorhanden, der mit der Grundwelle der Spannung in Phase ist, so erzeugt derselbe bei starken Phasenverschiebungen und bei $\cos \varphi = 0$ einen negativen dritten Oberton in der Stromkurve, und man erhält aus einer stumpfen Spannungskurve eine spitze Stromkurve und umgekehrt.

Untersuchung des Stromkreises der höheren Harmonischen mittels des Diagramms.

An Hand der bisherigen Versuchsergebnisse soll nun untersucht werden, ob das Synchronmotordiagramm auch für die höheren Harmonischen — hier speziell die dritte — angewandt werden kann.

Aus den nun vorliegenden Strömen, Spannungen und Phasenverschiebungen der ersten und dritten Harmonischen wurde für jeden untersuchten Fall das Diagramm gezeichnet und aus demselben die Reaktanz des Stromkreises der ersten und dritten Harmonischen ermittelt. Die zu dieser Konstruktion nötige sekundäre elektromotorische Kraft des Synchronmotors E_m ergibt sich aus dem Erregerstrom J_e und der in Fig. 12 (S. 271) eingetragenen Leerlaufcharakteristik des als Generator leerlaufenden Synchronmotors. Für die Grundwelle kann die elektromotorische Kraft E_{m_1} als übereinstimmend mit dem gemessenen Effektivwert E_m angenommen werden.

Für die dritte Harmonische ergibt sich die elektromotorische Kraft E_{m_3} aus E_m und der bei Leerlauf des Synchronmotors als Generator aufgenommenen Kurvenform der Spannung (deren Gleichung siehe S. 259). Wir machen hierbei zunächst auch noch die Annahme, dass die Kurvenform der elektromotorischen Kraft des Synchronmotors von der Belastung unabhängig bleibt. Ob diese Annahme zutrifft, muss sich aus den Resultaten der Diagrammuntersuchung ergeben.

Aus der gleichfalls in Fig. 12 eingetragenen Kurzschlusscharakteristik und dem bei Aufnahme derselben gemessenen Effektverbrauch des Synchronmotors ergibt sich der effektive Widerstand¹⁾ des Synchronmotors zu $r = 0,215 \Omega$, während der reine Ohmsche Widerstand

¹⁾ Siehe Arnold und la Cour, Vorausberechnung und Untersuchung von Ein- und Mehrphasenstromgeneratoren (Stuttgart 1901) S. 63 f.

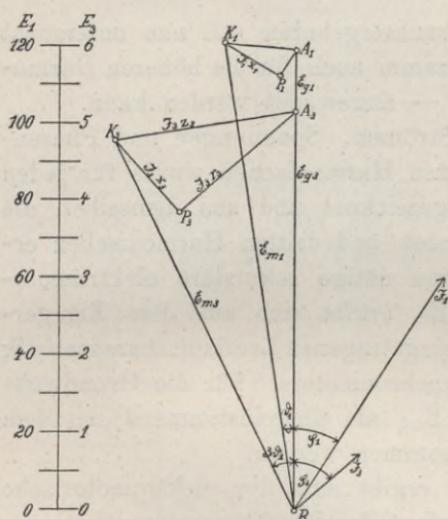
zu $0,14 \Omega$ erhalten wurde. Aus der Kurzschlusscharakteristik ergibt sich auch die Reaktanz des Synchronmotors zu $0,65 \Omega$ als annähernd konstant für Erregungen bis zu 1 Ampère. Bei stärkerer Erregung wird die Reaktanz kleiner und fällt bis zu ca. $0,42 \Omega$ bei 3 Ampère Erregung, wie sich aus der Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ (Fig. 12) entnehmen lässt.

Die Konstruktion des Diagramms soll wieder am Beispiel der Kurve V gezeigt werden (siehe Fig. 15). Die gemessenen Werte sind aus Tabelle 4 (S. 269) zu entnehmen. Für die Erregung $J_e = 1,95$ ergibt sich aus der Leerlaufcharakteristik $E_m = E_{m1} = 122$ Volt.

Fig. 15.

Erste Versuchsreihe. Belastung bei direktem Betrieb.

Diagramm zu Kurve V.



Die Klemmenspannung E_{g1} wird als feste Achse $A_1 B$ vertikal aufgetragen. Für das Diagramm der Grundwelle ist $E_{g1} = A_1 B = 119$ Volt. Von A_1 aus ist unter dem $\sphericalangle B A_1 P_1 = \varphi_1 = 32^\circ$ (Vor-eilung) der Spannungsabfall im Widerstand $A_1 P_1 = J_1 r = 7,6$ Volt abgetragen und in P_1 die Senkrechte auf $A_1 P_1$ errichtet. Wo diese den Kreis mit dem Radius $E_{m1} = 122$ Volt um B als Mittelpunkt schneidet, liegt der Punkt K_1 , und $P_1 K_1 = J_1 x_1$ ergibt den Spannungsabfall in der Reaktanz x_1 für die Grundwelle. Für Kurve V ergibt sich auf diese Weise der Wert $x_1 = 0,48 \Omega$, der entsprechend der Uebererregung des Synchronmotors den oben angegebenen Werten der Reaktanz annähernd entspricht.

Auch aus den übrigen im Diagramm untersuchten Fällen ergaben sich für die Reaktanz der Grundwelle mit wachsender Erregung abnehmende Werte von $0,65 \sim 0,4 \Omega$, welche mit den aus Kurzschlusscharakteristik und Charakteristik für $\cos \varphi = 0$ gewonnenen Werten gut übereinstimmen. Nur beim Minimalstrom und $\cos \varphi_1 = \infty 1$ zeigte sich ein abweichendes Verhalten. Hier fiel nämlich der aus der Leerlaufcharakteristik entnommene Wert E_m um ca. $2 \sim 4$ Volt kleiner

aus, als er bei dem gemessenen effektiven Widerstand und einer Reaktanz von $0,4 \sim 0,6 \Omega$ hätte sein müssen, und daher konnte der Vektor E_m mit dem Vektor $J_1 x_1$ im Diagramm nicht zum Schnitt gebracht werden, auch wenn man statt des Stroms J_1 der Grundwelle den Gesamtstrom J in J_r und J_x einführt.

Dies Verhalten habe ich auch noch bei den weiteren Aufnahmen beobachtet und es zeigte sich um so auffallender, je grösser die Ströme der höheren Harmonischen waren. Es scheint demnach, dass durch die höheren Harmonischen beim Betrieb des Synchronmotors eine Schwächung des Feldes hervorgebracht wird, welche im Diagramm in der Richtung der sekundären elektromotorischen Kraft wirkt. Dieselbe ist nur gering und wird daher bei Phasenverschiebungen der Grundwelle des Stroms gegen die Klemmenspannung durch die viel stärkere Wirkung der Reaktanz verdeckt. Bei $\cos \varphi_1 = 1$ dagegen und in der Nähe desselben hat die Reaktanz fast gar keinen Einfluss auf die Grösse von E_m , da der Spannungsabfall in derselben auf E_m nahezu senkrecht steht, und hier kommt daher die eben besprochene Wirkung deutlicher zum Vorschein.

Zur Konstruktion des Diagramms für den Stromkreis der dritten Harmonischen ergeben sich für Kurve V die Spannungen

$$E_{g_3} = 5,15 \text{ Volt und } E_{m_3} = 5,3 \text{ Volt,}$$

entsprechend E_{g_1} und E_{m_1} aus der Gleichung der Spannungskurve (S. 259). $E_{g_3} = BA_3$ ist mit E_{g_1} in Phase und liegt auf der festen Achse des Diagramms, vom Punkt B ausgehend (Fig. 15). E_{m_3} ist mit E_{m_1} in Phase; da jedoch für die dritte Harmonische die Phasenverschiebungen sich ihrer absoluten Grösse nach verdreifachen, so muss $E_{m_3} = BK_3$ unter dem $\sphericalangle \vartheta_3 = 3 \vartheta_1$ im Diagramm gegen E_{g_3} verschoben aufgetragen werden. Die Verbindungslinie $A_3 K_3$ der Endpunkte der Spannungen ergibt dann $J_3 z_3$ der Grösse und Richtung nach. $J_3 = 11$ und seine Phasenverschiebung $\varphi_3 = 48^\circ 20'$ gegen E_{g_3} ergaben sich aus der Kurvenaufnahme. Es kann daher durch A_3 die Richtung von $J_3 r_3 \parallel J_3$ gelegt werden und durch K_3 senkrecht hierzu die Richtung von $J_3 x_3$; so ergibt sich der Punkt P_3 und $A_3 P_3 = J_3 r_3$, sowie $P_3 K_3 = J_3 x_3$. Durch Division mit J_3 erhält man aus diesen Strecken für Kurve V

$$z_3 = 0,213, \quad r_3 = 0,172, \quad x_3 = 0,114.$$

In gleicher Weise wurde auch für die übrigen aufgenommenen Kurven Widerstand und Reaktanz des Stromkreises der dritten Harmonischen aus dem Diagramm bestimmt. Der Widerstand r_3 wird

zwar bei den Kurven für Belastung zwischen dem oben angegebenen effektiven ($0,215 \Omega$) und dem reinen Ohmschen Widerstand ($0,14 \Omega$) der Ankerwicklung liegend erhalten, bei den Kurven für Leerlauf und $\cos \varphi = 0$ jedoch auch noch kleiner als der letztere Wert, nämlich zu $0,13 \approx 0,08 \Omega$.

Dass sich hier der Widerstand für das Diagramm der dritten Harmonischen nicht mindestens so gross ergibt als der reine Ohmsche Ankerwiderstand und ausserdem so veränderliche Werte aufweist, lässt die Unzulässigkeit der Annahme erkennen, die für die elektromotorische Kraft E_{m_3} gemacht wurde. Zu demselben Resultat gelangt man bei Betrachtung der für die Reaktanz des Stromkreises der dritten Harmonischen erhaltenen Werte. Hierfür ergaben sich aus den verschiedenen Diagrammen Werte von $0,09 \approx 0,15 \Omega$, also bedeutend kleinere Werte als für die oben angegebene Reaktanz der Grundwelle ($0,65 \approx 0,42 \Omega$). Da in letzterer die Wirkung der Ent- und Quermagnetisierung, sowie der Selbstinduktion der Ankerwicklung enthalten ist, so wäre noch die Annahme möglich, dass für die Reaktanz der dritten Harmonischen nur die mit 3 multiplizierte Grösse der Selbstinduktion des Ankers in Frage kommt und die Wirkung der Ent- und Quermagnetisierung wegfällt. In unserem Falle beträgt jedoch die von der Selbstinduktion des Ankers herrührende Reaktanz ca. $0,2 \Omega$ für die Grundwelle und ist demnach mit 3 multipliziert für sich schon weit grösser als die aus den Diagrammen für die dritte Harmonische erhaltene Reaktanz.

Es möge an dieser Stelle gleich vorweggenommen werden, dass die Untersuchung im Diagramm für die weiterhin zu beschreibenden Versuche unter denselben Annahmen das gleiche Ergebnis hatte: Aus dem Diagramm der dritten Harmonischen ergaben sich zu kleine Werte des Widerstands und viel zu kleine Werte für die Reaktanz. Der Stromkreis der dritten Harmonischen kann also nicht ebenso wie der Stromkreis der Grundwelle im Diagramm behandelt werden, da die elektromotorische Kraft der höheren Harmonischen bei Belastung anders ist als bei stromlosem Anker und die Reaktanz nicht der Periodenzahl proportional. Die Ströme der höheren Harmonischen sind weit grösser, als aus den elektromotorischen Kräften der höheren Harmonischen bei stromlosem Anker (und auch aus der Klemmenspannung bei Belastung, vergl. S. 259 und 260) und aus der Reaktanz des Stromkreises hervorzugehen scheint.

Dass dies hier für Einphasenwechselstromsynchronmotoren gewonnene Ergebnis auch auf Drehstromsynchronmotoren übertragen

werden kann, entnahm ich aus weniger eingehenden Versuchen, die ich an Drehstromsynchronmotoren diesbezüglich angestellt habe. Auch die neuerdings von E. Rosenberg (E.T.Z. 1903, Heft 7, S. 111 ff.) veröffentlichten Versuchsergebnisse über den Leerlaufstrom von Drehstromsynchronmotoren lassen darauf schliessen.

II. Aufnahme der Stromkurven bei vorgeschaltetem Widerstand und vorgeschalteter Impedanz.

Da sich gezeigt hat, dass der Strom der höheren Harmonischen grösser ist, als sich aus der Impedanz für die Grundwelle ergeben würde, sollen nunmehr die Stromkurven des Synchronmotors aufgenommen werden, wenn Widerstand oder Impedanz dem Synchronmotor vorgeschaltet ist, um zu sehen, ob diese eine entsprechende Schwächung des Stromes der höheren Harmonischen hervorbringen.

Die Vorschaltung von Widerstand ist zwar für den Betrieb des Synchronmotors durchaus schädlich: sie verschlechtert den Wirkungsgrad, macht die V-Kurven übermässig steil und erfordert starke Veränderung der Erregung für Minimalstrom bei verschiedenen Belastungen; auch setzt sie die Ueberlastbarkeit des Synchronmotors beträchtlich herunter. Man wird daher einem Synchronmotor niemals absichtlich Widerstand vorschalten. Doch wirkt auch eine längere Fernleitung zum Synchronmotor als vorgeschalteter Widerstand.

Die Vorschaltung von Impedanz bringt oft manche Vorteile mit sich und kann den Betrieb eines mangelhaft konstruierten Synchronmotors beträchtlich verbessern. Die Impedanz verschlechtert den Wirkungsgrad nur wenig, wenn ihr Widerstand und ihre Eisenverluste gering sind, dagegen verflacht ihre Reaktanz die V-Kurven und bewirkt ein weniger empfindliches Nachregulieren der Erregung. Bei Uebererregung kann sie den Spannungsabfall in der Fernleitung kompensieren, so dass der Synchronmotor mit konstanter oder sogar mit der Belastung wachsender Klemmenspannung arbeitet. Man findet daher die Vorschaltung von Impedanz bei Synchronmotoren und besonders bei rotierenden Umformern häufig angewendet.

Bei den folgenden Versuchen war in den Stromkreis des Synchronmotors, wie in der Schaltungsskizze Fig. 5, S. 252 angedeutet, zunächst ein induktionsfreier Widerstand von $0,685 \Omega$ eingeschaltet, so dass der Gesamtwiderstand des Stromkreises $0,9 \Omega$ betrug. Alsdann wurde an Stelle des Widerstands eine Impedanz eingeschaltet, die aus einer Stromspule mit geschlossenem magnetischen Kreis bestand. Der Wider-

stand und die Reaktanz derselben wurden mit Strom-, Spannungs- und Wattmessung unter Benützung des Generators als Stromquelle bestimmt und es ergab sich bei den in Betracht kommenden Stromstärken:

$$r_v = 0,12 \Omega, \quad x_v = 0,45 \Omega.$$

Es betrug daher der Gesamtwiderstand des Stromkreises $0,335 \Omega$, die

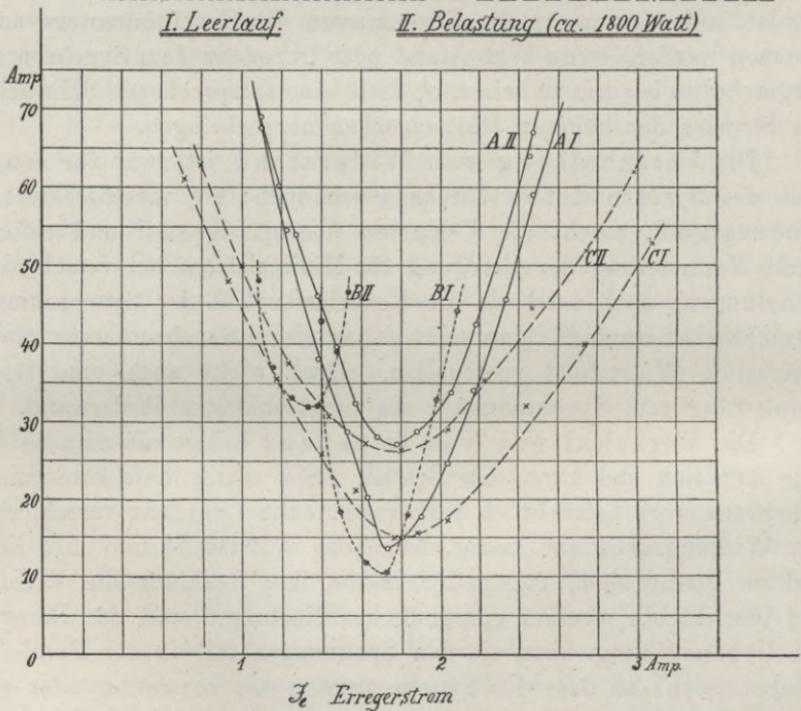
Fig. 16.

Erste Versuchsreihe

V-Kurven bei direktem Betrieb (A), Betrieb mit vorgeschaltetem Widerstand (B) und vorgeschalteter Impedanz (C).

I. Leerlauf.

II. Belastung (ca. 1800 Watt)



gesamte Reaktanz $1,1 \sim 0,85 \Omega$ je nach der Erregerstromstärke des Synchronmotors.

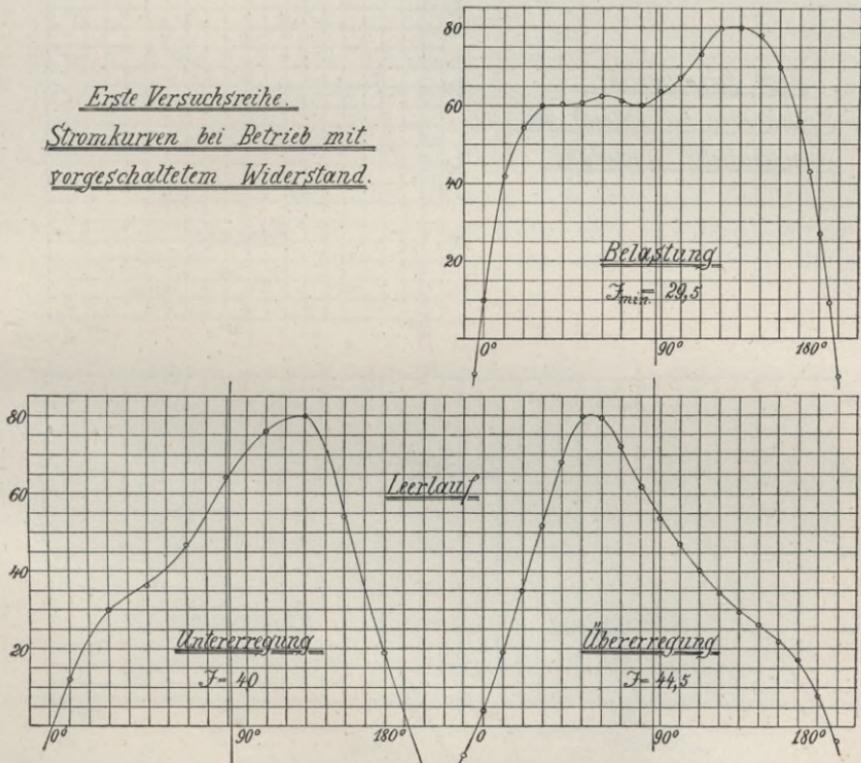
Bei den Messungen mit vorgeschaltetem Widerstand und vorgeschalteter Impedanz wurde die Klemmenspannung am Generator konstant auf 120 Volt gehalten und zur Messung von E_g und P_g benützt.

Der Einfluss des vorgeschalteten Widerstands und der vorgeschalteten Impedanz auf die Gestalt der V-Kurven ist aus Fig. 16 zu entnehmen, in der für Leerlauf und für eine Belastung die V-Kurven

bei direktem Betrieb, bei vorgeschaltetem Widerstand und bei vorgeschalteter Impedanz zusammengestellt sind; der Verlauf dieser Kurven bestätigt das oben Gesagte.

Die Stromkurven des Synchronmotors wurden hier jeweils für Ueber- und Untererregung bei Leerlauf und bei Belastung für den Minimalstrom aufgenommen. Die Aufnahme der Kurven war besonders bei Untererregung durch starkes Pendeln des Synchronmotors

Fig. 17.



erschwert, bei vorgeschaltetem Widerstand mehr als bei vorgeschalteter Impedanz.

Die aufgenommenen Stromkurven sind in Fig. 17 und Fig. 18 eingetragen und wurden ebenso wie oben (S. 262 f.) angegeben weiter untersucht. Die Ergebnisse der Untersuchung sind aus Tabelle 6 (S. 281) zu entnehmen.

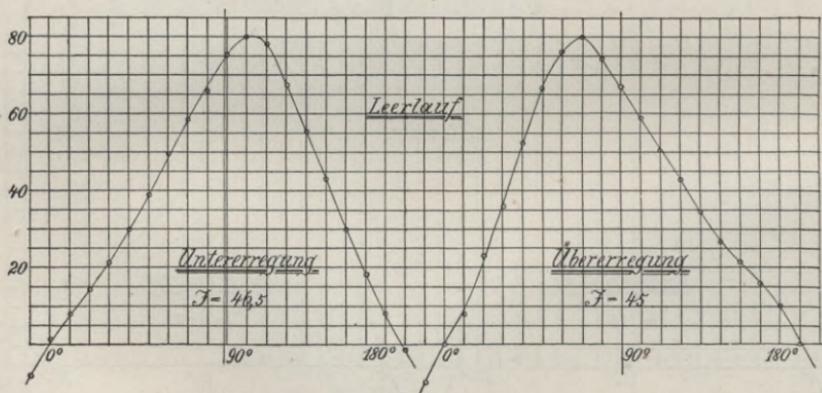
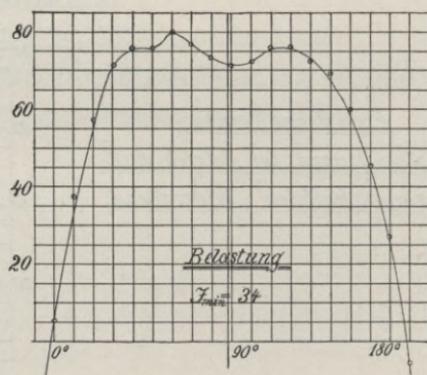
Die fünfte und höhere Harmonische können auch hier vernachlässigt werden. Die Phasenverschiebung der dritten Harmonischen φ_3

ändert sich ebenso wie bei direktem Betrieb zusammen mit der Phasenverschiebung der Grundwelle φ_1 und ist dieser ungefähr gleich bei Voreilung und bei Nacheilung.

Der Strom der dritten Harmonischen J_3 beträgt sowohl bei vorgeschaltetem Widerstand wie bei vorgeschalteter Impedanz im Mittel ca. 8 Ampère und ist demnach gegenüber dem direkten Betrieb, wo er

Fig. 18.

Erste Versuchsreihe.
Stromkurven bei Betrieb mit
vorgeschalteter Impedanz.



im Mittel 11 Ampère betrug, nur wenig gefallen. Entsprechend den Strömen ist auch die Leistung der dritten Harmonischen P_3 noch etwas geringer geworden.

Durch die Vorschaltung von Widerstand oder Impedanz erfährt demnach der Strom der höheren Harmonischen zwar eine geringe Schwächung, aber bei weitem nicht diejenige, die aus der Spannung der höheren Harmonischen und der Impedanz des Gesamtstromkreises zu erwarten wäre.

Tabelle 6.

Ergebnisse der ersten Versuchsreihe bei Betrieb mit:

	Vorgeschaltetem Widerstand			Vorgeschalteter Impedanz		
	Leerlauf		Belastung	Leerlauf		Belastung
J_e	1,4	2,0	1,32	0,98	2,7	1,7
E	118	120,5	120	120	120	120
J	40	44,5	29,5	46,5	45	34
P	2520	3020	3430	1540	2000	3980
$\cos \varphi$	0,534	0,563	0,969	0,276	0,370	0,975
φ	57° 40'	— 55° 40'	— 14° 20'	74°	— 68° 20'	12° 50'
c_1	71,4	65,5	83	67,6	66,6	90,1
c_3	14,5	15,3	24,4	10,8	12	23,6
c_5	0,9	2,4	5,5	1,7	2,1	2,8
γ_1	— 10°	12° 30'	— 4° 30'	— 6° 40'	8° 20'	1° 20'
γ_3	64° 40'	— 71° 20'	13° 20'	133° 50'	— 104° 30'	— 13° 30'
γ_5	139° 30'	— 170° 30'	18° 10'	— 90°	148° 30'	— 21°
α_3	94° 40'	— 108° 50'	26° 50'	153° 50'	— 129° 30'	— 17° 30'
J_1	39,3	43,5	28,3	45,9	44,3	32,9
J_3	8,0	10,1	8,3	7,4	8	8,6
$\cos \varphi_1$	0,542	0,570	0,999	0,277	0,375	0,997
φ_1	57° 10'	— 55° 15'	— 3°	73° 50'	— 68°	4° 30'
φ_3	76° 50'	— 57°	— 35° 40'	67° 40'	— 74° 30'	31°
P_1	2510	2992	3395	1525	1990	3943
P_3	10	28	35	15	10	37

Tabelle 7.

 Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

J_e	E	J_{\min}	P	$(\cos \varphi)_{\max}$	J_n
-------	-----	------------	-----	-------------------------	-------

Bei vorgeschaltetem Widerstand:

1,73	120,2	10,5	1130	0,896	4,7
1,50	120,7	20,5	2370	0,948	6,6
1,32	120	29,5	3430	0,969	7,2

Bei vorgeschalteter Impedanz:

1,78	119,5	14,7	1220	0,693	10,6
1,8	119,5	26,4	2960	0,936	9,3
1,7	120	34,0	3980	0,975	7,4

Ergebnisse der angenäherten Methode.

Nach der angenäherten Methode wurde der Strom der höheren Harmonischen aus dem Minimalstrom bei Leerlauf und bei zwei verschiedenen Belastungen bestimmt. Der Fall der höchsten Belastung ist derselbe, bei dem auch die Kurvenform des Minimalstroms aufgenommen und untersucht wurde.

Bei vorgeschaltetem Widerstand ergibt sich (Tabelle 7, S. 281) aus der angenäherten Methode ein mit wachsender Belastung zunehmender Strom der höheren Harmonischen J_n , der etwas kleiner ist als der aus der Untersuchung der Stromkurven erhaltene.

Bei vorgeschalteter Impedanz ergibt sich ein Fallen von J_n mit wachsender Belastung und für Leerlauf und die schwächere Belastung etwas grössere Werte von J_n , als sie sich aus der Untersuchung der Stromkurven ergaben. Die Ergebnisse der angenäherten Methode stimmen also hier nicht ebensogut wie früher mit den jedenfalls genaueren Ergebnissen der Kurvenaufnahme überein, liefern aber immer noch annähernd richtige Werte des Stromes der höheren Harmonischen.

Zweite Versuchsreihe.

Nicht übereinstimmende Kurvenform von Generator- und Motorspannung.

Für die folgenden Versuche wurden in den Wechselstromgenerator und -motor verschiedene Polschuhe eingesetzt. Der Generator erhielt die breitesten Polschuhe $\left(\alpha = \frac{\text{Polbogen}}{\text{Polteilung}} = 0,9\right)$ und damit eine stumpfe Spannungskurve, der Motor die schmalsten ($\alpha = 0,4$) und damit eine spitze Spannungskurve.

Die Kurvenform beider Maschinen wurde bei Leerlauf und offenem Anker aufgenommen und ist in Fig. 19 eingetragen. Um bei derselben mittleren Erregung wie früher arbeiten zu können, musste hier als normale Spannung 100 Volt angenommen werden.

Die Analyse der beiden Spannungskurven in Fig. 19 ergab für dieselben die Gleichungen:

Generator: Effektivwert $E_g = 97,5$

$$e_g = 137,2 \sin x + 13,0 \sin 3x.$$

Motor: Effektivwert $E_m = 98$

$$\begin{aligned} e_m &= 137,4 \sin x + 17,7 \sin (3x + 180^\circ) \\ &= 137,4 \sin x - 17,7 \sin 3x. \end{aligned}$$

Für den Effektivwert $E = 100$ Volt wird erhalten

Generator: $E_{g3} = 9,4$ Volt,

Motor: $E_{m3} = 12,7$ Volt

als Effektivwerte der dritten Harmonischen.

Fig. 19.

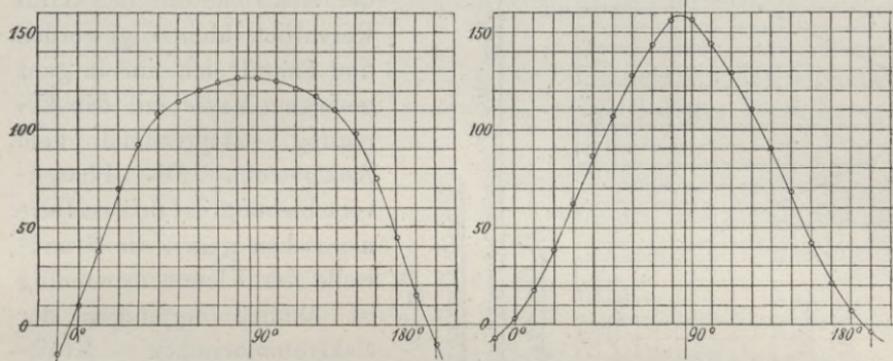
Zweite Versuchsreihe.

Volt
200

Kurvenform der Spannung bei Leerlauf und offenem Anker.

Generator. ($\alpha = 0,9$)

Motor. ($\alpha = 0,7$)



Aus der Analyse geht also hervor, dass trotz der verschiedenen Gestalt der beiden Spannungskurven dieselben nur höhere Harmonische gleicher Ordnung enthalten, nämlich die Generatorkurve eine positive, die Motorkurve eine negative dritte Harmonische.

Aufnahme der Kurvenform der Klemmenspannung beim Betrieb des Synchronmotors.

Um zu untersuchen, was für eine Klemmenspannungskurve sich aus den beiden verschiedenen Kurvenformen der Generator- und Motorspannung ergibt, wurde dieselbe bei leerlaufendem Synchronmotor für Untererregung, Minimalstrom und Uebererregung aufgenommen. Die drei Kurven sind in Fig. 20 eingetragen. Dieselben zeigen nur geringe Abweichungen voneinander und sind von der reinen Sinusform nur wenig verschieden. Aus der Analyse derselben ergeben sich die Gleichungen:

1. Untererregung: $e = 136,5 \sin x + 7,3 \sin (3x + 205^\circ 10')$,
2. Minimalstrom: $e = 138,5 \sin x + 6,9 \sin (3x + 152^\circ 20')$,
3. Uebererregung: $e = 136,5 \sin x + 9,4 \sin (3x + 162^\circ 50')$.

	Effektivwert	E_3 bei 100 Volt
1.	96,8	5,3
2.	98,2	5,0
3.	96,8	6,9

Der Wert von E_3 , der Effektivwert der dritten Harmonischen bei 100 Volt, ist also gegenüber den Kurven der elektromotorischen Kraft wesentlich kleiner geworden und ändert sich nur in ganz geringem Masse mit der Erregung entsprechend dem Ankerstrom. Die Phasenverschiebung der dritten Harmonischen gegen die Grundwelle der Klemmenspannung ist ähnlich derjenigen der elektromotorischen Kraftkurve des Motors geblieben.

Die Verkleinerung der dritten Harmonischen erklärt sich dadurch, dass Generator und Motor zwar mit ihren Grundwellen parallel geschaltet sind, mit den dritten Harmonischen dagegen hinter einander. Infolgedessen wird ein grosser Teil der Spannung der dritten Harmonischen durch den Spannungsabfall in den Maschinen selbst aufgezehrt und in der Klemmenspannung kommt die dritte Harmonische nur bedeutend geschwächt zum Vorschein.

Fig. 20.

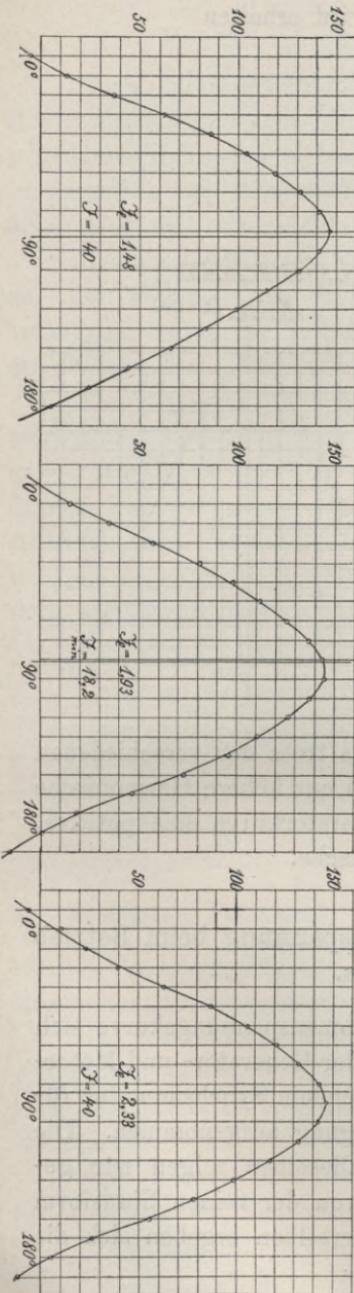
Zweite Versuchsreihe.

Kurvenform der Klemmenspannung am Synchronmotor bei Leerlauf.

1.) Untererregung.

2.) Normale Erregung.

3.) Übererregung.



Aufnahme der Stromkurven.

I. Bei direktem Betrieb.

Der zur Aufnahme der Stromkurven in die Leitung eingeschaltete induktionsfreie Widerstand S betrug hier $0,15 \Omega$. Derselbe ist grösser als bei den früheren Versuchen, weil jetzt infolge besserer Montierung der Maschinen auch der Minimalstrom bei Leerlauf und bei $\cos \varphi = 0$ aufgenommen werden konnte, und hierbei zur Erzielung eines genügenden Ausschlags bei der Stromkurvenaufnahme ein etwas grösserer Widerstand notwendig war.

Bei Leerlauf wurden die Stromkurven für Untererregung, Minimalstrom und Uebererregung aufgenommen, bei Belastung Stromkurven für vier verschiedene Erregungen.

Nach Multiplikation der aufgenommenen Werte mit den aus der entsprechenden Aichung sich ergebenden Konstanten und Reduktion der Kurven auf den gemeinsamen Maximalwert 80 mm sind dieselben in Fig. 21 (S. 286) und Fig. 22 (S. 288) eingetragen.

Die Ergebnisse der Analyse und der weiteren Untersuchung sämtlicher Kurven sind in Tabelle 8 (S. 287) zusammengestellt.

Aus der Analyse wurden zunächst die Ströme der höheren Harmonischen erhalten, die auch hier fast ausschliesslich aus der dritten Harmonischen bestehen, während die fünfte und die noch höheren Harmonischen vernachlässigt werden können.

Ermittlung der Phasenverschiebungen und Leistungen der einzelnen Harmonischen.

Für die Ermittlung der Leistungen und der Phasenverschiebungen zwischen Spannung und Strom der Grundwelle und der dritten Harmonischen wurde das oben benützte rechnerische Verfahren (S. 265 f.), bei welchem aus der gemessenen zugeführten Leistung und aus der Analyse der Strom- und Spannungskurven die Phasenverschiebungen berechnet werden, mit dem experimentellen Verfahren (S. 266 f.) kombiniert. Da nämlich hier für die dritte Harmonische Phasenverschiebungen von jedem Betrag zwischen 0° und 360° vorkommen, so können durch falsche Vorzeichen leicht Irrtümer entstehen.

Es wurden daher zunächst experimentell an der Kreisteilung des Kontaktgebers die Nullpunkte der Ströme und der Spannungen bestimmt und dann mit Hilfe der Analyse die Nullpunkte der Grund-

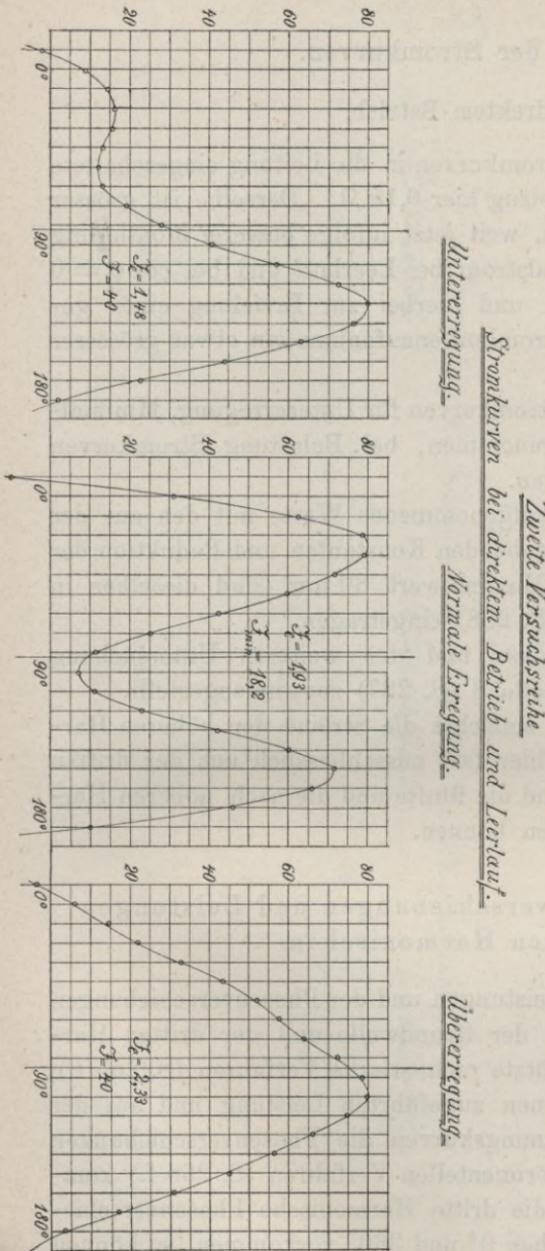


Fig. 21.

welle und der dritten Harmonischen. Die Lage der Nullpunkte und die hieraus sich ergebenden Phasenverschiebungen sind für alle hier aufgenommenen Kurven in Fig. 23 (S. 289) eingezeichnet.

Die Phasenverschiebungen stimmen natürlich infolge der vorhandenen Fehlerquellen nicht genau mit den Phasenverschiebungen überein, welche sich aus der zugeführten Leistung ergeben würden, und werden daher nur als erste Annäherungswerte benützt. Aus denselben werden mittels eines dem früher benützten ähnlichen Annäherungsverfahrens die mit der zugeführten Leistung P übereinstimmenden Werte von φ_1 und φ_3 und damit auch P_1 und P_3 berechnet.

Das Verfahren soll an dem Beispiel der Kurve für Belastung und $J_e = 2,16$ erläutert werden:

Die Gleichung des Stromes ergibt sich aus der Analyse der Stromkurve nach Reduktion auf den Effektivwert des Stromes $J = 39,7$: $i = 55 \sin x$

+ 11,4 sin (3x - 139° 40'). Beim gemessenen Effektivwert der Klemmenspannung E = 100,5 Volt ist die Gleichung derselben:
 $e = 141,5 \sin (x - \varphi_1) + 7,05 \sin (3x + 152° 20' - 3\varphi_1).$

Tabelle 8.

Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe bei direktem Betrieb.

	Leerlauf			Belastung			
J_{em}	1,48	1,93	2,33	1,61	1,78	2,0	2,16
E	98,5	100	98	100,5	100	99,5	100,5
J	40	18,2	40	40,3	34,5	34,7	39,7
P	1460	1220	1500	3000	2920	2940	3060
$\cos \varphi$	0,371	0,672	0,382	0,742	0,846	0,852	0,767
φ	$68^\circ 10'$	$47^\circ 50'$	$-67^\circ 30'$	$42^\circ 10'$	$32^\circ 10'$	$-31^\circ 30'$	$-39^\circ 50'$
c_1	52,8	52,7	72,5	62,8	77,7	66,4	67,8
c_3	25,7	48,0	6,3	26,5	34	19,2	14,0
c_5	3,5	6,0	1,3	3,4	4,2	0,9	0
γ_1	$-26^\circ 10'$	8°	$-5^\circ 40'$	$-11^\circ 40'$	$2^\circ 30'$	$14^\circ 50'$	$9^\circ 10'$
γ_3	$52^\circ 50'$	$-11^\circ 40'$	$118^\circ 30'$	$20^\circ 20'$	$-4^\circ 10'$	-59°	$-112^\circ 10'$
γ_5	134°	$21^\circ 30'$	-138°	$100^\circ 20'$	$32^\circ 40'$	$-83^\circ 40'$	—
α_3	$131^\circ 20'$	$-35^\circ 40'$	$135^\circ 30'$	$55^\circ 20'$	$-11^\circ 40'$	$-103^\circ 30'$	$-139^\circ 40'$
J_1	35,9	13,4	39,9	37	31,6	33,3	38,9
J_3	17,5	12,2	3,5	15,7	13,8	9,6	8,1
$\cos \varphi_1$	0,415	0,925	0,388	0,830	0,943	0,904	0,797
φ_1	$65^\circ 30'$	$22^\circ 20'$	$-67^\circ 10'$	$33^\circ 50'$	$19^\circ 30'$	$-25^\circ 20'$	$-37^\circ 10'$
$\varphi_1 \text{ exp.}$	$61^\circ 10'$	5°	$-73^\circ 40'$	$33^\circ 40'$	$11^\circ 30'$	$-19^\circ 50'$	$-33^\circ 10'$
φ_3	270°	255°	183°	$198^\circ 30'$	$222^\circ 30'$	180°	$180^\circ 30'$
P_1	1460	1236	1523	3074	2970	2988	3100
P_3	0	-16	-23	-74	-50	-48	-40

Die gemessene zugeführte Leistung $P = 3060$ ist demnach:

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{141,5 \cdot 55}{2} \cos \varphi_1 + \frac{7,05 \cdot 11,4}{2} \cos (3\varphi_1 - 139^\circ 40' - 152^\circ 20') \\
 &= 3890 \cos \varphi_1 + 40 \cos (3\varphi_1 - 292^\circ) \\
 &= P_1 + P_3 = 3060.
 \end{aligned}$$

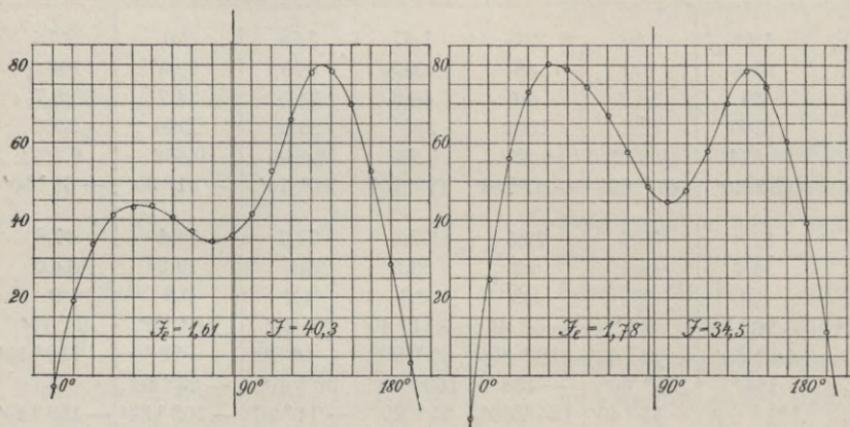
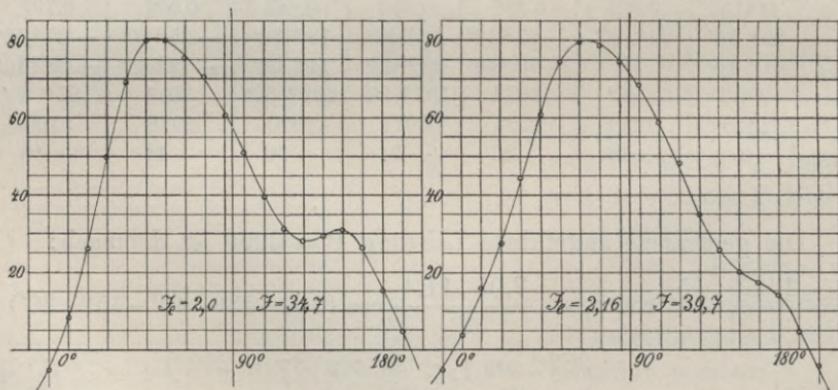
Die experimentelle Bestimmung der Phasenverschiebungen lässt sich aus der Aufzeichnung in Fig. 23 entnehmen und ergibt:

$$\begin{aligned}
 \varphi_1 \text{ exp.} &= 33^\circ 10', \\
 \varphi_3 \text{ exp.} &= 3 \cdot 64^\circ 10' = 192^\circ 30'.
 \end{aligned}$$

Zur Ermittlung von P_3 wird nun zunächst $\varphi_3 \text{ exp.} = 192^\circ 30'$ benützt und ergibt:

$$P_3 = 40 \cdot \cos 192^\circ 30' = -39.$$

Fig. 22.

Zweite Versuchsreihe.Stromkurven bei direktem Betrieb und Belastung.Untererregung.Untererregung.Übererregung.Übererregung.

Hieraus wird der erste Annäherungswert für die Leistung der Grundwelle P_1 erhalten:

$$P_1 = 3060 - (-39) = 3099,$$

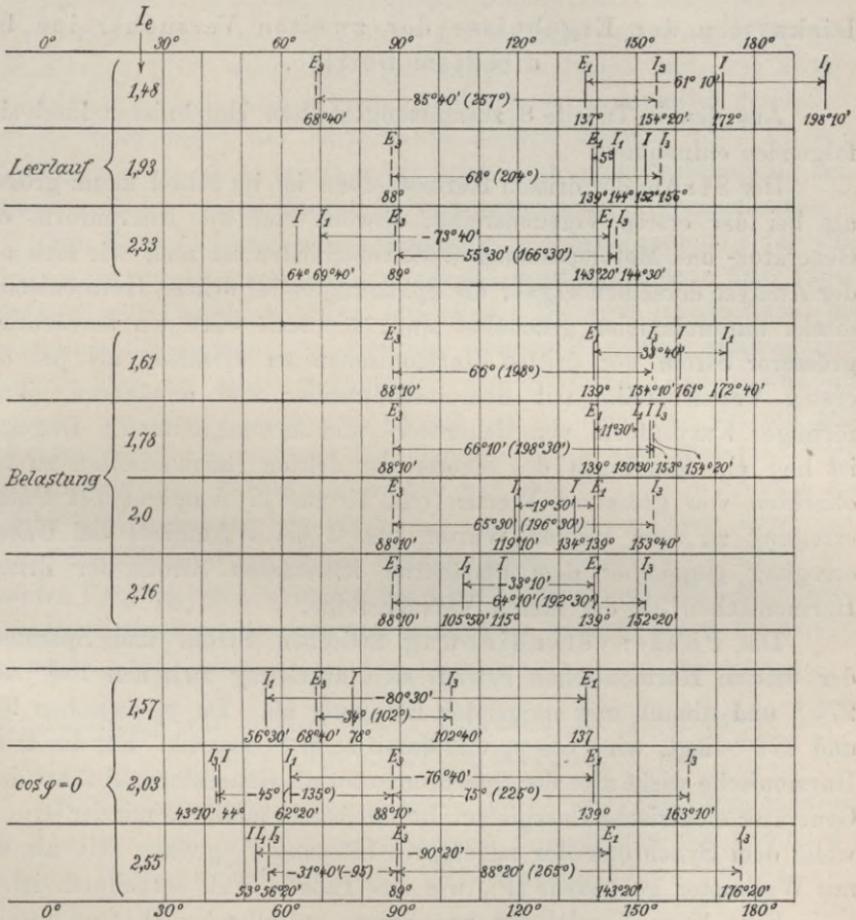
$$\cos \varphi_1 = \frac{3099}{3890} = 0,797, \quad \varphi_1 = 37^\circ 10'$$

Mit diesem Annäherungswert wird nun der zweite Näherungswert von P_3 erhalten u. s. w.:

Fig. 23.

Zweite Versuchsreihe.

Experimentelle Bestimmung der Phasenverschiebungen bei ungleichen Spannungskurven und direktem Betrieb.



$$P_3 = 40 \cdot \cos(3.37^{\circ} 10' - 292^{\circ}) = 40 \cdot \cos 180^{\circ} 30' = -40,$$

$$P_1 = 3060 - (-40) = 3100.$$

Somit ist schon der erste Näherungswert von $\cos \varphi_1$ genügend genau gewesen und es bleibt

$$\varphi_1 = 37^{\circ} 10', \quad \varphi_3 = 180^{\circ} 30'.$$

Auf diese Weise wurden für alle bei Leerlauf und Belastung aufgenommenen Kurven die korrigierten Werte von φ_1 und φ_3 und

hieraus die von P_1 und P_3 ermittelt und dieselben sind in Tabelle 8 (S. 287) zusammengestellt. Zum Vergleich mit den korrigierten Werten von φ_1 sind auch die experimentell aufgenommenen Werte $\varphi_{1 \text{ exp.}}$ eingetragen. Die Abweichung beträgt in fast allen Fällen nur wenige Grade.

Diskussion der Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe bei direktem Betrieb.

Aus den in Tabelle 8 zusammengestellten Ergebnissen lässt sich folgendes entnehmen:

Der Strom der dritten Harmonischen ist im Mittel kaum grösser als bei der ersten Versuchsreihe, obwohl hier die Kurvenform der Generator- und Motorspannung stark verschieden ist und, wie sich aus der Analyse derselben ergab, die Spannungen der dritten Harmonischen direkt hintereinander geschaltet sind; hiernach wäre ein beträchtlich grösserer Strom der dritten Harmonischen zu erwarten als bei der ersten Versuchsreihe mit übereinstimmender und annähernd sinusförmiger Kurvenform von Generator- und Motorspannung. Dagegen ist hier ein Abnehmen des Stroms der dritten Harmonischen zu beobachten von grösseren Werten (ca. 15 bis 17 Ampère) bei Untererregung zu sehr kleinen Werten (ca. 2 bis 4 Ampère) bei Uebererregung gegenüber dem annähernd konstanten Strom der dritten Harmonischen bei der ersten Versuchsreihe.

Die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung der dritten Harmonischen bewegt sich durchweg zwischen 180° und 270° und nimmt mit steigender Erregung ab. Da φ_3 zwischen 90° und 270° liegt, wird $\cos \varphi_3$ und damit auch P_3 negativ. Für die dritte Harmonische wirkt also der Synchronmotor als Generator und führt dem Generator elektrische Energie zu. Infolgedessen muss die mit der Grundwelle dem Synchronmotor zugeführte Leistung P_1 grösser sein als die mit Wattmeter gemessene (P), wie aus Tabelle 8 zu entnehmen ist.

Eine klare Vorstellung von dieser auffallenden Wirkungsweise kann man sich wohl am besten in folgender Art bilden:

Man denkt sich mit dem Generator und mit dem Motor, die reine Sinusform der elektromotorischen Kraft haben sollen, noch je eine kleinere Maschine für dreifache Periodenzahl, also mit $3 \times 4 = 12$ Polen, direkt gekuppelt und zwar derart, dass die Spannung der mit dem Generator gekuppelten Maschine mit der Spannung des Generators in Phase ist, also ihr negatives Maximum hat, wenn die Spannung des Generators ihr positives Maximum hat, so dass aus der

Hintereinanderschaltung beider die stumpfe Spannungskurve entstehen würde. Mit dem Motor soll dagegen die kleinere Maschine so gekuppelt sein, dass die Spannung derselben um 180° gegen die Spannung des Motors verschoben ist und also die einfache und die dreifache Periodenzahl gleichzeitig ihr positives Maximum haben, woraus bei Hintereinanderschaltung die spitze Spannungskurve entstehen würde. Es sollen nun die beiden Maschinen für einfache Periodenzahl parallel geschaltet werden, wenn ihre Spannungen in Phase sind, und gleichzeitig damit auch die beiden kleineren Maschinen aufeinander geschaltet. Da die Spannungen der letzteren in diesem Moment 180° Phasenverschiebung haben, so erhalten wir reine Hintereinanderschaltung derselben, und die beiden Maschinen sind aufeinander kurzgeschlossen.

Ein Betrieb derselben als Generator und Synchronmotor für sich allein wäre so nicht möglich, sie würden entweder ausser Tritt fallen oder sich auf Parallelschaltung einstellen. Dadurch jedoch, dass die Maschinen für einfache Periodenzahl bedeutend stärker angenommen sind als die mit ihnen gekuppelten für dreifache, halten jene die letzteren auf ihrer Phasenverschiebung von ca. 180° und die mit dem Synchronmotor für einfache Periodenzahl gekuppelte Maschine wird als Generator von diesem angetrieben und gibt elektrische Energie ab, welche dem grösseren Synchronmotor von seinem Generator unter einfacher Periodenzahl zugeführt werden muss. Diese so getrennt gedachten Vorgänge gehen in den bei den Versuchen benützten Maschinen in einem Stromkreis vor sich und bringen die beschriebenen Wirkungen hervor.

Ermittlung des Stromes der höheren Harmonischen nach der angenäherten Methode.

Nach der angenäherten Methode wurde aus dem Minimalstrom bei Leerlauf und bei drei verschiedenen Belastungen der Strom der höheren Harmonischen ermittelt. Siehe Tabelle 9.

Tabelle 9.

Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

J_e	E	J_{\min}	P	$(\cos \varphi)_{\max}$	J_n
2,02	100	17,7	1200	0,678	13,0
1,98	100	22,8	1840	0,807	13,4
1,94	100	28,5	2420	0,850	15,1
1,88	100	34,0	2960	0,870	16,7

Die hier erhaltenen Werte von J_n sind nur wenig grösser als die aus der Kurvenanalyse in der Nähe des Minimalstroms erhaltenen. Mit steigender Belastung zeigt sich hier eine geringe Zunahme von J_n .

Verhalten bei $\cos \varphi = 0$.

Bei $\cos \varphi = 0$ wurden, ebenso wie bei Leerlauf, drei Stromkurven aufgenommen, bei Untererregung, Minimalstrom und Uebererregung. Dieselben sind in Fig. 24 und Fig. 25 eingetragen und die Resultate der Analyse derselben sind in Tabelle 10 zusammengestellt.

Tabelle 10.

Zweite Versuchsreihe. — Stromkurven bei $\cos \varphi = 0$.

J_e	1,57	2,03	2,55
E	100,5	100	100
J	42,5	11,7	43,5
P	0	0	0
c_1	55,2	22,1	82,3
c_3	23,3	65,5	3,5
c_5	3,2	9,2	1,9
γ_1	$21^\circ 30'$	$-19^\circ 30'$	0
γ_3	$-74^\circ 10'$	$2^\circ 20'$	-10°
γ_5	169°	$157^\circ 40'$	$124^\circ 30'$
α_3	$-138^\circ 40'$	$60^\circ 50'$	-10°
J_1	39	3,7	43,4
J_3	16,5	11,0	1,9
$\varphi_1 \text{ exp.}$	$-80^\circ 30'$	$-76^\circ 40'$	$-90^\circ 20'$
$\varphi_3 \text{ exp.}$	102°	225°	265°

Die Ströme der dritten Harmonischen sind ihrer Grösse nach von denen bei Leerlauf und entsprechender Erregung nur wenig verschieden und nehmen mit wachsender Erregung stark ab. Der gemessene Minimalstrom 11,7 Ampère ist, wie die Stromkurve und deren Analyse zeigt, fast ausschliesslich ein Strom der dritten Harmonischen. Der Strom der Grundwelle beträgt dabei nur noch 3,7 Ampère, während der Strom der dritten Harmonischen = 11 Ampère ist. Man kann also den Minimalstrom (11,7 Ampère) bei $\cos \varphi = 0$ thatsächlich als Strom der höheren Harmonischen ansehen und diesen auf solche Weise direkt bestimmen.

Die in Tabelle 10 eingetragenen Phasenverschiebungen φ_1 und φ_3 sind experimentell bestimmt und aus der Aufzeichnung in Fig. 23

entnommen. Für die Grundwelle ergaben dieselben nahezu 90° , für die dritte Harmonische annähernd 90° für Unter-, bezw. 270° für

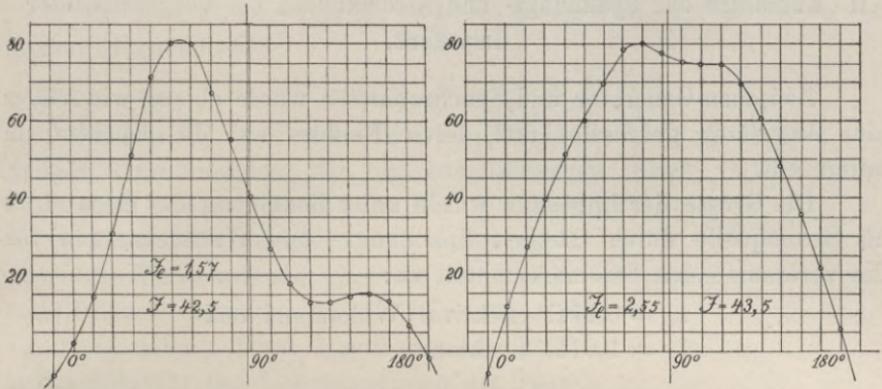
Fig. 24.

Zweite Versuchsreihe.

Stromkurven bei direktem Betrieb und $\cos\varphi=0$

Untererregung.

Übererregung.

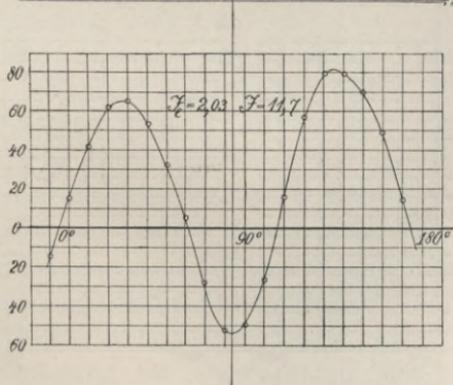


Übererregung und 225° bei Minimalstrom. Bei letzterem sind demnach die Einzelleistungen nicht genau gleich Null, wenn auch die ge-

Fig. 25.

Zweite Versuchsreihe.

Minimalstrom bei direktem Betrieb und $\cos\varphi=0$



samte übertragene Leistung $P = 0$ ist, da P_1 und P_3 entgegengesetzte Vorzeichen haben und somit einander aufheben. Daher verschwand hier auch der Strom der Grundwelle bei Minimalstrom und $P = 0$

nicht vollständig. Der gemessene Minimalstrom ist jedoch von dem darin enthaltenen Strom der höheren Harmonischen nur ganz wenig verschieden. Diesem Ergebnis entspricht die oben für die angenäherte Methode aufgestellte Bedingung, dass die Leistung der höheren Harmonischen klein sein soll gegenüber der der Grundwelle, was in dem hier vorliegenden Falle noch ausreichend zutrifft.

II. Aufnahme der Spannungs- und Stromkurven bei vorgeschalteter Impedanz.

Zwischen Generator und Synchronmotor wurde ebenso wie früher eine Impedanz geschaltet und deren Einfluss auf die Kurvenform untersucht.

Die Grösse der Impedanz wurde unter Benützung des Generators als Stromquelle durch Strom-, Spannungs- und Wattmessungen für die vorkommenden Ströme ermittelt zu:

$$r_v = 0,17 \Omega \text{ effektiver Widerstand und} \\ x_v = 1,07 \Omega \text{ Reaktanz.}$$

Fig. 26.

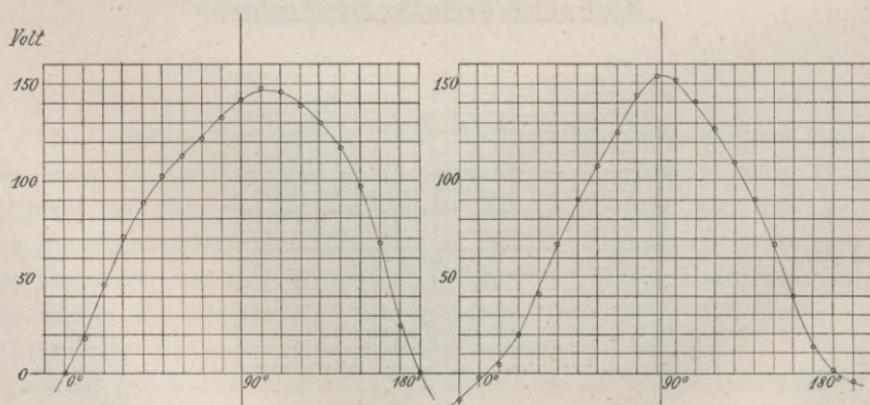
Zweite Versuchsreihe.

Betrieb mit vorgeschalteter Impedanz.

Kurvenform der Klemmenspannung bei Leerlauf.

Am Generator.

Am Motor.



Zunächst wurde bei Leerlauf des Synchronmotors und Minimalstrom die Kurvenform der Klemmenspannung am Generator (E_{k_g}) und am Motor (E_{k_m}) aufgenommen. Die mit Hilfe der hierzu aufgenom-

menen Aichungskurve umgerechneten Werte sind in den Kurven Fig. 26 eingetragen. Die Analyse dieser beiden Kurven ergibt die Gleichungen:

$$e_{kg} = 148,2 \sin x + 11,4 \sin (3x + 65^\circ),$$

$$e_{km} = 136,4 \sin x + 16,0 \sin (3x + 176^\circ 20').$$

Die Effektivwerte der beiden aufgenommenen Kurven sind:

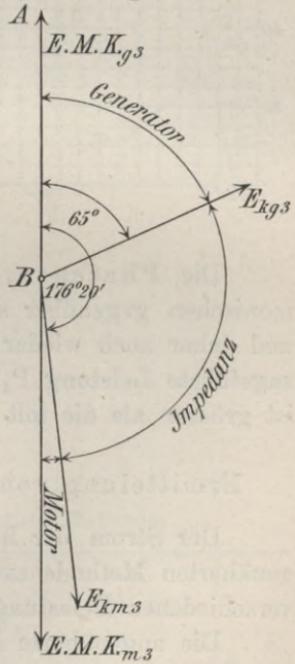
$$E_{kg} = 105, \quad E_{km} = 97,2.$$

Für den Effektivwert $E_k = 100$ Volt sind die Effektivwerte der dritten Harmonischen:

$$E_{kg3} = 7,7, \quad E_{km3} = 11,6 \text{ Volt.}$$

In Fig. 27 sind diese Werte mit den effektiven Werten der dritten Harmonischen der elektromotorischen Kraft (E.M.K.) des Generators und des Motors für $E = 100$ Volt der Grösse und Richtung nach aufgetragen unter der Voraussetzung, dass die Amplituden sämtlicher Grundwellen in die Richtung AB zusammenfallen. Diese Figur gibt ein deutliches Bild für den Uebergang von der Generatorspannungskurve zu der Motorspannungskurve.

Fig. 27.



Aufnahme der Stromkurven.

Die Stromkurven bei vorgeschalteter Impedanz wurden für Minimalstrom bei Leerlauf und bei Belastung aufgenommen. Die Klemmenspannung am Generator (E) wurde hierbei auf 100 Volt konstant gehalten und die zugeführte Leistung P gleichfalls auf die Klemmenspannung am Generator bezogen. Die beiden Stromkurven sind in Fig. 28 (S. 296) und die Ergebnisse der Analyse derselben in Tabelle 11 (S. 297) eingetragen. Die Leistungen der Grundwelle und der dritten Harmonischen wurden nach demselben Näherungsverfahren, wie S. 286 f. beschrieben, ermittelt mit Benützung der experimentell aufgenommenen Phasenverschiebungen.

Die fünfte Harmonische kann auch hier vernachlässigt werden. Der Strom der dritten Harmonischen ist gegenüber dem direkten Betrieb auf etwa die Hälfte reduziert worden. Jedoch ist hier auch

die vorgeschaltete Impedanz mehr wie doppelt so gross als diejenige, welche bei gleichen Spannungskurven bei der ersten Versuchsreihe angewandt wurde und eine Reduktion des Stromes der höheren Harmonischen um etwa 25 % hervorgebracht hatte.

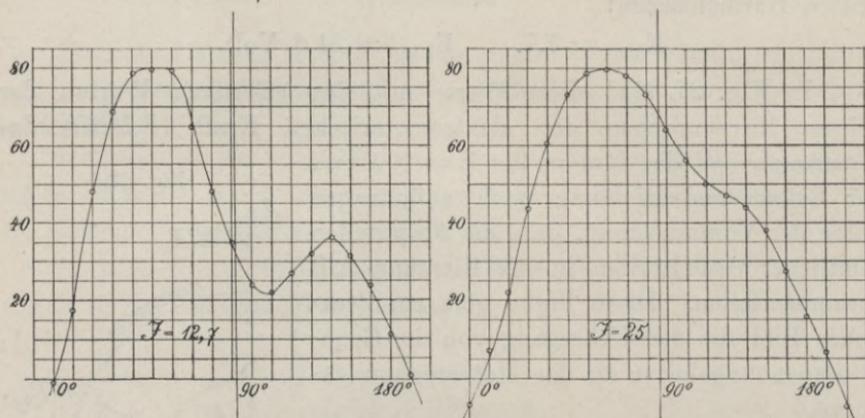
Fig. 28.

Zweite Versuchsreihe.

Kurvenform des Minimalstromes bei Betrieb mit vorgeschalteter Impedanz.

Leerlauf.

Belastung.



Die Phasenverschiebung des Stromes der dritten Harmonischen gegenüber seiner Spannung ist auch hier grösser als 90° und daher auch wieder die dem Motor mit der dritten Harmonischen zugeführte Leistung P_3 negativ, und die Leistung der Grundwelle P_1 ist grösser als die mit Wattmeter gemessene zugeführte Leistung P .

Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

Der Strom der höheren Harmonischen J_n wurde nach der angenäherten Methode aus dem Minimalstrom bei Leerlauf und bei drei verschiedenen Belastungen ermittelt. Siehe Tabelle 12.

Die angenäherte Methode ergibt also hier gleichfalls einen von der Belastung fast unabhängigen Strom der höheren Harmonischen; derselbe ist ein wenig höher als der aus der Kurvenanalyse ermittelte Wert von J_3 .

Sehr hohe vorgeschaltete Impedanz.

Um zu untersuchen, welche Gestalt der Stromkurven und welche Grösse der höheren Harmonischen bei sehr hoher vorgeschalteter Im-

Tabelle 11.

Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe bei Betrieb mit:

	Vorg. Impedanz		Vorg. hohe Impedanz		Stromkurve der hohen Impedanz allein
	Leerlauf	Belastung	Leerlauf	Belastung	
J_{em}	1,9	1,96	1,75	2,0	—
E	100	100	100	101	74,5
J	12,7	25	14,2	30,5	30
P	1120	2420	1360	2860	590
$\cos \varphi$	0,882	0,968	0,957	0,928	0,264
φ	28°	$14^\circ 30'$	$16^\circ 50'$	$21^\circ 50'$	$74^\circ 20'$
c_1	60,7	74,7	60,8	64	53,6
c_3	26,8	12,0	15,7	19,0	21,9
c_5	3,1	1,7	4,1	1,1	5,2
γ_1	18°	9°	$-6^\circ 50'$	$-12^\circ 30'$	$-16^\circ 30'$
γ_3	$-38^\circ 40'$	-61°	$145^\circ 10'$	$123^\circ 30'$	$109^\circ 50'$
γ_5	-178°	$-173^\circ 20'$	$-56^\circ 50'$	0°	-125°
α_3	$-92^\circ 40'$	-88°	$165^\circ 40'$	161°	$159^\circ 20'$
J_1	11,6	24,7	13,7	29,2	27,7
J_3	5,1	4,0	3,5	8,7	11,3
$\cos \varphi_1$	0,990	0,994			
φ_1	$-7^\circ 40'$	$6^\circ 10'$			
$\varphi_{1 \text{ exp.}}$	$-3^\circ 10'$	$1^\circ 50'$			
φ_3	$134^\circ 40'$	$171^\circ 30'$			
P_1	1148	2451			
P_3	-28	-31			

Tabelle 12.

 Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

J_{em}	E	J_{min}	P	$(\cos \varphi)_{max}$	J_n
1,9	100	12,7	1120	0,882	6,0
1,85	100	19,2	1820	0,948	6,2
1,96	100	25,0	2420	0,968	6,2
1,96	100	31,0	3020	0,974	6,9

pedanz erhalten wird, wurde bei dieser Versuchsreihe der verstellbare Eisenkern, den die als Impedanz benützte Stromspule enthielt, so eingestellt, dass sein magnetischer Kreis vollständig geschlossen war.

Die Grösse des Widerstands und der Reaktanz der Stromspule war dann natürlich stark von dem durchfliessenden Strom abhängig.

Bei einem Strom von 14 Ampère (entsprechend dem Leerlaufstrom des Synchronmotors) betrug die unter Benützung des Generators als Stromquelle aus Strom-, Spannungs- und Wattmessung erhaltene Grösse des effektiven Widerstands $r_v = 1,3\Omega$ und der Reaktanz $x_v = 4,1\Omega$. Bei 30 Ampère (entsprechend dem Minimalstrom bei Belastung) war

$$r_v = 0,66\Omega, \quad x_v = 2,48\Omega.$$

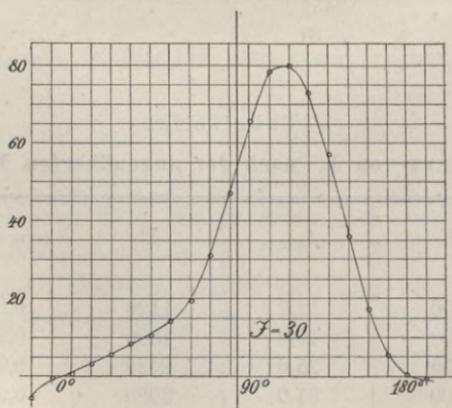
Eine derartig hohe Impedanz wird man zwar im praktischen Betrieb nicht mehr vorschalten, weil sie die Ueberlastbarkeit des Synchronmotors herabsetzt und schon zu viel Energie verbraucht. Dieselbe lässt jedoch immer noch einen Betrieb des Synchronmotors bis über normale Belastung zu.

Stromkurve der hohen Impedanz allein.

Ist die Impedanz allein ohne den Synchronmotor an den Generator angeschlossen, so ergibt sich bei $J = 30$ Ampère die in Fig. 29

Fig. 29.

Zweite Versuchsreihe.
Stromkurve bei Belastung des Generators
mit der hohen Impedanz allein.



eingetragene Kurvenform des Stromes, die als Kurvenform des Magnetisierungsstroms bei Transformatoren bekannt ist. Aus der Analyse dieser Kurve ergeben sich die in Tabelle 11 (S. 297, letzte Spalte)

eingetragenen Werte der Amplituden und Phasenverschiebungen der einzelnen Harmonischen gegeneinander. Der Strom enthält eine starke dritte Harmonische von 11,3 Ampère, die gegen die Grundwelle des Stroms um ca. 160° verschoben ist.

Die fünfte Harmonische ist nur gering und kann vernachlässigt werden.

Stromkurven des Synchronmotors bei vorgeschalteter hoher Impedanz.

Mit dem Synchronmotor und der hohen Impedanz im Stromkreis wurde die Kurvenform des Minimalstroms bei Leerlauf und bei einer Belastung aufgenommen. Die beiden Kurven sind in Fig. 30 ein-

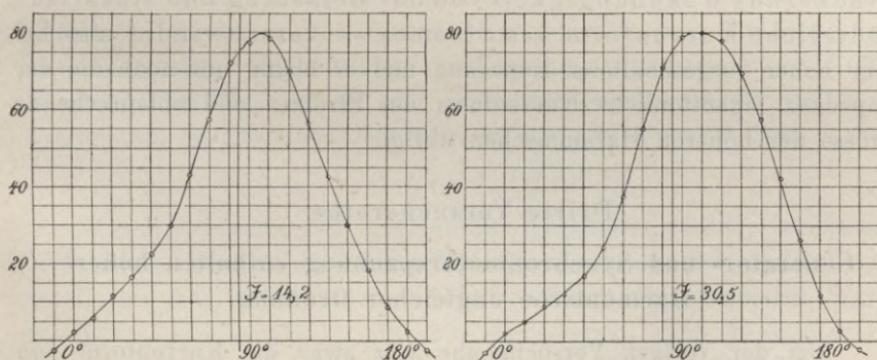
Fig. 30.

Zweite Versuchsreihe.

Kurvenform des Minimalstromes bei Betrieb mit hoher vorgeschalteter Impedanz

Leerlauf.

Belastung



getragen und lassen ohne weiteres die Aehnlichkeit mit der Stromkurve der Impedanz allein in Fig. 29 erkennen, während sie von den übrigen bei dieser Versuchsreihe erhaltenen Stromkurven des Synchronmotors stark abweichen. Die Analyse der beiden Kurven ergibt die in Tabelle 11 (S. 297) eingetragenen Werte. Die Phasenverschiebung der dritten Harmonischen gegenüber der Grundwelle (α_3) ist nahezu dieselbe wie bei der Stromkurve der Impedanz allein, der Strom der dritten Harmonischen bei Belastung nur etwas kleiner als bei dieser. Für Leerlauf nimmt der Strom der dritten Harmonischen annähernd proportional mit dem Strom der Grundwelle ab.

Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

Die angenäherte Methode, nach welcher für den Minimalstrom bei Leerlauf und bei zwei Belastungen der Strom der höheren Harmonischen J_n ermittelt wurde, ergab wieder etwas grössere Werte für J_n als die Kurvenaufnahme für J_3 und zeigte gleichfalls die annähernd proportionale Zunahme von J_n mit dem Strom der Grundwelle. Siehe Tabelle 13.

Tabelle 13.

Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

J_{em}	E	J_{min}	P	$(\cos \varphi)_{max}$	J_n
1,75	100	14,2	1360	0,957	4,1
1,87	100,5	23,7	2210	0,928	8,8
2,0	101	30,5	2860	0,928	11,4

Das für den Synchronmotor bei nicht sinusförmigen Spannungen charakteristische Verhalten der Ströme der höheren Harmonischen — annähernde Unabhängigkeit von der Belastung und stark veränderliche Kurvenform des Stromes — verschwindet also bei sehr hoher vorgeschalteter Impedanz und es bleibt nur noch die der Impedanz eigentümliche Kurvenform des Stromes und entsprechende Grösse der höheren Harmonischen übrig.

Dritte Versuchsreihe.

Generator- und Synchronmotorspannung enthalten höhere Harmonische ungleicher Ordnung.

Bei der vorigen Versuchsreihe war zwar die Kurvenform von Generator- und Motorspannung stark verschieden, doch wurde diese Verschiedenheit fast ausschliesslich durch die Stärke und besonders die Phasenverschiebung der dritten Harmonischen gegenüber der Grundwelle hervorgebracht, während die fünfte und alle noch höheren Harmonischen gar nicht oder nur in vernachlässigbar kleiner Grösse vorhanden waren.

Nunmehr wurde der Synchronmotor von der städtischen Drehstromzentrale des Elektrizitätswerks Karlsruhe als Stromquelle gespeist. Die Spannung derselben enthält als solche eines Drehstromnetzes gar keine dritte Harmonische, dagegen eine beträchtliche fünfte und auch noch eine zu berücksichtigende siebente Harmonische. Da die Zen-

trale mit 120 Volt und 50 Perioden arbeitet, so musste bei diesen Versuchen der Synchronmotor 1500 Touren machen, während alle übrigen vorausgehenden Versuche mit 1600 Touren pro Minute ausgeführt waren. Die auf S. 252, Fig. 5 angegebene Schaltung bleibt auch hier bestehen. Nur tritt an Stelle des wegfallenden Wechselstromgenerators die vom Schalter D aus unter Kurzschliessung der Phasenlampen Ph.-L₂ zugeführte Spannung der städtischen Zentrale und der Hilfsmotor zur Kurvenaufnahme kann unmittelbar als Drehstromsynchronmotor weiterlaufen.

Die Kurvenform der Spannung der Zentrale ist je nach der Tageszeit verschieden. Am Tage ist die Zentrale nur schwach belastet und dabei treten die vorhandenen höheren Harmonischen in der Spannung stärker hervor. Abends ist die Belastung stärker und die höheren Harmonischen werden hierbei etwas unterdrückt. Zunächst soll ein Versuch mit Benützung der letzteren Kurvenform der zugeführten Spannung vorgenommen werden.

Versuch A.

Der Synchronmotor hat dieselben Pole wie bei der ersten Versuchsreihe und daher eine stumpfe, von der Sinusform nur durch eine schwache dritte Harmonische abweichende Spannungskurve. Die Gleichung der Kurvenform der elektromotorischen Kraft des Synchronmotors ist für einen Effektivwert von 120 Volt (S. 259):

$$e_m = 170 \sin x + 7,3 \sin 3x.$$

Als Kurvenform der zugeführten Zentralenspannung wurde bei leerlaufendem Synchronmotor die Klemmenspannung an demselben aufgenommen und die entsprechend der Aichung umgerechneten Werte der Kurve sind in Fig. 31 (S. 302) eingetragen. Die Analyse dieser Kurve ergibt für den Effektivwert $E_g = 120$ Volt die Gleichung:

$$e_g = 168,5 \sin x + 19 \sin 5x + 5,5 \sin (7x + 153^\circ).$$

Die dritte Harmonische ist kleiner als 2% der Grundwelle und daher zu vernachlässigen.

Aufnahme der Stromkurven.

Wenn auch die Ströme der höheren Harmonischen hier, wie sich zeigen wird, sehr gross ausfallen, so liess sich der Synchronmotor trotzdem noch bei direktem Betrieb von Leerlauf bis zu mässiger Ueberlastung betreiben, ohne ausser Tritt zu fallen. Nur war der-

selbe gegen Vergrößerung des Widerstands des Stromkreises äusserst empfindlich, da der Strom hierbei sofort stark stieg und der Motor sogar unter Umständen ausser Tritt fiel.

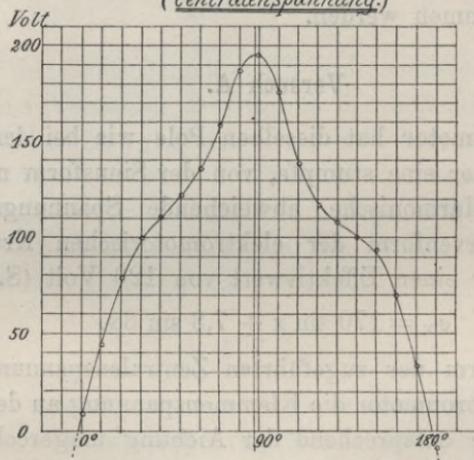
Es konnte daher auch der zur Aufnahme der Stromkurven dienende Widerstand S hier nicht in den Stromkreis mit eingeschaltet werden, und statt dessen wurde der Spannungsabfall im Widerstand des im Stromkreis befindlichen Hitzdrahtampèremeters für 100 Ampère und des Wattmeters nebst der beide verbindenden Leitung zur Aufnahme der Stromkurven benützt unter der Annahme, dass diese Widerstände genügend selbstinduktionsfrei sind, um den Stromkurven pro-

Fig. 31.

Dritte Versuchsreihe. Versuch A.

Kurvenform der Klemmenspannung bei Leerlauf.

(Centralenspannung.)



portionale Kurven zu ergeben. Diese Annahme war hier um so eher zulässig, als infolge der hier nicht zu vermeidenden stärkeren Pendelungen des Stroms überhaupt nicht dieselbe Genauigkeit der Aufnahme erreicht werden konnte wie bei den früheren Versuchen.

Es wurden hier drei Stromkurven bei Leerlauf für Uebererregung, Untererregung und dem Minimalstrom entsprechende normale Erregung aufgenommen. Dieselben sind in Fig. 32 eingetragen und lassen sofort die ausserordentlich starke Deformation durch die höheren Harmonischen erkennen. Die Kurven gehen schon für den Bereich von 0° bis 180° , in dem sie aufgenommen sind, an einer bis zwei Stellen zu negativen Werten über.

Die Analyse der Stromkurven ergab für die einzelnen Harmonischen und deren Phasenverschiebungen gegen die Grundwelle die in Tabelle 14 eingetragenen Werte. Die Bezeichnungen sind dieselben, wie S. 264 f. eingeführt. In der Tabelle sind auch die Spannungen, Ströme und zugeführten Leistungen, bei denen die drei Kurven aufgenommen wurden, eingetragen.

Zur Bestimmung der Phasenverschiebungen der Ströme der einzelnen Harmonischen gegenüber ihren Spannungen ist die Aufnahme wegen der

Versuchsschwierigkeiten nicht genau genug, und ich begnügte mich hier und bei dem noch folgenden Versuch damit, die Stärke der Einzelströme, die besonders interessiert, und deren Phasenverschiebungen gegen die Grundwelle zu ermitteln.

Fig. 32.

Dritte Versuchreihe. Versuch A.
Stromkurven bei direktem Betrieb und Leerlauf.

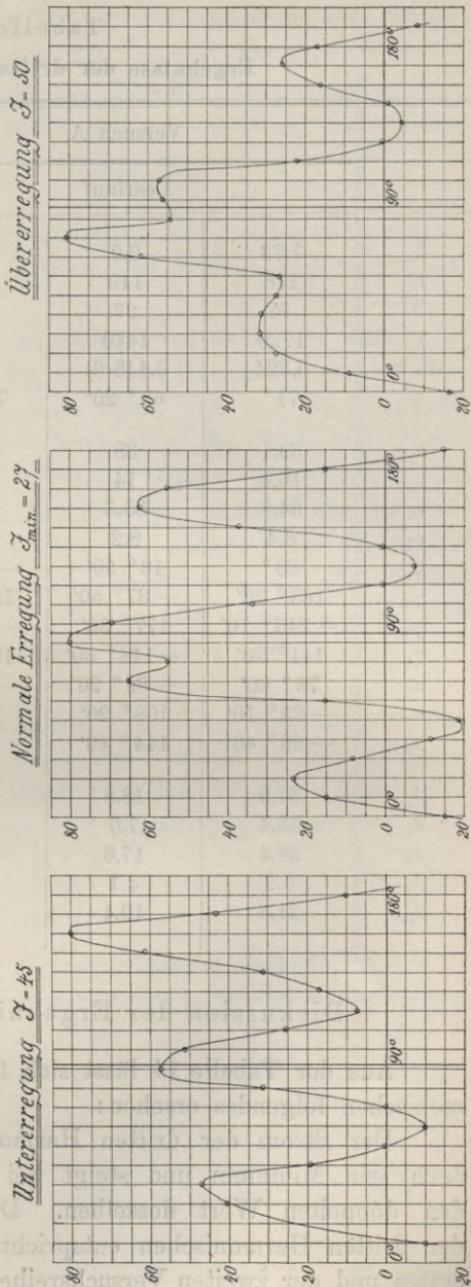


Tabelle 14.
Ergebnisse der dritten Versuchsreihe.

	Versuch A			Versuch B	
	Leerlauf			Leerlauf	Belastung
J_e	1,73	2,0	2,47	2,65	2,45
E	118	119	120,5	121	117
J	45	27	50	12,5	20,7
P	1720	1440	1840	1240	2260
$\cos \varphi$	0,324	0,448 (!)	0,305	0,822	0,933
φ	71°	$63^\circ 20'$	$72^\circ 20'$	$34^\circ 40'$	21°
c_1	39,1	38	46,5	70,3	68
c_3	16,4	14	15,3	30,4	18,9
c_5	34,8	35,5	16,9	22	10,5
c_7	6,4	8,2	7,2	6,2	4,6
γ_1	30°	$13^\circ 50'$	$-20^\circ 50'$	$9^\circ 40'$	17°
γ_3	$163^\circ 20'$	$-37^\circ 50'$	$129^\circ 40'$	-10°	$-49^\circ 50'$
γ_5	$-243^\circ 10'$	$177^\circ 30'$	$-173^\circ 10'$	$38^\circ 40'$	$21^\circ 30'$
γ_7	$141^\circ 20'$	$-118^\circ 30'$	$109^\circ 30'$	$-80^\circ 40'$	$-98^\circ 20'$
α_3	$73^\circ 20'$	$-89^\circ 20'$	$-167^\circ 50'$	-39°	$-100^\circ 50'$
α_5	$-33^\circ 10'$	$108^\circ 20'$	-69°	$-9^\circ 40'$	$-63^\circ 30'$
α_7	$-68^\circ 40'$	$144^\circ 40'$	$-104^\circ 40'$	$150^\circ 20'$	$142^\circ 40'$
J_1	31,9	18,8	44,5	11,0	19,7
J_3	13,4	7,0	14,6	4,8	5,5
J_5	28,4	17,6	16,1	3,4	3,0
J_7	5,2	4,1	6,9	1,0	1,3
J_n	31,8	19,4	22,8	6,0	6,4

Diskussion der Ergebnisse des Versuchs A.

Aus der Tabelle 14 lässt sich für die Ströme der höheren Harmonischen folgendes ersehen:

Der Strom der dritten Harmonischen hat beim Minimalstrom auch sein Minimum und steigt bei Unter- und Uebererregung auf den doppelten Wert desselben. Die mittlere Stärke des Stromes der dritten Harmonischen entspricht annähernd den hierfür bei der ersten und der zweiten Versuchsreihe bei direktem Betrieb erhaltenen Werten.

Der Strom der fünften Harmonischen ist, entsprechend dem starken Hervortreten der fünften Harmonischen in der Kurvenform der

zugeführten Spannung, der stärkste und bei Minimalstrom dem Strom der Grundwelle nahezu gleich. Während für Uebererregung der Strom J_5 nahezu derselbe ist wie für Minimalstrom, wird für Untererregung eine bedeutende Verstärkung von J_5 erhalten, die sich auch in der Stärke des Gesamtstroms der höheren Harmonischen $J_n = \sqrt{J_3^2 + J_5^2 + J_7^2}$ ausprägt.

Der Strom der siebenten Harmonischen ist annähernd konstant und kommt gegenüber dem der dritten und fünften nur wenig in Betracht.

Die Ströme der höheren Harmonischen sind auch hier sämtliche grösser, als aus den Spannungen der einzelnen Harmonischen und der Impedanz des Synchronmotors — Widerstand und der Periodenzahl entsprechende Selbstinduktion des Ankers ohne die Ent- und Quermagnetisierung — sich ergeben würde. Diese Vergrößerung ist wohl zum Teil der Verkleinerung der Reaktanz infolge der Schirmwirkung der Wirbelströme zuzuschreiben, die natürlich für die fünfte Harmonische noch mehr in Betracht kommt wie für die dritte; ausserdem wird aber auch die Aenderung der elektromotorischen Kraft des Synchronmotors bei stromdurchflossenem Anker dazu beitragen.

Aus dem Minimalstrom bei Leerlauf und bei Belastung wurde nach der angenäherten Methode auch hier der Strom der höheren Harmonischen J_n ermittelt und ergab die aus Tabelle 15 zu entnehmenden Werte; für Minimalstrom 24,2 Ampère gegenüber 19,4 Ampère aus der Kurvenanalyse.

Tabelle 15.

Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

J_e	E	J_{min}	P	$(\cos \varphi)_{max}$	J_n
Versuch A.					
2,0	119	27	1440	0,448	24,2
2,06	122	33	2960	0,735	22,3
Versuch B.					
2,65	121	12,5	1240	0,822	7,1
2,45	117	20,7	2260	0,933	7,4
2,55	118	27,8	3120	0,951	8,5

Versuch B.

Die höheren Harmonischen in der Kurvenform der zugeführten Spannung sind stärker als bei Versuch A, was durch Arbeiten bei einer entsprechenden Tageszeit erreicht wurde. Der Synchronmotor hat dieselben Pole wie bei der zweiten Versuchsreihe und daher eine spitze Spannungskurve mit einer starken dritten Harmonischen. Die Gleichung der Kurvenform der elektromotorischen Kraft des Synchronmotors ist für einen Effektivwert von 120 Volt (S. 282 unten):

$$e_m = 168,5 \sin x + 21,7 \sin (3x + 180^\circ).$$

Bei direktem Betrieb des Synchronmotors wuchs der Strom sofort nach dem bei gleichen Spannungen und Tourenzahlen erfolgten Parallelschalten auf über 35 Ampère an, und sobald der Antriebsmotor des Synchronmotors ausgeschaltet wurde, fiel der letztere ausser Tritt. Wurde nach dem Parallelschalten die Tourenzahl des Antriebsmotors so einreguliert, dass das Wattmeter auf Null stand, also $P = 0$ und $\cos \varphi = 0$ wurde, so ergab sich bei richtiger Einstellung der Erregung des Synchronmotors ein Minimalstrom von 33 Ampère. Dieser Strom ist nach den Ergebnissen der vorausgegangenen Versuche ausschliesslich ein Strom höherer Harmonischer und hier aussergewöhnlich gross. Mechanische Arbeit kann von diesem Strom jedoch nicht geleistet werden, weil die elektromotorische Kraft des Synchronmotors nur eine dritte Harmonische enthält, während die höheren Harmonischen der zugeführten Spannung fünfter und siebenter Ordnung sind.

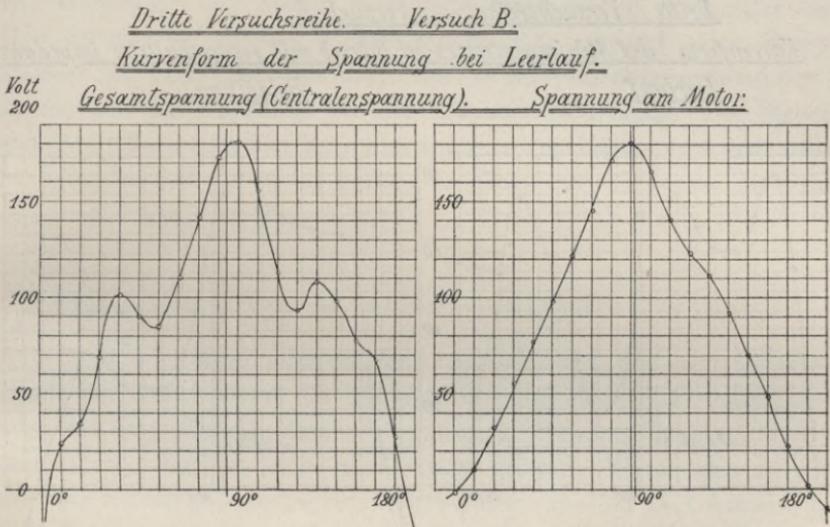
Dagegen erzeugen die Ströme der höheren Harmonischen im Synchronmotor Wechselfelder dritter, fünfter und siebenter Ordnung, und durch diese werden beträchtliche Hysteresis- und Wirbelstromverluste in den massiven Polen hervorgerufen, da sich der Anker nicht mit synchroner Geschwindigkeit mit diesen Wechselfeldern dreht, sondern nur mit $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{5}$ bzw. $\frac{1}{7}$ der synchronen Geschwindigkeit. Es ist dies derselbe Fall, wie wenn ein erregter Synchronmotor, dessen Anker mit Wechselstrom gespeist wird, von einem Motor mit einer der Periodenzahl des Wechselstroms nicht synchronen Tourenzahl angetrieben wird. Dann ist die dem Antriebsmotor zuzuführende Leistung um so grösser, je stärker der Wechselstrom im Anker des Synchronmotors und je weiter die Tourenzahl von der synchronen entfernt ist. Ist dagegen, wie in unserem Fall, der Synchronmotor sich selbst überlassen, so müssen ausser den normalen Leerlaufverlusten auch die Verluste durch die Felder der höheren Harmonischen von der Leistung

der Grundwelle gedeckt werden, und sobald die Grundwelle hierzu nicht mehr stark genug ist gegenüber den höheren Harmonischen, fällt der Synchronmotor ausser Tritt. Dabei wird das Aussertrittfallen durch die hier besonders stark auftretenden Pendelungen beschleunigt.

Betrieb mit vorgeschalteter Impedanz.

Es wurde nun dem Synchronmotor eine Impedanz von derselben Grösse, wie bei der zweiten Versuchsreihe (S. 294) angegeben, vorgeschaltet. Auf diese Weise konnte der Synchronmotor trotz der

Fig. 33.



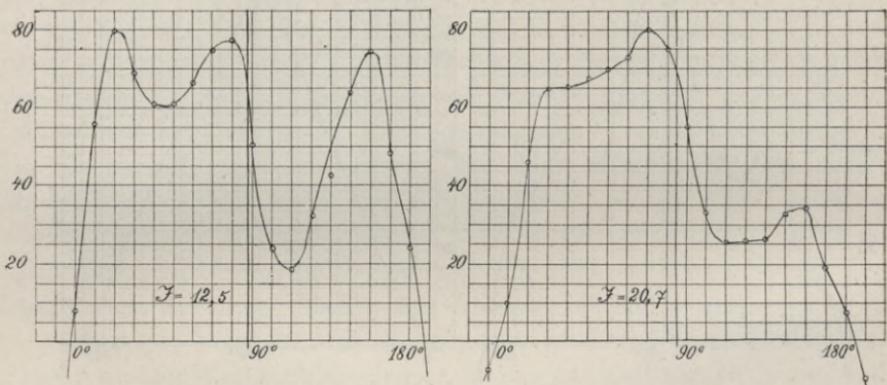
Verschiedenheit der Spannungskurven sogar bis zu mässiger Ueberlastung betrieben werden, und es traten hierbei nur geringe Pendelungen auf.

Bei leerlaufendem Synchronmotor und Minimalstrom wurde die Kurvenform der Gesamtspannung am Motor und Impedanz (übereinstimmend mit der Zentralenspannung) und die Kurvenform der Spannung am Motor allein aufgenommen. Die beiden Kurven sind in Fig. 33 einander gegenübergestellt. Die Analyse derselben ergibt für den Effektivwert $E = 120$ Volt die Gleichungen:

Gesamtspannung: $e_g = 168 \sin x + 25,2 \sin 5x + 10,7 \sin 7x,$
 Spannung am Motor: $e_k = 168,5 \sin x + 19,3 \sin (3x - 170^\circ 50')$
 $+ 5,6 \sin (5x + 40^\circ 20') + 5,2 \sin (7x - 160^\circ).$

In der Gesamtspannung verschwindet die dritte Harmonische bis auf 1 0/0. In der Spannung am Motor tritt von den höheren Harmonischen fast nur noch die dritte auf in annähernd derselben Stärke und Phasenverschiebung wie in der elektromotorischen Kraftkurve des Synchronmotors (S. 306). Die fünfte und siebente Harmonischen sind hier auf einen nur geringen Betrag herabgedrückt. Die Wirkung der vorgeschalteten Impedanz auf die höheren Harmonischen besteht also hauptsächlich darin, dass sie die in der zugeführten Spannung enthaltenen höheren Harmonischen, die in der elektromotorischen Kraft des Synchronmotors nicht enthalten sind, fast gar nicht durchlässt und

Fig. 34.

Dritte Versuchsreihe. Versuch B.Kurvenform des Minimalstromes bei Betrieb mit vorgeschalteter Impedanz.Leerlauf.Belastung.

so die Spannung am Motor selbst in annähernde Uebereinstimmung bringt mit der elektromotorischen Kraft desselben. Diese „reinigende“ Wirkung der vorgeschalteten Impedanz ergibt sich auch sofort augenscheinlich aus der Gestalt der beiden Spannungskurven in Fig. 33.

Aufnahme der Stromkurven.

Die Stromkurven konnten hier wieder wie früher ohne Beeinträchtigung des Betriebs mit dem in die Leitung eingeschalteten Widerstand $S = 0,15 \Omega$ aufgenommen werden. Es wurde hier die Stromkurve des Minimalstromes bei Leerlauf und bei einer Belastung aufgenommen. Dieselben sind in Fig. 34 eingetragen und zeigen auch hier noch starke

Deformationen, wenn sie auch zwischen 0° und 180° hier durchweg positive Werte beibehielten. Die Ergebnisse der Analyse der beiden Kurven, die Erregung, Gesamtspannung, Strom und zugeführte Leistung, bei denen sie aufgenommen wurden, sind in Tabelle 14 (S. 304) zusammengestellt. Aus dieser ergibt sich folgendes für die Ströme der höheren Harmonischen:

Die Ströme sind sämtliche bedeutend schwächer geworden gegenüber dem Versuch A mit nicht so stark deformierten Spannungskurven und direktem Betrieb. Der Strom der dritten Harmonischen ist etwa gerade so hoch wie bei dem Versuch der zweiten Versuchsreihe (S. 294 f.), bei dem dieselbe Impedanz vorgeschaltet war und die Spannungskurven von Generator und Motor nur dritte Harmonische enthalten hatten. Der Strom der fünften Harmonischen ist, obwohl seine Spannung grösser ist, schwächer als derjenige der dritten, entsprechend der Vergrößerung der Impedanz für die höhere Periodenzahl. Der Strom der siebenten Harmonischen kann hier schon vernachlässigt werden, während er beim Versuche A noch gerade so gross war, wie jetzt der Gesamtstrom der höheren Harmonischen $J_n = \sqrt{J_3^2 + J_5^2 + J_7^2}$.

Ermittlung von J_n nach der angenäherten Methode.

Aus dem Minimalstrom bei Leerlauf und bei zwei Belastungen wurde der Gesamtstrom der höheren Harmonischen J_n gleichfalls wieder nach der angenäherten Methode bestimmt. Wie aus Tabelle 15 (S. 305) ersichtlich, werden auch hier etwas grössere Werte von J_n als die aus der Kurvenaufnahme sich ergebenden erhalten (7,1 Ampère gegen 6,0; 7,4 Ampère gegen 6,4). Wie bei der zweiten Versuchsreihe zeigt sich auch hier bei vorgeschalteter Impedanz eine geringe Zunahme von J_n mit zunehmender Belastung.

Wurde der Synchronmotor in oben beschriebener Weise bei $\cos \varphi = 0$ betrieben, so ergab sich bei $J_e = 2,8$ Ampère Erregung und $E_g = 121$ Volt Gesamtspannung ein Minimalstrom von 7,5 Ampère, der nach den oben erhaltenen Ergebnissen den Strom der höheren Harmonischen darstellt und auch mit den Resultaten der Kurvenaufnahme und der angenäherten Methode gut übereinstimmt.

Diskussion der Ergebnisse des Versuches B.

Die Einzelströme der höheren Harmonischen sind hier zwar noch etwas grösser, als sich aus den Einzelspannungen und der Impedanz

des Gesamtstromkreises für die betreffende Harmonische ergeben würde. Jedoch werden sie hier bedeutend mehr durch die vorgeschaltete Impedanz geschwächt als in den zwei ersten Versuchsreihen, wo der dritten Harmonischen in der elektromotorischen Kraft des Synchronmotors auch eine solche in der zugeführten Spannung gegenübersteht.

Dies ist praktisch von grossem Vorteil. Denn in jenen Fällen geht der Strom der höheren Harmonischen nicht nutzlos verloren, sondern ist auch an der Arbeitsleistung beteiligt, wenn auch unter Umständen, wie bei der zweiten Versuchsreihe, durch Zurückliefern von Arbeit. In Fällen dagegen, wo wie hier die höheren Harmonischen der zugeführten Spannung in der elektromotorischen Kraft des Synchronmotors nicht enthalten sind und umgekehrt, kann der Strom der höheren Harmonischen keine Arbeit übertragen und fliesst daher als ganz nutzloser Strom in dem Stromkreise und verbraucht nur Energie in dem Widerstand desselben. Dabei erschwert er noch, wie wir gesehen haben, den Betrieb durch starke Pendelungen und macht ihn sogar unter Umständen ganz unmöglich. Gerade in solchen Fällen kommt daher zu den schon oben erwähnten Vorteilen, die eine vorgeschaltete Impedanz bieten kann, noch der sehr wichtige hinzu, dass sie die höheren Harmonischen zu unterdrücken bzw. stark zu schwächen vermag.

Zusammenfassung der Ergebnisse.

Kurz zusammengestellt sind die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung die folgenden:

Der Einfluss der Kurvenform der Spannungen äussert sich beim Synchronmotor in verstärktem Masse in der Kurvenform des Stromes. Haben Generator- und Motorspannung keine reine Sinusform, so sind die Stromkurven stark verzerrt und ihre Gestalt ändert sich auch beträchtlich bei Veränderungen der Erregung und der Belastung.

Ist die Kurvenform von Generator- und Motorspannung zwar übereinstimmend, aber von der Sinusform etwas abweichend, so treten schon beträchtliche Ströme höherer Ordnung auf, die in der Gestalt der Stromkurve zum Ausdruck kommen.

Diese Ströme werden nicht viel stärker, wenn Generator- und Motorspannung zwar verschiedene Kurvenform haben, jedoch nur gleichhohe Harmonische enthalten.

Besonders stark werden die Ströme der höheren Harmonischen, wenn Generator- und Motorspannung höhere Harmonische ungleicher Ordnung enthalten, so dass hier unter Umständen der Betrieb überhaupt unmöglich wird.

Von der Grösse der Belastung des Synchronmotors ist der Strom der höheren Harmonischen im allgemeinen nur wenig abhängig, weil er keine oder nur sehr wenig Arbeit leistet.

Vorgeschaltete Impedanz schwächt die Ströme der höheren Harmonischen nur wenig bei übereinstimmender Kurvenform von Generator- und Motorspannung, viel stärker aber, wenn höhere Harmonische ungleicher Ordnung in Generator- und Motorspannung enthalten sind.

Das Synchronmotordiagramm kann nicht in einfacher Weise auf die höheren Harmonischen übertragen werden. Denn die Reaktanz des Synchronmotors ist der Periodenzahl nicht proportional, und dann sind auch die elektromotorischen Kräfte der höheren Harmonischen bei stromdurchflossenem Anker anders und zwar höher als bei strom-

losem Anker. Infolgedessen sind die Ströme der höheren Harmonischen wesentlich grösser, als bei einfacher Uebertragung des Diagramms sich ergeben würde.

Die Stärke des Gesamtstroms der höheren Harmonischen lässt sich annähernd aus dem Minimalstrom bei Belastung oder besser bei Leerlauf des Synchronmotors und dem dabei beobachteten maximalen Leistungsfaktor auf einfache Weise berechnen und ist um so höher, je mehr der Leistungsfaktor von dem Wert 1 dabei abweicht.

Der Minimalstrom bei $\cos \varphi = 0$ ergibt direkt den Strom der höheren Harmonischen.



Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352029

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316090

CHNICZNE KRAKÓ

A. GŁÓWNA

431

S. I. X. 52. 10.000

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352030

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316092

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352031

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316093

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352032

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316094

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352033

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316095

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-352034

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000316096

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



II-351649

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000299088