Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens

Herausgeber: Association suisse des électriciens

Band: 16 (1925)

Heft: 11

Artikel: Die Theorie des Induktionsreglers

Autor: Brunn, A.v.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057300

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN
BULLETIN
ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich, im Januar dazu die Beilage „Jahresheft".

Alle den **Inhalt** des „Bulletin" betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins
Seefeldstrasse 301, Zürich 8 — Telephon: Limmat 96.60*, welches die Redaktion besorgt.

Alle Zuschriften betreffend **Abonnement, Expedition** und **Inserate** sind zu richten an den Verlag:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei A.-G.
Stauffacherquai 36/38 Zürich 4 Telephon: Selnau 38.68*

Ce bulletin paraît mensuellement. — „**L'Annuaire**" est distribué comme supplément dans le courant de janvier.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la **matière** du „Bulletin" au

Secrétariat général de l'Association Suisse des Electriciens
Seefeldstrasse 301, Zurich 8 — Telephon: Limmat 96.60* qui s'occupe de la rédaction.

Toutes les correspondances concernant les **abonnements, l'expédition** et les **annonces**, doivent être adressées à l'éditeur

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Stauffacherquai 36/38 Zurich 4 Telephon: Selnau 38.68*

Abonnementspreis (für Mitglieder des S. E. V. gratis) für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft: Schweiz Fr. 20.—, Ausland Fr. 25.— Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 2.— plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire Fr. 20.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger. L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 2.—, port en plus.

XVI. Jahrgang
XVIe Année

Bulletin No. 11

November
Novembre 1925

Die Theorie des Induktionsreglers [1]).

Von *A. v. Brunn*, dipl. Ing., Pilsen.

Der Autor weist einleitend auf die Bedeutung des Induktionsreglers für die Elektrizitätswerke hin und entwickelt, anknüpfend an eine frühere Arbeit[1]), das Vektordiagramm für den einfachen und doppelten Induktionsregler. Er zeigt, wie aus diesen Diagrammen die wattlose Leistung und die Drehmomente solcher Regler berechnet werden können. Sodann zeigt er, wie die Ausgleichsströme zwischen parallelgeschalteten Reglern bestimmt werden können. Der Autor behandelt darauf das aktuelle Problem[2]) der Verwendung des Induktionsreglers als Phasenschieber zwischen parallelarbeitenden Kraftwerken. An zwei Beispielen erläutert er die praktische Anwendung der entwickelten Diagramme und zeigt zum Schluss, wie der Regler zweckmässigerweise geschaltet werden soll und wie die richtige Schaltung im Fabrikprüfraum nachgeprüft werden kann.

1) *Siehe Bulletin S. E. V. 1922, Seite 386 u. ff. und 449 u. ff.*
2) *Siehe Bulletin S. E. V. 1925, No. 10, Aufsatz J. Kristen-Oerlikon.*

L'auteur parle d'abord de l'importance du régulateur d'induction pour les centrales d'électricité et développe le diagramme vectoriel du régulateur simple et du régulateur double, en se référant à un travail antérieur[1]). Il montre comment on peut calculer d'après ces diagrammes la puissance déwattée et le couple de tels régulateurs. Il fait voir ensuite comment peuvent être déterminés les courants d'équilibre circulant entre régulateurs d'induction branchés en parallèle. L'auteur traite alors le problème actuel[2]) de l'emploi du régulateur d'induction comme déphaseur entre centrales interconnectées. Il commente l'application pratique des diagrammes développés à l'aide de deux exemples et montre en terminant comment le régulateur doit être connecté pour atteindre son but et comment le schéma correct peut être contrôlé à la plate-forme d'essai.

1) *Voir Bulletin A. S. E. 1922, page 386 et suiv., 449 et suiv.*
2) *Voir Bulletin A. S. E. 1925, No. 10, article Kristen-Oerlikon.*

1. Bedeutung des Induktionsreglers.

Mit dem zunehmenden Bau grosser Kraftwerke und entsprechend langer Ueberlandleitungen ist das Problem der Spannungsregulierungen wieder mehr in den Vordergrund getreten.

Es gibt prinzipiell zwei Arten der Spannungsregulierung. Die eine besteht darin, dass der Fernleitung am Ende wattlose Leistung zugeführt wird, wodurch

1) Diese Arbeit ist bei der Redaktion am 6. August 1925 eingegangen.

der Spannungsabfall reguliert werden kann. Diese Methode findet nur bei sehr langen Leitungen Anwendung, wie sie beispielsweise in Amerika vorkommen. Die benötigte wattlose Leistung wird von leerlaufenden übererregten Synchronmaschinen geliefert. Die andere Art der Spannungsregulierung geschieht dadurch, dass am Ende der Leitung die Netzspannung durch eine zusätzliche variable elektromotorische Kraft (E. M. K.) verändert wird. Diese E. M. K. kann einem Induktionsregler, einem Stufentransformator oder einem mit der Netzfrequenz synchron umlaufenden Seriegenerator entnommen werden.

Die beiden letztgenannten Regulierungsmethoden haben in der Praxis nur geringe Bedeutung erlangt, während der Induktionsregler immer häufiger Verwendung findet. Dem Stufentransformator gegenüber hat der Induktionsregler den Vorteil der stetigen Spannungsregulierung und des Wegfalls von Kontaktfingern, welche der Abnützung unterworfen sind, voraus. Vom Seriegenerator unterscheidet er sich dadurch, dass er sich nur während des Regulierprozesses bewegt, sich also bedeutend weniger abnützt und ausserdem, dass sein Wirkungsgrad erheblich besser ist. In Verbindung mit einem Oeldruckschnellregler stellt der Induktionsregler einen geradezu idealen Spannungsregulator dar. Ist er doch imstande, plötzliche Spannungsschwankungen von 20 – 30 % der Netzspannung in der kurzen Zeit von 1,5 – 2 Sekunden vollkommen auszugleichen.

Ausser zur Spannungsregulierung kann der Induktionsregler auch als Phasenschieber verwendet werden, indem er bei parallelarbeitenden Kraftwerken gestattet, die gesamte wattlose Leistung des Netzes willkürlich auf die einzelnen Werke zu verteilen. Eine solche Regulierung ist z. B. dann erwünscht, wenn zwei Werke parallel arbeiten, von denen das eine wegen schlechtem $\cos\varphi$ überlastet ist, während das andere noch sehr gut wattlose Leistung abgeben könnte.

In Anbetracht des regen Interesses, das dem Induktionsregler in neuerer Zeit auch in Europa entgegengebracht wird, in Amerika erfreut er sich schon seit Jahren grosser Verbreitung, erscheint es berechtigt, eine eingehende Theorie dieses Apparates zu entwickeln. Leider finden sich in der gesamten Fachliteratur nur sehr spärliche Angaben über den Induktionsregler, so dass vielerorts noch recht unklare Ansichten über seine Wirkungsweise bestehen.

In theoretischer Hinsicht bietet der Induktionsregler soviel Interessantes, dass er die volle Aufmerksamkeit des Theoretikers verdient, aber auch der Praktiker wird, wie wir noch weiter unten sehen werden, aus der hier entwickelten Theorie Nutzen ziehen können, denn wir gelangen zu Resultaten, die den Betriebsmann lebhaft interessieren können.

Als eines dieser Ergebnisse wollen wir schon hier erwähnen, dass der Induktionsregler zwei unsymmetrische Arbeitsgebiete besitzt, wobei er je nach dem Anschluss der Klemmen und der Phasenfolge des Netzes dauernd entweder im einen oder im anderen Bereiche arbeitet.

Diese Gebiete unterscheiden sich u. a. durch die Grösse des bei Belastung aufgenommenen Rotorstromes, wodurch die Kupferverluste des Rotors in den beiden Bereichen wesentlich verschieden werden. Mit Hilfe der hier entwickelten Theorie kann der Betriebsmann feststellen, ob *sein* Induktionsregler im günstigen oder ungünstigen Gebiet funktioniert und auf welche Weise er ihn umschalten muss, damit er im günstigen Bereich arbeitet, wenn das Gegenteil der Fall sein sollte.

Auch die Tatsache, dass ein Parallelbetrieb mehrerer Induktionsregler nur möglich ist, wenn alle im gleichen Gebiete arbeiten, lässt es erwünscht erscheinen, eine Methode kennen zu lernen, mit deren Hilfe die Einstellung eines Induktionsreglers mit Sicherheit kontrolliert werden kann.

2. Literaturangaben.

Die meisten bekannten elektrotechnischen Lehrbücher geben für den Induktionsregler nur ein Spannungsdiagramm an und beschränken sich meist nur auf den

Leerlauf. So finden wir z. B. bei E. Arnold[2]) nur sehr spärliche Angaben über diesen interessanten Apparat. Arnold beschränkt sich auf die Leerlaufspannungsdiagramme des Einfach- und Doppelreglers. Er behauptet u. a., dass beim Doppelregler die beiden Rotordrehmomente sich in jeder Stellung Gleichgewicht halten. Dass dies nur bedingt der Fall ist, gibt Zederbohm[3]) als erster an. Zederbohm hat auch bereits ein Induktionsregler-Spannungsdiagramm mit Spannungsabfällen gezeichnet, wobei er aber keinen Beweis dafür erbringt, dass sich beim Induktionsregler die Spannungsabfälle wie beim gewöhnlichen Transformator konstruieren lassen.

In seinem Diagramm ist der Magnetisierungsstrom nicht eingetragen.

Kittler-Petersen[4]) gibt ein Diagramm des idealen Induktionsreglers an.

Fischer-Hinnen[5]) zeigt ein reines Spannungsdiagramm des Induktionsreglers. Er gibt auch eine (allerdings etwas ungenaue) Formel zur Berechnung der Drehstromreglermomente. Viel zu kleine Werte liefert seine Formel für die Momente der Einphasenregler.

Auf die erhebliche Unsymmetrie der zwei Reglergebiete macht zum erstenmal der Verfasser[6]) dieser Arbeit in einem früheren Aufsatz des Bulletin Oerlikon aufmerksam. Es wird dort die eigenartige Phasenverschiebung des Rotorstromes mit kurzen Worten erklärt. Die Arbeit gibt ein Diagramm für konstanten Statorstrom und zeigt die Kurven der Rotorströme bei konstanter externer Leistung. Für letztere Bedingung sind auch die Drehmomentkurven des einfachen und des Doppelreglers angegeben. Der Aufbau des Reglerdiagrammes ist streng systematisch, sodass der Sinn der Energieströmung und die Drehrichtung der Momente aus dem Diagramm eindeutig hervorgehen.

Ein Diagramm für konstante externe Leistung entwickelt J. Kristen[7]) im Bulletin Oerlikon. Er gibt die Ortskurven der Ströme und Spannungen unter Vernachlässigung der Spannungsabfälle an. Des beschränkten Raumes wegen wird die symbolische Ableitung des Diagrammes nicht angegeben. Eine genauere Definition des Winkels φ_2 wäre, um jeden Irrtum beim Aufbau des Diagrammes auszuschliessen, erwünscht gewesen. (Bekanntlich gehören beim Induktionsregler im allgemeinen zu jedem $\cos\varphi$ vier mögliche Winkel φ und dementsprechend vier mögliche Lagen des Statorstromes, von denen natürlich nur eine im gegebenen Falle richtig sein kann.)

Vor ca. 2 Jahren hat E. F. Gehrkens[8]) ein Buch über den Induktionsregler geschrieben, das fast alle wichtigen theoretischen Eigenschaften des Induktionsreglers behandelt und sich insbesondere mit seiner Konstruktion und den Verwendungsmöglichkeiten befasst. Leider fehlt in der vektoriellen Darstellung häufig der für den Prüffeld-Ingenieur so wichtige innige Zusammenhang zwischen Zeit- und Raumdiagramm. Für den Theoretiker und Konstrukteur bietet das Buch aber eine Fülle des Interessanten und viele wertvolle Anregungen.

Ein für Projekteure und Berechnungsingenieure sehr wertvoller Aufsatz von A. Hoeffleur[9]) ist ebenfalls im Bulletin Oerlikon erschienen. Nach einer kurzen Beschreibung der Wirkungsweise des Reglers, wobei er die wirtschaftliche Bedeutung des günstigen Arbeitsgebietes hervorhebt, konstruiert der Verfasser das von Herrn Ing. J. Kristen entwickelte Diagramm konstanter externer Leistung für ein angenommenes Beispiel, wobei er auch die Spannungsabfälle berücksichtigt und alle wichtigen Grössen und deren Variationen darstellt. Herr Ing. Hoeffleur gibt,

[2]) E. Arnold: Die Wechselstromtechnik, Band II: Die Transformatoren, Seite 417 u. ff.

[3]) Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen, 1914, Seite 208.

[4]) Kittler-Petersen: Allgemeine Elektrotechnik, 1910, Band III, Seite 526.

[5]) Fischer-Hinnen: Lehrbuch für Elektrotechniker, Seite 348.

[6]) Verfasser: Theorie des Induktionsreglers, Bulletin Oerlikon, No. 5, November 1921.

[7]) J. Kristen: Ein neuer Induktionsregler und sein Diagramm, Bulletin Oerlikon, Juni und Juli 1922.

[8]) E. F. Gehrkens: The Induction Voltage Regulator, General Electric Co., U. S. A., 1923.

[9]) A. Hoeffleur: Dreiphasen-Induktionsregler, Bulletin Oerlikon, No. 30, Dezember 1923.

was den Aufsatz besonders wertvoll macht, eine Reihe von allgemeinen Berechnungsformeln zur Bestimmung aller den projektierenden Ingenieur und Berechner interessierenden Grössen an. Auch für Regleranlagen mit Serie- und Erregertransformatoren führt er Formeln an, mit deren Hilfe die Regler- und Transformerleistungen bequem berechnet werden können.

Die vorliegende Arbeit versucht alle wichtigen stationären Vorgänge im Induktionsregler in einheitlicher Weise vektoriell darzustellen. Die Entwicklung der Diagramme geschieht auf möglichst physikalischer Basis unter Vermeidung der symbolischen Methode mit Hilfe einer genauen Vektorentheorie, so dass die so erhaltenen Diagramme denjenigen, welche man mit der symbolischen Methode erhält, in nichts nachstehen.

Das Mass an mathematischen und geometrischen Vorkenntnissen ist auf ein Minimum reduziert worden, so dass das Eindringen in das interessante Gebiet des Induktionsreglers einem grossen Kreise von Elektrotechnikern ermöglicht wird.

Wesentlich neu ist in dieser Arbeit die Entwicklung der Ortskurven der Ströme und Spannungen für konstanten Statorstrom und konstante externe Leistung unter Verwendung *elementarer* Hilfsmittel, sowie die Behandlung der Ausgleichsvorgänge an parallelarbeitenden Einfach- und Doppelinduktionsreglern. Als besonderer Vorzug der Arbeit darf hervorgehoben werden, dass durch den systematischen Aufbau und die einheitliche Begriffsbestimmung aller Vektoren, das Diagramm eines Reglers *im wesentlichen* unabhängig ist von dessen Einbau ins Netz, so dass sich z. B. eine *Umkehr der Energieströmung* im Diagramm lediglich durch *eine Veränderung der Phasenverschiebung* der Ströme kund tut. Dass sich bei einer so methodischen Darstellung eine viel klarere Uebersicht der Verhältnisse ergibt und ausserdem das Entstehen von Irrtümern weniger wahrscheinlich ist als bei Verwendung anderer Methoden, braucht wohl nicht besonders hervorgehoben zu werden.

3. Grundlagen für den Aufbau der Vektordiagramme.

Um ein möglichst klares Bild der elektrischen Zustände des Induktionsreglers zu erhalten, wollen wir an Hand einer *graphischen* Methode einen allgemeinen Belastungsfall, sowohl des idealen als auch des wirklichen Induktionsreglers, konstruieren, um dann unter Verwendung geometrischer Lehrsätze von diesen Einzelfällen zu den Ortskurven vorzudringen. Die Grundlagen dieser graphischen Methode finden sich in den Heften 9 und 10 dieses Bulletin vom Jahrgange 1922 unter dem Titel: *„Die Bedeutung des Bezugssinnes im Vektordiagramm."* Ich setze hier die Kenntnis meines Aufsatzes voraus, wiederhole aber, um dem Leser ein lästiges Nachschlagen zu ersparen, die Hauptsätze desselben.

Diese Sätze lauten:

„I. Kehren wir den Bezugssinn eines Leiterelementes um, so müssen wir, um denselben elektrischen Momentanzustand des Leiterelementes darzustellen, seine Strom- und Spannungsvektoren je um 180° umkehren.

II. Der Vektor der Spannung zwischen zwei Punkten eines Wechselstromnetzes ist die Resultante aller Spannungsvektoren der zwischen diesen zwei Punkten in Serie geschalteten Leiterelemente, wenn diese einzelnen Vektoren sich auf Bezugspfeile beziehen, die alle *den* Durchlaufssinn festlegen, auf den sich ihre Resultante beziehen soll.

IIa. Beziehen wir alle Spannungsvektoren der Leiterelemente eines geschlossenen Stromkreises auf Bezugspfeile, welche zusammen einen einheitlichen Umlaufssinn festlegen, so bilden alle diese Vektoren ein geschlossenes Polygon.

III. Der Vektor des resultierenden Stromes mehrerer in einem Verzweigungspunkte zusammenfliessender Ströme ist die Resultante aller dieser Stromkomponenten, wenn alle diese Vektoren auf Bezugspfeile bezogen werden, die demselben Durchlaufssinn entsprechen, auf den der resultierende Stromvektor bezogen werden soll.

IIIa. Beziehen wir die Stromvektoren aller in einem Verzweigungspunkte verknüpften Leiterelemente auf Bezugspfeile, welche entweder alle dem Verzweigungspunkte zu-, oder aber alle von ihm weggerichtet sind, so bilden alle diese Vektoren ein geschlossenes Polygon.

IV. Unter der Klemmenspannung eines Leiterelementes verstehen wir die Resultante aller der in diesem Leiterelement wirkenden elektrischen Kräfte."

In den meisten Lehrbüchern für Elektrotechnik findet man die *Klemmenspannung* etwas anders definiert, indem ihre Definition für alle generatorisch arbeitenden Systeme mit der obigen zusammenfällt, während man bei motorisch arbeitenden Maschinen als *Klemmenspannung die vom Netz her der Maschine aufgedrückte Spannung* bezeichnet. Diese ist gegenüber der von uns definierten Spannung um 180^0 (elektrisch) verdreht.

Es hat dies zur Folge, dass man dann mit den Sätzen II und IIa nicht mehr in konsequenter und deshalb bequemer Weise arbeiten kann. Unangenehmer aber ist die Tatsache, dass der Winkel zwischen Strom und Spannungsvektor eines Leiterelementes immer ein spitzer wird, so dass man dem Diagramm nie unmittelbar entnehmen kann, ob das Leiterelement generatorisch oder motorisch und induktiv oder kapazitiv arbeitet.

Solange eine elektrische Maschine, z. B. der Asynchronmotor, nur in *einem* Quadranten arbeitet, ist die Sache noch nicht schlimm, sobald aber der Stromvektor in einen anderen Quadranten hinüber wandert, beginnt die Verwirrung. So sagt man z. B., dass der leerlaufende Asynchronmotor mit *nacheilendem* Strome, der leerlaufende Asynchrongenerator aber mit *voreilendem* Strome arbeitet, während wir doch in beiden Fällen nur *einen* Zustand der Asynchronmaschine vor uns haben. Das ganz analoge gilt natürlich auch von der übererregten Synchronmaschine, bei der man den Stromvektor im Motorbetrieb *voreilend,* im Generatorbetrieb *nacheilend,* und ausserdem im Generatorbetrieb von *induktiver* statt von *kapazitiver* Arbeitsweise spricht.

Indem wir also den leider schon so fest eingewurzelten Begriff der aufgedrückten Klemmenspannung beseitigen und die Spannung bei allen Leiterelementen eindeutig nach Satz IV definieren, erhalten wir die vier Stromquadranten, siehe meinen oben erwähnten Aufsatz, welche über den Arbeitszustand des betreffenden Leiterelementes ohne weiteres ein klares Bild ergeben. Die vier Stromquadranten erhalten wir, indem wir den Spannungsvektor jedes Leiterelementes nach rückwärts verlängern und durch seinen Fusspunkt das Lot auf den Spannungsvektor fällen. Die Ebene wird dadurch in vier Quadranten geteilt, in welchen der Stromvektor liegen muss. Zählen wir den Winkel φ der Phasenverschiebung zwischen Strom- und Spannungsvektor im Gegenuhrzeigersinne, vom Spannungsvektor aus, positiv, so durchlaufen wir, wenn wir bei $\varphi = 0$ beginnen und im Sinne plus φ weiterschreiten, die vier Quadranten in folgender Reihenfolge:

	φ	
I. Quadrant:	$0 \div \frac{\pi}{2}$	generatorisch-induktiv,
II. Quadrant:	$\frac{\pi}{2} \div \pi$	motorisch-induktiv,
III. Quadrant:	$\pi \div \frac{3\pi}{2}$	motorisch-kapazitiv,
IV. Quadrant:	$\frac{3\pi}{2} \div 2\pi$	generatorisch-kapazitiv.

In die Figuren 6a, 8, 9 und 10 sind diese Stromquadranten zur deutlicheren Darstellung der Belastungsverhältnisse eingetragen.

Bedenkt man, dass sich beim Induktionsregler nicht nur während der Belastungsänderungen des Netzes, sondern auch während des Regulierprozesses die Arbeitsweise jedes einzelnen Teiles vollständig ändert, so erkennt man, dass nur eine streng konsequente Methode und Darstellungsweise ein wirklich brauchbares Vektordiagramm liefern kann.

Es soll schon an dieser Stelle hervorgehoben werden, dass zur Klarstellung der Verhältnisse im Induktionsregler seine Einbauart im Netz, sowie die Netzbelastungsverhältnisse vor und hinter dem Regler bekannt sein müssen, weshalb wir uns genötigt sehen, auch die vektorielle Darstellung von Leitungsnetzen näher ins Auge zu fassen.

Wir brauchen wohl nicht mehr besonders zu betonen, dass auch die Darstellung der Belastungsverhältnisse von komplizierten Leitungsnetzen an Hand der hier entwickelten graphischen Methode mit den charakteristischen vier Quadranten eine bedeutend klarere und einfachere geworden ist. Versucht man beispielsweise, das Diagramm eines Kupplungstransformators zu zeichnen, dessen Durchgangsenergie bald die eine, bald die entgegengesetzte Richtung annimmt, so sieht man ein, wie unbequem das normale und in den meisten Lehrbüchern dargestellte Transformatordiagramm wird und man muss sich wundern, mit welcher Zähigkeit an der alten Darstellungsweise festgehalten wird, bei der praktisch nichts gewonnen, wohl aber die physikalische Vorstellung getrübt wird.

4. Wirkungsweise und Konstruktion des Induktionsreglers.

Die Wirkungsweise des Dreiphasen-Induktionsreglers, mit dem wir uns vorwiegend befassen wollen, besteht darin, dass jeder Phasenspannung E_r des zu regulierenden Netzes eine der Grösse nach konstante, aber in der Phasenstellung variable E. M. K. E_s (Fig. 1) vektoriell hinzugefügt wird. In Fig. 1 ist das Diagramm für nur eine Reglerphase gezeichnet. Da die Verhältnisse in den anderen zwei Phasen genau dieselben sind, beschränken wir uns in allen Diagrammen auf die Darstellung in nur einer Phase. Die Zusatzspannungen der drei Phasen sind unter sich genau wie die Phasenspannungen je um 120^0 phasenverschoben, so dass, nach Satz II, die resultierenden variablen Phasenspannungen E_2 auch wieder vollkommen symmetrisch sind. Je nach der vektoriellen Richtung der Zusatzspannungen ändert sich dann die Grösse und Richtung der resultierenden Spannungen E_2. Ist E_s in Phase mit E_r, so erreicht die Resultante E_2 ihr *Maximum*, ist aber E_s zu E_r um 180^0 phasenverschoben, so erreicht E_2 ihr Minimum. Weil E_s immer konstant ist, so bewegt sich die Spitze von E_2 auf einer Kreislinie k_1. Da jedem Punkt P auf der rechten Seite der Kreislinie ein solcher Punkt P' auf der linken Seite entspricht, für den E_2 dieselbe Grösse E_2', wenn auch nicht dieselbe Phasenverschiebung, besitzt, so genügt es für die Spannungsregulierung, wenn der Induktionsregler nur auf einer der beiden Kreishälften arbeitet.

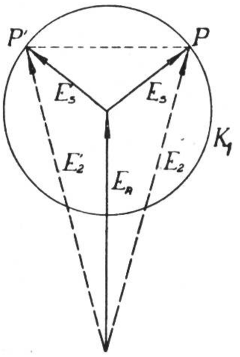

Fig. 1.
Spannungsdiagramm des Induktionsreglers.

In bezug auf den mechanischen Aufbau stimmt der Induktionsregler (insbesondere was den aktiven Teil anbelangt) mit dem Asynchronmotor fast völlig überein. Nur die Schaltung ist eine andere, indem normalerweise der Rotor den Netzphasen parallel und der Stator mit ihnen in Serie geschaltet wird (Fig. 2). Da der Induktionsregler keine Eigenventilation hat, erhält er einen besonderen Ventilator mit Antriebsmotor, oder er wird, insbesondere bei Hochspannung, in einen Oelkasten mit natürlicher oder künstlicher Kühlung eingebaut. Häufig werden auch Stator oder Rotor oder alle beide nur indirekt unter Zwischenschaltung von Transformatoren ans Netz geschaltet (Fig. 3).

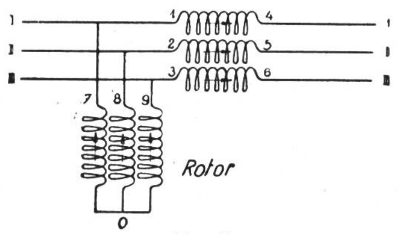

Fig. 2.
Schaltungsschema des Induktionsreglers.

Fig. 2 stellt das prinzipielle Schaltungsschema und Fig. 4a das prinzipielle Wicklungsschema eines zweipoligen Induktionsreglers dar, wobei der Einfachheit wegen im Stator und Rotor Einlochwicklungen angenommen sind. Beim Stator sind die Aus- und Eingänge, beim Rotor nur die Ausgänge gezeichnet.

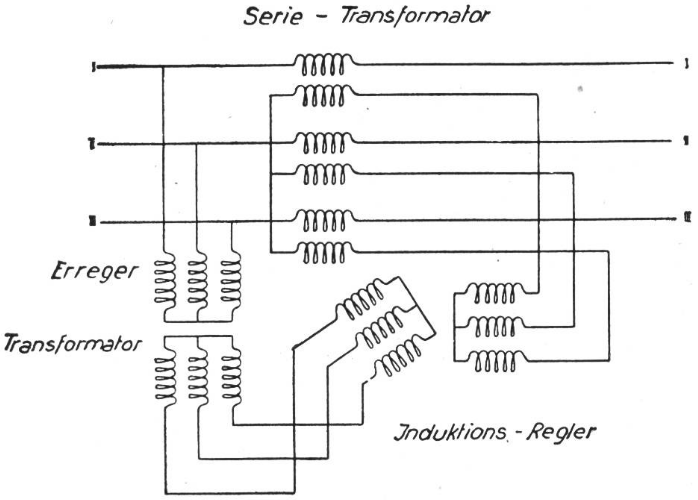

Fig. 3.
Schaltungsschema des Induktionsreglers mit Serien- und Erregertransformatoren.

Führen wir dem Rotor über die Klemmen 7, 8 und 9 Drehstrom zu, so entsteht im Stator- und Rotoreisen ein zweipoliges Drehfeld. Dieses erzeugt sowohl in den Stator- als auch in den Rotorleitern E. M. K. Letztere halten der Netzspannung Gegengewicht, erstere geben die gewünschten Zusatz-E. M. K. Diese sind mit den entsprechenden Rotor-E. M. K. der korrespondierenden Phasen nicht in Phase, weil die betreffenden Leiter von der Welle des Drehfeldes nicht gleichzeitig getroffen werden. Entsprechend dem elektrischen Raumwinkel ψ, dem Verdrehungswinkel des Rotors relativ zum Stator, trifft das Drehfeld den Leiter 4 des Stators um den Zeitwinkel ψ früher als den Leiter 7 des Rotors. Dementsprechend ist die E. M. K. E_s von Leiter 4 gegenüber derjenigen von Leiter 7 um den Phasenwinkel ψ in Voreilung (siehe Fig. 4b), wobei wir ein für allemal die *Festsetzung* machen, *dass wir den Winkel ψ im Sinne des Drehfeldes positiv zählen.*

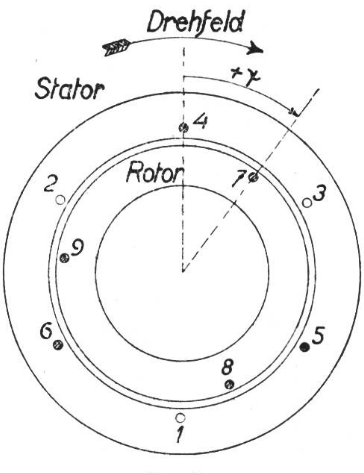

Fig. 4a.
Prinzipielles Wicklungsschema eines zweipoligen Induktionsreglers.

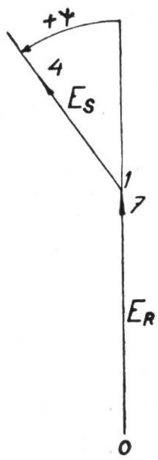

Fig. 4b.
Spannungsdiagramm zu Fig. 4a.

Bezüglich der Einzeichnung der *Bezugspfeile* treffen wir folgende Abmachungen:

1. Die Bezugspfeile der drei Rotorphasen sollen vom Sternpunkt weggerichtet sein.
2. Die Bezugspfeile der drei Statorphasen sollen den gleichen Durchlaufssinn (über die Verknüpfungspunkte von Stator und Rotor) wie die Bezugspfeile der entsprechenden Rotorphasen besitzen (Fig. 2).
3. Im übrigen gelten auch hier die bekannten Konventionen wie beim normalen Transformator, d. h. in der sogenannten *Grundstellung,* das ist die Stellung des Rotors für $\psi = 0$, sollen die E. M. K.-Vektoren bezogen auf die oben definierten Bezugsrichtungen als parallele und gleichgerichtete Vektoren erscheinen, oder mit anderen Worten:

   Durchfliessen zwei Ströme je den Stator und den Rotor im Sinne ihrer Bezugspfeile, so addieren sich ihre magnetisierenden Kräfte direkt.

Aus diesen Festsetzungen folgt:

1. Die Spannung E_2 ist, nach Satz II, immer die *Vektorsumme* der Spannung von Rotor- und Statorphase (Fig. 1 und 2).
2. Der dem Verknüpfungspunkte $1-7$ zufliessende Strom ist (nach Satz I und III)

immer die *Vektordifferenz,* gebildet aus dem Statorstrom und vermindert um den Rotorstrom (Fig. 2).

Durch Vertauschen zweier entsprechender Phasen vor und hinter dem Regleraggregat kann, ohne dass sich im übrigen Netze etwas ändert, der Umlaufssinn des Drehfeldes gekehrt werden. Indem wir auch jetzt den Winkel ψ *im Sinne des Drehfeldes positiv* zählen, erscheint im Diagramm (Fig. 4b) der Winkel ψ immer *im Gegenuhrzeigersinne* (Vektorendrehsinn) *positiv. Durch diese Festsetzung machen wir das Diagramm unabhängig vom Drehsinn des Drehfeldes.*

5. Bedeutung des Schaltsinnes (Unterwerk).

Wir gehen nun dazu über, den *belasteten* Induktionsregler zu betrachten. Wie wir schon früher betont haben, sind wir nur dann imstande, das Vektordiagramm des Induktionsregler zu konstruieren, wenn wir die *Netzbelastung* vor und hinter dem Regler kennen. Wir benützen dazu folgende einheitliche Methode, die wir auf einen konkreten Fall anwenden.

Es soll sich darum handeln, die wattlose und Wattleistung zu bestimmen, die dem Unterwerke *U* (Fig. 5) durch die Leitung *a* noch zuzuführen ist, wenn das Unterwerk unter folgenden Verhältnissen arbeitet:

1. Die Leitung *b* führt zu einer Fabrik, in der viele schlecht belastete Asynchronmotore laufen.
2. Durch die Leitung *c* wird dem Unterwerk aus einer kleinen Wasserkraftanlage mit Asynchrongenerator elektrische Energie zugeführt.
3. Die Leitung *d* speist eine Mühle, deren Besitzer einen grossen Asynchronmotor in einen Synchron-Induktionsmotor umbauen liess, weil der Stromlieferant unter dieser Bedingung den Strompreis des besseren Leistungsfaktors wegen erheblich reduzierte.

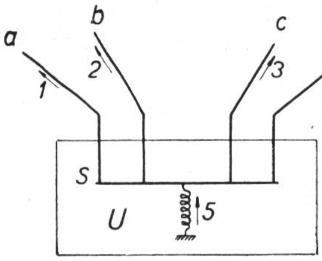

Fig. 5.
Schema eines Unterwerkes.

Es besteht nun die Aufgabe, den Strom zu bestimmen, der die Leitung *a* durchfliesst. Dies geschieht in folgender Weise:

Wir legen jeder Leitung einen besonderen Bezugssinn bei, den wir durch einen entsprechenden Bezugspfeil markieren (Fig. 5). Auf diese Bezugspfeile beziehen wir die Ströme aller Leitungen. *Die Spannung des Netzes* beziehen wir allgemein auf die *Durchflussrichtung vom Sternpunkt zur Freileitung* (wie es z. B. in Fig. 5 für eine Erdungsdrosselspule dargestellt ist). Indem wir die Ströme der Leitungen mit diesem Spannungsvektor zu einem Diagramm vereinigen, erhalten wir ein Bild der Arbeitsweise jeder Leitung. Wir können auch hier die Spannungsebene in je vier Felder zerlegen (Fig. 6a) und erhalten die bekannten vier Stromquadranten. Der Bezeichnung generatorisch entspricht ein Energiefluss in Richtung des Bezugspfeiles, der Bezeichnung motorisch die umgekehrte Energieströmung ins Unterwerk. Das analoge gilt von der wattlosen Energie.

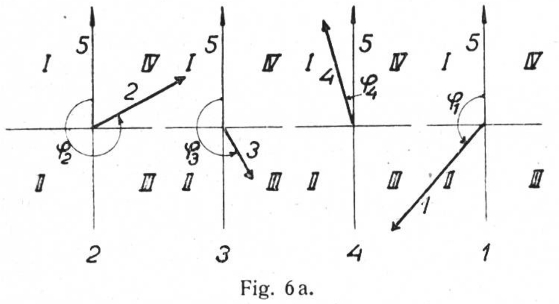
Fig. 6a.
Belastungsdiagramm des Unterwerkes.

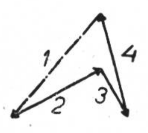

Fig. 6b.
Stromdiagramm des Unterwerkes.

Nach diesen Festsetzungen sind wir imstande, die Ströme der Leitungen *b*, *c* und *d* einzutragen:

Durch die Leitung *b* gibt das Unterwerk Wattleistung und viel wattlose Leistung an die Fabrik ab. Der Stromvektor der Leitung *b* kommt also in den vierten Quadranten zu liegen (Fig. 6a).

Da die Leitung *c* elektrische Energie aus dem Asynchrongenerator erhält, arbeitet *c* motorisch. Um aber den Asynchrongenerator zu magnetisieren, muss das Unterwerk wattlose Leistung abgeben. Die Leitung *c* arbeitet also motorisch-kapazitiv, ihr Stromvektor liegt im dritten Quadranten.

Der übererregte Synchron-Induktionsmotor benötigt viel elektrische Energie. Er gibt aber wattlose Energie ans Unterwerk ab, so dass die Leitung *d* generatorisch-induktiv im ersten Quadranten arbeitet.

Es ergibt sich aus dieser Betrachtung ganz allgemein die einfache Regel, *dass zwei elektrische Maschinen oder Apparate, welche allein am Anfang und am Ende einer Leitung angeschlossen sind, immer in den entgegengesetzten Quadranten arbeiten.* Der normalerweise übererregte Synchrongenerator wirkt im vierten, der von ihm gespeiste Asynchronmotor im zweiten Quadranten usw. Wäre die Leitung verlustfrei, induktions- und kapazitätslos, so würden sich die Phasenverschiebungen beider Maschinen genau um den Wert π unterscheiden.

Um den Stromvektor der Leitung *a* zu bestimmen, betrachten wir die Sammelschiene *S* (Fig. 5) als einen einzigen Verzweigungspunkt. Dann gilt für die Sammnelschiene der Satz III a, wonach die Stromvektoren aller abgehenden Leitungen ein geschlossenes Polygon bilden müssen, da ja alle Bezugspfeile von der Sammelschiene *S* aus weggerichtet sind. (Der Strom der Erdungsdrosselspule wird hier vernachlässigt.)

Fig. 6b zeigt das Stromvektorpolygon. Vektor 1 der Leitung *a* schliesst das aus den übrigen Vektoren 2, 3 und 4 gebildete Polygon. Die Leitung *a* arbeitet motorisch-induktiv im zweiten Quadranten. Die Leitung führt dem Unterwerk wattlose und Wattenergie zu. Der am anderen Ende der Leitung liegende Generator arbeitet generatorisch-kapazitiv im vierten Quadranten. Den Winkel zwischen Spannungsvektor 5 und dem zugehörigen Stromvektor nennen wir den Phasenverschiebungswinkel der Leitung (betrachtet vom Unterwerke aus), den wir vom Spannungs- zum Stromvektor im Gegenuhrzeigersinne positiv zählen.

6. Diagramm des idealen Induktionsreglers.

Nachdem wir nun eine Methode kennen gelernt haben, welche uns gestattet, die Belastung eines Netzes eindeutig graphisch zu erfassen, wenden wir uns wieder zum Induktionsregler und entwickeln sein Belastungsdiagramm.

Es gibt prinzipiell zwei Schaltungsarten, nach denen der Regler ins Netz eingebaut werden kann. Entweder wird der Stator so geschaltet, *dass sein Bezugspfeil mit demjenigen der in Betracht gezogenen Leitung eine und dieselbe Durchlaufsrichtung festlegt: Schaltung A,* oder aber: *die Bezugspfeile sind einander entgegengerichtet: Schaltung B.* (Es sei schon hier bemerkt, dass die Zwischenschaltung von Serien- und Erregertransformatoren an dieser prinzipiellen Unterscheidung nichts ändert.) Da der Induktionsregler immer zwischen zwei Leitungsenden, deren Bezugspfeile einander entgegengerichtet sind, eingebaut ist, so ist er, vom einen Leitungsende *A* (Fig. 7) aus betrachtet, nach *A*, vom andern, *B*, aus gesehen, nach *B* geschaltet. Es müssen demnach in den Fig. 8 und 9 die Stromvektoren von 2 und 4 (Fig. 7) gemäss Satz I gleich gross, aber je um 180° gegeneinander verdreht, im Diagramm erscheinen, während die Ströme 1 nach Satz I und III je die Vektordifferenz, gebildet aus Stator- minus Rotorstrom, darstellen. Auf die eigenartige Stellung des Rotorstromvektors 3 werden wir später zu sprechen kommen.

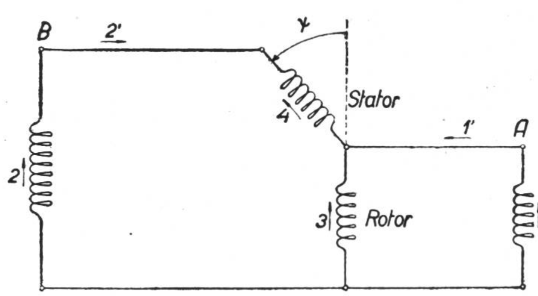

Fig. 7.
Prinzipielles Einbauschema eines Induktionsreglers ins Netz.

Die Diagramme 8 und 9 unterscheiden sich dadurch von einander, dass das Diagramm Fig. 8 für den Zustand gilt, wo die Energie von *A* nach *B* strömt, während bei Fig. 9 die Darstellung unter der Annahme entwickelt wurde, dass die Energieströmung sich von B nach A (Fig. 7) vollziehe.

Dementsprechend arbeitet im ersten Fall die Seite B motorisch, im zweiten generatorisch. Aus den Diagrammen Fig. 8 und 9 erkennt man, dass die *Richtung der Energieströmung* (dasselbe gilt auch von der wattlosen Energie) nur auf die *vektorielle Stellung der Ströme einen Einfluss hat und dass die Spannungen, mit Ausnahme der Spannungsabfälle,* die an die Belastungsströme gebunden sind, *durch den Wechsel der Energierichtung nicht beeinflusst werden.* Demnach erscheint auch die Zusatzspannung des Stators (Fig. 7) in beiden Diagrammen 8 und 9 als derselbe Vektor E_s unabhängig davon, ob der Generator vor oder hinter den Regler geschaltet ist. In den Diagrammen Fig. 8 und 9 sind die Spannungsabfälle und der Magnetisierungsstrom der Einfachheit wegen nicht eingetragen. Es handelt sich also um sogenannte „ideale" Diagramme. Zu den Belastungsströmen zählen wir nicht die Magnetisierungs- oder Leerlaufströme, die, wie der Name sagt, schon im Leerlauf auftreten und welche an die Spannungen gebunden sind, so dass sie relativ zu diesen fast vollständig feststehen und die Verdrehung der Belastungsströme nicht mitmachen.

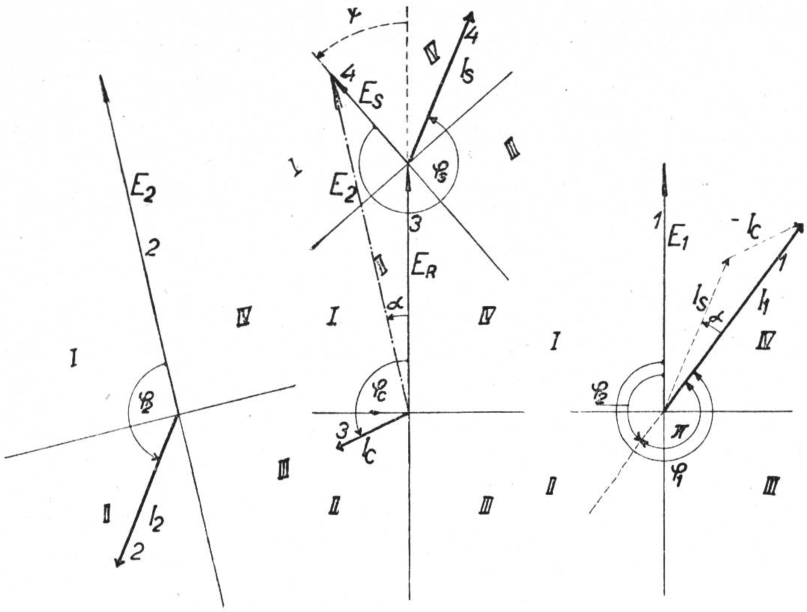

Fig. 8.
Belastungsdiagramm eines idealen Induktionsreglers (links Motor, rechts Generator).

Wir wollen nicht unerwähnt lassen, dass man sich das Diagramm Fig. 9 dadurch entstanden denken kann, dass sämtliche Belastungsströme im Diagramm 8 um den Phasenwinkel π verdreht wurden. Dies entspricht auch den Belastungsänderungen, wie sie in Unterwerken häufig vorkommen. Die Umkehrung der Energierichtung kann also auf zwei Arten erfolgen:

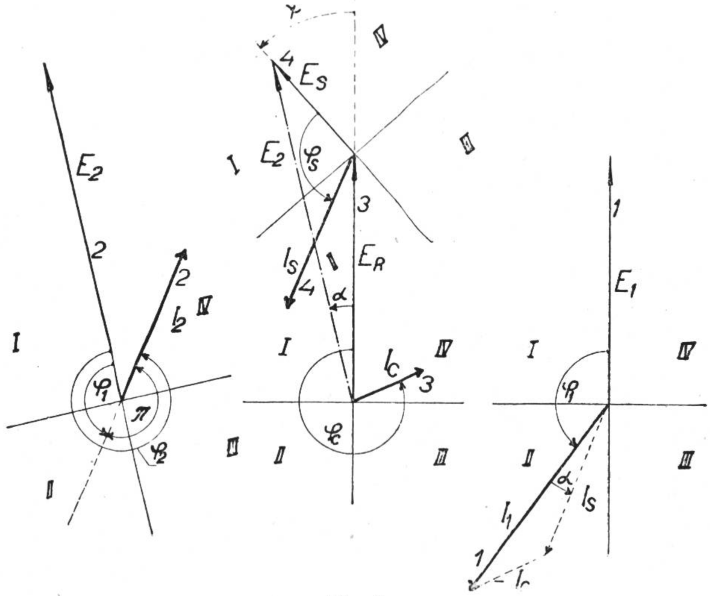

Fig. 9.
Belastungsdiagramm eines idealen Induktionsreglers (links Generator, rechts Motor).

1. Durch Vertauschen der Anschlussklemmen des Induktionsreglers.
2. Durch stetige Verdrehung der Belastungsstromvektoren, oder auch, indem man die Belastungsströme bei fester Phasenverschiebung auf den Wert 0 hinunter reguliert und sie in negativem Sinne wieder anwachsen lässt. Letzteres kommt allerdings sehr selten vor.

Bei stetigen Belastungsänderungen, bei denen sowohl die wattlose als auch die Wattenergie ihre Richtung wechseln können, arbeitet auch das hier entwickelte Induktionsreglerdiagramm *vollkommen stetig,* was bekanntlich beim gewöhnlichen Transformatordiagramm, wie es nach der alten Methode entworfen wird, nicht der Fall ist und als ein wesentlicher Vorzug der hier entwickelten Methode bezeichnet werden darf.

Es besteht also zwischen den Belastungszuständen der Fig. 8 und 9 kein prinzipieller, sondern nur ein quantitativer Unterschied. Haben wir für eine bestimmte Energierichtung das Diagramm richtig konstruiert, so lässt es sich auch für die entgegengesetzte Richtung *durch blosses Umkehren der Stromvektoren* leicht ableiten. Einige Sorgfalt erfordert lediglich die Beobachtung des Schaltsinnes A oder B des Reglers bei der Uebertragung der Leitungsströme I_1 oder I_2 auf das Statordiagramm.

In der Praxis spricht man beim Regulieren häufig vom *Devoltieren* und *Survoltieren* und denkt dabei an das Erniedrigen oder Erhöhen derjenigen Spannung, zu deren Einstellung der Induktionsregler dient. Da diese Spannung aber in den weitaus meisten Fällen dem Verbraucher angehört, also auf Seite der abgegebenen Energie liegt, so bezieht man obige Begriffe bei Induktionsreglerbelastung nach Fig. 8 auf die Spannung E_2 und bei Belastung entsprechend Fig. 9 auf Spannung E_1. Demnach entspricht dem ersten Falle die Reglerstellung $\psi = 0$ der Survoltier- und $\psi = \pi$ der Devoltierstellung, während bei Belastung gemäss Fig. 9 die Stellung $\psi = 0$ der Devoltier- und $\psi = \pi$ der Survoltierstellung entspricht. Diese Tatsache mag u. a. die unrichtige, aber in der Praxis nicht seltene Ansicht hervorgebracht haben, dass sich mit dem Vertauschen des Regleranschlusses ans Netz bei unveränderter Rotorstellung auch die Zusatzspannung E_s um 180^0 verdrehe.

Bei der Einstellung des Induktionsreglers im Prüffeld ist auf obige Vertauschung der Begriffe besonders Rücksicht zu nehmen, weil dort meistens die Variationen von E_2 unter Konstanthaltung von E_1 beobachtet werden.

Nach diesen Bestimmungen ist es uns jetzt möglich, für eine gegebene Einbauart des Reglers und bei bekannter Netzbelastung das Induktionsreglerdiagramm, wenigstens für den Statorstrom, aufzustellen:

Nehmen wir beispielsweise an, die vom Unterwerke U (Fig. 5) durch die Leitung b der Fabrik zugeführte Energie werde durch einen Induktionsregler auf konstante Spannung in der Fabrik reguliert, so muss der Regler so eingebaut werden, dass der Anschluss der Rotorklemmen auf die Seite der Fabrik zu liegen kommt, denn die Spannung, welche den Rotor speist, soll möglichst konstant gehalten werden. Der Anschluss erfolgt also nach Schaltung B und die Belastungsverhältnisse des Induktionsreglers entsprechen den Diagrammen der Fig. 9. Gemäss dem entgegengesetzten Umlaufssinn der Bezugspfeile von Leitung 2′ (Fig. 7 und 9) und dem Stator erscheint, nach Satz I, der Statorstromvektor I_s dem Leitungsstromvektor I_2 gegenüber zwar gleich gross, aber genau um 180^0 verdreht, im Diagramm (Fig. 9). Aendert sich die Phasenverschiebung des Netzes, so dreht sich der Stromvektor des Stators immer um den entsprechenden Winkel, d. h.:

„Wird ein Induktionsregler nach Schaltung B an ein Netz angeschlossen, so erscheint im Diagramm der Statorstrom dem Netzstromvektor gegenüber immer gleich gross, aber um 180^0 verdreht.“

Schliessen wir umgekehrt den Regler nach Schema A an, so erscheint *der Statorstrom als die Vektorsumme des Netzstromes und des Rotorstromes.* Weil nun dieser letztere relativ klein ist, stimmt die Richtung und Grösse des Statorstromes ungefähr mit derjenigen des Netzstromes überein (Fig. 8 und 9). Dieser allgemeine Satz kann uns bei der Entwicklung des Induktionsreglerdiagrammes als Kontrolle dienen. Zur genauen Eintragung des Statorstromes dient uns aber eine weiter unten folgende exakte Konstruktion.

Vorerst wenden wir uns der Ermittlung des Rotorstromes zu:

Denken wir uns den Induktionsregler im Leerlauf auf der Rotorseite an einen Generator angeschlossen, so wird er lediglich den sogenannten Leerlaufstrom, d. h.

einen Strom I_0, der der Rotor-E. M. K. E_r um etwas mehr als 90^0 voreilt, aufnehmen (Fig. 10). Dieser Strom I_0 erzeugt das den Stator und Rotor durchsetzende Drehfeld und deckt auch durch eine kleine Wattkomponente die Eisenverluste des Induktionsreglers. Das Drehfeld seinerseits erzeugt dann, wie schon anfangs erklärt, die Rotor-E. M. K. E_r (die der Generator-E. M. K. E_1 [Fig. 8] Gleichgewicht hält), und die zusätzliche verdrehbare Stator-E. M. K. E_s.

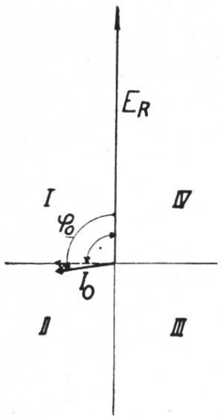

Fig. 10.
Leerlaufdiagramm des Rotors.

Bei Belastung wird die Statorwicklung (Fig. 7 und 11) vom Belastungsstrom I_s durchflossen, der durch seine magnetisierende Wirkung das Induktionsreglerdrehfeld zu verändern sucht, so dass das dynamische Gleichgewicht der E. M. K. gestört wird. Durch die Aufnahme des Rotorkompensationsstromes I_c, der die magnetisierende Kraft des Statorstromes I_s vollständig kompensiert, wird das Gleichgewicht der E. M. K. wieder hergestellt (Fig. 8 und 9).

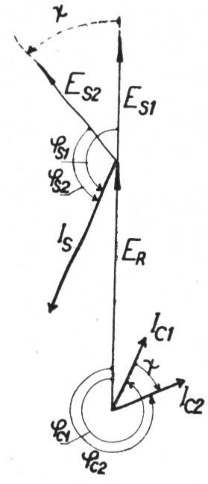

Fig. 11.
Belastungsdiagramm des idealen Induktionsreglers.

Zur Bestimmung der Grösse und vektoriellen Lage des Kompensationsstromes I_c gehen wir von der Grundstellung (d. i. $\psi = 0$) des Induktionsreglers aus (Fig. 11). Wir haben dann einen Autotransformator vor uns und wissen, dass in diesem speziellen Falle der Kompensationsstrom I_{c1} dem Statorstrom I_s genau um 180^0 entgegengerichtet ist (Fig. 11). Die Grösse des Kompensationsstromes I_{c1} berechnet sich aus der Energiegleichung des Transformators:

$$E_s\, I_s \cos\varphi_{s1} + E_r\, I_{c1} \cos\varphi_{c1} = 0\,, \tag{1}$$

nun ist:

$$\varphi_{c1} = \varphi_{s1} + \pi\,, \tag{2}$$

daher:

$$\cos\varphi_{c1} = \cos(\varphi_{s1} + \pi) = -\cos\varphi_{s1} \tag{3}$$

und somit:

$$E_s\, I_s \cos\varphi_{s1} - E_r\, I_{c1} \cos\varphi_{s1} = 0\,, \tag{4}$$

woraus:

$$I_{c1} = I_s \frac{E_{s1}}{E_r}\,. \tag{5}$$

Die magnetisierende Wirkung der Ströme I_s und I_{c1} aller drei Phasen können wir im Raumdiagramm (Fig. 12) durch magnetische Kraftvektoren, welche mit dem Drehfelde synchron umlaufen, darstellen. In dem Momente, in welchem der Stromvektor I_s vertikal nach unten weist, also der Strom I_s mit maximaler Stärke von 4 nach 1 (Fig. 2) fliesst, hat der magnetische Kraftvektor M_s des Stators die Richtung von rechts nach links (Fig. 12). Im selben Momente erreicht I_{c1} sein positives Maximum, der Strom fliesst mit maximaler Stärke von 0 nach 7 (Fig. 2) und der magnetische Kraftvektor M_{c1} des Rotors weist von links nach rechts (Fig. 12). Die Resultante von M_s und M_{c1} ist in der Tat gleich 0.

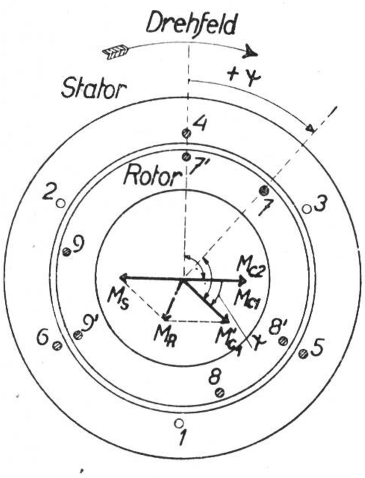

Fig. 12.
Magnetomotorische Kräfte der Belastungsströme des Induktionsreglers.

Drehen wir nun den Rotor des Reglers um den Winkel ψ aus der Grundstellung heraus, so verdreht sich die E. M. K. E_{s1} in die Lage von E_{s2}. Nehmen wir an, dass auch unter den neuen Verhältnissen der Rotorkompensationsstrom dem Statorstrom I_s gegenüber um zeitlich genau 180^0 verdreht wäre, so müsste, im Momente wo M_s horizontal von rechts nach links weist, der magnetische Kraftvektor der Kompensationsströme die Lage von M'_{c1} einnehmen, da die magnetisierende Kraft der Ströme an die Wicklung gebunden ist, die sie durchfliessen, und sich mit dieser um den Winkel ψ verdreht. Die Folge wäre ein resultierender magnetischer Vektor M_r, dessen Anwesenheit das elektrische Gleichgewicht stören würde. Die Störung wird vermieden, indem der Rotor statt des Stromes I_{c1} den um den *zeitlichen* Phasenwinkel ψ nach *rückwärts* verschobenen, aber der Grösse nach konstanten Kompensationsstrom I_{c2} aufnimmt, dessen magnetisierende Wirkung im Verein mit den Kompensationsströmen der anderen zwei Phasen, entsprechend ihrer *zeitlichen* Verspätung, im Raumdiagramm als der um den *Raumwinkel* ψ verdrehte magnetische Vektor M_{c2} des Kompensationsdrehfeldes erscheint (Fig. 11 und 12). Dem Strome I_{c2} entspricht also der Vektor M_{c2}, der mit M_s die Resultante Null ergibt.

Entsprechend der zeitlichen Verdrehung der Zusatzspannung E_2 hat sich auch der Kompensationsstrom I_{c2} um denselben Zeitwinkel, aber *im entgegengesetzten Sinne*, gedreht.

Aus der Fig. 11 erkennt man, dass:

$$\varphi_{s2} = \varphi_{s1} - \psi \quad (6) \qquad \text{und} \qquad \varphi_{c2} = \varphi_{c1} - \psi\,. \quad (7)$$

Nach Gleichung (2) ist:

$$\varphi_{c1} - \varphi_{s1} = \pi = \varphi_{c2} + \psi - \varphi_{s2} - \psi\,, \quad (8)$$

woraus:

$$\varphi_{c2} = \varphi_{s2} + \pi\,, \quad (9)$$

so dass sich allgemein schreiben lässt:

$$E_s\, I_s \cos\varphi_s + E_r\, I_c \cos\varphi_c = 0 \quad (10)$$

$$E_s\, I_s \sin\varphi_s + E_r\, I_c \sin\varphi_c = 0\,. \quad (11)$$

Das sind die allgemeinen Transformatorgleichungen des Gesetzes der Erhaltung der wattlosen und Wattenergie für den idealen Induktionsregler.

Da die Lage von E_{s2} eine allgemeine ist, so gilt die Gleichung:

$$\varphi_c = \varphi_s + \pi\,. \quad (12)$$

Aus (10) und (11) berechnet sich:

$$\frac{I_c}{I_s} = \frac{E_s}{E_r}\,, \quad (13)$$

d. h. *Rotorkompensationsstrom und Statorstrom verhalten sich zu einander wie die Stator-E.M.K. zur Rotor-E.M.K.* Da der Stromvektor I_{c2} dem Strome I_s gegenüber um den Winkel $\pi + \psi$ in nacheilendem Sinne verschoben ist (Fig. 11) und Gleichung (13) gilt, so ist das Stromdreieck $I_1 + I_c - I_s$ dem Spannungsdreieck $E_2 - E_s - E_r$ ähnlich (Fig. 8 und 9). Es besteht also zwischen E_1 und E_2 der nämliche Verschiebungswinkel α wie zwischen I_1 und I_s (Fig. 8 und 9), d. h.:

Die Phasenverschiebungswinkel der Leitung vor und hinter dem idealen Induktionsregler sind genau um den Wert π verschieden, oder (nach Satz I):

Bezieht man die Stromvektoren der Leitung auf eine und dieselbe Durchlaufsrichtung, so sind die Phasenverschiebungen vor und hinter dem idealen Induktionsregler dieselben.

Der Winkel der Rotorphasenverschiebung berechnet sich bei Betrachtung der Fig. 8, 9 und 11 zu:

$$\varphi_{c1} = \varphi_2 + \alpha = \varphi_1 + \pi + \alpha\,, \quad (14)$$

$$\varphi_{c2} = \varphi_c = \varphi_{c1} - \psi\,, \quad (15)$$

also:

$$\varphi_c = \varphi_2 + \alpha - \psi = \varphi_1 + \pi + \alpha - \psi\,. \quad (16)$$

7. Diagramm des wirklichen Induktionsreglers.

Nachdem wir das Diagramm des idealen Induktionsreglers entwickelt haben, konstruieren wir dasjenige des wirklichen Reglers.

An den Kompensationsstrom I_c des Rotors schliesst sich vektoriell der Magnetisierungsstrom I_0 an, welcher der Rotor-E.M.K. E_r um den Winkel φ_0 voraus eilt (Fig. 13). Die Resultante I_r ist der totale wirkliche Rotorstrom, der zu E_r um den Winkel φ_r phasenverschoben ist. Die Klemmenspannung V_r erhalten wir nach Satz IV als die Summe aller inneren Kräfte, also indem wir die induktive Streu-E.M.K. des Rotorstromes $A-B$ (Fig. 13) an E_r ansetzen und die ohmsche Gegenkraft $B-C$ an $A-B$ vektoriell anfügen. An V_r reihen sich die Stator-E.M.K. E_s und die induktive E.M.K. und ohmsche Gegenkraft des Statorstromes I_s an, die ihrerseits die Statorklemmenspannung V_s liefern. V_r und V_s geben als Vektorsumme V_2, die variable Induktionsregler-Klemmenspannung. Wie wir den Rotorstrom I_r in seine Komponenten I_c und I_0 zerlegen können, so lassen sich auch die durch diese Komponenten erzeugten Spannungs-„abfälle" aufteilen. Dem Magnetisierungsstrom I_0 entsprechen die Strecken $A-D$ und $D-E$, dem Kompensationsstrom die Werte $E-F$ und $F-C$. Natürlich gelangt man in beiden Fällen zum gleichen Resultat.

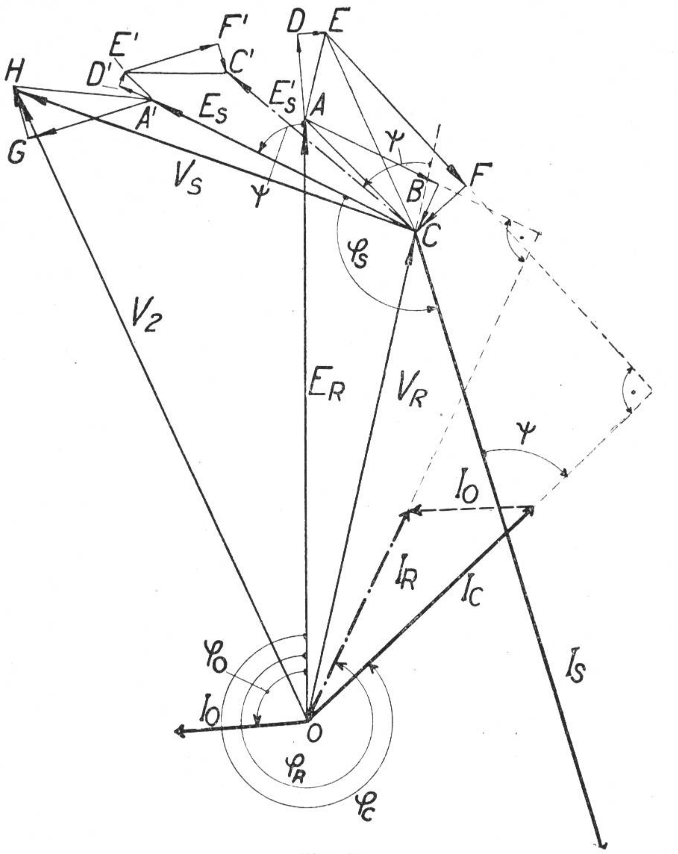

Fig. 13.
Reduktion der Spannungsabfälle.

Man kann das Induktionsreglerdiagramm wesentlich vereinfachen, wenn man folgende Ueberlegung macht:

Denken wir uns, dass der Rotor keinen Spannungsabfall besässe, so würde der Rotorklemmenspannung V_r die Stator-E.M.K. E'_s entsprechen. E'_s ist zu V_r um den Winkel ψ verschoben und verhält sich zu V_r wie E_s zu E_r. Demnach sind die Dreiecke OAC und $CA'C'$ ähnlich und es verhalten sich auch die Strecken $A'-C'$ und $A-C$ zu einander, wie die Spannungen E_s und E_r. Indem wir auch die verschiedenen Komponenten des Spannungsabfalles $A-C$ auf die Statorseite projizieren, erhalten wir die entsprechenden Punkte $D'E'F'$. Entsprechend der Verdrehung von I_c gegenüber I_s um den Winkel ψ ist auch $E-F$ zu $G-A'$ um den Winkel ψ verdreht und deshalb die Strecke $E'-F'$, die zu $E-F$ ebenfalls um den Winkel ψ verschoben ist, mit $A'-G$ in Gegenphase. Aus dem gleichen Grunde sind $G-H$ und $C'-F'$ parallel.

Vernachlässigen wir vorläufig die Strecke $A'-E'$, so legt sich $E'-F'$ direkt an $G-A'$ an und wir erkennen, dass der totale Spannungsabfall des Induktionsreglers, hervorgerufen durch den Belastungsstrom, gleich ist der Summe des Statorspannungsabfalles, vermehrt um den auf die Statorseite projizierten Rotorspannungsabfall, d. h.:

Der totale Spannungsabfall des Induktionsreglers lässt sich genau so konstruieren, wie derjenige des gewöhnlichen Transformators.

Betrachten wir jetzt die vorhin vernachlässigte Strecke $A'-E'$. Sie entspricht der Strecke $A-E$ auf der Rotorseite (Fig. 13), d. h. dem totalen Spannungsabfall, den der Leerlaufstrom I_0 erzeugt.

Besitzt der Induktionsregler im Leerlauf die Klemmenspannung $O-E$ (Fig. 13), so ist die Rotor-E.M.K. gleich $O-A = E_r$ und dementsprechend die Stator-E.M.K. gleich E_s. Hätte der Induktionsregler im Leerlauf keinen Spannungsabfall, so wäre die Stator-E.M.K. gleich $C-E'$. Aus dieser Betrachtung erkennt man, dass schon im Leerlauf die Stator-E.M.K. um den Betrag $A'-E'$ verkürzt wird, so dass man, um das Belastungsdiagramm zu erhalten, an die Leerlauf-Stator-E.M.K. lediglich die durch die Belastungsströme erzeugten Spannungsabfälle vektoriell ansetzen muss, um das Belastungsdiagramm zu erhalten. Es gilt also auch beim Induktionsregler das *Prinzip, dass das Belastungsdiagramm sich zusammensetzt aus dem Leerlauf- und Kurzschlussdiagramm,* denn beim Kurzschlussversuch ist die gesamte Klemmenspannung gleich dem totalen Spannungsabfall des Kurzschlussversuchsstromes.

Es mag noch darauf hingewiesen werden, dass das Diagramm (Fig. 13), lediglich um die einzelnen Spannungsabfälle deutlich hervortreten zu lassen, ganz extreme Verhältnisse darstellt. Bei ausgeführten grösseren Induktionsreglern beträgt der totale Spannungsabfall bei Normalstrom ca. 20 % und der Leerlaufspannungsabfall ca. 2 % der Stator-E.M.K., mit welcher letzterer fast genau in Phase ist. Ebenso ist die vektorielle Differenz zwischen V_r und E_r im allgemeinen so gering, dass man, ohne einen nennenswerten Fehler zu begehen, den Winkel φ_0 von V_r aus abtragen darf. Halten wir V_r konstant, so wird E_r und mit ihm I_0 etwas variieren. Auch diese Variationen dürfen wir unbedenklich vernachlässigen und bei festem V_r auch I_0 als konstant betrachten.

8. Vereinfachtes Diagramm des Induktionsreglers.

Nach diesen Betrachtungen versuchen wir, das vereinfachte Diagramm des Induktionsreglers aufzustellen. An die Rotorklemmenspannung V_r (Fig. 14) tragen wir unter dem Winkel ψ die Stator-Leerlaufklemmenspannung E_{s0} ab. Da die Spannungsabfälle des Induktionsreglers bei praktischen Ausführungen relativ sehr klein sind, können wir die Netzklemmenspannung als Vektorsumme von V_r und E_{s0} in erster Annäherung auftragen. Unter Berücksichtigung des Netz-cos φ_2 tragen wir den Netzstrom I_2 auf Seite der variablen Spannung auf. Diesem Strom I_2 ist der Statorstromvektor genau entgegengesetzt und gleich gross.

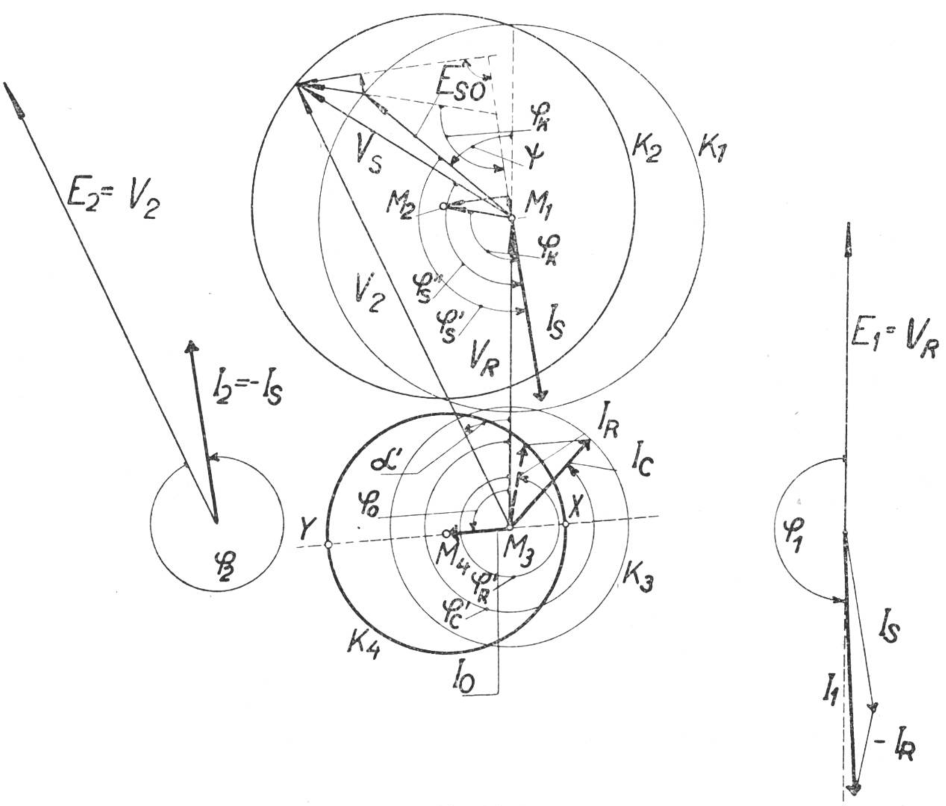

Fig. 14.
Diagramm des wirklichen Induktionsreglers für konstanten Statorstrom.

Die von I_s erzeugten inneren Kräfte tragen wir an E_{s0} ab. Diese Zusatzspannung bildet mit I_s den im Kurzschlussversuch herrschenden Phasenverschiebungswinkel φ_k. Wir erhalten so die Statorklemmenspannung V_s. V_r und V_s ergeben die genaue Netzklemmenspannung $V_2 = E_2$.

Die Phasenverschiebung zwischen E_{s0} und I_s nennen wir φ'_s und diejenige zwischen V_s und I_s bezeichnen wir mit φ''_s. V_r und V_2 schliessen den Winkel α' ein. An V_r legt sich unter dem Winkel φ_0 der Magnetisierungsstrom I_0 an. Der Kompensationsstrom I_c berechnet sich aus dem Uebersetzungsverhältnis des Induktionsreglers nach Formel (13). Die Phasenlage von I_c berechnet sich folgendermassen:

Es ist:
$$\varphi'_c = \varphi'_s + \pi \tag{17}$$
und:
$$\varphi'_s = \varphi_2 + \alpha' - \psi - \pi\,, \tag{18}$$
daher:
$$\varphi'_c = \varphi_2 + \alpha' - \psi\,. \tag{19}$$

I_0 und I_c ergeben den totalen Rotorstrom I_r mit seiner Phasenverschiebung φ'_r, relativ zu V_r. Die Belastungsverhältnisse hinter dem Regler lassen sich sehr leicht ermitteln. E_1 ist gleich V_r und der Netzstrom auf der Seite des Rotorschlusses an das Netz ist:
$$I_1 = I_s - I_r \text{ (Vektordifferenz), (Fig. 14).}$$

9. Ortskurven für konstanten Statorstrom.

Nachdem wir das Diagramm für einen beliebigen Belastungspunkt des Induktionsreglers aufgestellt haben, versuchen wir ein Diagramm zu entwickeln, das uns gestattet, die Lage der Strom- und Spannungsvektoren in allen möglichen Stellungen des Rotors zu beobachten. Halten wir z. B. den Statorstrom I_s fest und drehen wir den Regler, so behält der Spannungsabfall unbeeinflusst seine Richtung bei. Während sich dann die Spitze von E_{s0} auf dem Kreis k_1 mit dem Zentrum in M_1 bewegt, beschreibt dagegen die Spitze der Statorspannung V_s die Kreislinie k_2 mit dem Zentrum in M_2. Die Strecke $M_1 - M_2$ ist in Grösse und Richtung gleich dem Spannungsabfall des Induktionsreglers. Entsprechend der Unveränderlichkeit des Stromes I_s bleibt auch die Grösse des Rotorkompensationsstromes I_c konstant, nur seine Phase ändert sich. Diese berechnet sich leicht nach Gleichung (19), da ja alle Glieder auf der rechten Seite bekannt sind. Den Winkel α' kann man für jeden Belastungspunkt der Figur entnehmen. Entsprechend der Konstanz von I_c bewegt sich dessen Spitze auf der Kreislinie k_3 mit dem Zentrum in M_3. Durch vektorielle Addition des Magnetisierungsstromes I_0 zu I_c erhalten wir den totalen Rotorstrom I_r, der sich ebenfalls auf einer Kreislinie k_4 mit dem Zentrum M_4 (auf der Spitze des Magnetisierungsstromes I_0) bewegt.

Die durch den Spannungsabfall erzeugte Unsymmetrie der Statorklemmenspannung hat keine nennenswerte praktische Bedeutung. Anders verhält es sich beim Rotorstrom. Da die *Kupferverluste* mit dem Quadrat der Stromstärke wachsen, hat schon eine geringe Unsymmetrie erhebliche Unterschiede der Verluste zur Folge. Die Kupferverluste für die extremsten Lagen (Punkte Y und X, Fig. 14) verhalten sich zueinander wie:
$$(I_c + I_0)^2 \; : \; (I_c - I_0)^2 .$$

Bei kleinen Reglern erreicht I_0 bis zu 50 % und mehr von I_c. Es ergibt sich dann ein Verhältnis der Verluste von 9 : 1 und bei grossen Reglern mit 25 % Magnetisierungsstrom noch 2,8 : 1. Diese Werte gelten für die extremsten Lagen. Nimmt man den Mittelwert über den ganzen Regulierbereich, so ist das Verhältnis entsprechend kleiner, aber immer noch gross genug, dass es zweckmässig ist, den Induktionsregler so arbeiten zu lassen, dass sich der Rotorstrom in der Nähe des Punktes X bewegt (Fig. 14).

Wir wollen deshalb untersuchen, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit der Rotorstrom möglichst klein werde. Nach Gleichung (19) ist:
$$\varphi'_c = \varphi_2 + \alpha' - \psi\,.$$

Nun ist α' bei grösseren ausgeführten Induktionsreglern im allgemeinen so klein, dass wir es für unsere Untersuchung gleich Null setzen dürfen. Der Winkel ψ variiert während des Regulierprozesses entweder zwischen 0 und π oder π und 2π. Damit I_r klein werde, muss φ_c dem Werte $\frac{3\pi}{2}$ möglichst nahe kommen. Für die Mittelstellung der Regulierung $\left(\text{also } \psi = \frac{\pi}{2} \text{ oder } \psi = \frac{3\pi}{2}\right)$ muss φ_c gleich $\frac{3\pi}{2}$ sein. Hieraus ergeben sich die entsprechenden Werte von φ_2. Es ist:

$$\varphi_2 = \varphi'_c + \psi.$$

Fall I:

$$\psi = \frac{\pi}{2}$$

$$\varphi_2 = \frac{3\pi}{2} + \frac{\pi}{2} = 2\pi \text{ oder } 0.$$

Fall II:

$$\psi = \frac{3\pi}{2}$$

$$\varphi_2 = \frac{3\pi}{2} + \frac{3\pi}{2} = 3\pi \text{ oder } \pi.$$

Im ersten Fall $\varphi_2 = 0$, wo die Energie von der Seite der variablen Spannung zur konstanten fliesst, soll der Induktionsregler im ersten (linken) Gebiet, im zweiten Fall aber soll der Regler im zweiten (rechten) Gebiet arbeiten.

Die Verschiedenheit der Arbeitsgebiete tritt nur bei gutem $\cos\varphi$ stark in Erscheinung, mit schlechter werdender Phasenverschiebung nimmt sie mehr und mehr ab und verschwindet bei $\cos\varphi = 0$ völlig.

Auf einen theoretisch interessanten Fall, der hie und da die Bedienungsmannschaft eines Induktionsreglers in Verwunderung setzt, wollen wir noch aufmerksam machen. Geht nämlich die Belastung des Induktionsreglers so weit zurück, dass I_c gleich I_o wird, und ist ausserdem noch $\varphi_c' = \varphi_o + \pi$ oder $\psi = \varphi_2 - \frac{3\pi}{2}$ so wird I_r gleich 0 und es hat den Anschein, als ob der Rotor abgeschaltet wäre, weil der Induktionsregler bei voller Klemmenspannung und Belastung keinen Strom im Rotor führt.

Das Rätsel löst sich, wenn wir bedenken, dass in diesem Fall der Statorstrom der Stator-E. M. K. um 90^0 vorauseilt und die gesamte Magnetisierung des Induktionsreglers besorgt. Wir erkennen aus diesem Beispiel, dass es reine Willkür ist, wenn man sagt, dass der Rotorstrom auch bei Belastung den Induktionsregler magnetisiere. Es ist dies ebenso unrichtig, wie wenn man glaubt, dass der Induktionsregler eine bestimmte Primär-, resp. Sekundärseite besitze.

10. Ortskurven für konstante externe Leistung.

Nachdem wir die Ortskurven angegeben haben, auf denen sich die Spannungs- und Stromvektoren unter Festhaltung des Statorstromes bewegen, versuchen wir, die Ortskurven für den praktisch ungleich wichtigeren Fall zu konstruieren, in welchem die *durchgehende Leistung konstant* bleibt, oder, was dasselbe ist, in welchem die regulierte Spannung E_1 des Netzes auf der Rotorseite, sowie deren Strom I_1 und Phasenverschiebung festgehalten wird (Fig. 15).

Das Diagramm stellen wir folgendermassen auf: An die Rotorklemmenspannung V_r tragen wir den Winkel der Phasenverschiebung φ_1 ab und erhalten die Gerade g_o durch O. Auf dieser Geraden tragen wir den Strom I_1 von O aus so ab, dass seine Spitze in O zu liegen kommt. An I_1 reihen wir den Magnetisierungsstrom I_o, dessen Spitze den Punkt U bildet, während wir den Fusspunkt von I_1 mit T bezeichnen. Vernachlässigen wir die geringen Schwankungen von I_o, so bleibt $T-U$ der Grösse und Phase nach konstant. Die Vektorsumme von I_1, I_o und I_c müsste als Resultante I_s ergeben (Fig. 15), doch ist die Grösse und Phasenverschiebung von I_c vorläufig noch unbekannt. Beachten wir aber, dass das Verhältnis von I_c zu I_s dauernd konstant und gleich der Uebersetzung u des Induktionsreglers ist, und dass ferner die Resultante von I_c und $-I_s$ die konstante Strecke $U-T$ ergeben muss, so ist nach einem bekannten Satze der analytischen Geometrie die Ortskurve der Spitze S von I_c ein Kreis (k_5), dessen Zentrum M_5 auf der Geraden g_1, durch T und U liegt, und dessen Radius sich nach der Formel berechnet:

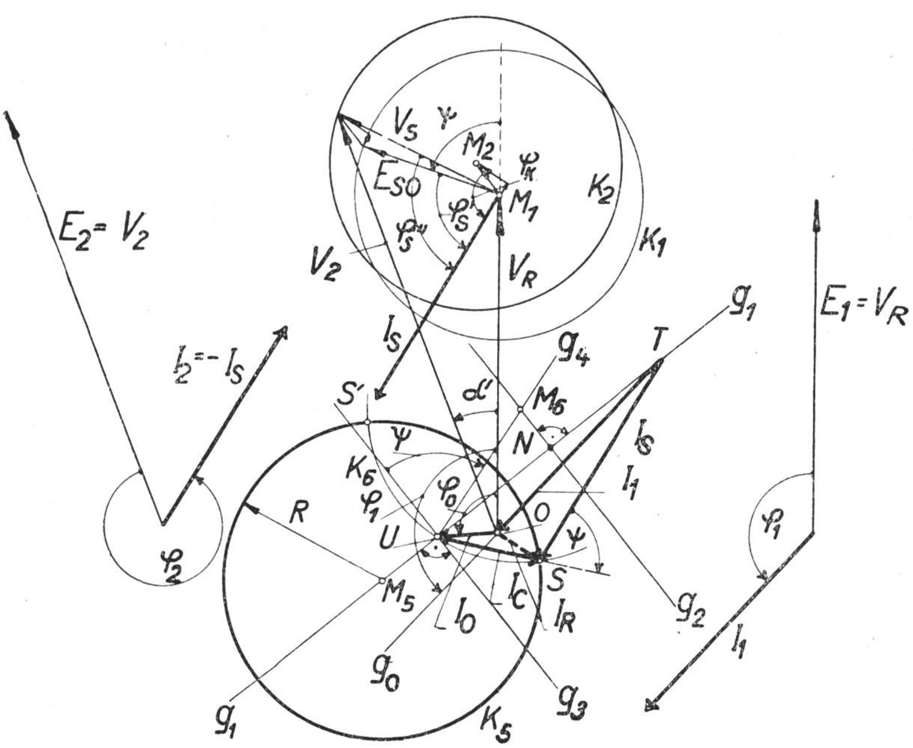

Fig. 15.
Diagramm des wirklichen Induktionsreglers für konstante externe Leistung.

$$R = \overline{UT} \frac{u}{1 - u^2}, \tag{20}$$

worin:

$$u = \frac{I_c}{I_s} = \frac{E_s}{E_r}. \tag{21}$$

Die Strecke $\overline{M_5 U}$ ist:

$$\overline{M_5 U} = R\,u = \overline{UT} \frac{u^2}{1 - u^2}. \tag{22}$$

Die genaue Lage von S auf dem Kreise k_5 lässt sich folgendermassen konstruieren:

Wir fällen durch die Mitte N von $U-T$ das Lot g_2 auf diese Strecke und legen durch U die Gerade g_3 parallel zu g_2. An g_3 tragen wir im Uhrzeigersinne den Winkel ψ ab und ziehen unter diesem Winkel den Strahl g_4. Schlagen wir um den Schnittpunkt M_6 von g_2 und g_4 den Kreis k_6 mit dem Radius $U-M_6$, so erhalten wir mit k_5 zwei Schnittpunkte S und S', welche uns die gesuchte Lage der Vektorspitzen von I_c und I_s (Fig. 15) ergeben. Der Punkt S entspricht dem Winkel ψ, Punkt S' dem Winkel $\psi + \pi$ oder $\psi - \pi$.

Bei richtiger Konstruktion müssen I_c und $-I_s$ zusammen den Winkel ψ bilden. Die Strecke $O-S$ stellt den gesuchten Rotorstrom I_r, $U-S$ den Rotorkompensations- und $T-S$ den variablen Statorstrom dar. Das Diagramm lässt deutlich die Phasenverschiebung der beiden Netzströme vor und hinter dem Regler erkennen, es zeigt uns, dass durch die Verschiebung des Kreiszentrums M_5 aus der Vektorspitze U des Magnetisierungsstromes I_o die Unsymmetrie der Rotorströme unter den angenommenen Belastungsverhältnissen noch ausgeprägter geworden ist. Allerdings kann auch der umgekehrte Fall eintreten, insbesondere, wenn zum Beispiel O mit M_5 zusammenfällt, wobei dann I_r bei allen Verdrehungen konstant bleibt.

Infolge der Schwankungen von I_s ist der Spannungsabfall nicht mehr konstant, doch sind diese Aenderungen bei Reglern, wie sie die Praxis kennt, im allgemeinen so geringfügig, dass wir auch bei diesem Diagramm den Spannungsabfall konstant annehmen und der Sicherheit wegen für den maximalen Belastungsstrom berechnen dürfen. Wir erhalten so den von Fig. 14 her bekannten Kreis k_2 der wahren Statorklemmenspannung V_s und V_2 (siehe Fig. 15).

Die Strecke $M_1 - M_2$ stellt der Grösse und Richtung nach den totalen Spannungsabfall des Induktionsreglers dar. Dieser ist mit dem Strome I_s fest verknüpft. Nun wissen wir, dass je nach dem Durchströmungssinn der wattlosen und Wattenergie der Stromvektor I_s alle möglichen Richtungen annehmen, sich also um volle 360^0 verdrehen kann. Der mit ihm starr verbundene Vektor des Spannungsabfalles dreht sich also ebenfalls um eine volle Umdrehung, woraus folgt, dass die zusätzlichen, den sogenannten Spannungsabfall erzeugenden inneren elektrischen Kräfte ebenso gut auch eine Spannungs*erhöhung* verursachen können. Dass man in der Praxis doch mit einem gewissen Rechte nur von Spannungs*abfällen* spricht, beruht darauf, dass der Betriebsmann seine Anlage immer nur im Sinne der Energieströmung betrachtet, d. h. aber, dass er mit jeder Umkehrung der Energierichtung auch sein Bezugssystem umkehrt. Aber auch dann darf man nicht in allen Fällen von einem Spannungs*abfall* sprechen.

Wir wollen hier eine praktische Methode angeben, nach welcher man auch ohne Zuhilfenahme eines Diagrammes in jedem Falle klar entscheiden kann, in welcher Richtung der Spannungs*abfall* zu zählen ist. Zerlegen wir die totale elektrische Leistung in die wattlose und Wattkomponente, so erzeugt bekanntlich die Wattkomponente praktisch nur ohmsche und die wattlose Komponente nur induktive Spannungsabfälle und wir können an Hand der Fig. 15 ganz allgemein sagen:

Strömt Wattenergie vom System A zum System B, so erfährt B gegenüber dem Leerlaufzustand eine Spannungserniedrigung, gleich dem Produkte aus Wattstrom mal ohmschem Widerstand zwischen A und B. Und analog:

Strömt wattlose Energie vom System A zum System B, so erfährt B gegenüber dem Leerlaufzustand eine Spannungserniedrigung, gleich dem Produkte aus wattlosem Strom mal induktivem Widerstand zwischen A und B.

Während die Strömung der Wattenergie einen physikalischen Sinn hat, ist dies, wie ich in meinem oben erwähnten Aufsatze schon hervorgehoben habe, bei der wattlosen Energie nicht der Fall. Trotzdem ist diese Ausdrucksweise sehr bequem. Um allfällige Missverständnisse zu vermeiden, erklären wir nochmals, *dass die Wattenergie von einem System, das im ersten oder vierten Quadranten arbeitet, in eines des zweiten oder dritten Quadranten fliesst, während die wattlose Energie von einem System des dritten oder vierten Quadranten in ein solches des ersten oder zweiten Quadranten strömt.*

Bekanntlich haben in den weitaus meisten praktischen Fällen die wattlose und Wattenergie dieselbe Richtung (der übererregte Synchrongenerator arbeitet im vierten, der von ihm gespeiste Asynchronmotor im zweiten Quadranten), weshalb man sich meist um die Richtung der wattlosen Energie nicht kümmert, liegt aber der Generator im ersten Quadranten, so werden die Verhältnisse komplizierter und die Zerlegung der Spannungsabfälle in der oben erwähnten Weise erscheint zweckmässig. So erfährt zum Beispiel ein Asynchrongenerator, der über einen Induktionsregler oder Transformator einen übererregten Synchronmotor antreibt mit steigender Leistung und konstanter Motorspannung, einen wachsenden Spannungs*abfall*, weil der Einfluss der induktiven Komponente, wenigstens bei schlechtem $\cos\varphi$, grösser als derjenige der ohmschen ist.

11. Absorbierte wattlose Leistung des Induktionsreglers.

Anschliessend an die Betrachtung des Spannungsabfalles wollen wir auch die Frage lösen: wieviel wattlose Leistung absorbiert der Induktionsregler bei Belastung aus dem Netze? Hie und da wird die Frage auch so formuliert: wie gross ist die Phasenverschiebung, die der Netzstrom durch den Einbau des Induktionsreglers erfährt?

Diese letztere Fragenstellung kann schon deshalb nicht eindeutig beantwortet werden, weil ein und derselbe Induktionsregler bei gleichem Strom und gleicher Spannung je nach dem Netz $\cos\varphi$ eine andere zusätzliche Stromverschiebung verursacht.

Bleiben wir also bei der ersteren Fragestellung und überlegen wir folgendes: der ideale Induktionsregler absorbiert keinerlei Energie, sondern transformiert sie nur. Der Unterschied zwischen wirklichem und idealem Induktionsregler besteht lediglich darin, dass der erstere Regler auf der einen Seite einen Energiebetrag aufnimmt, der auf der anderen nicht mehr erscheint, nämlich das Produkt aus Statorstrom mal totalem Spannungsabfall und auf Seite des Rotors den Betrag Rotorspannung mal Leerlaufstrom. Diese Energien stellen, da sie nicht transformiert werden, die vom Regler selbst absorbierten Energiebeträge dar. Auch sie können in je eine wattlose und eine Wattkomponente zerlegt werden. Wir erkennen so: *dass die totale vom Induktionsregler absorbierte wattlose Leistung gleich ist der Summe der beim Leerlauf- und Kurzschlussversuch aufgenommenen wattlosen Leistungen,* oder:

$$L_{0t} = 3 \cdot 10^{-3} \,(V_r \, I_0 \sin\varphi_0 + e_{ks} \, I_s \sin\varphi_k) \qquad (23)$$

wenn man den Kurzschlussversuch vom Stator aus macht, oder:

$$L_{0t} = 3 \cdot 10^{-3} \,(V_r \, I_0 \sin\varphi_0 + e_{kr} \, I_c \sin\varphi_k) \qquad (24)$$

wenn er von der Rotorseite aus aufgenommen wird.

Da bekanntlich die Kurzschlusspannungen e_{ks} und e_{kr} je nach der Reglerstellung bei nicht schrägen Nuten variieren, sind in die Formeln (23) und (24) Mittelwerte einzusetzen.

Die analoge Beziehung für die im Betriebe absorbierte *Wattleistung* existiert beim Induktionsregler nicht, vielmehr sind die Betriebsverluste je nach der Reglerstellung ψ grösser oder kleiner als die Summe der Leerlauf- und Kurzschlussverluste. Wohl können die Betriebseisenverluste den Leerlaufverlusten (annähernd) gleichgesetzt werden, die Kupferverluste aber müssen unter Zuhilfenahme des Diagrammes berechnet werden, wobei aber die (beim Induktionsregler häufig ziemlich grossen) Zusatzverluste in Rechnung zu bringen sind. Auf diese Verhältnisse ist bei Garantien, bei Abnahme- und Erwärmungsproben besonders zu achten.

12. Drehmomente im Induktionsregler.

Wie bei allen Drehstrommaschinen, treten auch beim Dreiphasen-Induktionsregler Drehmomente auf, deren Kenntnis für den Konstrukteur von Bedeutung ist, und zwar einerseits für die Bestimmung der mechanischen Festigkeit der Konstruktion, andererseits zur Berechnung der Steuerorgane und deren Energieverbrauch. Bekanntlich ist bei allen Drehfeldmaschinen das Drehmoment bei gegebener Polzahl proportional der vom Stator zum Rotor übertragenen Wattleistung.

Nennen wir ein Drehmoment, das vom Stator im Sinne des Drehfeldes auf den Rotor ausgeübt wird, also den Rotor im Sinne $+\psi$ zu verdrehen sucht, positiv, so gilt für Induktionsregler mit rechts oder links umlaufenden Drehfeldern die nämliche Formel:

$$DM = +\,975\,\frac{3\,E_r\,I_c\cos\varphi_c\,p}{10^3 \cdot 60\,c}\ \text{kgm}, \qquad (25)$$

worin: E_r = Rotor-E. M. K., I_c = Rotorkompensationsstrom,
φ_c = Phasenverschiebungswinkel zwischen E_r und I_c,
c = Periodenzahl, p = Pol*paar*zahl bedeuten.

Nennen wir:

$$10^{-3} \cdot 3\, E_r\, I_c = L_{iw} \text{ (kVA)} \tag{26}$$

die wahre interne Leistung des Induktionsreglers, so erhalten wir:

$$DM = + \frac{975\, L_{iw}\, p}{60\, c} \cos\varphi_c \text{ (kgm)}, \tag{27}$$

das Drehmoment wird ein Maximum für $\cos\varphi_c = 1$, also:

$$DM_{max} = \frac{975\, L_{iw}\, p}{60\, c} \text{ kgm.} \tag{28}$$

Des inneren Spannungsabfalles wegen ist die wahre interne Leistung ca. 20 % grösser als die *„nominelle“* vom Projekteur angegebene *interne Leistung,* welche wir mit L_i bezeichnen. Es gilt daher für den Konstrukteur die Formel:

$$DM_{max} = \frac{1{,}2 \cdot 975\, L_i\, p}{60\, c} \text{ kgm.} \tag{29}$$

Wird der Induktionsregler vierpolig gebaut und beträgt die Periodenzahl 50, so vereinfacht sich die Formel zu:

$$DM_{max} = 0{,}78\, L_i \cong 0{,}8\, L_i \text{ kgm.} \tag{30}$$

Das Drehmoment verändert sich, wie man aus Formel (25) erkennt, mit der Lage des Rotorstromes und kann positiv oder negativ werden, je nachdem die Projektion des Rotorstromes auf $+E_r$ oder in die entgegengesetzte Richtung fällt. Wie man aus Fig. 15 erkennt, sind im allgemeinen bei Belastung des Reglers mit konstanter Durchgangsleistung die Drehmomentmaxima und -minima nicht gleich gross.

Da der Winkel φ_c sich sowohl mit dem Winkel ψ, als auch mit der Phasenverschiebung des Netzes verändert, so variiert das Drehmoment bei festem $\cos\varphi$ des Netzes mit der Rotorverdrehung und bei fester Rotorstellung mit dem $\cos\varphi$ des Netzes. Nach Gleichung (19) ist:

$$\varphi'_c = \varphi_2 + \alpha' - \psi \quad \text{oder angenähert} \quad \varphi_c = \varphi_2 - \psi,$$

und:

$$\cos\varphi_c = \cos(\varphi_2 - \psi). \tag{31}$$

Die Drehmomentmaxima resp. -minima wandern also mit dem Phasenverschiebungswinkel φ_2 der externen Leistung nach verschiedenen Reglerstellungen ψ. Maximale positive resp. negative Drehmomente treten auf, wenn:

$$\varphi_2 - \psi = 0 \text{ resp. } \pi. \tag{32}$$

Das Drehmoment ist 0, wenn:

$$\varphi_2 - \psi = \frac{\pi}{2} \text{ oder } \frac{3\pi}{2}, \tag{33}$$

wobei wir zwei Fälle unterscheiden können:

1. Der Rotor ist im *labilen Gleichgewicht,* wenn:

$$\varphi_2 - \psi = \frac{\pi}{2}. \tag{34}$$

2. Der Rotor ist im *stabilen Gleichgewicht,* wenn:

$$\varphi_2 - \psi = \frac{3\pi}{2}\,. \tag{35}$$

Der Induktionsregler hat also die bemerkenswerte Eigenschaft, dass er sich für jeden Winkel φ der externen Leistung in eine besondere Lage einstellt, falls er sich selbst überlassen wird.

13. Die Ausgleichsströme zwischen parallelarbeitenden Induktionsreglern.

Werden zwei gleiche Induktionsregler (Fig. 16) bei gleicher Verdrehung ψ unter sich parallel an einen Generator G geschaltet, so ist der Spannungssatz IIa erfüllt, wenn die Regler nur die Leerlaufströme aufnehmen. Wird aber einer der beiden Regler um den Winkel $\varDelta\psi$ verdreht, so wird das Gleichgewicht der elektrischen Kräfte gestört: es entsteht ein Ausgleichsstrom, der so grosse und so gerichtete elektrische Kräfte entwickelt, bis das dynamische Gleichgewicht der elektrischen Kräfte wieder hergestellt ist. Die von den Ausgleichsströmen erzeugten Kräfte sind ohmsche Gegenkräfte und induktive E. M. K., herrührend von den Streufeldern der Ausgleichsströme. Fig. 16 stellt das prinzipielle Schema, wiederum nur einphasig, dar. Die Summe der Stator- und auf die Statorseite reduzierten Rotorimpedanzen der beiden Regler ist durch die gemeinsame Impedanz Z verbildlicht. Fig. 17 zeigt das zugehörige Vektordiagramm. Entsprechend dem elektrischen Verdrehungswinkel $\varDelta\psi$ erscheint Spannungsvektor 5 des Induktionsreglers II gegenüber Vektor 2 von Induktionsregler I um den Zeitwinkel $\varDelta\psi$ verdreht. Der Ausgleichsstrom im Statorenkreis besitzt zu den entsprechenden Spannungen die Phasenverschiebung φ_2 und φ_5. Er erscheint im Stator 5 als Stromvektor 5 und entsprechend im Stator 2 als Vektor 2. Nennen wir den Impedanzwinkel von Z φ_k (d. i. der Phasenverschiebungswinkel zwischen Strom- und Spannung im Kurzschlussversuch), so ist:

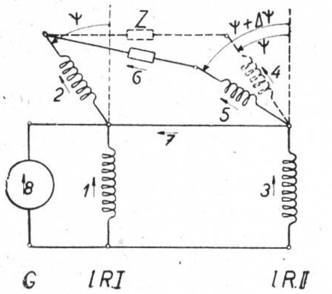

Fig. 16.
Parallelarbeitende Induktionsregler.

$$\varphi_k = \frac{\pi}{2} + \beta \tag{36}$$

und:

$$\varphi_2 = \frac{\varDelta\psi}{2} + \beta + \pi \tag{37}$$

und:

$$\varphi_5 = \beta - \frac{\varDelta\psi}{2}\,. \tag{38}$$

Da selbstverständlich auch die Ausgleichsströme kompensiert werden müssen, erhalten wir entsprechende Kompensationsströme in den Rotoren. Dem Strome 2 entspricht der Stromvektor 1 und dem Strome 5 Vektor 3. Die entsprechenden Phasenverschiebungswinkel sind:

$$\varphi_1 = \varphi_2 + \pi = \frac{\varDelta\psi}{2} + \beta \tag{39}$$

und:

$$\varphi_3 = \varphi_5 + \pi = \beta - \frac{\varDelta\psi}{2} + \pi\,. \tag{40}$$

Die Phasenverschiebungen φ_1 und φ_3 sind, wie man aus diesen Gleichungen erkennt, unabhängig vom Winkel ψ. Während sich die Ströme 2 und 5 bei gegebenem $\varDelta\psi$ mit dem Winkel ψ mitverdrehen, behalten die Ströme 1 und 3 ihre

Lage bei. Aendert der Winkel $\Delta\psi$ sein Vorzeichen, so vertauschen die Ströme 1 und 3 ihre Rollen. Von der Konstanz der Winkel φ_1 und φ_3 (bei gegebenem $\Delta\psi$) macht man (nach dem Vorschlag des Verfassers) Gebrauch bei der automatischen Steuerung parallelarbeitender Induktionsregler. Durch eine passende Schaltung wirken nur die Kompensationsströme der Ausgleichsströme auf die Relais der beiden Regler, indem sie je nach der Verdrehungsrichtung des betreffenden Reglers die Spule des Relais im positiven oder negativen Sinne beeinflussen, wodurch die Regler automatisch immer wieder in dieselbe Lage gebracht werden.

Für den Leerlauf wäre zwar, wie man aus Fig. 17 erkennt, eine solche Einrichtung nicht nötig, denn die Regler streben von selbst einer Mittelstellung zu, da ja der vorwärts gedrehte Rotor 3 ein negatives Moment durch den Strom 3 und der zurückgebliebene Rotor 1 durch den Strom 1 ein positives Moment erhält, wodurch beide Regler in dieselbe Lage kommen müssen. Man kann also auch beim Induktionsregler von einem *synchronisierenden Drehmoment* sprechen. Durch die Belastungsströme allerdings werden die beiden Regler gewaltsam auseinander getrieben, so dass die oben erwähnte stabilisierende Einrichtung notwendig wird.

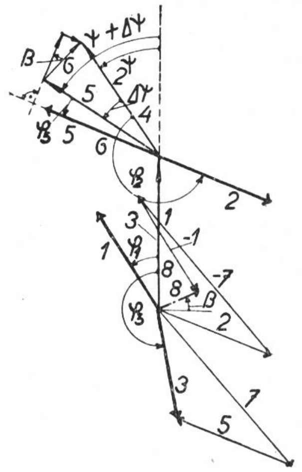

Fig. 17.
Die Ausgleichströme zwischen parallelarbeitenden Induktionsreglern.

In Fig. 17 ist noch der Strom der Verbindungsleitung 7 eingetragen, sowie der Strom 8, den der Generator 8 bei vorhandenen Ausgleichsströmen liefern muss. Sehen wir von den Leerlaufströmen der beiden Rotoren ab, welche absichtlich in Fig. 17 nicht eingetragen worden sind, so ergibt das Diagramm, dass der Generator genau so viel wattlose und Wattenergie abgeben muss, als beide Regler zusammen im Kurzschlussversuch bei gleicher Strombelastung aufnehmen. Es ist auch:

$$\varphi_8 = \frac{3\pi}{2} + \beta = \varphi_\text{k} + \pi\,. \tag{41}$$

Im weiteren muss der Generator noch die beiden Leerlaufströme liefern, so dass auch hier der Satz gilt: *Dass die von einem Induktionsregler absorbierte totale wattlose Leistung gleich der Summe der im Leerlauf und Kurzschlussversuch absorbierten wattlosen Leistungen ist* (vorausgesetzt natürlich, dass die im Leerlauf- und Kurzschlussversuch eingestellten Spannungen und Ströme denjenigen des Ausgleichsvorganges entsprechen).

14. Der Doppelinduktionsregler.

Die In- und Ausserbetriebssetzung eines Induktionsreglers ist gewöhnlich mit einem mehr oder weniger starken elektrischen Stoss ins Netz verbunden, weil die Zusatzspannung plötzlich entsteht, resp. verschwindet. Ausser den dadurch verursachten Spannungsschwankungen besteht aber bei diesem Umschalten noch die Gefahr, dass in Hochspannungsnetzen Ueberspannungen erzeugt werden können. Wird nämlich der Rotor und mit ihm der Kompensationsstrom abgeschaltet, so wirkt der ganze Statorstrom als Magnetisierungsstrom und der Induktionsregler stellt eine hochübersättigte, mit dem Netz in Serie geschaltete Drosselspule dar, welche durch die erzeugten Oberwellen der Spannung im Netze Schaden anrichten kann. Der letztgenannte Fehler kann zwar behoben werden, wenn man nach einem Patent der Maschinenfabrik Oerlikon während des Ein- und Ausschaltens der Statorwicklung einen ohmschen Widerstand parallel schaltet.

Will man aber beide Fehler vollständig beheben, so schaltet man zwei Induktionsregler zu einem sogenannten *Doppelinduktionsregler* zusammen. Hierbei werden die entsprechenden Rotorphasen einander parallel und die Statorphasen je in Serie zusammengeschaltet. Fig. 18 stellt das (einphasig gezeichnete) Schema eines Doppelinduktionsreglers dar. Die Wirkungsweise besteht darin, dass die Zusatzspannungen E_{s1} und E_{s2} derart *gegeneinander* verdreht werden, dass ihre Resultante immer in die Verlängerung der Netzspannung E_1 fällt. (Fig. 19.) Während sich E_{s1} gegenüber der Netzspannung E_1 um den Winkel $+\psi$ verdreht, bewegt sich E_{s2} im entgegengesetzten Sinne um den Winkel $-\psi$. Diese gegenläufige Verdrehung kann auf zwei Arten erreicht werden:

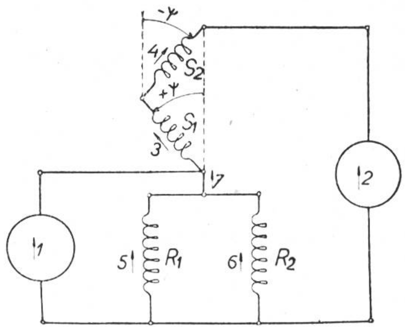

Fig. 18.
Schaltungsschema des Doppel-Induktionsreglers.

1. Indem man zwei gleiche und gleich geschaltete Induktionsregler mechanisch so kuppelt, dass sich die beiden Rotoren in entgegengesetztem Sinne verdrehen, und:
2. Indem man zwei gleiche, aber ungleich geschaltete Induktionsregler sich zwar mechanisch in gleichem Sinne verdrehen lässt, aber die Schaltung so vornimmt, dass die zwei Drehfelder entgegengesetzten Umlaufssinn haben.

Letzteres geschieht am einfachsten, indem man je zwei Rotor- und je zwei Statorphasen miteinander vertauscht, wobei man aber darauf zu achten hat, dass die vertauschten Phasen von Rotor und Stator einander entsprechen.

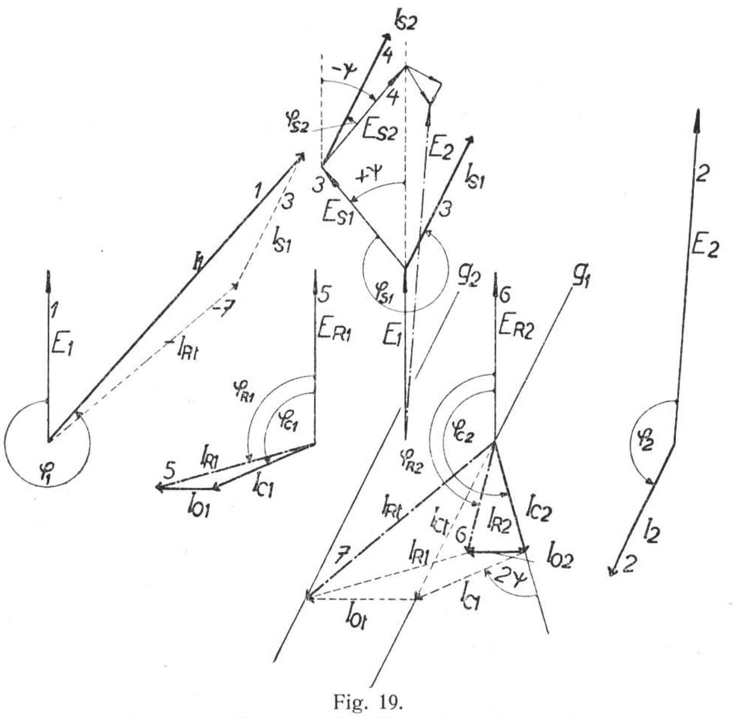

Fig. 19.
Belastungsdiagramm des Doppelinduktionsreglers.

Das Ein- und Ausschalten des Doppelinduktionsreglers geschieht in derjenigen Lage, in welcher E_{s1} und E_{s2} in Phasenopposition liegen, wo also die Summenspannung zweier in Serie liegender Statorspannungen gleich Null ist. In dieser Stellung kann deshalb auch der Doppelregler überbrückt und ans Netz zu- oder abgeschaltet werden, ohne dass ein Ausgleichsstrom oder ein Spannungsstoss entstünde. In diesem Verhalten besteht die Ueberlegenheit des Doppelinduktionsreglers gegenüber dem einfachen Induktionsregler. Die Tatsache, dass (im Leerlauf) die regulierten und unregulierten Spannungen jederzeit miteinander in Phase sind, ist nur dann von praktischer Bedeutung, wenn der Induktionsregler in einen Leitungsstrang eingebaut ist, der anderen Leitungen parallel geschaltet ist, oder beim Schnellreglerbetrieb wegen der sonst auftretenden Energiestösse.

15. Die Drehmomente im Doppelregler.

Der oft gerühmte Vorzug des Doppelinduktionsreglers, dass er nämlich zum Regulieren nur einen sehr geringen Arbeitsaufwand erfordere, weil die beiden Reglerdrehmomente sich in jeder Stellung Gleichgewicht halten würden, besteht nur ganz bedingt. Betrachten wir Fig. 19, welche das Belastungsdiagramm des Doppelinduktionsreglers darstellt, so erkennen wir, dass die Kompensations- und Rotorströme I_{c1} und I_{c2} resp. I_{r1} und I_{r2} der beiden Regler ganz verschiedene Grössen und Phasenverschiebungen aufweisen, woraus folgt, dass auch die Drehmomente verschieden sein werden, so dass das resultierende Drehmoment beider Regler nicht gleich Null sein kann.

Das Drehmoment der beiden Regler kann nach Gleichung (28) berechnet werden.

Nun ist angenähert:
$$\varphi_{c1} = \varphi_2 - \psi \tag{42}$$
und:
$$\varphi_{c2} = \varphi_2 + \psi . \tag{42}$$

Schaltet man die Regler nach (1), so ist das resultierende Drehmoment, bezogen auf die positive Drehrichtung des ersten Reglers:
$$DM_r = DM_1 - DM_2 , \tag{44}$$
weil einer positiven Verdrehung des ersten Reglers eine negative des zweiten entspricht.

Schaltet man aber nach (2), so erhalten wir die nämliche Formel, da wir die Drehmomente immer im Sinne des Drehfeldes positiv zählen, dasselbe aber im zweiten Falle entgegengesetzt umläuft. Nun ist:
$$L_{iw\,1} = L_{iw\,2} = \frac{L_{iw}}{2} ,$$
worin L_{iw} die wahre interne Leistung des ganzen Doppelinduktionsreglers darstellt. Weiter ist:
$$p_1 = p_2 = p \qquad c_1 = c_2 = c ,$$
so dass wir unter Berücksichtigung der Gleichungen (45) und (46) erhalten:
$$DM_r = \frac{975\, L_{iw}\, p}{2 \cdot 60\, c} \{\cos(\varphi_2 - \psi) - \cos(\varphi_2 + \psi)\} . \tag{46}$$

Nun ist:
$$\cos(\varphi_2 - \psi) - \cos(\varphi_2 + \psi) = \cos\varphi_2 \cos\psi + \sin\varphi_2 \sin\psi$$
$$- \cos\varphi_2 \cos\psi + \sin\varphi_2 \sin\psi = 2 \sin\varphi_2 \sin\psi ,$$

woraus:
$$DM_r = \frac{975\, L_{iw}\, p}{60\, c} \sin\varphi_2 \sin\psi , \tag{47}$$

oder auch:
$$DM_r = \frac{1{,}2 \cdot 975\, L_i\, p}{60\, c} \sin\varphi_2 \sin\psi . \tag{48}$$

Aus dieser Gleichung erkennt man, *dass der Doppelinduktionsregler im allgemeinen ein resultierendes Drehmoment besitzt.* Dieses wächst unter sonst gleichen Umständen mit dem sinus des Netzphasenverschiebungswinkels φ_2 und mit dem sinus des Rotorverdrehungswinkels ψ_2. Für $\cos\varphi_2 = \pm 1$, also $\sin\varphi_2 = 0$, ist das Drehmoment in jeder Lage gleich Null. Bei $\cos\varphi_2 = 0$ ($\sin\varphi_2 \pm 1$) wird es in den Mittellagen $\left(\psi = \frac{\pi}{2} \text{ und } \frac{3\pi}{2}\right)$ zu einem *Maximum* resp. *Minimum.* Es ist dann:
$$DM_{r\,max} = \frac{1{,}2 \cdot 975\, L_i\, p}{60\, c} , \tag{49}$$
d. h.: *Das maximale Drehmoment eines Doppelinduktionsreglers ist gleich dem maximalen Drehmoment eines einfachen Induktionsreglers gleicher totaler interner Leistung.* Insbesondere für die Berechnung der Kurzschlusskräfte ist die Kenntnis dieser Tatsache von Bedeutung.

Auf eine *besondere Eigentümlichkeit des resultierenden Speisestromes der beiden Rotoren* R_1 und R_2 (Fig. 18) wollen wir an dieser Stelle noch aufmerksam machen. Die Vektorspitze der Resultante I_{ct} der beiden Kompensationsströme I_{c1} und I_{c2} bewegt sich nämlich, wie man aus Fig. 19 erkennt, auf einer zu I_2 parallelen Geraden g_1. Für $\psi = \frac{\pi}{2}$ resp. $\frac{3\pi}{2}$ ist diese Resultante jederzeit gleich Null. Der totale Rotorstrom I_{rt} beider Regler bewegt sich auf der zu g_1 parallelen Geraden g_2, welche von g_1 um die horizontale Strecke $I_{0t} = I_{01} + I_{02}$ entfernt liegt. In der Mittelstellung des Doppelreglers wird das Leitungsstück 7 (Fig. 18) auch bei den schwersten Ueberlastungen nur den verhältnismässig sehr kleinen und annähernd konstanten Strom I_{0t} aufnehmen. *Auf diese Erscheinung ist beim Einbau von Amperemetern und Maximalrelais Rücksicht zu nehmen.*

16. Ausgleichsströme beim Doppelinduktionsregler.

Im Gegensatze zum einfachen Induktionsregler sind beim Parallelbetrieb zweier Doppelregler die Ausgleichsströme der Statoren phasenkonstant, während die Kompensationsströme der Ausgleichsströme in jedem einzelnen Rotor phasenvariabel sind. Phasenkonstant sind ferner die Ausgleichsströme, welche die Stelle 7 (Fig. 18) passieren.

Beim automatischen Parallelbetrieb zweier Doppelregler wird man deshalb die Stabilisierstromwandler zweckmässig in die Stelle 7 einbauen.

17. Der Einphasen-Induktionsregler.

Mit dem Doppelinduktionsregler hat der Einphasen-Induktionsregler die Eigenschaft gemeinsam, dass sich die totale Zusatzspannung nur der Grösse, nicht aber der Phase nach verändert. Diese Tatsache ist nicht zufällig, sondern wurzelt in der inneren Verwandtschaft beider Apparate. Denken wir uns nämlich zwei gleiche Zweiphasen-Induktionsregler in der Weise vereinigt, dass beide Regler sich mechanisch im gleichen Sinne verdrehen, dass aber deren Drehfelder entgegengesetzt umlaufen und werden ferner die beiden ersten Statorphasen der beiden Regler in Serie an die erste Rotorphase, die zweiten Statorphasen aber in Gegenschaltung an die zweite Rotorphase angeschaltet, so entsteht ein Zweiphasen-Doppelinduktionsregler.

Denken wir uns jetzt den einen Induktionsregler vollständig in den anderen hineingeschoben, so werden die beiden gegenläufigen Drehfelder nur noch ein pulsierendes Wechselfeld ergeben, die beiden ersten Rotorphasen werden sich direkt unterstützen, während die zweiten Rotorphasen sich gegenseitig kurz schliessen und zur *Kompensationswicklung* degenerieren.

Die Statorphasen der ersten Phase ergeben die eigentliche Statorwicklung, während die Statorphasen der zweiten Phase, da sie gegeneinander geschaltet sind, keine Spannung ergeben und deshalb weggelassen werden können. Man erhält so in der Tat den *Einphasen-Induktionsregler.* Es gilt also auch für ihn die Drehmomentformel (47).

Dass auch beim Einphasen-Induktionsregler grosse Drehmomente möglich sind, sieht man ein, weil in der Mittelstellung $\psi = \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}$ Strom und Feld *räumlich* und bei $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}; \frac{3\pi}{2}$ auch *zeitlich* zusammenfallen. Das Drehmoment, berechnet aus obiger Formel, stellt einen Mittelwert des pulsierenden Momentes des Einphasen-Induktionsreglers dar. Das Moment pulsiert mit der Anzahl der Energiestösse. Für $\varphi_2 = \frac{\pi}{2}$ oder $\frac{3\pi}{2}$ haben alle Stösse dasselbe Vorzeichen. Für andere Werte von φ_2 entstehen in rascher Folge positive und negative Drehmomente, welche sich sehr häufig unangenehm bemerkbar machen, weshalb die konstruktive Durchführung von Einphasen-Induktionsreglern besondere Sorgfalt erfordert. Wegen des etwas grösseren induktiven Spannungsabfalles des Einphasen-Induktionsreglers ergibt die der Formel (48) entsprechende Drehmomentformel den Wert:

$$D M_r = \frac{1{,}3 \cdot 975\ L_i\ p}{60\ c} \sin \varphi_2 \sin \psi. \tag{54}$$

18. Verwendung des Induktionsreglers als Phasenschieber.

Die Tatsache, dass man mit Hilfe des Induktionsreglers die Phase der Netzspannung in gewissen Grenzen beliebig nach vorwärts oder rückwärts verschieben kann, hat den Glauben erweckt, dass man mit diesem Apparat auch den Leistungsfaktor des Netzes verbessern könne. Dass dies nicht möglich ist, haben unsere Untersuchungen gezeigt, denn wir haben gesehen, dass sich der Strom um angenähert denselben Winkel wie die Spannung verdreht. Tatsächlich bewirkt ja der Induktionsregler sogar eine Verschlechterung des Leistungsfaktors.

In gewissen Fällen kann nun der Induktionsregler doch als Phasenschieber benützt werden. Zwar nicht in dem Sinne, dass er etwa selbst wattlose Leistung erzeugen würde, aber in der Weise, dass er die Verteilung der wattlosen Energie eines Netzes in willkürlicher Weise gestattet.

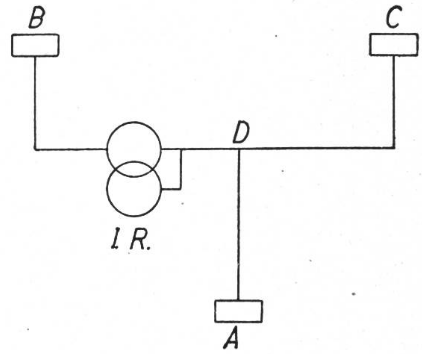

Fig. 20.
Schaltungsschema eines Induktionsreglers als Phasenschieber.

Als Beispiel für diesen Fall nehmen wir an, ein Stromabonnent A beziehe von seinen Lieferanten B und C (Fig. 20) elektrische Energie. Ohne uns näher mit dem nicht sehr einfachen Problem der Energielieferung aus zwei Kraftwerken zu befassen, machen wir die Annahme, dass sich die Lieferanten in die Abgabe der wattlosen- und Wattenergie gleichmässig teilen sollen. Solange die Produzenten B und C die elektrische Energie unter denselben Bedingungen liefern, wird eine gleichmässige Aufteilung zweckmässig sein. Nehmen wir aber an, dass B die Energie wesentlich billiger als C verkaufe, dabei aber die Bedingung stelle, dass der Leistungsfaktor, unter dem der Strom bezogen werde, z. B. den Wert 0,85 nicht unterschreite, so wird A zweckmässig seinen Hauptenergiebedarf unter Innehaltung der $\cos\varphi$-Bedingung von B decken. Natürlich wird dann der Lieferant C den grössten Teil der wattlosen Energie liefern müssen.

Die Möglichkeit einer derartigen Verschiebung der wattlosen Energie bietet unter anderem der Induktionsregler. Die Wirkungsweise ist die folgende:

Bekanntlich benötigen alle elektrischen Maschinen zur Erzeugung ihrer Spannung ein magnetisches Feld und einen entsprechenden Magnetisierungsstrom zur Aufrechterhaltung dieses Feldes. Sind das Feld und das Wicklungssystem, in welchem der Magnetisierungsstrom fliesst, relativ zueinander nicht in Ruhe, so ist die Magnetisierung zugleich mit einer aufgenommenen wattlosen Leistung verknüpft. Deshalb benötigen alle elektrischen Maschinen, welche vom Netz her magnetisiert werden, eine entsprechende Menge wattlosen Stromes. Es besteht demnach zwischen Spannung und wattloser Energie ein inniger Zusammenhang.

So wird ein Generator einem Asynchronmotor soviel wattlose Energie zuführen, als er zur Erzeugung seiner Klemmenspannung, die ohmschen Spannungsabfälle ausgenommen, benötigt. Schaltet man aber mit diesem Motor einen Apparat in Serie, der selbst eine mit der Motorspannung in Phase liegende Zusatzspannung erzeugt, so bedarf es einer kleineren Motorklemmenspannung, damit das Gleichgewicht der E. M. K. erfüllt ist. Der Motor wird dann auch weniger wattlose Energie aufnehmen.

Diese Sachlage tritt ein, wenn wir z. B. zwischen D und B (Fig. 20) einen Induktionsregler schalten. Wird im Sinne von A nach B survoltiert, so wird B weniger wattlose Energie nach A liefern, als im entgegengesetzten Falle, dafür wird aber beim Survoltieren C mehr wattlosen Strom abgeben als beim Devoltieren. Durch Verwendung passender Relais kann im automatischen Betrieb der $\cos\varphi$ der Leitung $B-D$ (praktisch) konstant gehalten werden. Es mag noch darauf hingewiesen werden, dass im allgemeinen bei dieser Art der Regulierung trotz der durch den Regler verursachten seitlichen Phasenverschiebung der Netzspannungen kein Einfluss auf die Wattkomponente vorhanden ist, so dass von der Verwendung des kostspieligeren Doppelinduktionsreglers Umgang genommen werden kann.

19. Anwendung des Induktionsregler-Diagrammes für konstante externe Leistung auf zwei praktische Beispiele.

Zur Erleichterung der praktischen Anwendung des in Fig. 15 entwickelten Diagrammes wollen wir folgende zwei Beispiele behandeln. Gleichzeitig soll der Einfluss der Schaltung eines Reglers auf sein Diagramm hervorgehoben werden, was am besten dadurch geschieht, dass wir das Diagramm eines und desselben Induktionsreglers für genau dieselbe Durchgangsleistung, aber für *verschiedenen externen* $\cos\varphi$, konstruieren. Im ersten Falle befinde sich auf Seite der konstanten Spannung ein Asynchron*generator,* im zweiten Falle ein Asynchron*motor.*

Die charakteristischen Daten des Induktionsreglers seien:

Konstante Durchgangsleistung . . . . = 200 kVA
Konstante Netzspannung, verkettet . . . . . = 500 V

Konstanter Netzphasenstrom $= \dfrac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 500}$ . . = 231 A

Regulierbereich = 20 % von 500 V . . . . . = 100 V
Tiefste variable Spannung 500 − 100 V . . . = 400 V
Höchste variable Spannung 500 + 100 V . . . = 600 V

$\left.\right\}$ bei Belastung

Kleinster theoretischer Statorstrom $= \dfrac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 600}$ = 192,5 A

Grösster theoretischer Statorstrom $= \dfrac{200 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400}$ = 289 A

Diese beiden Stromwerte weichen *wesentlich* von den wirklichen Werten, wie sie das Diagramm ergeben wird, ab. Das Diagramm wird im *ersten* Falle:

Kleinster Statorstrom . . . . = 195,2 A
Grösster Statorstrom . . . . = 318,0 A

im *zweiten* Falle:

Kleinster Statorstrom . . . . = 204 A
Grösster Statorstrom . . . . = 330 A ergeben.

Die Unterschiede rühren vom Leerlaufstrom und dem Spannungsabfall her, welch letzterer uns auch zwingt, den Induktionsregler grösser zu wählen, wodurch wiederum die Reglerströme vergrössert werden. Um den Einfluss des Spannungsabfalles zu korrigieren, müssen wir die Zusatzspannung um ca. 20 % vergrössern. Es ergibt sich dann:

Verkettete Regler-Zusatz-E. M. K. = 100 V + 20 % . . = 120 V

Uebersetzung des Induktionsreglers $= \dfrac{120}{500}$ . . . . . . = 0,24

Maximaler theoretischer Kompensationsstrom = 289 · 0,24 = 69,4 A

Da der Leerlaufstrom unseres Reglers 25 A beträgt, so ergäbe sich ein maximaler Rotorstrom von $69{,}4 + 25{,}0 = 94{,}4$ A. Dem Diagramm Fig. 21 entnehmen wir aber den richtigen Wert von 97 A und dem Diagramm Fig. 22 den Wert von 104 A.

Auch der genaue Wert der *internen Reglerleistung* ergibt sich erst aus dem Diagramm und ist ausser vom externen $\cos\varphi$ auch davon abhängig, ob der Regler im günstigen oder ungünstigen Gebiet arbeitet.

Wir erhalten für die *nominelle interne Leistung:*

$$100 \text{ V} \cdot 289 \text{ A} \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-3} = 50 \text{ kVA}$$

und die theoretische interne Leistung:

$$120 \text{ V} \cdot 289 \text{ A} \cdot \sqrt{3} \cdot 10^{-3} = 60 \text{ kVA}.$$

Der Leerlaufstrom beträgt 25 A, d. i. $\frac{25 \cdot 100}{69{,}4} = 36\,\%$ des maximalen theoretischen Kompensationsstromes. Ferner betragen:

Die Leerlaufverluste = 2170 Watt

$$\text{Leerlauf } \cos\varphi_0 = -\frac{2170}{500 \cdot 25 \cdot \sqrt{3}} = -0{,}10 \text{ (II Quadrant)}$$

Kurzschlusspannung = 18 V (bei 289 A)

Kurzschlussverluste (bei 289 A) = 2250 Watt

$$\text{Kurzschluss } \cos\varphi_k = -\frac{2250}{18 \cdot 289 \cdot \sqrt{3}} = -0{,}25 \text{ (II Quadrant)}$$

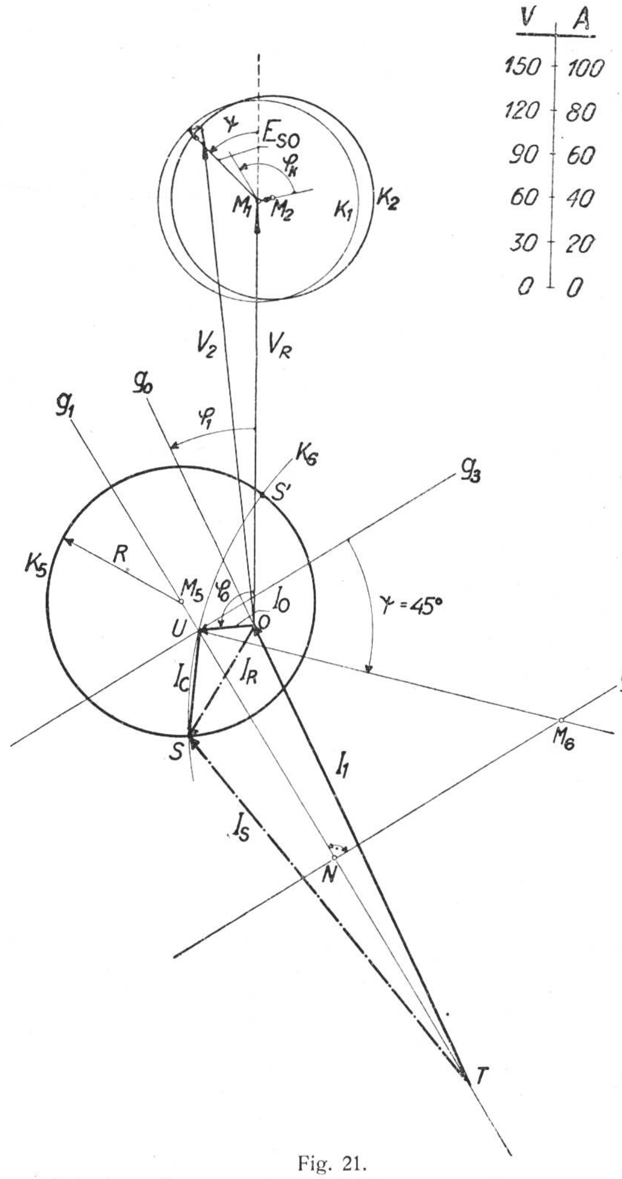

Fig. 21.
Belastungsdiagramm eines Induktionsreglers für konstante externe Leistung. (Der Induktionsregler ist auf der Seite des Rotoranschlusses mit einem Asynchrongenerator verbunden.)

Beispiel 1.

Wir knüpfen an unser bereits eingangs angeführtes Beispiel eines Unterwerkes an und denken uns, dass in die Leitung *C* (siehe Fig. 5), an deren Ende sich ein Asynchrongenerator befindet, ein Induktionsregler eingebaut werde, der die Spannung des Asynchrongenerators konstant halten soll. Die Aufstellung des Diagrammes geschieht nun in folgender Weise (Fig. 21):

Von der konstanten Spannung $V_r = \frac{500 \text{ V}}{\sqrt{3}} = 289$ V tragen wir entsprechend $\cos\varphi = 0{,}9$ den Winkel der Generatorphasenverschiebung φ_1 ab. Es entsteht so der Strahl g_0, den wir nach rückwärts verlängern und auf ihm den konstanten Generatorstrom $I_1 = 231$ A abtragen. Der Fusspunkt von I_1 liegt in *T*, die Spitze in *O*. Der Strom 3 der Fig. 6a stellt den um 180^0 verdrehten Statorstrom des Induktionsreglers dar. Die Umkehrung entspricht dem entgegengesetzten Durchlaufssinn der Bezugspfeile von Leitung *C* und dem Stator. Der Statorstrom und derjenige des Asynchrongenerators stimmen im *wesentlichen* miteinander überein.

Deshalb ist auch I_1 gegenüber Strom 3 (Fig. 6a) um annähernd 180° verdreht und liegt nur scheinbar (wegen der Zurückverschiebung) im selben Quadranten wie Strom 3 (Fig. 6a), sein *Sinn* aber ist entgegengesetzt gerichtet.

Von O aus tragen wir unter dem Winkel φ_0 an V_r den Leerlaufstrom $I_0 = 25$ A ab. Seine Spitze U verbinden wir mit T und erhalten die Gerade g_1, auf welcher sich das Zentrum M_5 des gesuchten Stromkreises k_5 befindet. Die Strecke M_5U ist:

$$M_5U = TU\frac{u^2}{1-u^2}$$

$$= 240\frac{0{,}24^2}{1-0{,}24^2} = 14{,}6 \text{ A.}$$

Der Radius R des Kreises ergibt sich aus:

$$R = TU\frac{u}{1-u^2}$$

$$= 240\frac{0{,}24}{1-0{,}24^2} = 61 \text{ A.}$$

k_5 wird mit R um U herum geschlagen. Die Verbindungen von O nach k_5 sind die jeweiligen Rotorströme. Indem wir die Leerlaufzusatzspannung $= \frac{120^V}{\sqrt{3}} = 69{,}3$ V in den Zirkel nehmen und den Kreis k_1 um M_1 herum schlagen, erhalten wir den Leerlaufkreis. Ziehen wir durch M_1 die Parallele zu g_1 und tragen wir den Phasenverschiebungswinkel φ_k rückwärts von dieser Geraden ab, so erhalten wir den Strahl M_1M_2. Die Strecke M_1M_2 entspricht der Kurzschlusspannung entsprechend dem grössten Statorstrom. Es ist: $TM_5 + R = 318$ A. Der Spannungsabfall beträgt somit:

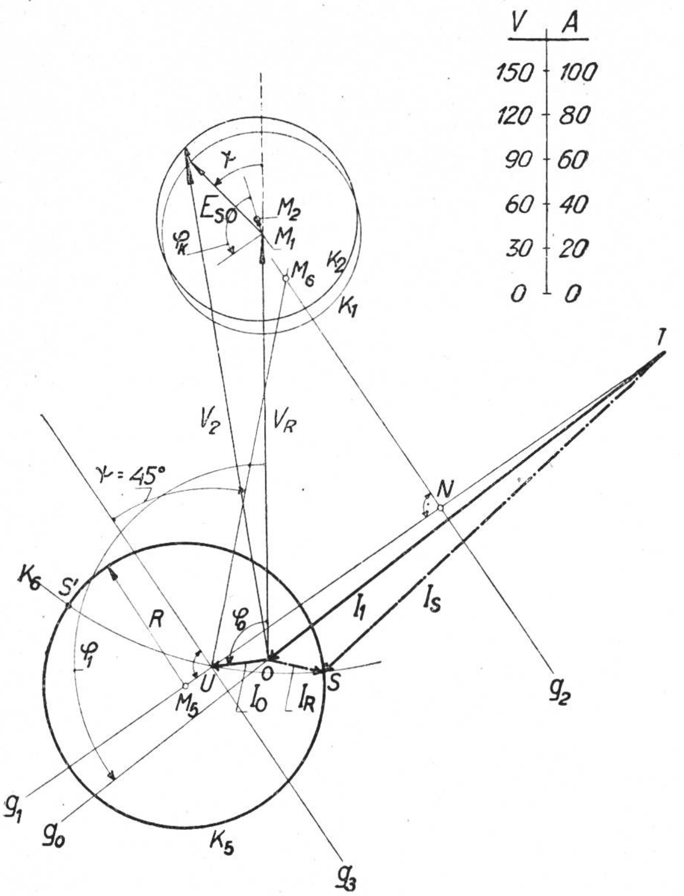

Fig. 22.
Belastungsdiagramm eines Induktionsreglers für konstante externe Leistung. (Der Induktionsregler ist auf Seite des Rotoranschlusses mit einem Asynchron*motor* verbunden.)

$$M_1M_2 = \frac{318 \cdot 18{,}0}{289 \cdot \sqrt{3}} = 11{,}4^V.$$

Schlagen wir auch um M_2 mit demselben Radius den Kreis k_2, so erhalten wir den geometrischen Ort der variablen Spannung V_2, wenn V_r *unter Vollast* vollständig konstant bleiben soll.

Um bei gegebener Reglerverstellung ψ die Ströme und Spannungen zu ermitteln, verfahren wir folgendermassen:

Wir legen durch N die Mittelsenkrechte g_2 zur Strecke TU und durch U die zu ihr Parallele g_3. Von g_3 aus tragen wir den Winkel ψ im Uhrzeigersinne von U aus ab. Der eine Schenkel schneidet g_2 in M_6. Nehmen wir jetzt M_6U als Radius mit dem Zentrum M_6 in den Zirkel, so erhalten wir die Punkte S und S'. Ersterer entspricht dem Winkel ψ, letzterer dem Winkel $\psi + \pi$. OS ist der gesuchte totale Rotor-, TS der zugehörige Statorstrom I_s.

Das Spannungsdiagramm erhalten wir in einfacher Weise, indem wir die Leerlaufspannung E_{s0} entsprechend dem Winkel ψ eintragen (Fig. 21) und von deren

Spitze die Strecke $M_1 M_2$ abtragen (oder auch E_{s0} von M_2 aus einzeichnen). V_2 ist dann diejenige variable Belastungsklemmenspannung, welche bei Vollast und gegebener Verdrehung ψ des Reglers die konstante Klemmenspannung V_r ergibt.

Beispiel 2.

Wir nehmen weiter an, dass derselbe Induktionsregler verwendet werde, um die Spannung einer Fabrik, die mit schlechtem $\cos\varphi$ arbeite, konstant zu halten. Wir denken uns, dass der Induktionsregler in die Leitung *b* unseres eingangs erwähnten Unterwerkes (Fig. 5) eingebaut werde, und zwar wiederum so, dass sich der Rotoranschluss auf Seite der konstanten Spannung befinde. Die durchgehende Leistung, sowie die Spannung und deren Regulierung seien genau gleich, wie im vorigen Beispiel, nur die Phasenverschiebung φ_2 des Netzstromes habe sich geändert. Da die Asynchronmotore der Fabrik im zweiten Quadranten arbeiten, übersteigt der Phasenwinkel φ_1 den Wert von 90^0. Fig. 22 zeigt das Reglerdiagramm entsprechend einer Netzphasenverschiebung von $\cos\varphi_1 = -0{,}6$. Das neue Diagramm ist nach den gleichen Regeln wie das alte aufgebaut. Weil Punkt T um O herum gewandert ist, hat sich auch die Strecke TU und mit ihr der Kreisradius R geändert. Der maximale und minimale Rotorstrom besitzt nun andere Werte. Für gleiche Rotorverdrehung ψ (z. B. 45^0) erhält man ganz verschiedene Rotorströme und Verluste. Es soll ausdrücklich darauf hingewiesen werden, dass die im Diagramm möglichen extremen Stromwerte nicht unbedingt auch im normalen Betrieb auftreten müssen. Arbeitet der Regler beispielsweise mit gutem $\cos\varphi$, so muss er im allgemeinen nicht ganz in die Endlagen verdreht werden, um die geforderten Spannungsvariationen zu erzeugen. Mit Hilfe des obigen Diagrammes können diese Grenzwerte, die bei Abnahmeproben von Bedeutung sind, sehr leicht ermittelt werden.

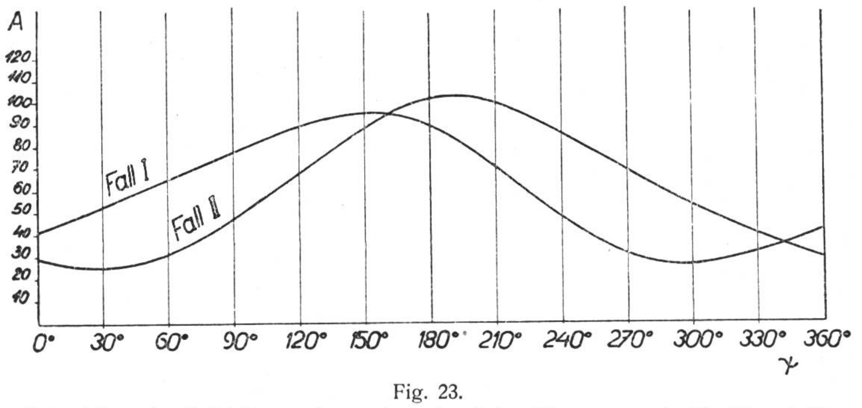

Fig. 23.
Rotorströme des Induktionsreglers entsprechend den Diagrammen in Fig. 21 und 22.

Fig. 23 zeigt die Rotorströme und Fig. 24 die totalen Reglerverluste für die zwei angenommenen Belastungsfälle des obigen Induktionsreglers in Funktion der Rotorverdrehung ψ. Man erkennt aus diesen Figuren, dass mit schlechter werdendem $\cos\varphi$ die Unterschiede der zwei Arbeitsgebiete mehr und mehr verschwinden.

Es sei noch darauf hingewiesen, dass mit variabler Phasenverschiebung sich natürlich auch die Lage von M_2 verändert, so dass auch die Ortskurve von V_2 jedesmal eine andere wird. Entsprechend der möglichen Phasenverschiebung φ_1 von $O - 2\pi$ beschreibt auch T einen vollen Kreis um O. Der höchsten Lage von T entspricht die Belastung des Reglers durch eine Maschine mit $\cos\varphi = -1$, oder z. B. durch ein reines Beleuchtungsnetz. Punkt T wandert noch weiter nach links, wenn die motorisch arbeitende Maschine (auf Seite des Rotoranschlusses) auch noch zur Abgabe von wattloser Leistung herangezogen wird (gewöhnlicher übererregter Synchronmotor oder Synchron-Induktionsmotor). T bewegt sich schliesslich nach links unten, wenn die Wattkomponente dieser Maschine ihr Vorzeichen wechselt und letztere z. B. als (normaler) übererregter Synchrongenerator (im vierten Quadranten) arbeitet.

Beim Aufbau des Reglerdiagrammes konstanter externer Leistung haben wir die Leistung (kVA) auf Seite des Rotoranschlusses als gegeben angenommen. Die Durchgangsleistung auf Seite der variablen Spannung unterscheidet sich von ersterer um den Betrag der vom Regler absorbierten wattlosen und Wattleistung. Ist nun die *Durchgangsleistung auf Seite der variablen Spannung* gegeben, so lässt sich das Diagramm mit praktisch genügender Genauigkeit folgendermassen aufbauen: Man bestimmt den Strom I_1 und seine Phasenverschiebung φ_1, wie wenn der Induktionsregler ein idealer wäre. Hierauf reiht man an I_1 einen generatorisch-kapazitiven Stromvektor an, dessen Wattkomponente den mittleren totalen Reglerverlusten und dessen wattlose Komponente der gesamten vom Regler absorbierten mittleren wattlosen Leistung entspricht. Der resultierende Summenstrom ist (mit genügender Genauigkeit) der Netzstrom auf Seite der konstanten Spannung und kann nun in bekannter Weise zum Aufbau des obigen Diagrammes verwendet werden. Diese Konstruktionsmethode kommt häufig bei Belastungsarten in Frage, wie sie der letzte der oben angeführten vier Fälle darstellt, wenn z. B. von einem Netze konstanter Spannung aus ein *Einanker-Umformer* oder ein elektrischer Ofen zwecks Spannungsvariierung über einen Induktionsregler gespeist wird, wobei dann φ_2 statt φ_1 und die externe Leistung auf Seite der *variablen* Spannung gegeben sind.

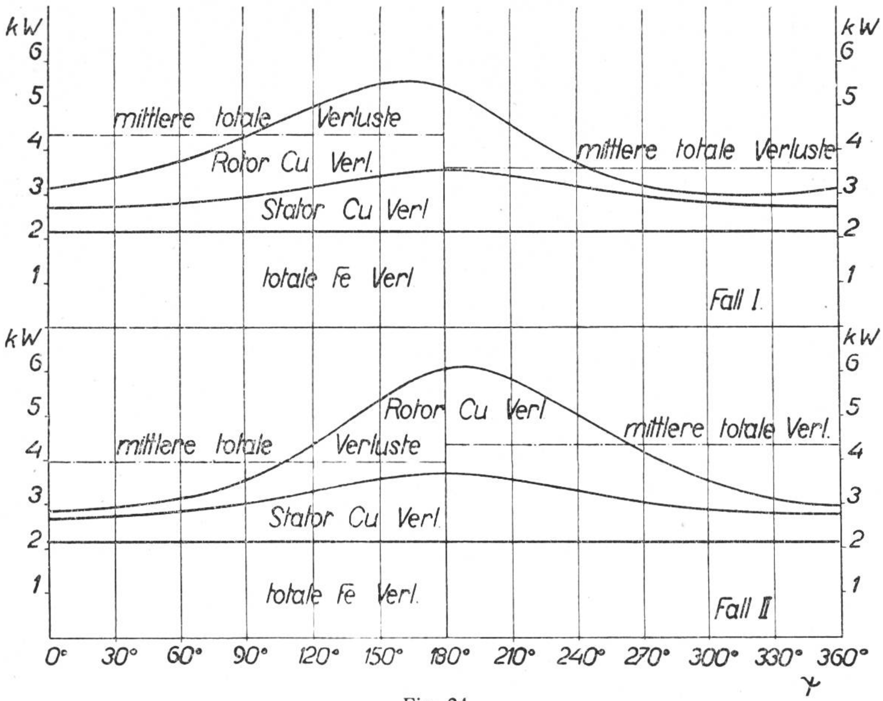

Fig. 24.

Totale Verluste eines Induktionsreglers entsprechend den Diagrammen in Fig. 21 und 22.

20. Einstellung des Reglers im Prüfraum.

Wir haben erkannt, welche Bedeutung einer richtigen Einstellung des Reglers in bezug auf sein Arbeitsgebiet zukommt. Erstens ist sie unbedingtes Erfordernis für den *Parallelbetrieb* zweier Regler, anderseits hat man aus wirtschaftlichen Gründen ein Interesse daran, den Regler im günstigen Gebiet arbeiten zu lassen.

Nun ist es zwar theoretisch immer möglich, bei etwaigem unrichtigem Anschluss die Arbeitsgebiete auch im Betrieb zu wechseln, indem man lediglich zwei entsprechende Stator- und Rotorphasen miteinander vertauscht, doch stösst die praktische Durchführung (wenigstens bei grösseren Reglerausführungen) in den meisten Fällen auf grosse Schwierigkeiten. Man tut deshalb gut, den Regler schon im Prüffeld so einzustellen, dass seine Arbeitsweise allen gewünschten Bedingungen entspricht.

Die erste Bedingung ist die Kenntnis der Schaltanlage, in welche der Regler eingebaut werden soll. Es muss die *Richtung der Energieströmung*, die Verbindungsweise der Klemmen und insbesondere der *Phasenzyklus* bekannt sein. Letzteres ist häufig nicht der Fall. Doch lässt sich die Phasenfolge mit sogenannten Drehrichtungszeigern leicht ermitteln. Ist ein solcher nicht vorhanden, so genügen zur Feststellung des Phasenzyklusses zwei Glühlampen und eine kleine Drosselspule, deren Impedanz in Ohm ungefähr gleich ist dem Widerstand einer der beiden Glühlampen. Werden die beiden Lampen und die Drosselspule zusammen in

Stern ans Netz geschaltet (eventuell unter Verwendung von Spannungswandlern), so bleibt diejenige Lampe *dunkel,* welche der anderen in der Phase vorauseilt. Durch diesen Versuch ist die Phasenfolge also sehr leicht zu ermitteln. An Hand des ganzen Schaltplanes und mit Benützung der oben entwickelten Reglerdiagramme ist es nun nicht mehr schwer, festzustellen, ob der Regler zweckmässig im Gebiet $\psi = 0 \div 180^0$ oder $\psi = 180^0 \div 360^0$ arbeiten soll. Der Prüffeldingenieur hat dann nur noch die Aufgabe zu lösen, die *Lage der Arbeitsgebiete am Regler selbst* festzustellen und dementsprechend durch eventuelles Umschalten oder Verdrehen des Rotors die richtige Einstellung vorzunehmen. Dies geschieht in folgender Weise:

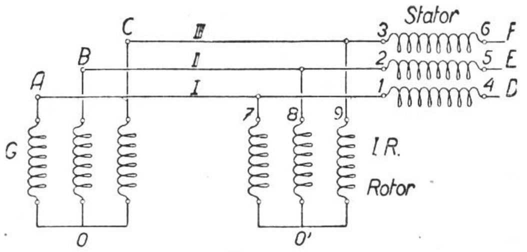

Fig. 25.
Anschlussweise des Induktionsreglers im Prüffeld.

Man schaltet den Induktionsregler in richtiger Phasenfolge (wie sie im Betriebe herrscht) an den Prüfgenerator *G* (Fig. 25) und bestimmt die Grösse einer Reihe von Spannungen, wobei der Rotor zuerst eine beliebige aber feste Lage einnehmen möge. Mit Hilfe der gemessenen Spannungen wird das sogenannte *Raum-Zeit-Diagramm* für diese Rotorstellung entwickelt. Nach einer weiteren beliebigen Verdrehung des Rotors werden neue Spannungen gemessen und damit ein neues Raum-Zeit-Diagramm gezeichnet. Der Vergleich der beiden Diagramme gibt einen klaren Einblick in die elektrischen Verhältnisse des Reglers und ermöglicht es, seine genaue Einstellung vorzunehmen.

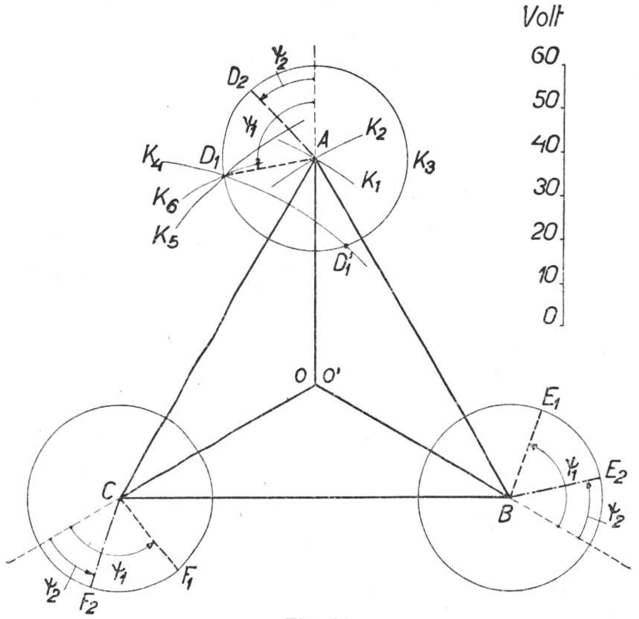

Fig. 26.
Raum-Zeit-Diagramm eines Induktionsreglers.

Bei der ersten Rotorstellung mögen folgende Spannungen (mit Hilfe eines Spannungswandlers) gemessen worden sein (Fig. 25 und 26):

$$BC = 89{,}4\ \text{V} \quad AC = 89{,}3\ \text{V} \quad AB = 89{,}5\ \text{V} \quad CF_1 = 21{,}0\ \text{V} \quad AD_1 = 21{,}0\ \text{V}$$
$$BE_1 = 20{,}9 \quad CD_1 = 77{,}3 \quad BD_1 = 98{,}2 \quad AE_1 = 77{,}5 \quad CE_1 = 98{,}6$$
$$BF_1 = 77{,}6 \quad AF_1 = 98{,}5 \quad \text{und zur Kontrolle:}$$
$$E_1D_1 = D_1F_1 = E_1F_1 = 90{,}1\ \text{V} \qquad OD_1 = OE_1 = OF_1 = 52{,}1\ \text{V}.$$

Nachdem der Rotor des Reglers um ca. 30^0 mechanisch im Sinne des Uhrzeigers verdreht wurde, ergaben sich folgende Spannungen:

$$CF_2 = 21{,}0 \quad AD_2 = 21{,}0 \quad BE_2 = 20{,}9 \quad CD_2 = 97{,}5 \quad BD_2 = 109{,}9$$
$$AE_2 = 97{,}6 \quad CE_2 = 110{,}0 \quad BF_2 = 97{,}9 \quad AF_2 = 110{,}0 \ \text{und zur Kontrolle}$$
$$E_2D_2 = D_2F_2 = E_2F_2 = 118{,}7\ \text{V} \qquad OD_2 = OE_2 = OF_2 = 68{,}6\ \text{V}.$$

Die erstgemessenen Spannungen ergeben ein Raum-Zeit-Diagramm, das sich folgendermassen aufbaut:

Die Spannung $BC = 89{,}4$ V wird als Strecke BC horizontal aufgetragen (Fig. 26). Hierauf greift man die Spannung $AC = 89{,}3$ V mit dem Zirkel ab und schlägt um C den Kreis k_1, dann nimmt man $AB = 89{,}5$ V in den Zirkel und schlägt um B den Kreis k_2 (siehe Fig. 26). Die Schnittpunkte der Kreise k_1 und k_2 entsprechen der möglichen Lage von A (in der Fig. 26 ist nur der obere Schnittpunkt sichtbar). Da die zeitliche Phasenfolge dem Zyklus ABC gehorcht (siehe Fig. 25), so ist der obere Schnittpunkt der Kreise der gesuchte Punkt A des Raum-Zeit-Diagrammes:

Denn im Raum-Zeit-Diagramm wird die zeitliche Folge der Spannungen durch eine räumliche Folge ausgedrückt, und zwar so, dass alle sich zeitlich folgenden Spannungen sich im Diagramm im Sinne des Uhrzeigers folgen.

Die weiteren Punkte des Diagrammes sind nun sehr leicht zu bestimmen: D_1 z. B. findet man, indem man $AD_1 = 21{,}0$ V in den Zirkel nimmt und den Kreis k_3 um A schlägt. Hierauf greift man $CD_1 = 77{,}3$ V mit dem Zirkel ab und zieht den Kreis k_4. Es entstehen die Schnittpunkte D_1 und D'_1. Um zu entscheiden, welcher von den Punkten der richtige ist, nimmt man die Spannung $BD_1 = 98{,}2$ V oder auch $OD_1 = 52{,}1$ V in den Zirkel und zieht die Kreise k_5 beziehungsweise k_6, welche beide durch den gesuchten Punkt D_1 gehen. In analoger Weise konstruiert man die Punkte E_1, F_1, D_2, E_2 und F_2 und erhält die Raum-Zeit-Diagramme der zwei oben erwähnten Reglerstellungen. Die Tatsache, dass mit einer Verdrehung des Reglers der Punkt D_1 nach D_2, also *im Sinne des Uhrzeigers,* gewandert ist, während wir den Regler ebenfalls *im Uhrzeigersinn* verdreht haben, lässt uns erkennen, dass das *Drehfeld* des Reglers *entgegen dem Sinne des Uhrzeigers* rotiert. Diese Erkenntnis ist von Wichtigkeit bei der Bestimmung des Drehsinnes der Reglermomente und der Regulierdrehrichtung.

Das Diagramm Fig. 26 zeigt uns ohne weiteres, dass der vorliegende Regler in der herrschenden Stellung im Gebiet $\psi = 0 - 180^0$ arbeitet und gibt uns (was als besonders wertvoll angesehen werden darf) *für jede beliebige Reglerstellung die genaue Lage der Spannungsvektoren aller drei Phasen an*, so dass die elektrische Stellung des Reglers aus dem Diagramm unmittelbar abgelesen werden kann und jede eventuelle *Fehlschaltung* deutlich zutage treten müsste. An Hand des für diesen Regler im gegebenen Fall in Frage kommenden Belastungsdiagrammes ist das günstige Arbeitsgebiet leicht zu bestimmen und durch das Raum-Zeit-Diagramm der Fig. 26 ist uns ein bequemes und sicheres Mittel in die Hand gegeben, den Regler so einzustellen, dass er wirklich in dem gewünschten Gebiete arbeitet.

Schlussbemerkung.

Die obigen Ausführungen bilden keine erschöpfende Theorie des Induktionsreglers. Viele Fragen sind unbeantwortet geblieben. So fehlt z. B. die Darstellung der kombinierten Diagramme von Induktionsreglern mit Serien- und Erregertransformatoren. Ebenso sind die nichtstationären Vorgänge unberücksichtigt geblieben. Dennoch wird die hier entwickelte Theorie manche Unklarheit beseitigen. Sie wird dem Theoretiker bei der Berechnung gute Dienste leisten, dem Prüffeldingenieur erleichtert sie die Einstellung des Reglers und dem Betriebsmanne gewährt sie Einblicke in die Arbeitsweise eines Apparates, der mit dem fortschreitenden Bau unserer grossen Ueberlandleitungen mehr und mehr Verbreitung finden wird.