

Zeitschrift:	Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber:	Association suisse des électriciens
Band:	19 (1928)
Heft:	3
Artikel:	Die Verbesserung kleiner Netzeistungsfaktoren und Regulierung der Fernleitungsspannung durch Synchron- und Asynchronmaschinen
Autor:	Schönholzer, Ernst
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-1057021

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Verbesserung kleiner Netzleistungsfaktoren und Regulierung der Fernleitungsspannung durch Synchron- und Asynchronmaschinen.

Von Ernst Schönholzer, Zürich.

621.312(065)

Der Autor legt dar, von welch günstigem Einflusse die Verwendung von Blindstrommaschinen, das sind synchrone oder asynchrone Wechselstrommotoren, auf die Wirtschaftlichkeit und den Betrieb von elektrischen Anlagen ist. Er zeigt ferner, dass sowohl die Energieproduzenten, wie auch die Konsumenten Interesse daran haben, die unliebsamen Erscheinungen der induktiven Industrielast zu mildern und zeigt an Hand von Berechnungsbeispielen, welchen technischen und wirtschaftlichen Einfluss solche Maschinen haben können. Sodann erläutert er die Wirkungsweise verschiedener für die Phasenkompensation in Frage kommender Maschinen.

L'auteur expose combien l'usage de machines à courant déwatté, c. à. d. de moteurs à courant alternatif synchrones ou asynchrones, influe favorablement sur l'exploitation et le rendement économique d'installations électriques. Il montre ensuite que les producteurs aussi bien que les consommateurs ont intérêt à atténuer les effets désagréables des charges inductives provenant de l'industrie et indique, par des exemples numériques, les conséquences techniques et économiques qu'entraîne l'emploi de telles machines. Il explique enfin le fonctionnement de différentes machines entrant en ligne de compte pour la compensation du décalage.

Einleitung.

Obwohl schon viel über das wichtige Gebiet der Blindstromkompensation und die Verbesserung des Leistungsfaktors geschrieben worden ist¹⁾, dürften die nachstehenden Studien und besonders die wirtschaftlichen Untersuchungen von den Betriebsleuten der Elektrizitätswerke begrüßt werden.

Die $\cos \varphi$ Frage ist immer noch aktuell und weit entfernt restlos gelöst zu sein. Spricht man mit sachverständigen Betriebsleuten von Ueberlandzentralen, so hört man immer wieder die ernste Klage über die unheimlich anwachsenden Blindströme, die zu transportieren seien, welche die Spannungsverhältnisse des Netzes wesentlich verschlechtern. Dies zusammen mit den zusätzlichen Anlagekosten durch stärkere Leitungen, Generatoren und Transformatoren gibt in hydro-elektrischen Anlagen die Summe der Unannehmlichkeiten, während in kalorisch-elektrischen Werken die zusätzlichen Betriebsverlustkosten jene fatale Summe noch weiter vergrössern.

I. Der Leistungsfaktor und seine Bedeutung.

Es ist bekannt, dass die Wirkungsweise elektrischer Maschinen und Apparate fast ausschliesslich auf dem Vorhandensein magnetischer Felder beruht, welche mit andern Teilen der Maschinen oder der Apparate in magnetischer oder elektrodynamischer Wechselbeziehung stehen. Die speisende Stromquelle muss eine bestimmte Energie aufbringen, und diese magnetischen Felder sind deren Träger. Während des Einschaltvorganges wird beim Gleichstrom die Feldenergie der Maschine zugeführt, beim Wechselstrom hingegen wechseln Richtung und Grösse dieser Felder bei jeder Periode und veranlassen ein Hin- und Herströmen der Feldenergien zwischen dem Stromerzeuger und -Verbraucher. Es bedeuten diese Energiependelungen für die zu übertragende Leitung einen Stromfluss, der unabhängig von der vom Stromverbraucher geforderten Leistung ist. Indem sich dieser Blindleistungsfluss in jedem Betriebszustand dem Wirkleistungsfluss überlagert, tritt ersterer um so mehr in Erscheinung, je kleiner die effektiv übertragene Leistung, also die Wirkleistung, ist. Die pendelnde Feldleistung tritt in der äusseren Energiebilanz nicht in Erscheinung; mit andern Worten, die dem Stromerzeuger zugeführten und dem Stromverbraucher entnommenen mechanischen Leistungen werden von ihr nicht beeinflusst. Infolge dieser Eigenschaft ordnete man ihr in der Praxis

¹⁾ „Blindstrom“ von R. Rüdenberg, Siemens Zeitschrift 1922, Heft 1.

„Die Ursachen und schädlichen Folgen eines niedrigen Leistungsfaktors und Mittel zur Bekämpfung dieser Folgen“, von Obering. M. Schiesser, Baden, Bulletin S.E.V. 1924, No. 9.

den Namen „Blindleistung“ zu. In den sie übertragenden Organen wie Leitungen, Schalter, Transformatoren etc., macht sie sich durch einen grösseren Strom, den „Blindleistrom“, sehr unangenehm bemerkbar.

Der Leistungsfluss, der in einer Leitung nachweisbar ist, setzt sich also aus Wirk- und Blindleistung zusammen und wird mit dem (nicht gerade glücklich gewählten) Wort „Scheinleistung“ bezeichnet, weil sie kein Mass für die Wirkleistung ist. Zutreffender und schärfer kennzeichnend ist zweifellos der Name „Komplexleistung“, denn im Worte komplex ist immer Wirkliches *und* Unwirkliches, d. h. Imaginäres, verstanden, während unter „Schein“ auch etwas ganz Unwirkliches verstanden werden kann. Für Blindleistung könnte also ebensogut Scheinleistung gesetzt werden. Fig. 1 stellt die Zusammensetzung der 3 Leistungen durch ein einfaches Diagramm dar.

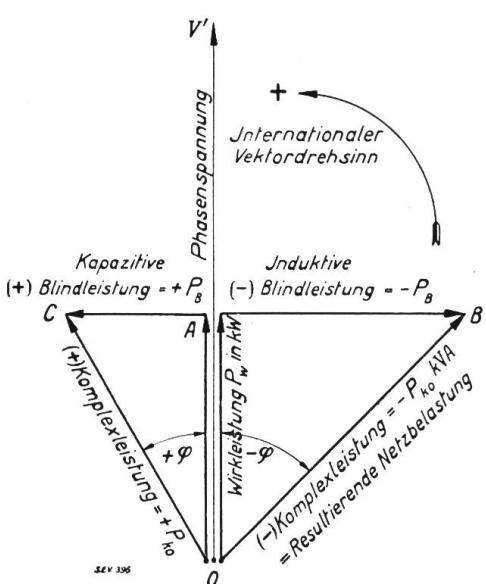


Fig. 1.
Leistungsdigramm einer Wechselstrom-
übertragung.

$OA = P_w$ = Wirkleistung.
 $OB = (-)$ induktive Komplexleistung.
 $AB = (-)$ induktive Blindleistung.
 $AC = (+)$ kapazitive Blindleistung.
 $OC = (+)$ kapazitive Komplexleistung.

Hinsichtlich der Stromverbraucher (Motoren und Apparate) wurde allerdings ein guter Leistungsfaktor angestrebt, indessen waren meist Sicherheitsgründe des Konsumenten ausschlaggebender. Die Drehstrommotoren wurden oft zu reichlich bemessen und grosse Luftspalte verlangt, wodurch der Leistungsfaktor herabgesetzt wird. Verluste und Ausnutzung spielten eine untergeordnete Rolle.

Heute sieht der weitblickende Industrielle oder Konsument elektromotorischer Arbeit nicht allein die momentanen Anschaffungskosten, sondern auch die jährlichen Betriebskosten und lässt sie unter Umständen bei der Wahl und Bestellung des Motortyps ausschlaggebend sein.

Leider ist aber diese klare Einsicht noch lange nicht genügend in Industriekreisen durchgedrungen. Erst in neuerer Zeit, als die stromliefernden Werke infolge des Sinkens des Leistungsfaktors auf Werte von 0,4–0,60 selbst bei Vollast dazu schritten, den industriellen Konsumenten eine empfindliche Gebühr für den Blindleverbrauch zu verrednen, konnte eine gewisse Besserung der betriebstechnischen und wirtschaftlichen Verhältnisse festgestellt werden. Die Elektrizitätswerke sind es, die am meisten darunter zu leiden haben, weil ihre Generatoren, Transformatoren und Leitungen schlecht ausgenutzt werden. Nehmen wir als Zahlenbeispiel ein Wasserkraftwerk mit 4 Turbinen, gekuppelt mit 4 Generatoren zu je 8000 kW bei

Die Komplexleistung P_{ko} wird geometrisch dargestellt durch die Hypotenuse eines rechtwinkligen Dreiekes und die Wirk- und Blindleistung (P_w, P_B) durch dessen Katheten bezw. die Komponenten. Das Verhältnis von Wirk- zu Komplexleistung = P_w/P_{ko} nennt man heute allgemein Leistungsfaktor oder analytisch $\cos \varphi$ (sinusförmige Strom- und Spannungswelle vorausgesetzt). Er gibt den Bruchteil an, welcher der in einer Uebertragungsleitung fliessenden Leistung, der tatsächlichen Energieübertragung, also der Wirkleistung entspricht. Das negative Vorzeichen vor dem Phasenverschiebungswinkel φ deutet auf einen nacheilenden, ein Pluszeichen auf einen voreilenden Blindlestrom hin.

Dem Leistungsfaktor mass man in früheren Jahren, als die Maschinen und übertragenden Organe noch nicht so zahlreich und intensiv beansprucht waren wie heute, noch eine recht geringe Bedeutung zu. Die Spannungshaltung war eine leichte Sache für die Kraftwerke. Nur um einer guten Ausnutzung der Antriebsmaschine wegen wurden die Generatoren für einen $\cos -\varphi = -0,80$ bestellt, um event. auch Blindleistung liefern zu können.

$\cos -\varphi_G = -0,8$, an. Dann muss erstens, ganz abgesehen von den Spannungs-erhöhungen in der Leitung und in den Transformatoren, die generatorische Anlage, allein schon wegen der zur Erzeugung der vom Netz geforderten Blindlast, um $4(1 - \cos \varphi_0) \frac{8000}{0,80} = 8000$ kVA grösser als eigentlich nötig bemessen sein. Ein

Gleiches ist zweitens von den 4 Auf- und den 4 Abtransformatoren zu sagen, welche zusammen für $2 \cdot 8000 = 16000$ zusätzliche kVA zu bauen sind. Im Kraft- und Unterwerk sind also total $8000 + 16000 = 24000$ unnütze kVA zu installieren²⁾. Drittens können beim Sinken des Leistungsfaktorwertes auf 0,60 die 4 Antriebsturbinen, welche normal für 8000 kW gebaut wurden, die restlichen $4 \cdot (8000 - 6000) = 8000$ kW nicht mehr hergeben, weil die elektrische Anlage schon mit $4 \cdot 10000$ kVA = 40000 kVA, also voll belastet ist. Insgesamt stehen in diesem Fall (bei $\cos -\varphi = 0,60$ und Vollast der Anlage = $P_{k0} = 40000$ kVA) im Kraftwerk und Energie-Empfangsstation für $4 \cdot (8000 - 6000) = 4 \cdot 2000 = 8000$ Turbinen-kW + $4(1 - 0,60) \cdot 10000 = 16000$ kVA Generatoren-kVA + $2 \cdot 16000 = 32000$ kVA Transformatoren-Anlagegelder ungenutzt da, also totes Kapital, das verzinst und amortisiert werden muss, alles wegen der Blindlast im Netz. Zu dieser wirtschaftlich sehr unangenehmen Tatsache gesellen sich noch zwei andere. Es sind dies die zusätzlichen Kupfer- oder Aluminium-Kosten, sowie die jährlichen Stromwärmeverlustkosten durch Blindstrom in der Fernleitung. Ein Zahlenbeispiel, das sich an obiges Beispiel anlehnt, illustriert dies am besten. Die Komplexleistung von 40000 kVA soll während 3000 Vollast-Stunden im Jahre 100 km weit übertragen werden. Die kWh ab Kraftwerk koste Fr. 0,02, im Hauptunterwerk Fr. 0,03. Wie gross sind die Leistungsverlustkosten bei $\cos -\varphi_2 = -0,80$ und 0,60? Betrachten wir eine Drehstrom-Aluminiumleitung, für welche die wirtschaftliche Spannung sich zu 110 kV ergibt.³⁾

Der günstigste Querschnitt beträgt $\frac{P_2 l \varrho}{X_2 V^2 \cos^2 \varphi_2} = 338$ mm²; wir wählen 300 mm².

Die Leistungsverluste betragen dann 4%. Der ferngeleitete Strom vom Kraftwerk nach der Unterwerk-Oberspannungsseite beträgt 200 A. Der ohmsche Widerstand oder die Resistenz 0,10 Ω/Phase/km. Demnach belaufen sich die Leistungsverlustkosten, bei $\cos -\varphi_2 = -0,80$, jährlich rund auf $k_{v-0,80} = 3 I_2^2 r_{Al} l 10^{-3} P_{kWh} t = \text{Fr. } 72000.-$; während dieselben bei $\cos \varphi_2 = 1$ und gleichem Querschnitt nur $72000 \cdot 0,8^2 = \text{Fr. } 46000.-$ betragen würden; bei $\cos -\varphi_3 = -0,60$ jedoch gleicher Leistung, Spannung und Querschnitt wie oben $k_{v0,60} = \text{Fr. } 128000.-$, bei gleichgebliebener Wirkleistung von 30500 kW. Wir stehen also einer Erhöhung der Verlustkosten um $128000 - 72000 = \text{Fr. } 56000.-$ gegenüber, welche bei 10% für Verzinsung und Amortisation ein Kapital von Fr. 560000.- darstellen.

Aus dem Leistungsdiagramm für Wechselstromübertragung (Fig. 1) erkennen wir ganz allgemein, dass die Blindleistungsverluste mit dem Quadrate des $\tan \varphi$ wachsen.

Es ist: $\tan \varphi = \frac{P_B}{P_W} = \frac{I_B}{I_W}$ und da $3 I_W^2 R 10^{-3}$ den Wirk-kW-Verlust P_{vw} bedeutet, so ist auch der Blindlastwattverlust in kW:

$$P_{vb} = 3 I_W^2 R 10^{-3} \tan^2 \varphi.$$

Wie rasch dieser bei sinkendem $\cos \varphi$ ansteigt, illustriert die Fig. 2 sehr deutlich. Schon bei $\cos \varphi = 0,70$ erreichen die durch die Wirkleistung verursachten Verluste infolge der zu transportierenden Blindleistung die Grösse von P_{vw} . Bei $\cos \varphi = 0,3$ vollends werden die Blindleistungsverluste schon 10 mal grösser als die Wattverluste bei $\cos \varphi = 1,0$ betragen.

²⁾ Tatsächlich sind es, wie wir später zeigen werden, noch viel mehr, durch die Spannungsänderung bedingte unnütz zu installierende kVA.

³⁾ Siehe Bulletin S. E. V. 1926, No. 4, Seite 105 und ff. und No. 8, Seite 388.

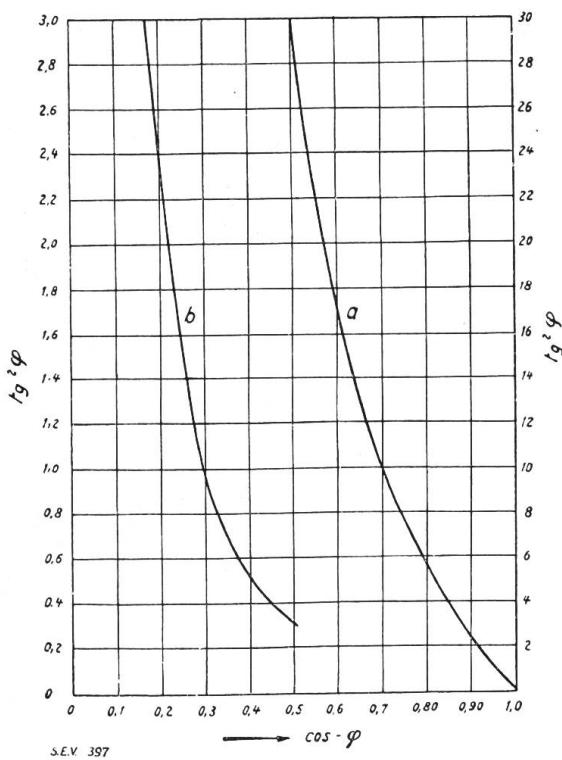


Fig. 2.

Die relativen Blindlastverluste in Funktion des Leistungsfaktors $\cos \varphi$. Ordinaten von Kurve *a* links, von Kurve *b* rechts ablesen.

Verkettete Spannungen⁴⁾:

$$\begin{aligned}\cos -\varphi_3 = 0,80 &: 110 \\ \cos -\varphi_3 = 1,8 &: 110\end{aligned}$$

Phasenströme⁴⁾:

$$\begin{aligned}\cos -\varphi_3 = 0,80 &: 200 \\ \cos -\varphi_3 = 1,0 &: 160\end{aligned}$$

Die *toten* Anlagekosten des ganzen *nicht* kompensierten Systems ergeben sich dann in runden Zahlen wie folgt:

Bei $\cos -\varphi_3 = -0,80$ im Hauptunterwerk Unterspannungsseite und Vollast $P_{2W} = 30\,500$ kW betragen die ungenützten kVA und Leitungsquerschnitte des Systems gegenüber einem Betrieb mit $\cos -\varphi_3 = 1,0$ gemäss den Vektordiagrammen (Fig. 5a, b, c):

1. *Im Netz.* Der Komplexstrom $I'_3 \sim I_2 = 200$ A; der Wattstrom $I'_{3W} = 160$ A. Für die Kompensation durch 2 gleich grosse Synchron- oder Asynchronmotoren sind also total:

$$\sqrt{3} \cdot 110 \cdot \sqrt{(200^2 - 160^2)} = 22\,800 \text{ kVA}$$

erforderlich + 5% Zuschlag wegen Transformerreaktanz (Magnetisierungsstrom) ergibt 24 000 kVA oder 12 000 kVA pro Einheit.

Wird nicht kompensiert, so erhalten wir folgende Blindleistungen:

2. *In den Unterwerk-Abtransformatoren.*

$$\begin{aligned}4 P_2^{\text{kVA}} &= [(V_2 I_2)_{0,8} - (V_2 I_2)_{1,0}] \sqrt{3} \cdot 10^{-3} = (121,5 \cdot 209 - 112,4 \cdot 162) \sqrt{3} \cdot 10^{-3} \\ &= 44\,000 - 31\,500 = 12\,500 \text{ kVA.}\end{aligned}$$

⁴⁾ Die mit Strichen ('') versehenen Buchstaben bedeuten auf Obervoltseite reduzierte Spannungen und Ströme.

Rechnen wir einmal interessehalber zusammen, was wegen des niederen Leistungsfaktors bzw. der zu erzeugenden, umzuwandelnden und fernzuleitenden Blindströme für ein totes Kapital in solchen schlecht ausgenützten Generatoren, Transformatoren, manchmal auch Turbinen investiert werden muss. Als runder, durchschnittlicher Einheitspreis, der den wirklichen Verhältnissen nahe kommt und für eine überschlägige Rechnung vollauf genügt, nehmen wir Fr. 15.– pro installiertes Maschinen-kW bzw. kVA an, und zwar für Generatoren, Transformatoren und Turbinen. Für die Phasenschieber hingegen, welche noch einen Extraraum und besondere Regulierapparate bedürfen, nehmen wir, um sicher und eher zu ungünstig zu rechnen, 20 Fr./kVA an.

Aus den Vektordiagrammen (Fig. 5a und b) und aus der Rechnung für $P_{2W} = \sim 30\,500$ kW und $\cos \varphi_3 = 0,80$ erhalten wir die folgenden, der Kostenbilanz zu Grunde zu legenden Strom- und Spannungswerte:

	V'_3	V_2	V_1	V'_G	in kV
	110	121,5	132,7	148	
		112,4	114	122,5	
	I'_3	I_2	I_1	I'_G	in A
	200	209	194	200	
	160	162	162	161	

3. Mehr-Querschnitt der Drehstrom-Einfachfernleitung s_B .

$$\Delta s = \frac{P_2 l_Q}{X V_{0,8}^2 \cdot 0,80^2} - \frac{P_2 l_Q}{X V_{1,0}^2 \cdot 1,0^2} = \frac{30\,500 \cdot 100 \cdot 0,03}{0,04 \cdot 121,5 \cdot 0,8^2} - \frac{30\,500 \cdot 100 \cdot 0,03}{0,04 \cdot 112,5^2 \cdot 1,0^2} \\ = 245 - 180 = 65 \text{ mm}^2 \text{ (nur nötig wegen Blindstrom).}$$

4. Kraftwerk-Auftransformatoren.

$$\Delta P_2^{\text{kVA}} = \sqrt{3} \cdot 10^{-3} (132,7 \cdot 194 - 114,0 \cdot 162) = 46\,000 - 32\,000 = 14\,000 \text{ kVA.}$$

5. Kraftwerk-Generatoren.

$$\Delta P_1 = \sqrt{3} \cdot 10^{-3} (148 \cdot 200 - 122,5 \cdot 161) = 51\,000 - 34\,000 = 17\,000 \text{ kVA.}$$

6. Turbinen im Kraftwerk (voll ausgenutzt). Die Mehrkosten derselben infolge schlechteren $\cos \varphi$ seien vernachlässigt.

Zusammen erhalten wir eine unnütze Vermehrung der Anlageleistung von $12\,500 + 14\,000 + 17\,000 = 43\,500 \text{ kVA}$, welche ein totes Anlagekapital von $43\,500 \cdot 15 \text{ Fr./kVA} = \text{Fr. } 653\,000.-$ darstellen. Dazu kommt noch die Vergrösserung des Leitungsquerschnittes wegen der Blindstrom führenden Leitung, welche bei 4 Fr./kg verlegten Materials $3 \cdot 65 \text{ mm}^2 \cdot 100 \text{ km} \cdot 2,7 \text{ kg/dm}^3 \cdot 4 \text{ Fr./kg} = \text{Fr. } 210\,000.-$ ausmacht, so dass wir vor einer total unnötigen Investierung von $653\,000 + 210\,000 = \text{Fr. } 863\,000.-$ stehen, die zu denken gibt.

Wollen wir diese vermeiden, so installieren wir die genannten Phasenschieber von $2 \cdot 12\,000 \text{ kVA}$, welche $24\,000 \cdot 20 \text{ Fr./kVA} = \text{Fr. } 480\,000.-$ kosten. Es bleibt noch eine respektable Gesamtersparnis von

$$863\,000 - 480\,000 = \text{Fr. } 383\,000.$$

Würde der Leistungsfaktor bei gleicher Anlage auf $\cos \varphi_3 = 0,60$ fallen (Fig. 5c), so dürfte die Anlage im Unterwerk nur noch max. $P_3 = 23\,000 \text{ kW}$ abgeben, um die Transformatoren und Generatoren im Kraftwerk nicht zu überlasten, die Turbinen würden nur zu rund $\frac{2}{3}$ ausgenutzt, so dass auch für diese $\frac{1}{3}$ ihrer Kosten Totinvestierung wäre. Dieser Fall ist indessen praktisch bedeutungslos, weil mit scharfen Tarifmassnahmen ein solch starkes Sinken des Leistungsfaktors verhindert werden kann. Rein informatorisch sei jedoch angegeben, dass die Totinvestierung nach analoger Rechnung wie oben für Generatoren und Transformatoren ca. $653\,000 \cdot \frac{0,80}{0,60} = \text{Fr. } 870\,000.-$, die Leitung $210\,000 \cdot \left(\frac{0,80}{0,60}\right)^2 = \text{Fr. } 375\,000.-$

und für die Turbinen $\frac{1}{3} \cdot 32\,000 \text{ kW}$ nom. Fr. 15.- = Fr. 160 000.- betragen würde. Insgesamt also $870\,000 + 375\,000 = \text{Fr. } 1\,405\,000.-$! Wenn dieser Belastungsfall während z. B. 1000 Jahresstunden andauerte, so entspräche er bei einer Jahresquote von 18% immerhin ca. $\frac{1000}{8760} \cdot 0,18 \cdot 1\,405\,000 \text{ Fr.}$ rund 30 000 Fr.

Jahreskosten oder einem kapitalisierten Wert von Fr. 167 000.-.

Es ist klar, dass es Fälle geben kann, wo es wirtschaftlicher ist, im Unterwerk nicht ganz auf $\cos \varphi_3 = 1,0$, sondern z. B. auf 0,95 zu kompensieren. Eine genauere Untersuchung wird den günstigsten Wert liefern.

In diesen vielsagenden Zahlen ist noch nicht einmal berücksichtigt, dass die zusätzlichen, resp. ungenützten kVA Anlageteile auch die Gebäude- und Mastenkosten erheblich erhöhen. Denn ob man die ca. 500 Masten für je 1000 - 2000 kg mehr oder weniger Horizontabzug bestellen muss, ist sicher nicht gleichgültig.

Nach diesem Exkurs in die *wirtschaftliche* Seite der Frage wollen wir noch deren *betriebstechnische* Seite betrachten. Fig. 3 veranschaulicht das generelle Schema der Uebertragung ohne Blindlastkompensation.

Hier ist es die starke, für den Betriebsleiter sowie den Konsumenten äusserst unangenehme Spannungsänderung von Leerlauf bis Vollast, welche als schwerwiegender Nachteil in Erscheinung tritt und als direkte Folge der Blindleistung anzusehen ist.

Fig. 4 zeigt das Diagramm einer vollbelasteten Freileitung für Strom und Spannung, aber ohne Berücksichtigung der Auf- und Abtransformatoren sowie des Ladestromes.

Der Blindstrom-Einfluss auf den Spannungsabfall ist deutlich zu erkennen. Ja, der induktive Spannungsabfall $\sqrt{3} I \omega L$ überwiegt, vollends bei Freileitungen, den

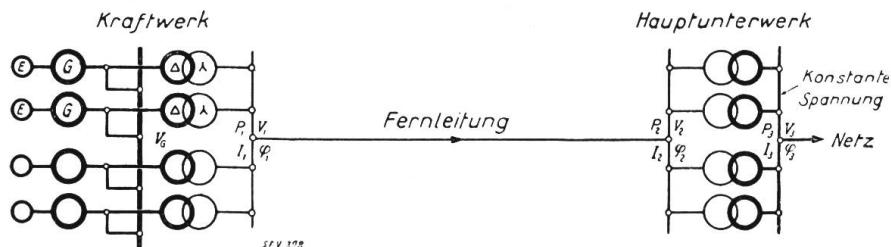


Fig. 3.

Einpoliges Uebersichtsschema der Uebertragung ohne Blindlastkompenstation.

ohmschen Spannungsabfall bei weitem. In Drehstromnetzen, deren $\cos \varphi = 0,30 \div 0,40$ beträgt, sind Potentialänderungen von 30% und mehr beobachtet worden. Analytisch berechnet sich der Spannungsabfall der Leitung am

einfachsten aus: $\sqrt{3} I (R \cos \varphi + \omega L \sin \varphi)$, wenn der Ladestrom unbedeutend ist.

Noch bedenklicher treten die Verhältnisse vor unsere Augen, wenn wir die Auf- und Abtransformatoren-Einflüsse auch mit berücksichtigen. Bekanntlich geht im modernen Anlagenbau die Tendenz dahin, die Kurzschluss-Spannung der Generatoren und Transformatoren im Hinblick auf die Herabsetzung der Kurzschlussgefahr wesentlich zu erhöhen. Bei Oberspannungen bis 220 000 Volt strebt man bereits Werte von 18% an. Damit ist einer fatalen Möglichkeit wohl vorgebeugt, aber dafür eine andere Unannehmlichkeit heraufbeschworen. Es ist die grosse Spannungsschwankung der ganzen Uebertragung von Leerlauf bis Vollast. Dies geht aus Fig. 5a, b, c deutlich hervor. Es sind dort folgende Daten angenommen: ε_K = Kurzschluss-Spannung der Auf- und Abtransformatoren = 15% und $\varepsilon_{KQ} = 1\% \cdot$ Leerlaufstrom; $j_0 = 5\%$; $j_Q = 1\% \cdot$ Frequenz = 50 Hertz · Seilradius der $3 \times 300 \text{ mm}^2$ Aluminium-Leitung = $(2,5 \cdot 9) \cdot 0,5 = 12,25 \text{ mm}$, wenn 61 Drähte vorgesehen werden. Mittlerer Phasenabstand der verdrillten Seile = 300 cm. Dann erhalten wir als kilometrische Leistungskonstanten⁵⁾ pro Phase: Die Resistanz $r_{15^0} = 0,1 \Omega$; die Induktanz $x = 0,36 \Omega$, Impedanz $z = 0,375 \Omega$; Kapazitanz $b = \omega \cdot c = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ Mho}$; Konduktanz $g = 0$; Admittanz $y = \sqrt{g^2 + b^2} = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ Mho}$; $k = y \cdot z = 1,18 \cdot 10^{-6}$; $a = \arctan \frac{x}{b} = 74^\circ 30'$; $\beta = \arctan \frac{b}{g} = 90^\circ$.

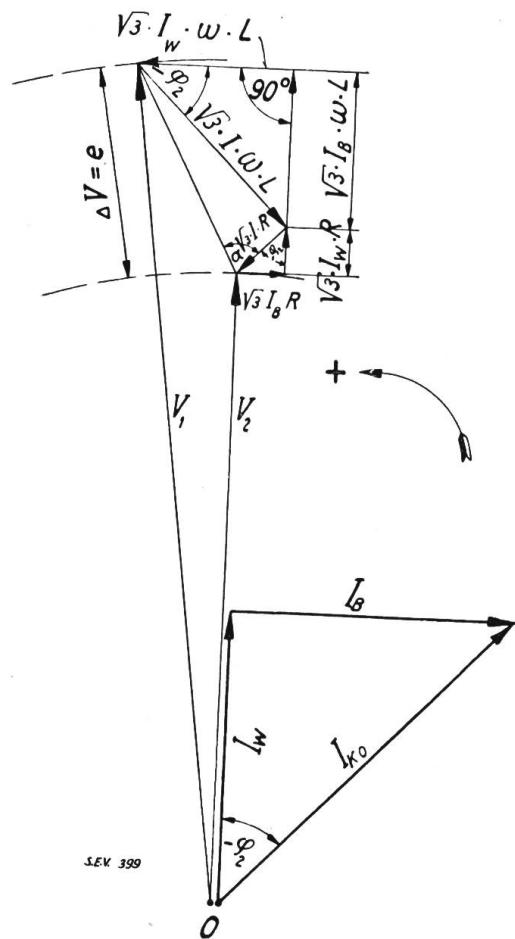


Fig. 4.

Fig. 4.
Vektordiagramm für Strom und Spannung, den
Spannungsabfall einer Leitung darstellend.

$$1,18 \cdot 10^{-6}; \quad \alpha = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{x}{r} = 74^\circ 30'; \quad \beta = \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{y}{g}$$

$= \sim 90^\circ$; $\delta = \alpha + \beta = 74^\circ 30' + 90^\circ = 164^\circ 30'$; $\frac{k}{2} l^2 = 0,59 \cdot 10^{-2}$. Ohne Regulierung durch Blindleistungsmaschinen ergäben sich folgende reduzierte Spannungen V_G auf der Generatorenseite im Kraftwerk, wenn von dort aus die Spannung auf der Nie-

5) Siehe Sonderabdruck des Verfassers in dem Aufsatz: „Ueber eine moderne und praktische Berechnungsmethode sehr langer Hochspannungsfernleitungen mit Potentialregelung durch Synchronmotoren“, aus der S. T. Z. 1922, No. 6 bis 9.

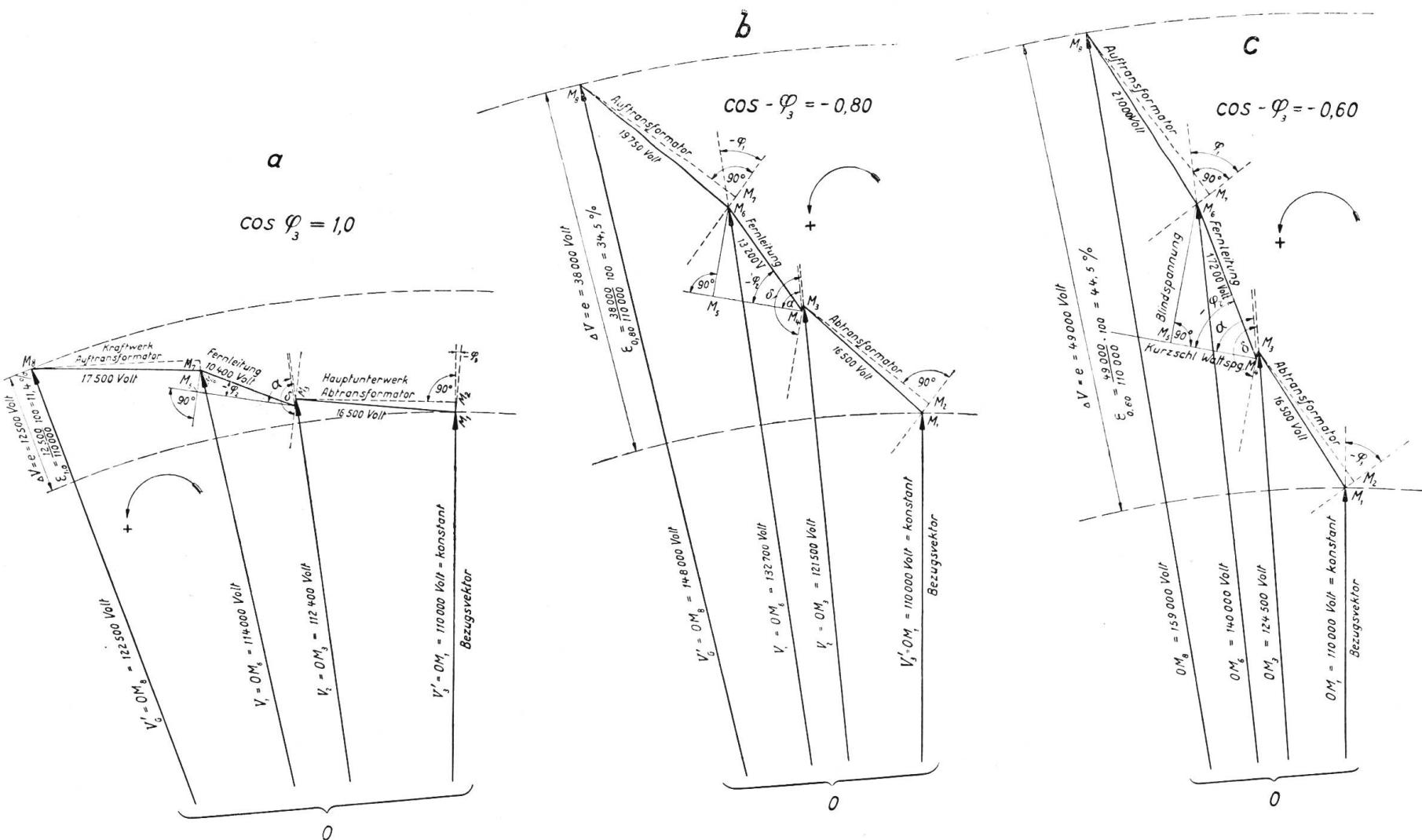


Fig. 5 a - c.

Spannungsvektordiagramme für die gesamte Leistungsübertragung auf 100 km bei der Netzvollast $P_3 = \sim 30000 \text{ kW}$ und verschiedenen Netzleistungsfaktoren $\cos \varphi$ ohne Phasenkompensation.

dervoltseite im Unterwerk konstant gehalten werden soll. Dieser auf Oberspannung reduzierte Wert betrage $V_3' = 110$ kV.

	V_G	Spannungserhöhung
Leerlaufbetrieb ⁶⁾	111 000 V	1 000 V = 0,91 %
Vollast 30 000 kW bei $\cos \varphi = 1,0$	122 500 V	12 500 V = 11,4 %
Vollast 30 000 kW bei $\cos \varphi = 0,80$	148 000 V	38 000 V = 34,3 %
Vollast 30 000 kW bei $\cos \varphi = 0,60$	159 000 V	49 000 V = 44,5 %

Die Fig. 6 zeigt die Spannungsänderungen der Uebertragung innerhalb des Systems V_3 bis V_G durch Kurven in absoluten Werten und Prozenten an. Man beachte ferner, dass durch Spannungsänderungen auch die Kraftwerktransformatoren

für eine viel grössere Oberspannung, und zwar $V_1 = \sim 150$ kV gebaut werden müssen und demzufolge im vorliegenden Beispiel einzig deswegen ca. 50 % teurer zu stehen kommen als die Transformatoren im Hauptunterwerk.

All diese technischen und wirtschaftlichen Nachteile infolge der Blindstromerscheinung, schlechte Ausnutzung der Generatoren und Uebertragungsorgane, erhöhte Verluste in der Kraftübertragung, sowie grosse Spannungsabfälle rücken die Leistungsübertragung auf weite Entfernung oft in ein recht ungünstiges Licht. Die stromversorgenden Gesellschaften haben von sich aus nur wenig Mittel in der Hand, dem schlechten Leistungsfaktor wirksam und unmittelbar zu begegnen, da dessen Ursache in den Maschinen und Apparaten der Konsumenten liegt. Einzig das Mittel grosser leerlaufender Blindleistungsmaschinen, sog. Synchronkondensatoren — auf den ersten Blick ein etwas teures Verfahren zur Verbesserung des Leistungsfaktors — kann von den Stromproduzenten selbständig angewendet werden. Durch

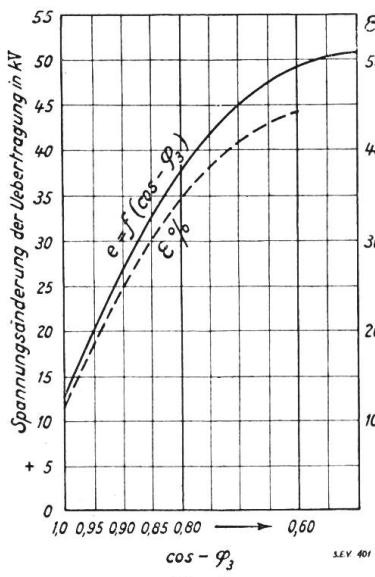


Fig. 6.

Kurve der Spannungsänderung in Funktion des Leistungsfaktors bei konstanter Vollast.

leer mitlaufende Reservegeneratoren werden nur die Kraftwerke selbst von Blindstrom entlastet, die Fernleitungen und Transformatoren aber nicht. *Die wirtschaftlichen Bedingungen werden also⁷⁾ nur bessere, wenn besondere Blindleistungsmaschinen in den Knotenpunkten der Verteilungsnetze installiert werden.* Um diese Kosten nicht allein zu tragen, müssten die Stromlieferanten durch besondere Blindstromtarife beim Konsumenten Interesse an einem hohen Leistungsfaktor seiner Maschinen erwecken. Darunter ist der Staffeltarif der gerechtfertigtste, weil er schon bei Leistungsfaktoren $< 1,0$ nicht erst von $-0,80$ an, eine Erhöhung des kWh-Preises vorsieht, etwa nach der Gleichung: $a \text{ kWh} + b \text{ BkVAh}$. Der Konsument wird es dann wirtschaftlich vorteilhafter finden, statt eines grossen Schleifring-Asynchronmotors, einen Synchron-Induktionsmotor oder kompensierten Asynchronmotor, der selbst anläuft, zu kaufen. In manchen Stromlieferungsverträgen wird heute auch stipuliert, dass gewisse Stromkontingente nur bei bestimmten Leistungsfaktoren vom Netz entnommen werden dürfen. Auf diese Weise wird es dem Energieerzeuger möglich, einen hohen Prozentsatz der toten Anlagekosten wieder hereinzu bringen, indem er dem Konsumenten auch die Blind $\text{kVAh} = \text{BkVAh}$ verrechnet,

Die scharfe Besteuerung der Blindleistung übt beim Stromkäufer erfahrungs-gemäss einen grossen Anreiz zur Verbesserung des Leistungsfaktors aus, jedoch scheint seltsamerweise diese wirksame Massnahme noch ungenügend in die Praxis gedrungen zu sein, obwohl damit neben dem wirtschaftlichen auch ein erheblicher betriebstechnischer Vorteil, nämlich die Verminderung der Spannungsänderungen, verbunden ist.

⁶⁾ Alle Transformatoren eingeschaltet.

⁷⁾ Nachdem alle Mittel bei den Abnehmern bereits angewandt sind! (Die Redaktion.)

Die Aufstellung der Tarifsätze zur Verrechnung des Blindstromverbrauches, die Berechnung der Wirkung auf den Gesamt- $\cos \varphi$ und des anzustrebenden Wertes gehören heute zu den wichtigen technisch wirtschaftlichen Aufgaben der Elektrizitäts-wirtschaft. Oertliche, technische und wirtschaftliche Bedingungen, auch ihr zeitlicher Wechsel, beeinflussen diese Verhältnisse und erfordern periodische Nachprüfungen der gewonnenen Ergebnisse.

Für den Stromlieferanten sind die Tarifprobleme weit schwieriger zu lösen als für den Stromkäufer, welch letzterer nur darauf bedacht sein muss, den Mehrpreis für blindstromfreie Motoren gegenüber Induktionsmotoren in wenigen Jahren nebst der Verzinsung amortisieren zu können, und zwar durch geringere Stromkosten. Ein Zahlenbeispiel soll die Verhältnisse illustrieren. Der Mehrpreis für einen 150 kW Synchron-Induktionsmotor gegenüber einem gewöhnlichen Schleifringankermotor betrage 10 % oder rund Fr. 500.-. Die auf Vollast reduzierte Benutzungsdauer betrage $t = 2000$ h im Jahre. Der mittlere $\cos \varphi$ im Betriebsjahr sei 0,70. Für jede entnommene Blind kVAh verlange das Elektrizitätswerk Fr. 0,01. Die gesamte Blindarbeitsmenge im Jahre beträgt beim Asynchronmotor $150 \cdot \text{tg } \varphi \cdot t = 150 \cdot 1,0 \cdot 2000 = 300\,000$ BkVAh; beim Synchron-Induktionsmotor hingegen fallen diese praktisch weg. Folglich beläuft sich die Stromkostendifferenz zu Gunsten des Synchron-Induktionsmotors oder kompensierten Asynchronmotors auf $300\,000 \cdot 0,01 = \text{Fr. } 3000.-$. Selbst wenn der Zuschlag pro Blind kVAh nur 0,1 Rp. wäre, wäre es vorteilhaft, sich für die $\cos \varphi$ -Kompensation zu entscheiden, denn nach kaum 2 Jahren wäre der Mehrpreis amortisiert.

Die Phasenkompensation lässt sich am vorteilhaftesten bei grösseren Motoren anwenden, währenddem sie für kleine Motoren von 0 – 50 kW schwieriger und weniger rentabel ist, es sei denn, dass spezielle phasenkompensierte Motoren verwendet werden.

Die Erzeugung der Blindleistung soll grundsätzlich immer da erfolgen, wo sie am *billigsten* und *betriebssichersten* erreicht werden kann. Es ergibt sich die einfache Regel für die Praxis, dass die Blindstromkompensation für grössere Motoren, etwa von 50 oder 100 kW an individuell, für kleine Motoren durch Gruppenblindlastmaschinen in den Knoten- oder Hauptspeisepunkten des Netzes zu geschehen hat, weil bekanntlich die Blindleistung sich am einfachsten und relativ billigsten in grossen Maschineneinheiten erzeugen lässt. Die genauere Auswahl der Massnahmen wird sich im Einzelfall durch eine wirtschaftliche Untersuchung stets feststellen lassen. Selbstverständlich soll angestrebt werden, auch die kleineren Motoren, besonders in Neuanlagen, auf $\cos \varphi = 1,0$ regelbar auszurüsten, wo immer die Verhältnisse es gestatten und Wartpersonal, das mit solchen Maschinen umzugehen weiß, zur Verfügung steht.

II. Motoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors.

Der Elektromaschinenbau hat in den letzten Jahren angesichts der Nachfrage eine überraschende Anzahl Lösungen für dieses Problem gefunden und eine ganze Anzahl sinnreicher Konstruktionen und Anordnungen hervorgebracht, denn es ist bekanntlich nicht immer die gleiche Maschinenart, welche bestimmte praktische Bedingungen am besten erfüllt. Sämtliche Bauarten sollen indessen keinen Blindstrom aus dem Netz aufnehmen.

Zum Aufbau ihrer elektrischen Felder ist Magnetisierung erforderlich, und diese muss entweder durch den Motor selbst oder durch eine spezielle Hilfsmaschine oder Erregermaschine erzeugt werden. Wird dem Motor gerade soviel Blindleistung zugeführt, als er zur Erhaltung seines Drehfeldes benötigt, so stellt sich ein Leistungsfaktor auf den Wert 1,0 ein, wird anderseits mehr Magnetisierung zugeführt, so tritt Uebererregung ein und der Blindleistungsüberschuss flutet ins Netz zurück, kompensiert dadurch die Blindleistungsaufnahme und verbessert damit den $\cos \varphi$ der Anlage.

Grundsätzlich unterscheidet man zwei verschiedene Arten der Erregung, deren jede wieder verschiedene Betriebscharakteristiken hat. Es sind dies: A) Gleichstrom-Erregung, B) Drehstrom-Erregung.

Die erstere arbeitet mit der Erregerfrequenz Null und besitzt deshalb ausgesprochene synchrone Charakteristik. Die zweite arbeitet mit Schlupffrequenz und ändert deshalb am asynchronen Charakter der Hauptstrommaschine nichts.

Ganz allgemein können wir sagen, dass die günstigere Art der Blindleistungserzeugung dann erfolgt, wenn sie mit der Abgabe oder Aufnahme mechanischer Leistung vereinigt werden kann. In der Praxis erfüllen die übererregten Motoren und Generatoren diese Aufgabe vollauf, und zwar am vorteilhaftesten bei einem $\cos\varphi = -0,70$, denn dann sind bekanntlich Wirk- und Blindstromkathete gleich gross.

A. Gleichstrom-Erregung.
(Synchronglaufende Maschinen.)

1. Der gewöhnliche oder anwurfsbedürftige Synchronmotor mit Gleichstrom-Eregermaschine.

Er hat als erste Maschine zur Verbesserung des Leistungsfaktors in Wechselstromnetzen gedient. Auch heute noch findet er, trotzdem er von geeigneteren Phasenschiebern wegen seiner ungünstigen Anlauf- und Kippverhältnisse aus vielen industriellen Betrieben wieder verdrängt zu werden beginnt, sehr ausgedehnte Verwendung. Dieselbe ist da gegeben und unbestritten am Platze, wo er leer anlaufen kann und nur stossfreie Lasten zu bewältigen hat. Als Umformermotor zur gleichzeitigen Abgabe von Wirkleistung und Aufnahme von kapazitiver Blindleistung eignet er sich ganz besonders. In ganz grossem Ausmaße kommt der Synchronmotor mit Anwurforgan (Fig. 7) als reine Blindleistungsmaschine zur Spannungsregelung bei Kraftübertragungen zur Anwendung. Es werden heute Einheiten von 50 000 kVA für diesen besonderen Zweck gebaut⁸⁾. Mit allen technischen Raffinements ist es heute möglich, bei solch grossen Maschinen die Betriebsverluste kleiner als 3% zu halten. Meistens müssen solche Maschinen auch noch untererregt laufen, d. h. das Netz bei schwacher Belastung oder Leerlauf künstlich induktiv belasten können.

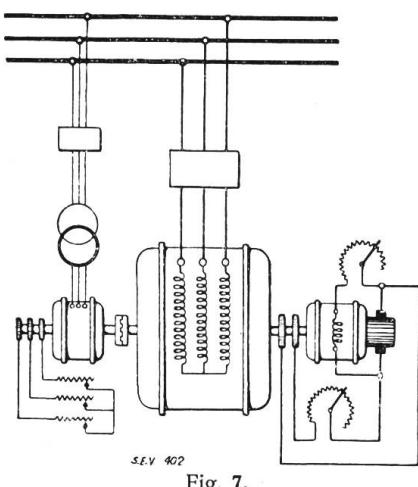


Fig. 7.

Schaltung eines gewöhnlichen Synchronmotors mit Gleichstrom-Eregermaschine und Anwurfmotor.

Ihre Leerlaufcharakteristik erhält dann schwach ansteigende Gestalt, d. h. der Luftspalt wird extra gross gemacht (Fig. 8 und 8a). Selbstverständlich werden dann die Totalverluste wegen der grösseren Rotorverluste höher. Korrekterweise müssen bei solchen Maschinen für die Leistungsangaben auch die induktiven Blind-kVA angegeben werden, z. B. $-10\,000/+20\,000$ kVA. Das (-) Zeichen gilt für den untererregten, das (+) Zeichen für den übererregten Zustand. Mit der Spannungsregelung geht naturnämmig auch eine Leistungsfaktor-Verbesserung einher, so dass dieselbe an praktischer Bedeutung noch erheblich gewinnt. Der leerlaufende Synchronmotor wird deshalb bei der zentralisierten Regelung (nach Schaltung Fig. 21) der Blindleistung in grossen Konsumschwerpunkten stets in Frage kommen und seinen Platz behaupten. Siehe ausführliche Berechnungen des Verfassers mit 4 Vektordiagrammen im Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, No. 4 von 1926, Seiten 105 – 137.

⁸⁾ Kürzlich hat die Southern California Edison Company 3 solch grosser „Synchronous Condenser“ in ihrem Big Creek-Los Angeles 220 kV System in Lighthipe und Rock Eagle Substation installieren lassen.

Greifen wir auf unser früheres Zahlenbeispiel des Wasserkraftwerkes zurück und denken uns im Hauptunterwerk zwei Phasenschieber installiert, für total $2 \cdot 12000 = 24000$ kVA kapazitive Blindleistung. Die Spannungsänderung bei $\cos -\varphi_3 = 0,80$ von Leerlauf auf Vollast der ganzen Uebertragung geht dann von $34,5\%$ auf $11,5\%$ zurück, bei $\cos -\varphi_3 = 0,60$ von $44,5\%$ auf ca. 30% . Wir sehen also, dass hier Spannungsregelung wohl am Platze, ja sogar unentbehrlich ist, die betriebstechnische Seite der Frage, ob eine Regelung notwendig ist, muss also mit

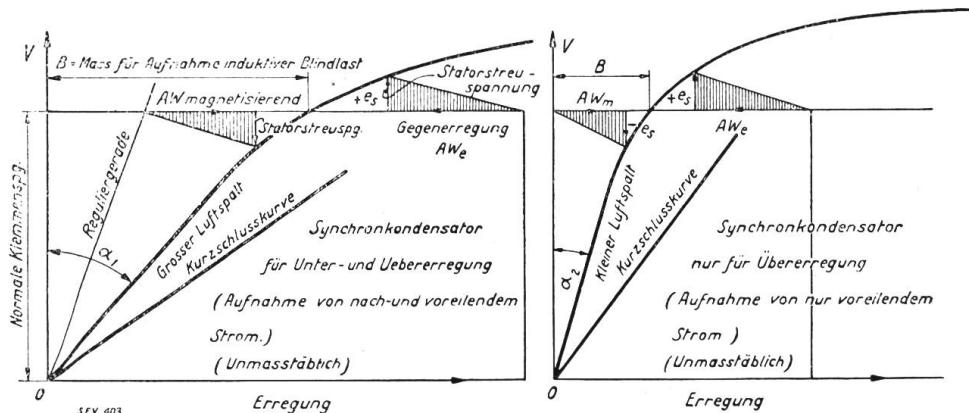


Fig. 8 und 8a.
Leerlaufcharakteristiken von Synchronblindleistungsmaschinen.

Ja beantwortet werden. Es ist noch die betriebswirtschaftliche Seite der Frage zu beantworten und zu untersuchen. Ein Phasenschieber von 12000 kVA absorbiert bei Vollast ca. 3% Wattleistung, total also 2 mal 3% von $12000 = 720$ kW für beide Phasenschieber. Diese Verluste kosten jährlich bei einer Benutzungsdauer von 3000 h (reduziert auf Vollast) bei Fr. $0,03/\text{kWh} = 720 \cdot 3000 \cdot 0,03 = \text{Fr. } 64800.-$, welcher Betrag aber, wie wir jetzt sehen werden, mehr als ausgeglichen wird durch kleinere Verlustkosten. Vor der Installation der beiden Phasenschieber kosten dem Unternehmen die Verluste infolge der Blind-kVAh im ganzen System jährlich:

a) in den Unterwerk-Abtransformatoren:

$$\Delta P_2 (1 - \eta_{tr_2}) t p_{kwh_2} = (12500 \cdot 0,015) \cdot 3000 \cdot 0,03 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad = \text{Fr. } 11300.-$$

b) In der 100 km Fernleitung:

$$3 I^2 R 10^{-3} p_{kwh_1} t = 3 \left(\frac{12500}{\sqrt{3 \cdot 121,5}} \right)^2 0,03 \frac{100}{65} 0,025 \cdot 3000 \quad . \quad . \quad . \quad = \text{Fr. } 36700.-$$

(worin $p_{kwh_1}' = \frac{0,02 + 0,03}{2} = 0,025$ im Mittelwert ist);

c) In den Kraftwerk-Auftransformatoren:

$$\Delta P_1 \cdot (1 - \eta_{tr_1}) t p_{kwh_1} = (14000 \cdot 0,015) \cdot 3000 \cdot 0,02 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad = \text{Fr. } 12600.-$$

d) In den Kraftwerk-Generatoren:

$$\Delta P_G (1 - \eta_G) t p_{kwh_1} = 17000 \cdot 0,03 \cdot 3000 \cdot 0,02 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad = \text{Fr. } 30600.-$$

Totalverlustkosten in der unnützen kVA-Installation $\quad . \quad . \quad . \quad = \text{Fr. } 91200.-$

Denselben stehen Fr. 64800.- zusätzliche Jahresverlustkosten der Phasenschieber gegenüber, so dass noch $91200 - 64800 = \text{Fr. } 26400.-$ jährlichen Gewinnüberschuss bleiben, welche für die Instandhaltung, Verzinsung und Tilgung im Hauptunterwerk verwendet werden können. Das Ergebnis spricht also auch in der Verlustkostenrechnung zugunsten der Verwendung von Asynchron- oder Synchron-Maschinen.

Resumieren wir rasch der Uebersicht halber die erhaltenen Resultate dieses Beispiels, so sehen wir, dass schon bei einem relativ kleinen Uebertragungssystem ganz ansehnliche Ersparnisse möglich sind.

Mögliche Kapitalersparnisse, wenn die Anlage zum Voraus im Unterwerk für volle oder angenähert restlose Blindstromkompensation vorgesehen wird (Blindstromfreie Uebertragung) = Fr. 383000.-.

Mögliche Jahreskostenersparnisse durch Minderverlust in kVAh = Fr. 26400.-.

Um nicht gar so grosse Phasenschieberleistungen zu erhalten, kann man auch die Kraftwerkoberspannung auf zwei verschiedene Werte einstellen z. B. dass $V_1 = V_2$ ist von Nullast bis Halblast, ferner $V_1 = V_2 + e$ = Endspannung plus Spannungsabfall bei Vollast und $\cos \varphi = 1,0$ im Belastungsbereiche von Halblast bis Vollast. Es muss dann allerdings darauf gesehen werden, dass die Kraftwerkoberspannung V_1 für den letzteren Bereich stets unter der kritischen Durchbruchspannung $V_{\text{krit nass}}$ bei nassem Wetter bleibt. Es ist auch angezeigt, jeweils zu untersuchen, ob es nicht wirtschaftlicher ist, nicht auf $\cos \varphi_3 = 1,0$, sondern etwas darunter, z. B. $\cos \varphi_3 = 0,95$, zu kompensieren, weil auch dann die Phasenschieberleistungen wesentlich kleiner werden.

Aus alledem geht unzweideutig hervor, dass der Synchronkondensator eine hervorragende Rolle im wirtschaftlichen Betriebe, besonders von dichten Industrievorsorgungsanlagen, einnimmt. Trotz seinen hohen Kosten kann er oft eine bestehende schlecht ausgenützte und deshalb unrentable Anlage ins Gegenteil umkehren. In neuerer Zeit ist ihm indessen für schon respektable Leistungen (bis 10 000 kVA) ein in betriebstechnischer Hinsicht überlegener Rivale erwachsen, das ist der Asynchronmotor mit fremderregter Drehstrom-Erregermaschine oder Asynchronkondensator, welchen wir im späteren Abschnitt besprechen wollen.

2. Der Synchronmotor mit Anlaufwicklung.

Als weitere Entwicklung ist der selbstanlaufende Synchronmotor gebaut worden. Mit diesem Fortschritt ging noch ein anderer einher, nämlich das bedeutend einfachere Anlassen, womit der Verwendungsbereich dieser Maschinentypen rasch gestiegen ist.

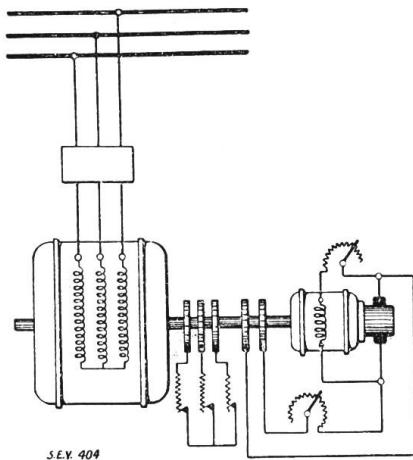


Fig. 9.
Schaltung eines selbstanlaufenden
Synchronmotors.

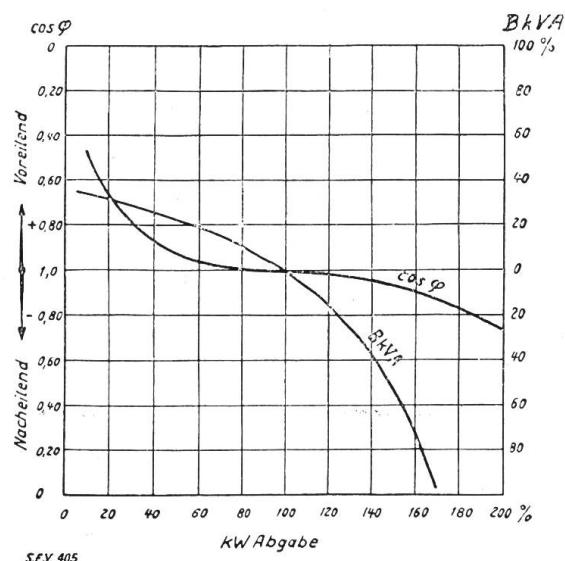


Fig. 10.
Leistungsfaktor und Blindleistungsaufnahme des
Synchronmotors mit Anlaufwicklung.

Der Rotor dieser Konstruktion hat die üblichen ausgeprägten Pole mit kleinen Pollücken und trägt zwei Wicklungen. Eine, die Anlaufwicklung, welche in den Polshuhen eingebettet liegt, ist eine normale Drehstromwicklung, deren Enden zu

drei Schleifringen geführt werden. Die zweite Wicklung ist als normale Gleichstromerregerwicklung auf die Polschenkel gebracht. Sie erhält den Strom entweder von einem direkt gekuppelten Erregerdynamo oder von einer fremden Gleichstromquelle. (Fig. 9).

Das Anlassverfahren des Motors ist das gleiche wie beim gewöhnlichen Induktionsmotor. Wenn der Motor auf Touren gekommen ist und der Rotoranlasser auf der letzten Widerstandsstufe steht, werden jedoch die drei Schleifringe kurzgeschlossen und die Gleichstromerregung zugeschaltet. Der Motor zieht sich dann von selbst in Synchronismus. Alle Parallelschaltvorrichtungen sind entbehrlich. (Fig. 10). Das entwickelte Anlaufmoment kommt dem normalen Moment ungefähr gleich, das Kippmoment indessen beträgt ca. 170 %. Bei Vollast arbeitet dieser Motor mit $\cos \varphi = 1,0$. Bei Entlastung eilt der Strom nur wenig vor, die Maschine erzeugt nur wenig kapazitive Blindleistung.

Weil die Erhöhung des Anlaufmomentes auf Kosten der Blindleistungsaufnahme geschieht, wird dieser Motor kaum für höhere Leistungen als ca. 1000 kW gebaut werden, in seiner Verwendung also auf kleinere Leistungen beschränkt bleiben.

3. Der Synchron-Induktionsmotor.

Die Nachfrage nach einem Synchronmotor, der die Möglichkeit stark kapazitiver Blindstromaufnahme mit einfachstem Anlassen bei hohem Anlaufmoment vereinigt, führte schliesslich zur Konstruktion des synchronisierten Asynchronmotors, d. h. des asynchron anlaufenden Synchronmotors. Die Maschinenfabrik Oerlikon nennt ihn S. I. Motor.

Diese Maschine (Fig. 11) besteht aus einem Induktionsmotor und einer direkt gekuppelten Gleichstromerregermaschine. Derselbe wird wie ein reiner Asynchronmotor angelassen. Nach vollendetem Anlauf wird ihm über Schleifringe Gleichstrom zugeführt. Hierauf folgt selbsttätige Parallelschaltung zum Netz und damit nimmt die Maschine synchronen Charakter an. Anstatt nacheilenden Blindstrom aus dem Netz, entnimmt der Motor sogar voreilenden Blindstrom. Eine kapazitive Blindleistungsaufnahme sogar bei Vollast und einem Leistungsfaktor von $\cos +\varphi = +0,90$ (d. h. voreilend) entspricht einer ganz normalen Ausführung. Der S. I. Motor weist trotzdem die gleichen Abmessungen auf wie ein gewöhnlicher Asynchronmotor gleicher Leistung und ist nur wenig teurer. Er liefert, seiner Eigenschaft als übererregter Synchronmotor entsprechend, bei Entlastung starke kapazitive Blindleistung ins Netz und eignet sich deshalb als Phasenschieber oder reine Blindleistungsmaschine ebenso, ja noch besser als der gewöhnliche Synchronmotor. Fig. 12 zeigt die Betriebskurven eines S. I. Motors.

Für normal ausgeführte Motoren stellt sich die Ueberlastbarkeit auf etwa 150 % der Vollast, für solche mit erhöhter Blindleistungsabgabe entsprechend mehr. Der Anschluss des Motors an das Netz geschieht wie bei einem gewöhnlichen Induktionsmotor. Der Synchronmotor der Fig. 11 unterscheidet sich von diesem nur dadurch, dass die Gleichstromerregermaschine in eine der drei Phasen gelegt wird, welche von den Schleifringen zum Anlasser führen.

Die Maschinenfabrik Oerlikon baut solche S. I. Motoren bis zu 5000 kW Vollastabgabe. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen Synchronmotoren und dem Synchronmotor mit Anlaufwicklung können dieselben nicht von einer vorhandenen Erregerstromquelle gespeist werden. Die niedrige Erregerspannung verbietet dies, weil ein Vorschaltwiderstand nötig würde, der hohe Rotorverluste mit sich brächte. Der

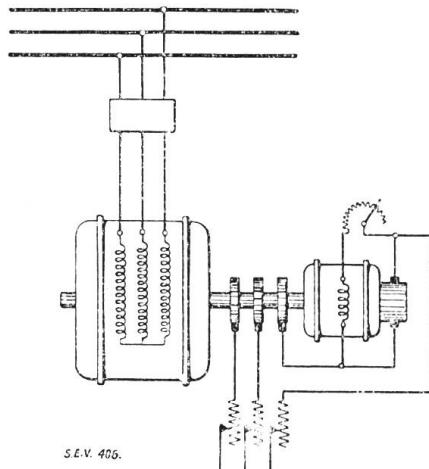


Fig. 11.
Prinzipielle Schaltung des S. I.-Motors.

S.I. Motor eignet sich auf Grund seiner Betriebscharakteristik für schwer anlaufende Antriebe, deren Belastung wenig variiert, ferner für die Gruppenverbesserung des $\cos \varphi_{\text{res}}$ von vielen Einzelmotoren.

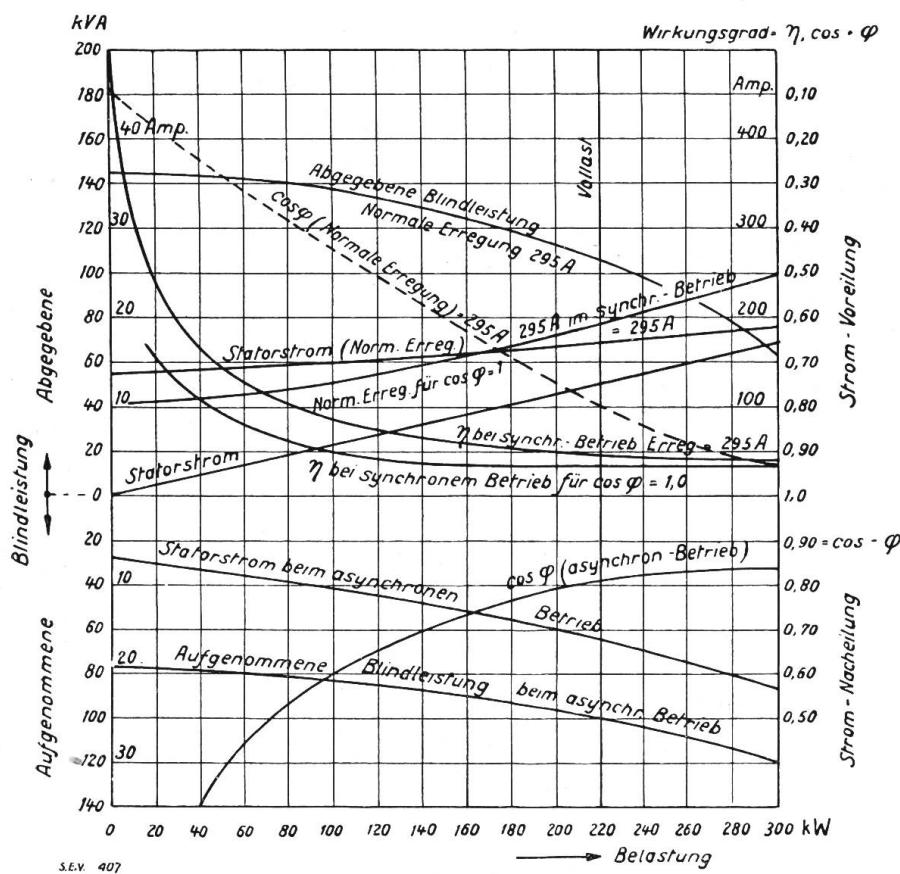


Fig. 12.
Betriebskurven eines S.I.-Motors.

woraus ein unruhiger Betrieb mit oft unerwünschtem Ansprechen von Sicherheitsvorrichtungen resultiert. Die S.I. Motoreigenschaften sind indessen gut geeignet für Antriebe, wo diese Nachteile sich nicht auswirken, z. B. Ventilator- und Rotationspumpen-Antriebe.

B. Drehstrom-Erregung. (Asynchron laufende Maschinen.)

Für manche Betriebe wird der Nachteil aller synchronen Antriebe wegen des relativ kleinen Kippmomentes sehr unangenehm empfunden. Der Elektromaschinensbau ist deshalb zur Entwicklung asynchron laufender Motoren ohne Blindleistungsaufnahme geschritten.

Durch Zuführen von Magnetisierungsstrom mit Schlupffrequenz in den Läufer erfolgt die Erregung eines gewöhnlichen Asynchronmotors.

Dies kann entweder ausserhalb des Motors durch kleine Drehstrom-Eregermaschinen oder im Motor selbst durch Hilfswicklungen geschehen.

Der grosse und praktisch bedeutungsvolle Vorteil der drehstromerregten Maschine gegenüber dem Induktionsmotor ist das erheblich gesteigerte Kippmoment, also der Wegfall der Gefahr des Aussertrittfallens bei Ueberlasten in unruhigen Betrieben.

Diese vorzügliche Eigenschaft wird ausgenutzt in Anlagen, wo die Motorgrösse durch die zu bewältigende Spitzenleistung bestimmt ist. Es kann dann ein kleinerer Motor gewählt werden, als ohne Drehstromerregung notwendig wäre.

Nun erkauft man diesen Vorteil allerdings nicht ohne Nachteil, weil die Drehstromerregung nicht ohne Kommutator möglich ist. Es hängt von den örtlichen

Im *Bulletin Oerlikon* No. 8 vom 8. Februar 1922 ist ein lesenswerter Aufsatz von Herrn Hoeffleur, Chefingenieur, über diesen Spezialmotor erschienen, in welchem die Eigenschaften dieser Maschine geschildert werden.

Charakteristisch und als grundsätzlicher Nachteil anzusehen ist bei sämtlichen heute bekannten synchronen Antrieben, dass ihr Kippmoment relativ niedrig ist und sie die Gefahr des Pendelns und Aussertrittfallens bei Ueberlastungen oder Frequenz-

Spannungsschwankungen in sich bergen. Das selbsttätige Synchronisieren bedingt Pendelung von Stromstärke und Drehzahl,

Bedingungen ab, wie schwer dieser Nachteil einzuschätzen ist. Dabei soll man aber im Auge behalten, dass der Stand der Drehstrom-Kommutierung heute hoch entwickelt ist und bei richtiger Anwendung einwandfreies Arbeiten gewährleistet werden kann.

*1. Prinzipielles über die Erzeugung von Schlupf-Blindstrom bezw.
Blindleistung im Kollektoranker.*

Diese kann auf drei verschiedene Arten stattfinden:

a) An die Ankerbürsten einer fremderregten Gleichstrommaschine legt man eine langsam pulsierende Spannung. Dadurch pendelt der Anker genau im Rhythmus der Spannung hin und her. Der Strom, den der Anker aufnimmt, ist dem Drehmoment immer proportional. Wenn nun letzteres einzig und allein zur Beschleunigung und Verzögerung der Ankerschwungmassen verwendet wird, so ist das Drehmoment ein Maximum, wenn die Drehzahländerung am grössten ist, wenn diese also durch Null geht. Der Strom ist jedoch Null, wenn die Drehzahl sich nicht ändert, sondern ihren positiven oder negativen Höchstwert besitzt. Weil nun aber die Drehzahl der Ankerspannung proportional ist, so erkennt man leicht, dass Ankerstrom und Ankerspannung stets um 90° in der Phase gegeneinander verschoben sind, und zwar haben wir die Erscheinung einer Stromvoreilung. Wir sehen also, dass der Anker einer fremderregten, nur mit Schwungmasse belasteten Gleichstrom-Maschine die zugeführte Energie genau so aufspeichert, wie ein Kondensator in seinem elektrischen Felde. Man kann ihn daher als Starkstromkondensator besonders für langsame Frequenzen verwenden, wie sie im Rotorkreise von Asynchronmaschinen auftreten. Diese Pendelanordnung bedingt aber für jede Phase des Mehrphasenstromes einen gleichstromerregten Anker, was einen Nachteil bedeutet.

b) Praktischer und vorteilhafter gestaltet sich die Erzeugung der Blindspannung von Schlupffrequenz im rotierenden Kollektoranker innerhalb eines wirkungslosen Stators. Fig. 13 zeigt einen solchen, schematisch dargestellten, dem über drei symmetrisch angeordnete Bürsten Drehstrom zugeführt wird. Steht der Anker still, so verhält er sich wie eine in Dreieck geschaltete Drosselpule und nimmt nachelenden Magnetisierungsblindstrom auf, um das Drehfeld zu unterhalten (Fig. 13).

Bringen wir nun den Anker im Sinne des rotierenden Drehfeldes in mechanische Drehung, so ändert man an der Feldausbildung der Ströme gar nichts, weil die Kollektorbürsten und die Stromzonen des Ankers im Raume still stehen, also festgehalten bleiben. Hingegen nimmt die Relativgeschwindigkeit, mit der das Drehfeld über die rotierenden Ankerleiter hinwegläuft, ab. Damit wird aber auch die vom magnetischen Felde erzeugte Selbstinduktionsspannung kleiner und kleiner, je rascher wir den Anker drehen lassen.

Hat die Ankerdrehzahl diejenige des Drehfeldes erreicht, so besteht Syndromnismus. Es wird keine Spannung mehr in den Rotordrähten induziert. Drehen wir den Anker noch rascher als das Drehfeld, so dass die Leitergeschwindigkeit jener des Drehfeldes voreilt, dann kehrt sich die Richtung der induzierten Spannung um. Während beim Untersyndromnismus Selbstinduktionswirkung vorhanden war, tritt nun beim Uebersyndromnismus des Ankers Kapazitätswirkung in Erscheinung, welche man durch genügend schnelle Rotation des Ankers beliebig, d. h. bis 90° Stromvoreilung steigern kann.

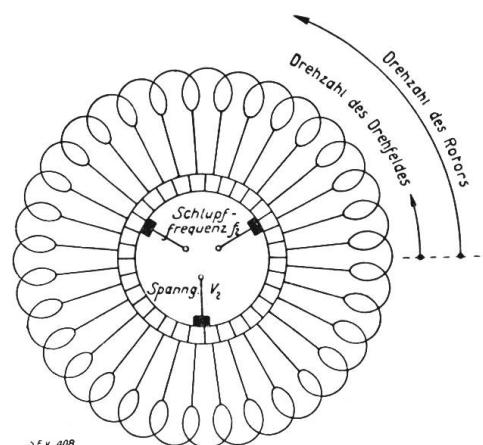


Fig. 13.
Erzeugung von kapazitiver Blindleistung im rascher als das Drehfeld rotierenden Kollektoranker.

Führt man dem Kollektoranker aus dem Rotor von Asynchronmaschinen über dessen Schleifringe Schlupfstrom zu, so ist es ein Leichtes, durch hohen Uebersynchronismus darin stark voreilende Ströme zu erzeugen. Das ist ein vorzügliches und praktisches Mittel zur Kompensation der induktiven Blindleistung von Asynchronmotoren.

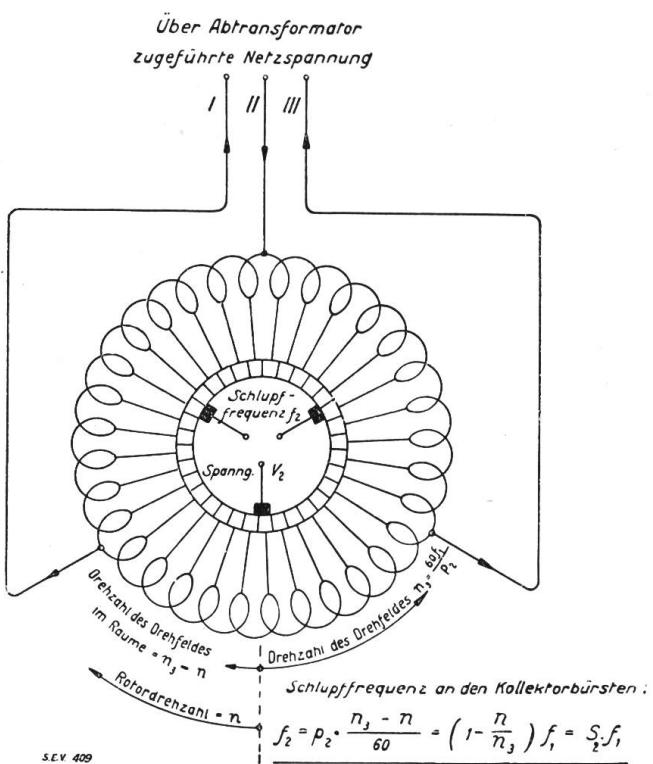


Fig. 14.

Erzeugung von kapazitiver Blindleistung im entgegen dem Drehfeld rotierenden Kollektoranker.

c) Ein weiteres ähnliches Mittel, das für die Praxis Bedeutung hat, nachelenden Blindstrom in grossen Motoren zu kompensieren, besteht darin, dem Anker einer Kollektormaschine über Transformator und Schleifringe von einem Netz aus Magnetisierungsstrom mit der Frequenz f_1 zuzuführen.

Fig. 14 zeigt den Rotor mit dem Kollektor schematisch dargestellt. Der Rotor werde von einem direkt gekuppelten Hauptmotor mit der Tourenzahl n so angetrieben, dass er dem in ihm erzeugten Drehfeld des Netzes mit der Drehzahl n_3 entgegenläuft. Der Rotor der Kollektormaschine habe p_2 Polpaare. Die Relativgeschwindigkeit beträgt dann $(n_3 - n)$ im Raum und deshalb die Frequenz an den Bürsten der

$$\text{Hintermaschine } f_2 = \frac{p_2}{60}, \quad (n_3 - n) = \\ \left(1 - \frac{n}{n_3}\right) f_1 = s_2 f_1. \quad \text{Die an diesen}$$

Bürsten abnehmbare Spannung von Schlupffrequenz $= s_2 f_1$ wird nun dem Rotor des Hauptmotors über Schleifringe aufgedrückt. Sie kann die Lage des Statorstromvektors so beeinflussen, dass der Hauptmotor stark kapazitiv arbeitet, d. h. stark voreilenden Strom aufnimmt. Wir werden später an Hand von Vektordiagrammen auf diese für die Praxis wichtigen Erscheinungen zurückkommen.

2. Asynchronmotoren mit eigenerregter Drehstrom-Erregermaschine.

Diese ist wohl das einfachste Mittel, um dem Rotor des Induktionsmotors Magnetisierungsstrom zuzuführen.

Die eigenerregte Drehstrom-Erregermaschine besteht aus einem Gleichstromanker mit Kollektor, der in einem wicklungslosen Stator läuft. Die drei Kollektorbürsten sind an die drei Schleifringe des Induktionsmotors angeschlossen, dessen $\cos \varphi$ korrigiert werden soll. Der Schlupfstrom, der über die Bürsten der Erregermaschine zugeführt wird, erzeugt ein mit der Schlupfperiodenzahl rotierendes Feld, ein Drehfeld.

Wenn nun der Erreger oder die Hintermaschine in Richtung des Drehfeldes, aber mit grösserer Geschwindigkeit angetrieben wird, so resultiert eine Relativgeschwindigkeit zwischen den Stäben der Ankerwicklung und dem Drehfeld. Infolgedessen wird, wie bereits beschrieben, in der Rotorwicklung eine Spannung induziert, welche als kapazitiv wirkende Blindstromkompensation des Vorder- oder Hauptmotors (vergl. Fig. 13) in Erscheinung tritt.

Eine ganze Reihe von Abhängigkeiten sind bei Betrachtung der Wirkungsweise festzustellen. Die Kompensationswirkung, d. h. das Mass der Verbesserung des Leistungsfaktors, ist einmal abhängig von der in der Drehstrom-Erregermaschine

erzeugten Spannung. Diese letztere ist wiederum abhängig von der Feldgrösse. Weil nun dieses Feld vom Schlupfstrom erzeugt wird, ist die im Erreger induzierte Spannung von der Schlupfstromstärke und damit die Kompensationswirkung von der Motorbelastung abhängig.

Fig. 15 zeigt das dreipolige generelle Schema eines solchen Motors.

Für kleine Grössen ist es üblich, Motor und Erreger zusammen zu bauen, während bei grösseren Leistungen die getrennte Aufstellung zweckmässiger ist.

Der Anlasser ist so konstruiert, dass die drei Nullpunktenden herausgeführt sind, damit nach erfolgtem Anlauf die Schleifringe des Hauptmotors an die Erregermaschine gelegt werden können.

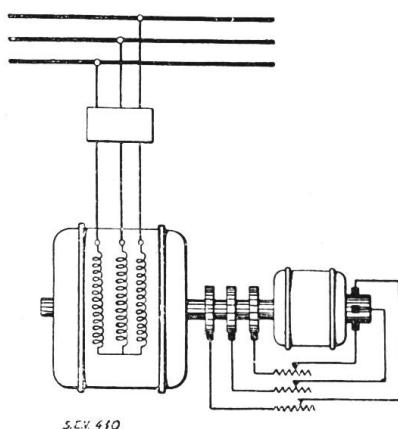


Fig. 15.

Prinzipielle Schaltung des Asynchronmotors mit eigenerregter Drehstrom-Erregermaschine.

Im allgemeinen kann der mit eigenerregtem Drehstrom-Erreger versehene Asynchronmotor nur innerhalb eines Belastungsbereiches von 50 – 125% der Vollast mit einem $\cos \varphi = 1,0$ arbeiten, ausserhalb dieser Grenzen ist sein Verhalten, wie Fig. 16 zeigt, nicht günstig. Dieser Typ

wird nur da verwendet, wo mit einer dauernden und gleichmässig hohen Last gerechnet werden darf.

3. Asynchronmotoren mit fremderregter Drehstrom-Erregermaschine.

Die praktische Forderung bei der Entwicklung der Drehstrom-Erregermaschine lautete dahin, eine Schaltung hervorzubringen, welche die Kompensation von der Belastung unabhängig macht, ja es soll über die Vollastkompensation hinaus bei Entlastung noch Blindleistung an das Netz abgegeben werden, so dass schliesslich der Motor im Grenzfall als reine Blindleistungsmaschine dienen kann.

Diesem Bedürfnis aus der Praxis kommt die fremderregte Drehstrom-Erregermaschine vollauf nach.

Bei dieser Anordnung ist letztere ebenfalls mit ihren Bürsten über einen Anlasser an die Schleifringe des Hauptmotors angeschlossen. Fig. 17 zeigt die prinzipielle Schaltung. Der Schlupfstrom erzeugt hier nicht die kompensierende Spannung, vielmehr besorgt das eine besondere Drehstromerregung, die über drei weitere Schleifringe und einen Erregertransformator den Maschinen vom Netz geliefert wird. Es folgt hieraus, dass die dem Hauptmotorläufer von der Erregermaschine her zugeführte Magnetisierung, also auch die Kompensationswirkung, von der Schlupfstromstärke und damit auch von der Belastung abhängig ist, und diese Wirkung bleibt angenähert über dem ganzen Belastungsbereich konstant. Fig. 18 a – e

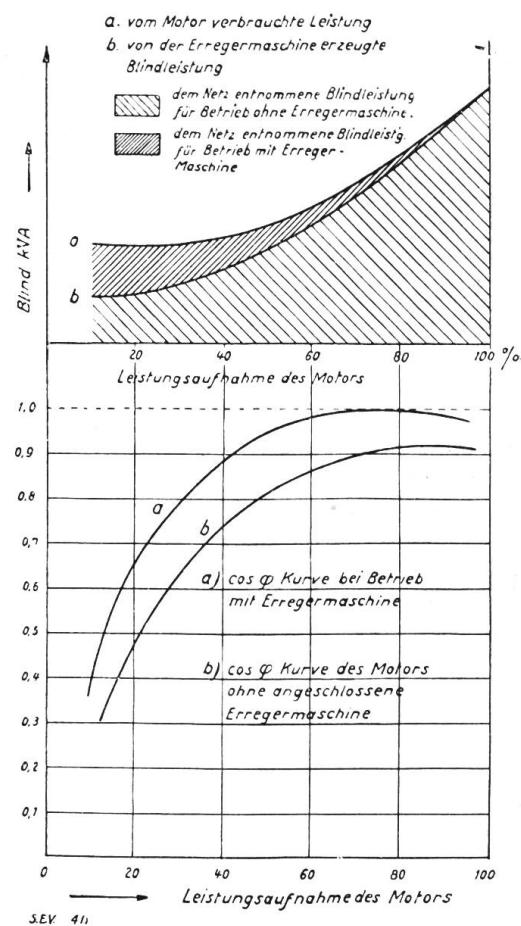


Fig. 16.
Leistungsfaktorkorrektur durch eigenerregte Drehstrom-Erregermaschine.

zeigt eine Anzahl Vektordiagramme vom extrem nacheilenden bis zum extrem voreilenden Statorphasenstrom, für reine Blindstrom-Asynchronmaschinen.

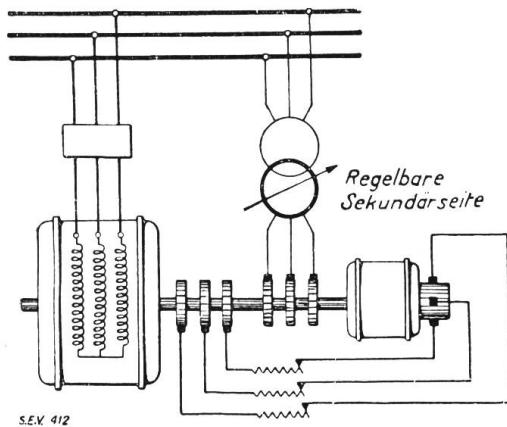


Fig. 17.
Prinzipielle Schaltung eines Asynchronmotors mit fremderregter Drehstrom-Erregermaschine.

ten – wo mit langen Leerlaufzeiten der Vollast gerechnet werden muss und zeichnet sich durch diese Eigenschaften vor andern bekannten Erregermaschinen aus, bietet dem Asynchronmotor alle Vorzüge der Synchronmaschine, eliminiert aber deren Nachteile.

Weil durch diese konstant bleibende Blindleistung der Hauptmotor bei Vollast auf $\cos \varphi_1 = 1$ kompensiert wird, und anderseits bei Teilbelastung weniger Blindleistung als bei Vollast verbraucht, so kann er den bei kleiner Belastung auftretenden Blindleistungsüberschuss an das Netz abgeben. Dieses Verhalten befähigt den Hauptmotor bei quasi Nullast oder vollends bei Leerlauf voreilenden Strom zu erzeugen und nacheilenden anderer Maschinen zu decken. Die Leistungsfaktoränderung bei verschiedenen Erregerspannungen stellt die Kurvenschar der Fig. 19 dar. Die 100% Erregerspannung entspricht dem gewöhnlichen Fall bei Vollast und $\cos \varphi_1 = 1$.

Durch die beschriebene Arbeitsweise ist die fremderregte Drehstrom-Erregermaschine überall da im Vorteil – im Gegensatz zur eigenerregten oder langdauernden Belastungen unter 50% – wo mit langen Leerlaufzeiten der Vollast gerechnet werden muss und zeichnet sich durch diese Eigenschaften vor andern bekannten Erregermaschinen aus, bietet dem Asynchronmotor alle Vorzüge der Synchronmaschine, eliminiert aber deren Nachteile.

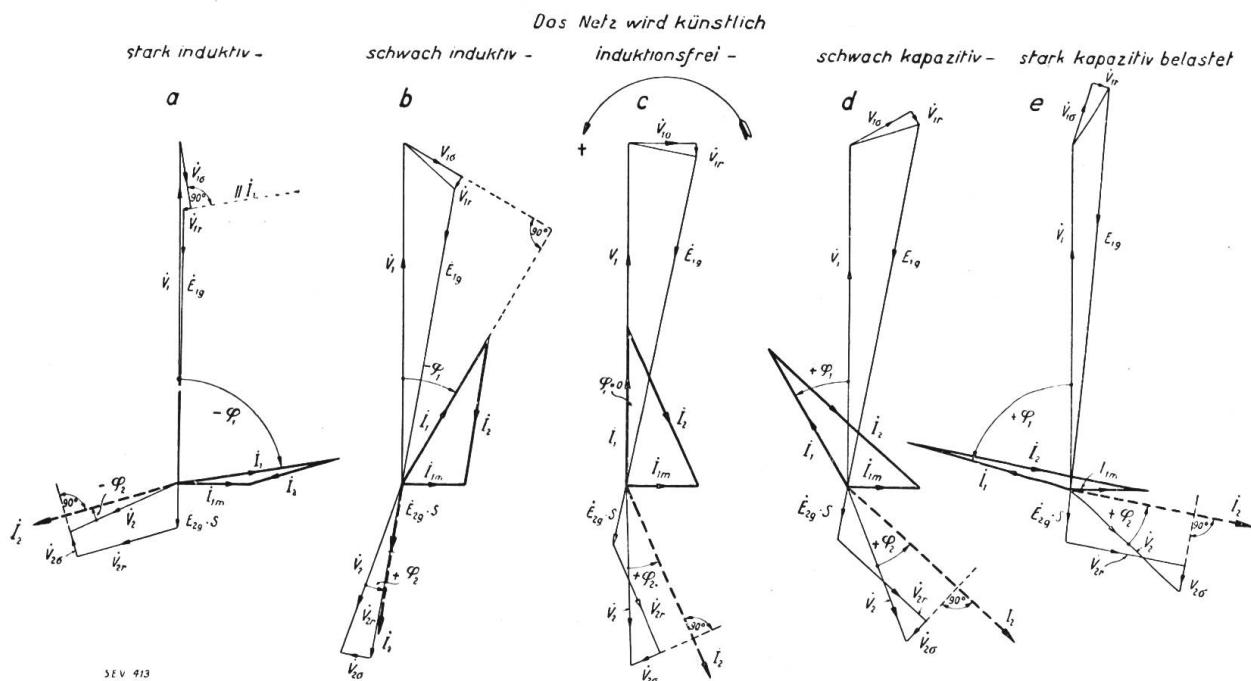


Fig. 18 a – c.
Vektordiagramme mit verschiedenen Phasenverschiebungen $\pm \varphi_1$ eines Drehstrom-Asynchronmotors mit fremderregter Drehstrom-Erregermaschine.

Die wichtigsten Vorteile der asynchronen Wirkungsweise und Bauart bestehen in der grossen Ueberlastbarkeit, die jede Pendelungsgefahr bei Spannungs- oder Frequenzschwankungen zum vornherein ausschliesst, ferner in den geringen Verlusten und vor allem in der erheblichen Herabsetzung des Kurzschlussstromes. Der Anfangs- oder Stosskurzschluss-Strom vermindert sich gegenüber der synchronen Anordnung wesentlich, weil bei der asynchronen Maschine zwei Reaktanzen vorhanden

sind, nämlich die des Stators und des Rotors. Hinsichtlich des Dauerkurzschluss-Stromes liegen die Verhältnisse noch viel günstiger. Weil die Asynchronmaschine vom Netz aus erregt wird, so bricht das Feld der Maschine beim Absinken der Netzspannung rasch zusammen und der Stosskurzschluss-Strom fällt sehr rasch auf den Nullwert ab.

Genau wie Synchronmotoren können auch Asynchronmotoren mit Drehstrom-Fremderregung leerlaufend ans Netz gelegt und durch Uebererregung oder Untererregung zur kapazitiven bzw. induktiven Blindleistungserzeugung gebracht werden.

In neuerer Zeit haben solche sogen. „Asynchrone Blindleistungsmaschinen“ besonders bei grossen Leistungen schon erfolgreich mit Synchronmaschinen konkurriert. Haben diese die Aufgabe, den Spannungsabfall in Leitungen zu regeln, so tritt zu den früher genannten günstigen Eigenschaften ein weiterer schwerwiegender Vorteil hinzu. Eine Umkehr der Erregung, z. B. von Ueber- auf Untererregung bewirkt einen induktiven Blindleistungsverbrauch oder eine künstliche induktive Blindbelastung des Netzes. Diese ist viel grösser als der Magnetisierungsbedarf der Maschine selbst ist. Zur Aufrechterhaltung des Synchronismus ist bei Synchronmaschinen eine gewisse Erregung stets notwendig, der höchste Blindleistungsverbrauch ist aber stets kleiner als der eigene Magnetisierungsbedarf. Da Blindstrommaschinen nach der Summe von induktiver und kapazitiver Blindleistungserzeugung gewertet werden, so folgt hieraus, dass die asynchrone Anordnung auch dadurch der synchronen weit überlegen ist.

Solche drehstrom-fremderregte Asynchronmotoren werden bereits schon in Einheiten von 10000 kVA konstruiert. Noch etwas grössere werden ebenfalls in dem Bereich der Möglichkeit liegen⁹⁾. Auch die Kommutation auf dem Erregerkollektor bietet heute keine Schwierigkeiten mehr, sie erfolgt funkenfrei. Der beschriebene Asynchronmotor mit fremderregter Drehstrom-Erregermaschine ist dazu berufen, in allen schwierigen Betrieben (Walzwerke, Hauptunterwerke usw.) seinen vorzüglichen Dienst zu versehen, wo den schwer zu erfüllenden Betriebsbedingungen (grosse Ueberlastbarkeit, Pendelfreiheit, kleiner Stosskurzschlusstrom usw.) der Synchron-Induktionsmotor nicht gewachsen ist.

4. Weitere wichtige Vertreter der kompensierten Drehstrommotoren sind:

der rotorgespeiste Osnosmotor,
der statorgespeiste Heylandmotor.

Beide Motoren haben sehr günstige Betriebskurven, dennoch führen sie sich, trotzdem man sie schon lange kennt, nicht gut in die Praxis ein. Aus diesem Grunde soll hier nicht näher darauf eingetreten werden, besonders auch deshalb, weil sie nur für kleine Leistungen günstig sind. Die Gruppen- oder zentralisierte Kompensation eignet sich besser und ist wirtschaftlich vorteilhafter.

Fassen wir unsere Betrachtungen zusammen, so kommen wir zur Erkenntnis, dass die heutige Lösung der Kompensierungsfrage wenigstens in Europa zum asynchronen Betrieb hinneigt. Der Synchronmotor, mit Ausnahme desjenigen für sehr grosse Blindleistungen ($20 \div 50 \cdot 10^3$ kVA), wird in stetig steigendem Masse

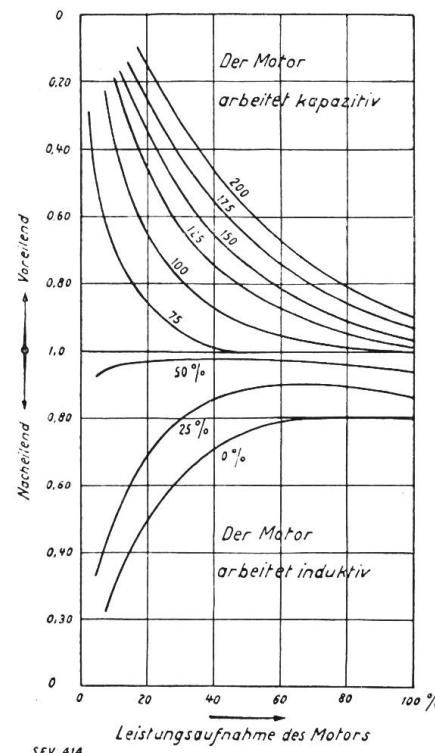


Fig. 19.

Leistungsfaktor eines Asynchronmotors mit fremderregter Drehstrom-Erregermaschine bei verschiedenen Erregerspannungen.

⁹⁾ Wie wohl die Rotorkonstruktion aus Festigkeitsrücksichten gewisse Grenzen auferlegt.

vom asynchronen, kompensierten Betrieb wieder verdrängt werden, weil dieser alle Vorteile des synchronen besitzt, seine grossen Nachteile aber ausschaltet.

III. Zentralisierte-, Gruppen- oder Einzelverbesserung des Leistungsfaktors.

Wie wir gesehen haben, stehen eine ganze Anzahl Maschinengattungen zur Verfügung, die je nach der Art der vorliegenden Betriebsverhältnisse und nach den wirtschaftlichen Verhältnissen sorgfältig ausgewählt werden müssen.

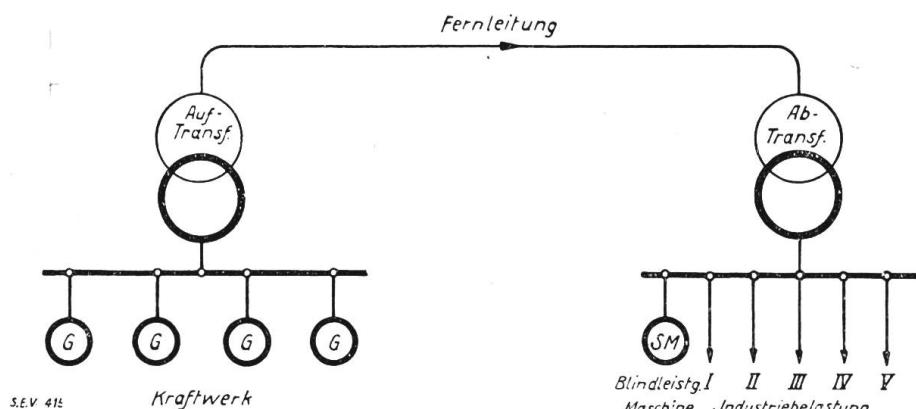


Fig. 20.
Schema der zentralisierten Verbesserung des Leistungsfaktors.

Man unterscheidet heute in der Praxis grundsätzlich drei örtliche Erzeugungsarten von Blindleistung. Deren älteste ist die *zentralisierte* gemäß Fig. 20 und 21. Es wird ihr oft zu Unrecht der Vorwurf gemacht, dass sie eine unwirtschaftliche Lösung darstelle, wenn nicht gleichzeitig der Synchronmotor neben der Blindleistung

stung noch eine Wirkleistung abgeben kann. Diese Möglichkeit ist aber nicht immer vorhanden und trotzdem kann die zentralisierte Kompensation oft vorteilhaft sein. Viele leitende Organe von Elektrizitätsgesellschaften, manche Industrielle sehen nur die ihnen hoch scheinenden Anschaffungs- und Jahresleeraufbetragskosten einer Blindleistungsmaschine, übersehen und unterschätzen aber die Vorteile einer bedeutend besser ausgenützten und zusätzliche Maschinen-Installationen oft ersparenden Anlage, und zwar nicht nur am Aufstellungsort, sondern auch im Kraftwerk und in der Fernleitung. Gesetzt der Fall, die Kosten für Installation und Betrieb der Phasenkompensation seien gleich den Minderanlagekosten, die daraus resultieren würden, so bliebe immer noch die namhafte Verbesserung der Spannungsverhältnisse. Die Frage, ob die zentralisierte Kompensation an der Verbrauchsstelle eingerichtet werden müsse — trotz Gleichstellung der Kosten — ist dann gerechtfertigt und unbedingt zu bejahen.

In Hochspannungsanlagen gewinnt der Synchron- oder Asynchronmotor zur Phasenkompensation besonders grosse Bedeutung, weil es sich dort darum handelt, die Spannung am Anfang und am Ende bei jeder Belastung und Phasenverschiebung wenigstens angenähert auf einem bestimmten Wert konstant zu halten, was mit der gewöhnlichen Generatorenspannungs-Regulierung nicht mehr möglich wäre.

Geht man so vor, dass die Betriebsspannung am Anfang und Ende immer gleich oder wenig unter der kritischen Durchbruchsspannung bei nassem Wetter liegt,

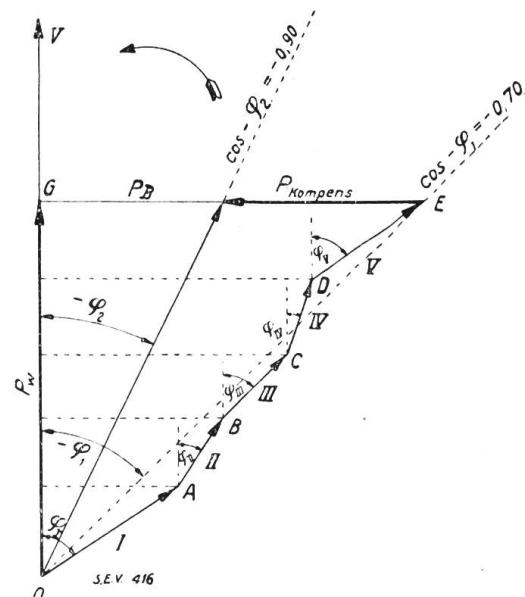


Fig. 21.
Vektordiagramm der zentralisierten Verbesserung des Leistungsfaktors von 0,70 auf 0,90.

so ist zudem der beste Selbstschutz erreicht. Ueberspannungen, Wanderwellen, die aus der Atmosphäre auf die Leitung treffen, werden sofort reflektiert. Besondere Schutzapparate erübrigen sich. Diese indirekten betriebstechnischen und wirtschaftlichen Vorteile müssen gerechterweise auch gewürdigt und zu Gunsten der Blindstromkompensation in Rechnung gesetzt werden¹⁰⁾. Fig. 22 a, b, c zeigen die Verhältnisse drastisch. Man kann einwenden, dass ja Transformatoren mit vielen Anzapfungen (welche übrigens gefährliche Reflexionspunkte sind) oder noch besser, und kürzlichen Vorschlägen entsprechend, mit Stufenschalter ausgerüstet werden

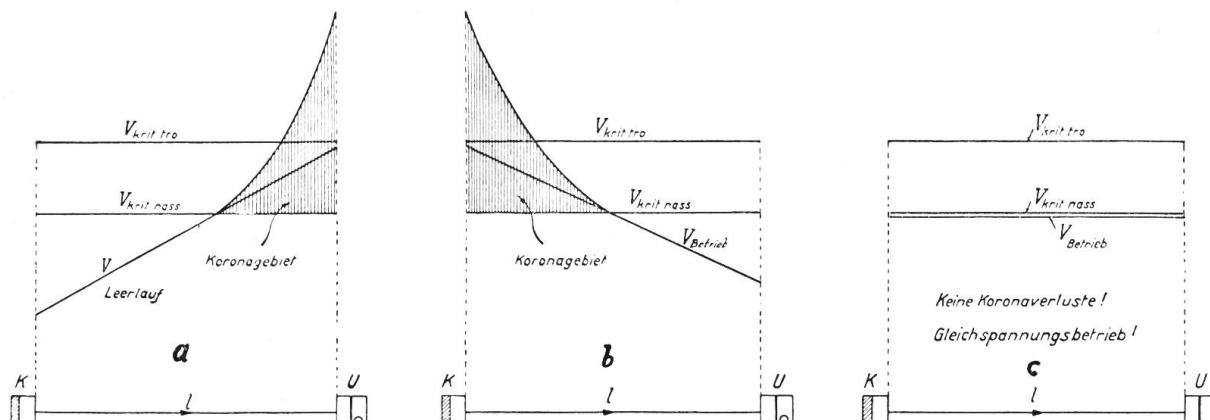


Fig. 22 a-c.

Spannungsverlauf bei

a) Leerlauf.

b) Vollast.

Man beachte die Koronaverlustflächen infolge stark ungleicher Spannung am Anfang und Ende der Fernleitung, die noch bedeutend anwachsen würden, wenn V_{Betrieb} über die ganze Länge $> V_{\text{krit nass}}$ wäre.

 K = Kraftwerk. U = Unterwerk.

c) Anzustrebender konstanter Spannungsverlauf V von Leerlauf bis Vollast nahe und parallel der kritischen Durchbruchsspannung bei nassem Wetter, möglich durch kapazitive und induktive Blindlastregulierung am Ende der Fernleitung.

können, um den grossen Spannungsschwankungen wirksam zu begegnen. Damit ist wohl gerade diese Unannehmlichkeit beseitigt, aber die Anlage nicht von Blindstrom entlastet, was einen schwerwiegenden Nachteil für die Stufen- oder Anzapfregelung bedeutet. Der nicht genug einzuschätzende Vorteil der Blindstromerzeugung in Spezialmaschinen am Verbrauchsort und an Zwischenstationen auf der Strecke, wobei *simultan* Phasen-Verbesserung und gute Spannungsregelung erreicht wird, tritt hier klar zutage.

Als weiteres, sehr wichtiges Mittel ist die *Gruppenverbesserung* des Leistungsfaktors. Dabei werden in grösseren Industrieanlagen die stärksten Drehstrom-Motoren des Versorgungsbezirkes zur Blindstromkompensation herangezogen. Es handelt sich aber oft um vorhandene Motoren, die zu kompensieren sind, bezw. ihren Leistungsfaktor auf $\cos \varphi = 1$ zu bringen haben und hier wird zweckmässigerweise nur die fremderregte Drehstrom-Erregermaschine in Frage kommen. Sind aber neue Motoren zu installieren, so wird man diese für starke Stromvoreilung bemessen und Synchron-Induktionsmotoren verwenden. Welche angenehmen Folgen solche Massnahmen haben können, soll folgendes Beispiel zeigen. Ein Textil-industrieller besitze eine Drehstromanlage mit 100 kleinen Induktionsmotoren zu je 5 kW und 3 grosse Motoren zu je 100 kW. Der mittlere Jahresleistungsfaktor der kleinen Motoren betrage $\cos \varphi = 0,60$. Die reduzierte oder mittlere Vollastbenutzungsdauer sei für grosse und kleine Motoren 2000 h. Die kWh koste 0,04 Fr. Die Blind kVAh koste 0,01 Fr. Es sind also Wirk- und Blindleistungszähler installiert. Ferner ist der Einfachheit wegen angenommen, dass die bei Entlastung und unveränderter Erregung der Motoren gleichbleibenden Wirkverlustkosten den Gewinn durch vermehrte Blindstromkompensierung gerade aufheben.

¹⁰⁾ Diese Vorteile können sich praktisch erst in Anlagen mit Spannungen in der Gegend von 100 kV und darüber auswirken. (*Die Redaktion.*)

Welches ist der Jahresgewinn in kVAh und Franken, wenn:

- die grösseren 3 Motoren auf $\cos \varphi = 1,0$ statt 0,6 arbeiten?
- die grösseren 3 Motoren den $\cos \varphi$ der ganzen Anlage auf die Einheit bringen?

Beantwortung von Frage a):

Die durch S.I. Motoren bewirkte Phasenverbesserung bringt einen Minderbetrag an Blindleistung von 400 kVA. Der mittlere Leistungsfaktor der Anlage steigt damit von $\cos \varphi = 0,60$ auf

$$\cos -\varphi_2 = \frac{800}{\sqrt{(800 \cdot 1,33 - 400)^2 + 800^2}} = 0,77.$$

(Siehe Fig. 23).

Die Minderblindleistungsarbeit beläuft sich jährlich auf $400 \cdot 2000 = 800000$ BkVAh. Die Minderkosten für bezogene Blindleistung aus dem Netz betragen jährlich $(400 \cdot 2000) \cdot 0,01 = 8000$ Fr.

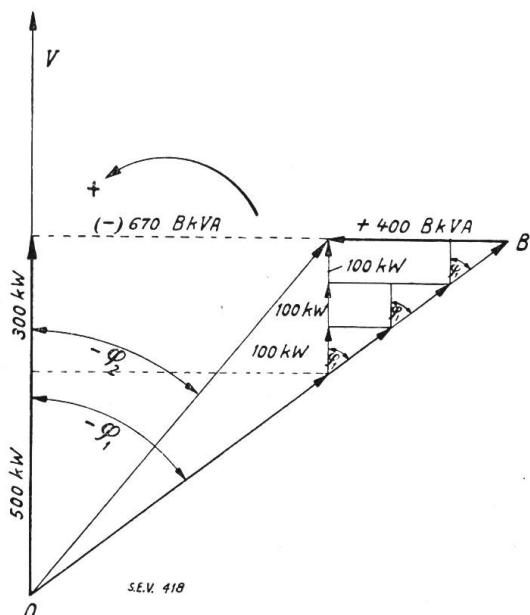


Fig. 23.

Gruppenverbesserung des Leistungsfaktors von 100 Kleinmotoren von 0,6 auf 0,77 durch 3 grössere Motoren.

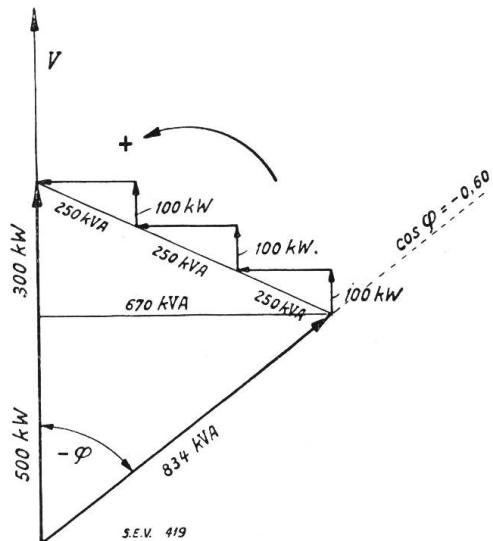


Fig. 24.

Gruppenverbesserung des Leistungsfaktors von 100 Kleinmotoren von 0,6 auf 1,0 durch 3 grössere Motoren.

Angenommen die Mehrkosten für die 3 S.I. oder kompensierten 100 kW-Motoren zusammen gegenüber gewöhnlichen Asynchron-Motoren seien reichlich hoch zu 2000 Fr. angenommen, so können dieselben schon nach einem Vierteljahr gedeckt werden.

Beantwortung von Frage b):

Die 100 kleinen Motoren absorbieren jährlich eine Blindlastarbeit von:

$$(100 \cdot 5 \cdot 1,333 \cdot 2000) = 1330000 \text{ kVAh}, \text{ welche den Industriellen im Minimum (d. h. bei Fr. } 0,01/\text{kVAh) Fr. } 13300.- \text{ kosten.}$$

Wählen wir nun 3 stark übererregbare S.I. oder kompensierte Motoren von je 100 kW bei 1000 t/m, welche zusammen rund 670 kVA kapazitive Blindleistung aufnehmen können, so fallen die obigen Blindstromkosten vollständig weg, nur im ersten Jahr ist ein Teil davon für die Mehrkostendeckung der Spezialmotoren aufzuwenden. Diese Mehrkosten belaufen sich für die drei 250 kVA Motoren auf ca. Fr. 5000.-, so dass wiederum für die Amortisation der zusätzlichen Einrichtungen für die Blindstromkompensation nicht einmal ein Jahr nötig wäre.

Fig. 24 stellt die Verhältnisse in einem Vektordiagramm dar.

Die Kompensation hat noch einen weiteren Vorteil, wenn schwächere Induktionsmotoren infolge vergrößertem Leistungsbedarf durch stärkere Motoren ersetzt werden sollen. Eine solche Änderung bedingt oft auch eine Verstärkung der Leitungen, Schalter und Sicherungen, also zusätzliche Installationskosten, wenn einfach größere Asynchronmotoreinheiten aufgestellt würden, ohne die Phasenkompensation zu berücksichtigen. Das ist nun nicht nötig, wenn phasenkompensierte Motoren gewählt werden, deren Wirkstrom ungefähr gleich dem Komplexstrom bei Vollast der ersetzen Motoren ist.

Oft stehen aber in weitem Umkreis eines Versorgungsbezirkes keine grösseren Motoren für die Blindstromerzeugung zur Verfügung; es muss dann, falls sehr schlechte Leistungsfaktoren auftreten, zur *Einzelverbesserung* Zuflucht genommen werden, d. h. die Kompensierung ist gezwungenermassen in viele kleine Antriebe zu verlegen. In landwirtschaftlichen Gegenden mit verhältnismässig wenig Industrie und wenig Gewerbe trifft man oft infolge der vielen schlecht belasteten Motoren und Transformatoren Leistungsfaktoren von 0,6, so dass hier statt Kurzschlussanker-motoren die kompensierte Motoren mit $\cos \varphi = 1$ am Platze wären, insofern darauf gerechnet werden kann, dass die Kollektormotoren vor Verstaubung geschützt blei-

Fig. 25 zeigt die Einzelverbesserung des Leistungsfaktors im Vektordiagramm, wo für ein Netz der $\cos \varphi$ von 0,6 auf 0,8 gebracht wird.

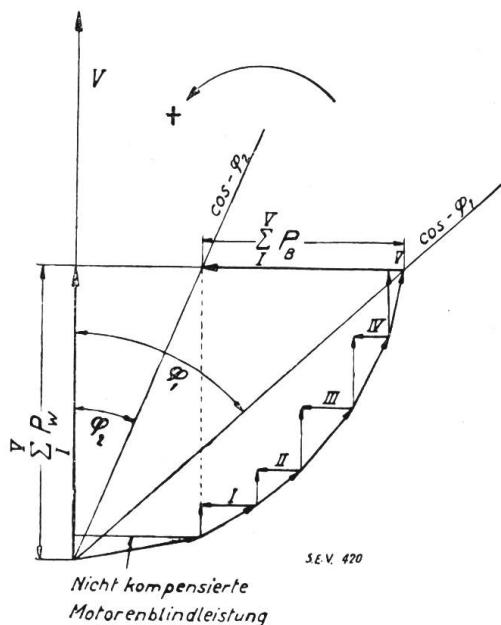


Fig. 25.
Einzelverbesserung des Leistungsfaktors von 0,6 auf 0,80 in einem Netz mit vielen Kleinstmotoren

IV. Schlussbetrachtungen.

Anschliessend und zusammenfassend können wir für die Blindleistungskompen-sation zur Korrigierung der Phasenverschiebung die drei folgenden Grundsätze aufstellen:

1. Die Blindleistungserzeugung zur Phasenkompensation soll wenn möglich in Maschinen geschehen, die gleichzeitig Wirkleistung führen, gleichgültig ob es sich dabei um Motoren oder Generatoren handelt. Weil Wirk- und Blindleistung sich geometrisch zusammensetzen, ergeben sich für diesen kombinierten Betrieb der Maschinen kleinste Abmessungen und Verluste.
 2. Die Blindleistungserzeugung soll in den grössten Maschinen stattfinden, welche für Kompensationszwecke nutzbar gemacht werden können. Die Generatoren stellen allerdings die grössten Einheiten einer Kraftübertragung dar und wären deshalb für Blindstromerzeugung sehr gut geeignet. Indessen verbieten oft die zusätzlichen Stromwärmeverluste und die unzulässigen Spannungsänderungen die Blindstromerzeugung durch Generatoren. Die Hauptkompensation der Blindströme soll vielmehr im Schwerpunkt des Versorgungsgebietes vorgenommen werden und Auf- wie Abtransformatoren, Fernleitung und Generatoren vom Blindstrom bei allen Betriebsverhältnissen entlasten.
 3. Nur solche Maschinen sollen als Mithilfe zur Blindstromkompensation herangezogen werden, die eine lange Benutzungsdauer haben, um eine möglichst grosse Zahl von BkVA Stunden zu erzeugen. Generatoren und Umformer

¹¹⁾ Wir glauben kaum, dass der robuste und in der Handhabung einfache Induktionsmotor in landwirtschaftlichen Betrieben durch den nicht nur teureren, sondern vor allem viel heikleren Kollektormotor wird verdrängt werden können. (*Die Redaktion.*)

haben grösste Benutzungsdauer, kleinere Motoren für das Kleingewerbe, Landwirtschaft und Hebezeuge hingegen nur sehr kurze Benutzungsdauer. Dieser Umstand weist wiederum auf die Blindleistungserzeugung in grossen Maschinen hin. Die Forderungen aus diesen drei Grundsätzen werden noch in der Hinsicht unterstützt, dass durch die Kompensationsmaschinen die Betriebssicherheit der Anlage unter keinen Umständen leiden darf. Es ist noch zu beachten, dass der ausgiebigen Verwendung von Kollektormotoren mit Rücksicht auf die Betriebsverhältnisse, ferner die Nähe von Reparaturwerkstätten, wie überhaupt mit Rücksicht auf die Güte der Wartung und Bedienung von vornherein gewisse Beschränkungen auferlegt sind. Bei grösseren Maschinen dürften die Voraussetzungen für eine sachgemäße Wartung eher vorhanden sein. In Ländern und Gegenden, wo die Reparaturwerkstätten und geeignetes Personal schwer zu finden sind, fallen die betriebstechnischen Gesichtspunkte besonders schwer ins Gewicht.

Zwei Aufgaben fallen der kompensierenden Blindleistungserzeugung zu: Die vorhandenen elektrischen Anlagen durch Korrigierung des Leistungsfaktors bestmöglich auszunützen und neue Anlagen so zweckmässig zu installieren, dass die heute noch so oft auftretenden betriebstechnischen und wirtschaftlichen Nachteile, wie das unrationelle Spazierenführen von starken Blindströmen vermieden werden.

Man darf heute mit Befriedigung feststellen, dass in fast allen Industrieländern in der Bestrebung, die schädlichen Blindströme zu kompensieren, Fortschritte gemacht worden sind. Dennoch glaubt der Verfasser, dass es noch viele Kraftwerke und Verteilungssysteme gibt, bei welchen es sich wohl lohnte, dieselben auf die besprochenen unliebsamen Erscheinungen nachzuprüfen und allfällige Massnahmen zu deren Behebung zu treffen, sei es durch die Installation synchroner oder asynchroner Blindleistungsmaschinen.

Technische Mitteilungen. – Communications de nature technique.

Die elektrische Fernmessung. 621.37

Der Zusammenschluss mehrerer Kraftwerke oder die Betriebsleitung von zentraler Stelle aus, welche das richtige Zusammenarbeiten der einzelnen Speise- und Netzpunkte regelt, verlangt, dass der Betriebsingenieur über die im Netz herrschende Belastung, Phasenverschiebung, Strom- und Spannungsverhältnisse jederzeit unterrichtet ist, damit er die richtigen Dispositionen treffen kann. Bisher bediente man sich zur Verständigung meistens des Telephons, ein zeitraubendes Verfahren, welches zudem nicht genügende Sicherheit für die Richtigkeit der Meldung bietet. Einen Fortschritt in dieser Beziehung bildet eine Einrichtung, welche die Firma Siemens & Halske entwickelt hat, und die es ermöglicht, Zeigerstellungen von Instrumenten auf beliebige Entfernungen zu übertragen. Bei Verwendung dieser im nachfolgenden beschriebenen Einrichtung ist es also möglich, alle für das richtige Arbeiten des Netzes benötigten Instrumentenangaben an einer Stelle zu vereinigen. Der Vorteil der neuen Einrichtung besteht darin, dass die Entfernung nahezu keiner Beschränkung unterliegt und dass zur Uebertragung jeder beliebigen Angabe stets nur zwei Leitungen geringen Querschnitts und geringer Isolation nötig sind und dass diese Leitungen auch z. B. mit Telefonleitungen in einem gemeinsamen Kabel verlegt werden können. Grundsätzlich neu an der Einrichtung

ist, dass der Zeiger des Anzeige-Instrumentes keine Kontakte zu schliessen hat, wodurch leicht Störungen verursacht werden können, da solche Kontakte nicht zuverlässig sind. Es werden vielmehr kräftige Druckkontakte geschlossen, so dass die Uebertragung unbedingt zuverlässig ist.

Fig. 1 zeigt ein Geberinstrument, wie es für die Fernmessung gebraucht wird, und zwar einen Leistungsmesser; Messgeräte für Strom, Spannung, Wirk- und Blindleistung sind bis auf das Messwerk gleich gebaut. Fig. 2 erläutert die Wirkungsweise der eigentlichen Fernübertragungseinrichtung. Der Apparat besteht aus einem Potentiometer, auf das in kurzen Zeitabständen der Zeiger des Messinstrumentes niedergedrückt wird. Auf diese Weise wird eine bestimmte Gleichspannung in die Fernleitungen geschickt, die das Empfängergerät betätigt. Das Prinzip des Fallbügels ist ja bekannt; es wird z. B. besonders bei Registriegeräten für Temperaturmessungen in den bekannten Mehrfarbenschreibern angewandt. Um zu vermeiden, dass beim Anheben des Fallbügels der Kontakt aufgehoben wird und das Empfängerinstrument in seine Ruhelage zurückgeht, wird hier ein Doppelfallbügel benutzt. Mit dem einen Zeiger des Messinstrumentes ist nämlich ein zweiter Zeiger gekuppelt, der «Erinnerungszeiger», der von einem zweiten Fallbügel niedergedrückt wird. Beide Zeiger haben