Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke

Band: 15 (1924)

Heft: 9

Artikel: Die Ursachen und schädlichen Folgen eines niedrigen Leistungsfaktors in elektrischen Anlagen und die Mittel zur Bekämpfung dieser Folgen

Autor: Schiesser, M.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1061839

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: 02.10.2025

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

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: Hottingen 7320,
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 7016

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.

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: Hottingen 7320
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 7016

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.

XV. Jahrgang
XVe Année

Bulletin No. 9

September
Septembre 1924

Die Ursachen und schädlichen Folgen eines niedrigen Leistungsfaktors in elektrischen Anlagen und die Mittel zur Bekämpfung dieser Folgen.

Vortrag, gehalten an der Generalversammlung des V. S. E. am 21. Juli 1924,
von Oberingenieur *M. Schiesser*, Baden.

Auf Grund der diese Materie betreffenden Verhältnisse in schweizerischen Elektrizitätswerken behandelt der Autor in vorliegendem Aufsatze vorerst die physikalischen Ursachen der Phasenverschiebung und hierauf den Einfluss von Leitungen, Transformatoren und Motoren auf letztere. Nach Besprechung der Folgen des schlechten Leistungsfaktors (ungünstige Ausnützung der Anlageteile, Verluste, betriebstechnische Schwierigkeiten) orientiert der Verfasser über den prozentualen Einfluss der Anlageteile auf die Verschlechterung desselben. Unter den Mitteln zur Bekämpfung des schlechten Leistungsfaktors werden hauptsächlich solche zur Abgabe von Wattleistung angegeben und die Anwendung derselben in verschiedenen Anlageteilen besprochen.

En se basant sur les résultats d'exploitation des centrales électriques en Suisse, l'auteur de cet article examine d'abord les causes physiques du déphasage dans les installations électriques, puis l'influence des lignes, transformateurs et moteurs sur la valeur du cos φ. L'auteur indique ensuite les conséquences d'un mauvais facteur de puissance, comme l'utilisation défavorable du matériel, les pertes, certaines difficultés d'exploitation, et donne en % la part qui revient aux lignes, aux transformateurs et aux moteurs dans l'origine d'un mauvais facteur de puissance. Parmi les moyens susceptibles d'améliorer la valeur du cos φ, l'auteur mentionne l'emploi de moteurs fournissant eux-mêmes la puissance déwattée, l'utilisation de condensateurs, et parle de leur application rationnelle.

Mit Rücksicht auf die kurze Zeit, die mir für die Behandlung dieser umfangreichen Fragen zur Verfügung steht, muss ich mich darauf beschränken, nur die wesentlichsten Punkte zu behandeln und alle Detailbetrachtungen wegzulassen. Es lag mir sehr daran, meine Schlussfolgerungen möglichst gestützt auf die Verhältnisse in unseren schweizerischen Netzen abzustellen. Ich habe zu diesem Zwecke eine Grosszahl von Werken um Unterlagen ersucht. Aus der grossen Bereitwilligkeit, mit der meiner Bitte entsprochen wurde und aus dem grossen Entgegenkommen, mit welchem die Werke selbst einige Messungen für diesen Vortrag vornahmen oder uns Anlageteile für Messungen überlassen haben, ebenso wie aus

dem umfangreichen, wertvollen Material, das mir zugestellt wurde, war das allgemeine Interesse für diese Materie zu entnehmen.

Ich kann die Werke, die mir Material zur Verfügung stellten, nicht einzeln aufzählen und ich kann ihnen hier nur summarisch meinen Dank aussprechen für ihre Unterstützung bei meiner Arbeit. Auch Herrn Dr. Kopeliowitch, der die zeitraubende Auswertung des umfangreichen Materials vornahm, will ich an dieser Stelle meinen Dank aussprechen.

Ich habe meinen Vortrag in die folgenden Kapitel unterteilt:

I. Die Ursachen des Leistungsfaktors.
II. Die Folgen des schlechten Leistungsfaktors.
III. Prozentualer Einfluss der Leitungen, Transformatoren und Motoren auf den Leistungsfaktor in unseren Anlagen.
IV. Die Mittel zur Bekämpfung des schlechten Leistungsfaktors.
V. Wahl dieser Mittel in verschiedenen Anlagen.

I. Die Ursachen der Phasenverschiebung.

1. Physikalische Ursachen. Bekanntlich entstehen beim Durchgang eines Wechselstromes gegebener Frequenz durch elektrische Leiter, Apparate oder Maschinen elektrische und magnetische Wechselfelder gleicher Frequenz. Die Energiequanten, welche in jeder Periodenhälfte zu ihrer Erzeugung nötig sind, bleiben, solange der elektrische Zustand aufrecht erhalten wird, in der Anlage aufgespeichert. Sie pulsieren nur hin und her mit der Frequenz des Netzes. Wie alle Schwingungen, brauchen auch diese einen Energieaufwand und da die Leiter Widerstände besitzen, bedingen die erregenden Ströme einen ständigen Wärmeverlust.

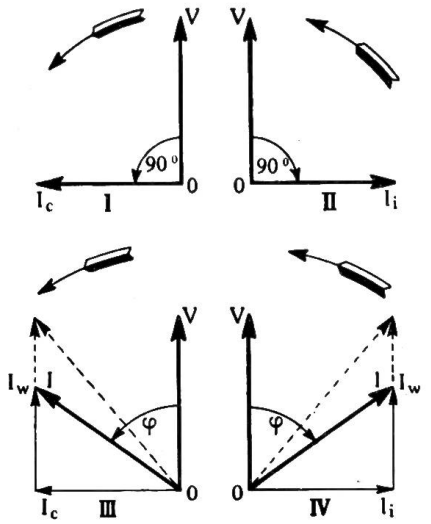

Fig. 1.
Vektordiagramme für vor- und nacheilende Ströme.
I Strom des elektrischen Feldes.
II Strom des magnetischen Feldes.
III Voreilender Strom.
IV Nacheilender Strom.

Stellt man die elektrischen Ströme und Spannungen eines Wechselstromkreises durch Vektoren dar, so ergibt sich folgendes:

Die Ströme, welche elektrische Felder erzeugen (Ladeströme der Kapazitäten), eilen dem Vektor der EMK (Spannung) um 90° vor (Fig. 1, Diagramm I).

Die Ströme, welche magnetische Felder erzeugen (mittels Induktivitäten), eilen dem Vektor der EMK um 90° nach (Fig. 1, Diagramm II).

Im ersten Falle werden die Ströme kapazitiv und im zweiten Falle induktiv genannt.

Wird einer Wechselstromanlage mechanische oder thermische Energie mittels Motoren oder Widerständen entzogen, so bekommt der Stromvektor gegenüber dem Vektor der EMK eine Neigung, die kleiner als 90° ist. Die Vektoren des arbeitverrichtenden Stromes, d. h. des Wattstromes, und der EMK besitzen die gleiche Richtung.

Je nachdem die kapazitiven oder induktiven Ströme überwiegen, wird der resultierende Strom nach vorwärts (Fig. 1, Diagramm III), oder nach rückwärts (Fig. 1, Diagramm IV) um den Winkel φ (Phasenverschiebung) gegenüber der EMK verschoben sein.

Daraus lassen sich folgende Begriffsbestimmungen festlegen:

Das Produkt aus Spannung und Strom entspricht einer Scheinleistung:

$$P = E\,I \text{ in kVA gemessen;}$$

das Produkt aus Spannung, Strom und $\cos\varphi$ der Wattleistung:

$$P_w = E\,I\cos\varphi = E\,I_w \text{ in kW gemessen;}$$

das Produkt aus Spannung, Strom und $\sin \varphi$ entspricht der Blindleistung:

$$P_b = E\,I \sin \varphi = E\,I_b \text{ in Blindkilowatt (BkW) gemessen.}$$

Das Verhältnis der Wattleistung zu der Scheinleistung wird als Leistungsfaktor bezeichnet.

Bei Mehrphasensystemen muss man, um die entsprechenden Grössen zu bekommen, die obigen Produkte noch mit dem Faktor 2 bei Zweiphasenstrom, bezw mit $\sqrt{3}$ bei Drehstrom, multiplizieren.

Im allgemeinen führt man die verschiedenen Rechnungen betreffend die Blindbelastung eines Netzes mit Hilfe des Leistungsfaktors durch. Es gibt aber oft Fälle, wo es notwendig ist, aus Blind- und Wattleistung einiger Stromverbraucher den gemeinsamen Leistungsfaktor auszurechnen. Diese Rechnung ist eine sehr einfache, da man nur einerseits die BkW und anderseits die kW der einzelnen Verbraucher zusammenzuzählen braucht, um daraus den gesuchten Leistungsfaktor ableiten zu können. Es ist überhaupt zu empfehlen, eher mit Blindleistung und BkW zu rechnen, als mit $\cos \varphi$.

2. Leitungen und Kabel. Der Blindleistungsverbrauch der Leitungen und der Kabel ist durch ihre Selbstinduktivität und Kapazität bedingt.

Wenn die Länge einer Freileitung nicht sehr gross und die Betriebsspannung nicht sehr hoch ist, ist der Einfluss der Erdkapazität der Leitung klein und kann vernachlässigt werden. Deswegen stellt die Fig. 2 in Funktion der Leiterquerschnitte nur die Reaktanzen pro Phase und Kilometer der Freileitungen (Anordnung im gleichseitigen Dreieck) für verschiedene Drahtabstände dar. Wie daraus ersichtlich ist, nimmt die Induktivität der Freileitungen mit dem Drahtabstand zu; eine Verkleinerung des Querschnittes wirkt im gleichen Sinne. Die Verkleinerung der Reaktanz mit wachsendem Querschnitt ist allerdings von ca. 20 mm² an nicht bedeutend.

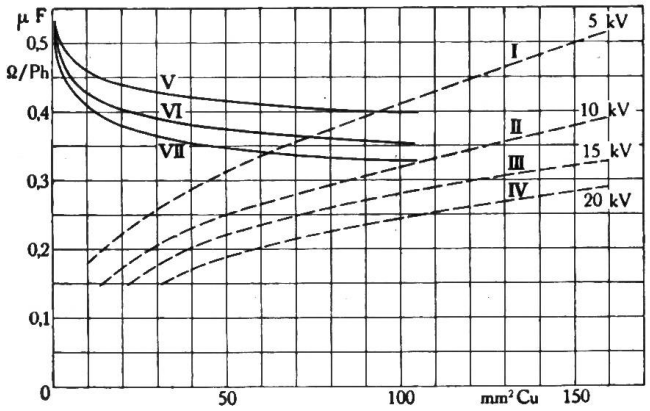

Fig. 2.
Kapazität von Dreileiterkabeln und die Reaktanz von Freileitungen (Leiteranordnung im gleichseitigen Dreieck) in Funktion des Kupferquerschnittes.

I Betriebskapazität/km bei Kabeln für 5 kV Betriebsspannung
II " " " " 10 kV "
III " " " " 15 kV "
IV " " " " 20 kV "
V Reaktanz pro Phase und km der Freileitungen bei einem Drahtabstand von 2,4 m.
VI Reaktanz pro Phase und km der Freileitungen bei einem Drahtabstand von 1,2 m.
VII Reaktanz pro Phase und km der Freileitungen bei einem Drahtabstand von 0,8 m.

Bei gegebener Uebertragungsleistung ist die zusätzliche Phasenverschiebung, die durch die Reaktanz der Leitung verursacht wird, um so kleiner, je höher die Betriebsspannung ist. Anderseits muss, um die Veränderung der Phasenverschiebung durch die Leitung klein zu halten, das Verhältnis der Reaktanz zum ohmschen Widerstand pro km so klein wie möglich gehalten werden. Der ohmsche Widerstand lässt sich aus wirtschaftlichen Gründen nicht vergrössern, die Reaktanz kann jedoch durch Reduktion des Drahtabstandes etwas heruntergedrückt werden. Man soll also den Drahtabstand so gering wählen, als es die elektrischen und mechanischen Verhältnisse zulassen. Wie aber aus der Fig. 2 ersichtlich ist, kann durch diese Massnahme nicht viel erreicht werden.

Die Betriebskapazität pro km Kabel nimmt mit zunehmender Betriebsspannung ab. Die Vergrösserung des Leiterquerschnittes ruft eine Vergrösserung der Kapazität hervor. Die Kurven I bis IV der Fig. 2 geben die Betriebskapazität pro km Dreileiterkabel für verschiedene Betriebsspannungen (nach Petersen, E.T.Z., 1916) an.

Die Kapazität des Netzes bewirkt teilweise die Kompensierung der Blindleistung der Belastung und diese Kompensierung ist um so grösser, je höher die Betriebsspannung ist. Immerhin beträgt der Blindverbrauch der Leitungen und die Kompensationswirkung der Netzkapazität (mit Ausnahme einiger Sonderfälle) für unsere Verhältnisse nur einen sehr kleinen Prozentsatz des Blindverbrauches der Belastung.

3. Transformatoren. Die Transformatoren arbeiten, wie bekannt, mit magnetischen Feldern; zur Erzeugung der letzteren werden nacheilende, induktive Blindströme gebraucht. Deswegen können die Transformatoren unter Umständen eine

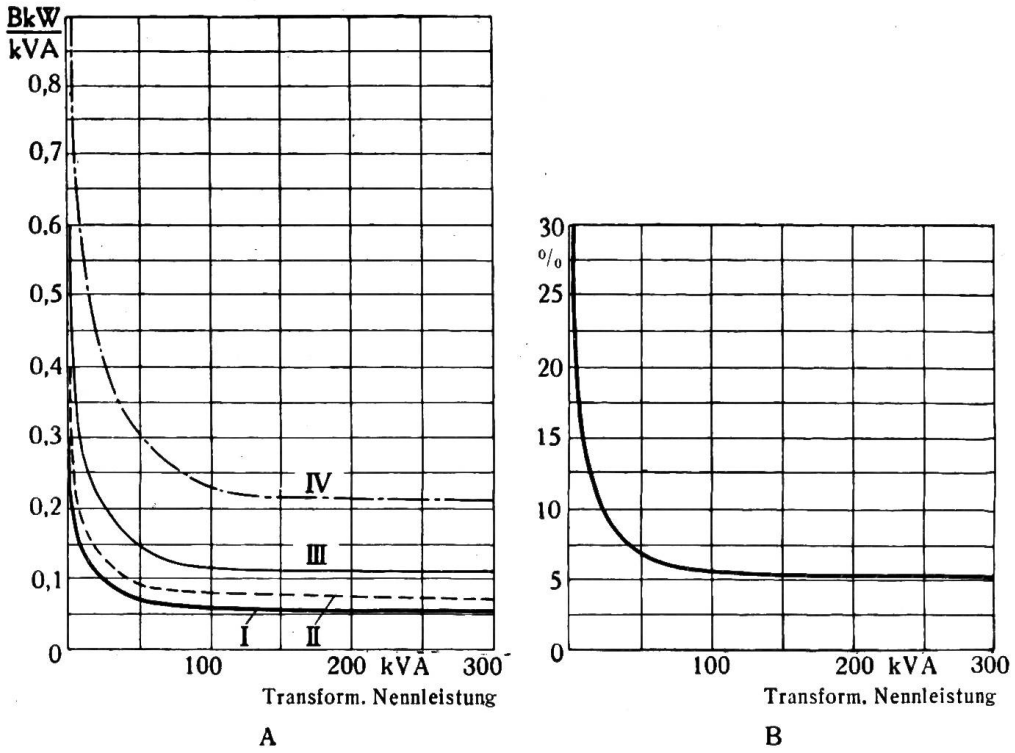

Fig. 3. Annähernder Blindleistungsverbrauch von Transformatoren.
B: Blindleistungsverbrauch in % der Nennleistung.
A: Blindkilowattaufnahme pro kVA der Belastung:
I Bei 4/4 Last. II Bei 3/4 Last. III Bei 2/4 Last. IV Bei 1/4 Last.

der Hauptursachen der Phasenverschiebung des Netzes bilden. Fig. 3 B zeigt den Blindleistungsverbrauch von Transformatoren in Prozent der Nennleistung und in Funktion dieser Leistung. In erster Annäherung kann angenommen werden, dass die für die Magnetisierung eines Transformators nötige Blindleistung von der Grösse der Belastung unabhängig ist. Folglich wächst das Verhältnis Blindleistungsverbrauch zur Belastung eines Transformators in kVA umgekehrt proportional zur Belastung (Fig. 3 A). Aus diesem Grunde ist bei gegebenem cos φ des Netzes die zusätzliche Phasenverschiebung im Transformator um so kleiner, je höher seine Belastung ist. Daraus folgt, dass es *auch für Transformatoren sehr wichtig ist, sie so zu wählen, dass sie möglichst gut ausgenützt werden.*

Die zusätzliche Phasenverschiebung, welche infolge der Kurzschlussimpedanz des Transformators zustande kommt, weist dieselben Verhältnisse wie bei einer Leitung auf; ihr Einfluss ist nicht bedeutend.

Die in Fig. 3 angegebenen Kurven entstammen Transformatoren mit relativ kleinem Blindleistungsverbrauch. Wie wir aus einer anderen Abbildung noch sehen werden, ist die aufgenommene Blindleistung eines Transformators in hohem Masse von der Konstruktion abhängig, sie ist aber prozentual immer grösser für kleine Transformatoren, als für grosse.

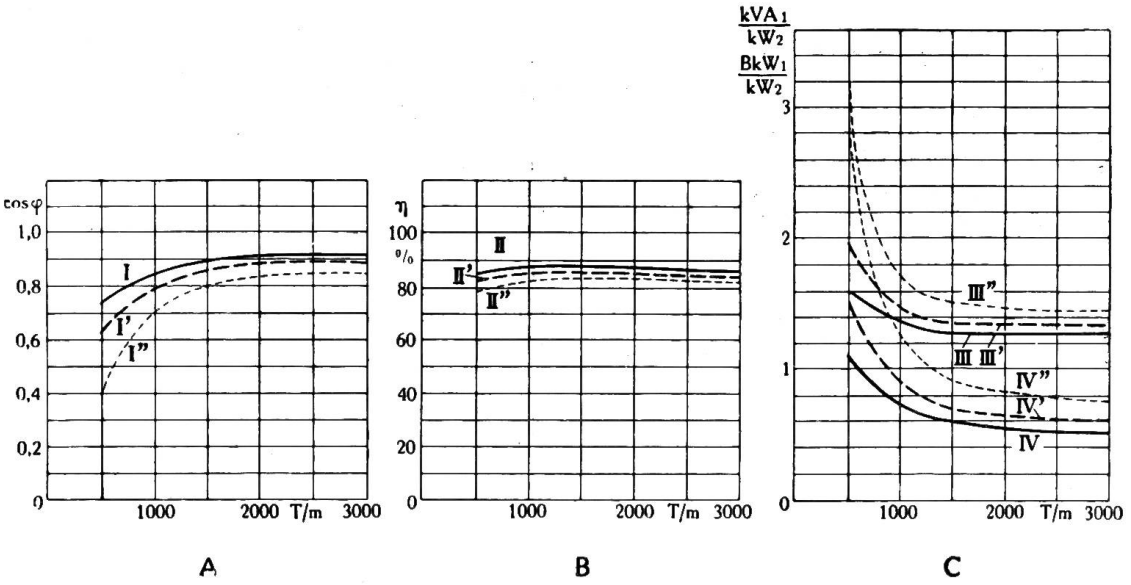

Fig. 4. Einfluss der Polzahl auf cos φ, η, $\frac{kVA_1}{kW_2}$ und $\frac{BkW_1}{kW_2}$ bei 11 kW Asynchronmotoren mit Schleifringrotoren.

A: I Leistungsfaktor bei 4/4 Last. B: II Wirkungsgrad bei 4/4 Last.
I' " " 3/4 " II' " " 3/4 "
I" " " 2/4 " II" " " 2/4 "

C: III Leistungsaufnahme in kVA pro abg. kW bei 4/4 Last.
III' " " " " " " " 3/4 "
III" " " " " " " " 2/4 "
IV Blindkilowattaufnahme pro abg. kW bei 4/4 Last.
IV' " " " " " 3/4 "
IV" " " " " " 2/4 "

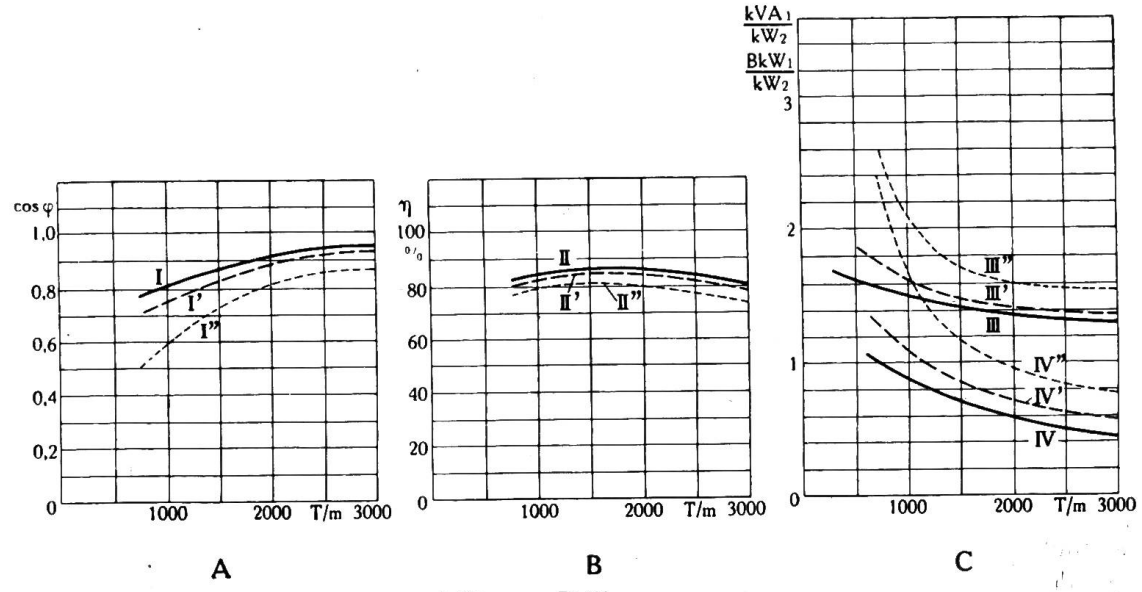

Fig. 5. Einfluss der Polzahl auf cos φ, η, $\frac{kVA_1}{kW_2}$ und $\frac{BkW_1}{kW_2}$ bei 3 kW Asynchronmotoren mit Kurzschlussrotoren

A: I Leistungsfaktor bei 4/4 Last. B: II Wirkungsgrad bei 4/4 Last.
I' " " 3/4 " II' " " 3/4 "
I" " " 2/4 " II" " " 2/4 "

C: III Leistungsaufnahme in kVA pro abg. kW bei 4/4 Last.
III' " " " " " " " 3/4 "
III" " " " " " " " 2/4 "
IV Blindkilowattaufnahme pro abg. kW bei 4/4 Last.
IV' " " " " " 3/4 "
IV" " " " " " 2/4 "

4. Induktionsmotoren, Induktionsgeneratoren und Induktionsregler. Die Verhältnisse liegen hier grundsätzlich gleich wie bei den Transformatoren. Die Motoren und die mit denselben verwandten Konstruktionen brauchen aber, wegen des Luftspaltes zwischen Stator und Rotor und wegen der grösseren Streufaktoren der beiden Wicklungen, verhältnismässig viel grössere Blindleistungen.

Der Blindleistungsverbrauch der Motoren gleicher Leistung nimmt mit grösserer Polzahl (d. h. mit abnehmender synchroner Drehzahl) zu, oder mit anderen Worten,

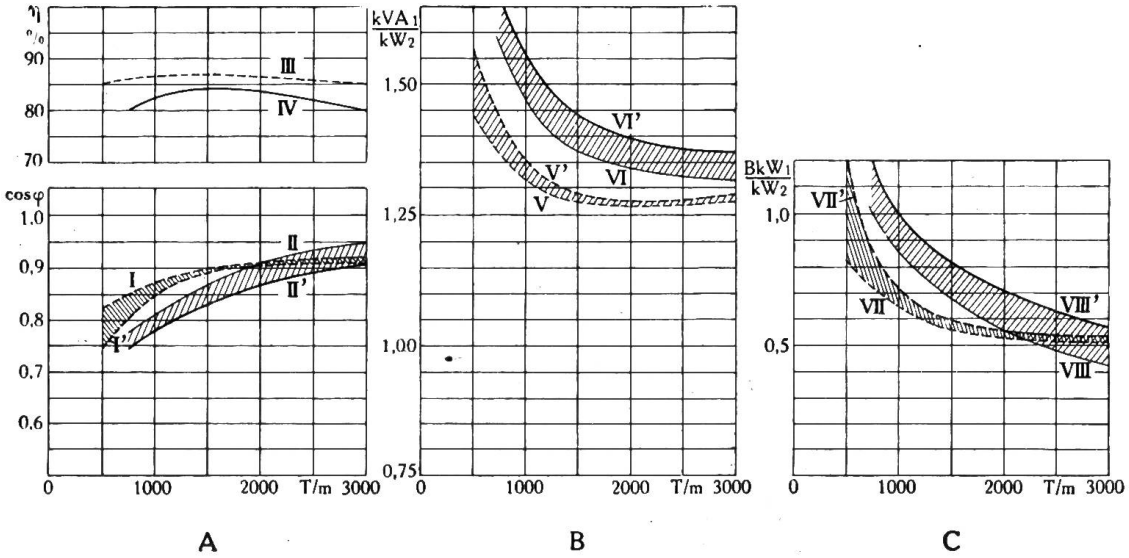

Fig. 6. Vergleich zwischen Motoren mit Kurzschluss- und Schleifringrotor bei Vollast: Einfluss der Polzahl auf $\cos\varphi$, η, $\frac{kVA_1}{kW_2}$ und $\frac{BkW_1}{kW_2}$.

A: I Leistungsfaktor der 11 kW Kurzschlussmotoren.
I' „ „ 11 kW Schleifringmotoren.
II „ „ 3 kW Kurzschlussmotoren.
II' „ „ 3 kW Schleifringmotoren.
III Wirkungsgrad der 11 kW Motoren.
IV „ „ 3 kW Motoren.

B: V Leistungsaufnahme in $\frac{kVA_1}{kW_2}$ der 11 kW Kurzschlussmotoren.
V' „ „ $\frac{kVA_1}{kW_2}$ der 11 kW Schleifringmotoren.
VI „ „ $\frac{kVA_1}{kW_2}$ der 3 kW Kurzschlussmotoren.
VI' „ „ $\frac{kVA_1}{kW_2}$ der 3 kW Schleifringmotoren.

C: VII Blindleistungsverbrauch in $\frac{BkW_1}{kW_2}$ der 11 kW Kurzschlussmotoren.
VII' „ „ $\frac{BkW_1}{kW_2}$ der 11 kW Schleifringmotoren.
VIII „ „ $\frac{BkW_1}{kW_2}$ der 3 kW Kurzschlussmotoren.
VIII' „ „ $\frac{BkW_1}{kW_2}$ der 3 kW Schleifringmotoren.

die mehrpoligen Motoren arbeiten mit schlechterem $\cos\varphi$. In Fig. 4 A, B und C sind die charakteristischen Grössen von normalen 11 kW Schleifringmotoren verschiedener Polzahlen für Vollast, Dreiviertellast und Halblast dargestellt. Wie aus diesen Kurven hervorgeht, weisen die langsamlaufenden Motoren bei Teillasten bedeutend ungünstigere Verhältnisse auf als die raschlaufenden. Analoge Kurven für normale 3 kW Kurzschlussmotoren sind in Fig. 5 A, B und C angegeben.

Aus den Kurven der Fig. 4 und 5 und aus dem Vergleich der Kurven der Fig. 4 und 5 ist somit zu ersehen, dass sich bei Teillasten alle Verhältnisse rasch verschlechtern und dass diese Verschlechterung bei kleinen Motoren grösser ist als bei grösseren; ferner dass langsamlaufende Motoren immer ungünstiger sind als

raschlaufende. *Man muss folglich dafür Sorge tragen, dass die Nennleistungen der Motoren möglichst gut den Arbeitsmaschinen angepasst werden und dass so viel wie möglich raschlaufende Motoren zur Verwendung kommen.*

Da die Kurzschlussmotoren im Rotor günstigere Streuverhältnisse haben, arbeiten sie mit kleinerer Blindleistung als die Schleifringmotoren (siehe Fig. 6 A, B und C). Der Unterschied ist für kleine Motoren und Vollast ganz wesentlich, z. B. bei ca. 3÷5 kW Motoren bis 5 Einheiten des Leistungsfaktors. Demgegenüber ist bei Motoren von ca. 11 kW Nennleistung der Einfluss der Rotorwicklung bei raschlaufenden Motoren vernachlässigbar klein. *Man muss also, soweit die Verhältnisse es gestatten, möglichst Kurzschlussmotoren verwenden.*

Die Verhältnisse beim Induktionsregler liegen ähnlich wie beim Induktionsmotor, aber immer etwas günstiger wegen des kleineren Luftspaltes. Der Blindleistungsverbrauch eines Induktionsreglers ist natürlich hauptsächlich von der Eigenleistung des Reglers und weniger von der durchgehenden Leistung abhängig. Es sei hier noch bemerkt, dass es in Mittelspannungsnetzen Fälle gibt, in welchen die Induktionsregler mit Vorteil durch Synchronmotoren ersetzt werden können.

Die Induktionsgeneratoren ergeben noch ungünstigere Verhältnisse als die Motoren, weil die Induktionsmaschinen als Generator mit etwas grösserem prozentualem Aufwand an Blindleistung als die Motoren arbeiten. Die Verwendung der Induktionsgeneratoren ist daher nur in einigen Sonderfällen angezeigt.

II. Die Folgen des schlechten Leistungsfaktors.

1. Ungünstige Ausnützung aller Anlageteile. Wie oben erwähnt, arbeiten fast alle Wechselstrommaschinen mit magnetischen Feldern und die meisten beziehen die Blindleistung zur Erzeugung dieser letzteren aus dem Netze. Infolgedessen werden normalerweise die Generatoren und andere Anlageteile mit Rücksicht auf Blindleistungslieferung gebaut. Die Notwendigkeit, den Leistungsfaktor zu berücksichtigen, verteuert die Wechselstromanlagen, da diese mit grösseren Kupferquerschnitten ausgerüstet werden müssen. Unterschreitet beispielsweise der Leistungsfaktor, wie es oft der Fall ist, den Wert 0,8, welchen man bei der Berechnung der Anlage zugrunde gelegt hat, und erreicht er den Wert 0,6, so sinkt die Ausnützung der Generatoren um 25 %. Auch die Wattleistung, welche die anderen Anlageteile bei gutem Leistungsfaktor imstande sind wirtschaftlich zu übertragen, wird im gleichen Verhältnis kleiner. Es ist aber bis vor kurzem nur die abgegebene bezw. übertragene Energie (die Anzahl kWh) massgebend gewesen für die Einnahmen des Stromerzeugers oder Widerverkäufers. Unter der Annahme, dass es sich um ein vollbelastetes Netz handelt und der Leistungsfaktor nicht oder zu wenig bei der Verrechnung berücksichtigt wird, wird die Rentabilität des Kapitals einer elektrischen Anlage um so kleiner, je kleiner der Leistungsfaktor des Betriebes ist. Diese Tatsache ist zwar allgemein bekannt, musste hier aber vollständigkeitshalber doch gestreift werden.

2. Verluste. Bekanntlich hängt der Wirkungsgrad der Generatoren, Transformatoren und Leitungen, ausser von der Wattbelastung, noch vom Leistungsfaktor ab, was durch folgende einfache Ueberlegung erläutert werden kann: Bei gleichbleibendem Wattstrom bleiben auch die Wattstrom-Kupferverluste unverändert. Nimmt dabei der $\cos\varphi$ ab, so wachsen die Kupferverluste mit dem Quadrate des zunehmenden Blindstromes. Der Anstieg der totalen Kupferverluste geschieht proportional mit $\frac{1}{\cos^2\varphi}$. Nimmt man z. B. an, dass die Kupferverluste 100 % bei $\cos\varphi = 1$ betragen, so verdoppeln sie sich (bei gleicher Leistung und konstanter Spannung) schon bei $\cos\varphi = 0{,}707$ auf 200 % und bei $\cos\varphi = 0{,}5$ betragen sie das 4fache (Fig. 7). Ausserdem ist bei ungünstigem $\cos\varphi$ die Rückwirkung der Statorströme auf das induzierende Feld des Polrades grösser, so dass es notwendig wird, die

Generatoren bedeutend stärker zu erregen. Die Verstärkung des Erregerstromes hat eine weitere Verkleinerung des Wirkungsgrades zur Folge. Auch die Gefahr grösserer Kurzschlussströme und grösserer Abklingungszeiten dieser Ströme, eine Folge der verstärkten Erregung der Generatoren, darf nicht vernachlässigt werden.

Um das oben Gesagte anschaulicher zu machen, sei noch folgendes Beispiel angeführt: Eine Unternehmung, die jährlich ca. 350 Millionen kWh produziert, könnte durch Verbesserung des Leistungsfaktors von 0,65 auf 0,8 durch die dadurch erzielte Mehrausnützung und durch die Minderverluste, bei gleichem Installationswert und ohne mehr Wartung, mehrere 100 000 Franken pro Jahr gewinnen. Dies zeigt die grosse wirtschaftliche Bedeutung der Frage des Leistungsfaktors.

3. Spannungsregulierung. Ausser den im letzten Absatz erwähnten Nachteilen der Phasenverschiebung welche direkte Verluste zur Folge haben, gibt

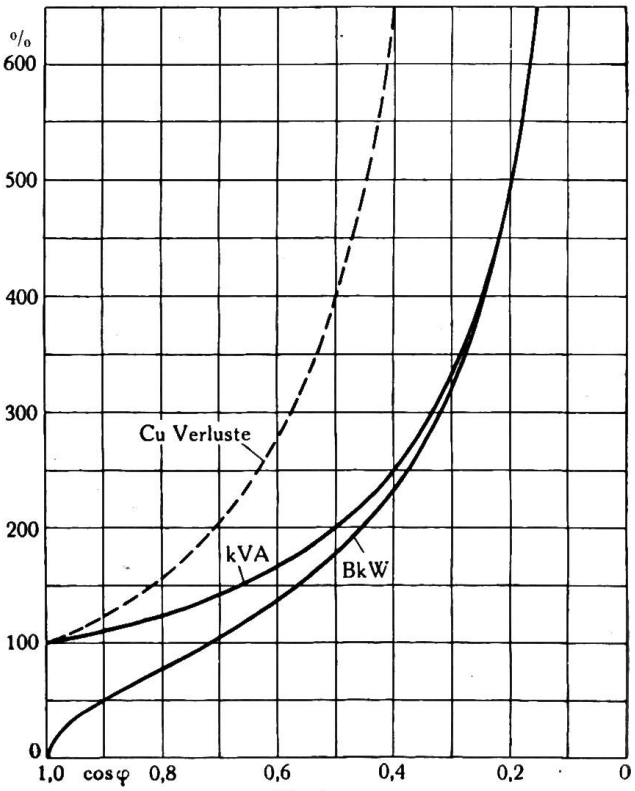

Fig. 7.
Einfluss des Leistungsfaktors auf die Scheinleistung, die Blindleistung und die Kupferverluste bei gleichbleibender Wattleistung und Spannung.
Bei cos $\varphi = 1$ betragen Cu-Verluste 100 %.
Blindleistung ist Null.
Scheinleistung = Wattleistung.

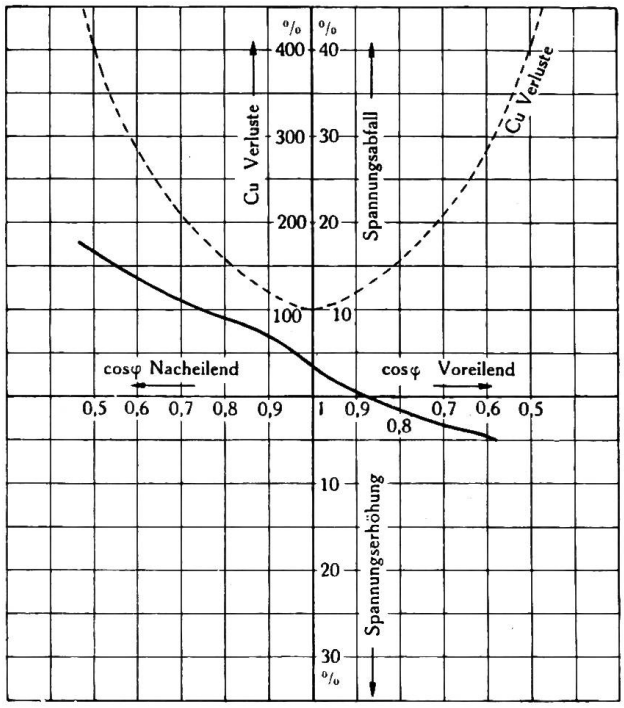

Fig. 8.
Einfluss des Leistungsfaktors auf Spannungsabfall einer 45 kV-Leitung von 46 km Länge bei Uebertragung von 15000 kW.
Drahtquerschnitt 95 mm² Cu.
Drahtabstand 1,2 m.
Reaktanz 0,36 Ohm/km und Phase.
Widerstand 0,185 Ohm/km und Phase.

es noch solche, welche in betriebstechnischer Hinsicht Schwierigkeiten bieten und mit mehr oder weniger grossen Unkosten verbunden sind. Das ist der Fall bei der Spannungsregulierung.

Betrachten wir (Fig. 8) z. B. den Spannungsabfall längs einer sehr günstigen 50 kV Leitung, welche 15000 kW bei variablem cos φ auf eine Entfernung von 46 km zu übertragen hat, so stellt sich folgendes heraus: Bei cos $\varphi = 1$ hat die Leitung ca. 3,5 % Spannungsabfall und bei cos $\varphi = 0,6$ beträgt dieser Abfall schon das 4fache, d. h. 14 %. Rechnet man noch die Vergrösserung des Spannungsabfalles in den Auf- und Abtransformatoren hinzu, so wird oft der letztgenannte Prozentsatz verdoppelt. Auch der Spannungsabfall in den Generatoren zwischen Leerlauf und Vollast bei grosser nacheilender Phasenverschiebung kann bedeutende Werte erreichen. Sollten alle Spannungsverluste einer Fernübertragung durch die Generatoren des Kraftwerkes gedeckt werden, so müssen

diese für einen sehr grossen Regulierbereich vorgesehen werden, was wirtschaftlich meistens nicht sehr erwünscht ist. Bei normal gebauten Generatoren und Erregermaschinen kann, bei sehr ungünstigem cos φ, die Erregerleistung bezw. Polwicklung nicht mehr stark genug sein, um die Spannung des Normalbetriebes aufrecht zu erhalten. Aus allen diesen Gründen können die Spannungsschwankungen bei starken Belastungsänderungen unzulässige Werte erreichen. Infolgedessen wird es öfter notwendig, die Spannungsregulierung in Haupt-Unterwerken des Netzes, mittels Induktionsreglern oder Synchronmaschinen, vorzunehmen.

Es ist noch erwähnenswert, dass auch zu grosse kapazitive Phasenverschiebung unter Umständen in bezug auf Spannungsregulierung bedeutende Schwierigkeiten bietet: Wegen der Ladeströme langer leerlaufender Hochspannungsleitungen kann die Spannung am Ende der Leitung viel höher sein, als am Anfang.

III. Prozentualer Einfluss der Leitungen, Transformatoren und Motoren auf den Leistungsfaktor in schweizerischen Anlagen.

An der Verschlechterung des Leistungsfaktors sind, wie soeben besprochen wurde, mehrere Anlageteile beteiligt. Um zu erkennen, wie man diese Verhältnisse in einer Anlage verbessern kann, sollte man die Wichtigkeit der einzelnen Ursachen auf den gesamten Fehler genau kennen. Nur dann wird man wissen, welche Mittel man zur Verbesserung in den einzelnen Fällen mit Vorteil anwenden und welche Verbesserung auf das betreffende Speisezentrum sofort oder nach einer Reihe von Jahren erzielt werden kann. Obwohl diese Forderung eine sehr natürliche ist, so war es mir nicht möglich, darüber etwas zu finden oder zu erhalten. Ich habe mir daher die Aufgabe gestellt, diese prozentuale Verteilung der Blindleistung auf Leitungen, Transformatoren und Motoren für einige typische Fälle zu untersuchen. Diese Untersuchung ist einmal für die Verteilungsnetze, von welchen alle dazu nötigen Unter-

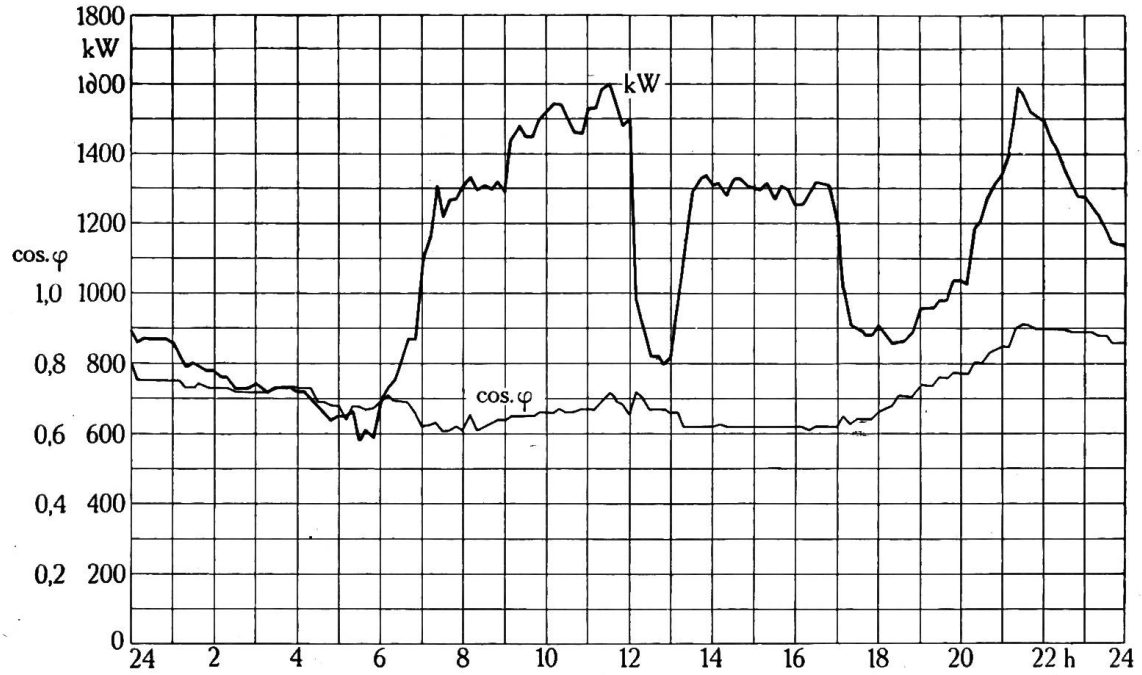

Fig. 9. Diagramm der Tagesbelastung in einem Teil des Elektrizitätswerkes der Stadt Aarau, vom Donnerstag, den 22. Mai 1924. Unkompensiertes Stadtnetz.

lagen vorhanden waren, durchgeführt worden. Daran anschliessend ist dann noch eine zweite Untersuchung auf Grund der Geschäftsberichte mehrerer grossen Elektrizitätswerke gemacht worden. Diese Berichte gaben allerdings zu diesem Zweck

oft etwas ungenügende Unterlagen. Die Resultate der Auswertung dieser Unterlagen sind aber für eine allgemeine Uebersicht sehr interessant; die erhaltenen Ergebnisse dürften sich mit der Wirklichkeit gut decken. Die Untersuchung erfolgte für Netzteile bezw. ganze Netze mit nur städtischem, nur landwirtschaftlichem, nur industriellem und gemischtem Charakter.

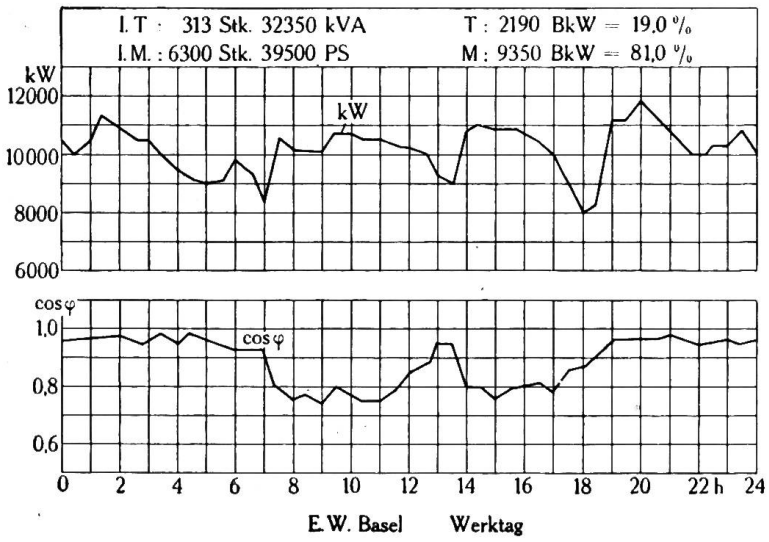

Fig. 10.
Diagramm der Tagesbelastung der Stadt Basel vom Donnerstag, 13. März 1924.
Mittels Synchronmotoren kompensiertes Stadtnetz.
Abkürzungen: I = Installierte: T = Transformatoren, M = Motoren.

Bevor ich die Ergebnisse dieser Untersuchung anführe, scheint es mir von Interesse zu sein, einige typische Diagramme der Tagesbelastung hier wiederzugeben, die die heutigen Verhältnisse schweizerischer Werke zeigen.

In der Fig. 9 ist der Verlauf der Belastung und des Leistungsfaktors während eines Werktages im einen Teil des Elektrizitätswerkes der Stadt Aarau (am 22. Mai 1924) dargestellt. Das ist ein Beispiel eines städtischen Netzes, welches ohne Kompensationsvorrichtungen arbeitet. Während der Arbeitszeit schwankt der Leistungsfaktor zwischen 0,62 ÷ 0,65 und nur gegen Mittag, dank den Kochapparaten, erreicht er den Wert 0,72. Abends steigt der Leistungsfaktor wegen der Beleuchtung bis auf 0,9 und sinkt dann während der ganzen Nacht allmählich bis auf 0,7. Charakteristisch ist es, dass der cos φ zur Zeit der Tagesbelastung am tiefsten steht.

In einer grösseren Stadt ist das Bild prinzipiell ähnlich, was z. B. aus dem Tagesdiagramm der Stadt Basel für einen normalen Werktag hervorgeht (Fig. 10).

Für dieses Bild ist folgendes zu bemerken: Tagsüber ist das Netz durch die auf cos φ = 0,8 voreilend erregten Synchronmotoren der Umformerstationen kompensiert. Die Kompensationswirkung des Kabelnetzes (ca. 150 km 6000 V Kabel) beträgt ca. 5,5 % der totalen Blindleistung der Belastung. Trotz dieser Kompensierung sinkt auch hier der cos φ während der Arbeitszeit noch auf 0,75 – 0,8. Es stellt dieses Beispiel aber ein seltenes und gutes Resultat dar. Interessant ist die Abgabe von Nachtenergie als Abfallenergie und für Warmwasserspeicher und Raumheizung unter Verwendung von Spezialtarifen.

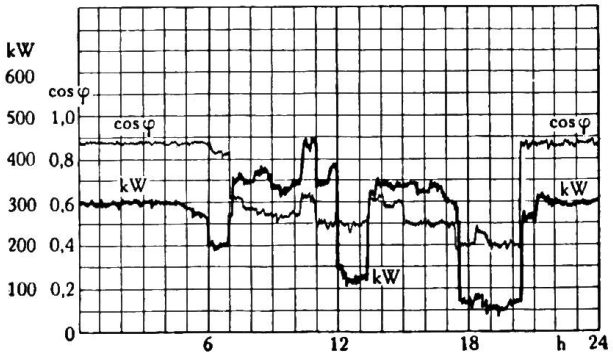

Fig. 11.
Werktagsdiagramm einer Fabrikanlage.
Mittlerer cos φ = 0,67, da dank der Heizkörper und Boiler der Leistungsfaktor nachtsüber 0,88 beträgt.

Die Fig. 11 und 12 sollen die Verhältnisse in Industrienetzen zeigen. Die beiden Bilder zeigen, wie tief (0,4 – 0,65) der Leistungsfaktor tagsüber steht; dagegen erreicht er in der Nacht, wegen grossen thermischen Anlagen, den Wert 0,9 ÷ 0,97.

Der mittlere Leistungsfaktor für den in Fig. 12 dargestellten Fall beträgt 0,83, so dass, im Falle einer Blindleistungsverrechnung auf Grund dieses Wertes und einem vertraglichen Leistungsfaktor von 0,8, die Fabrik keinen Zuschlag für den exzessiven

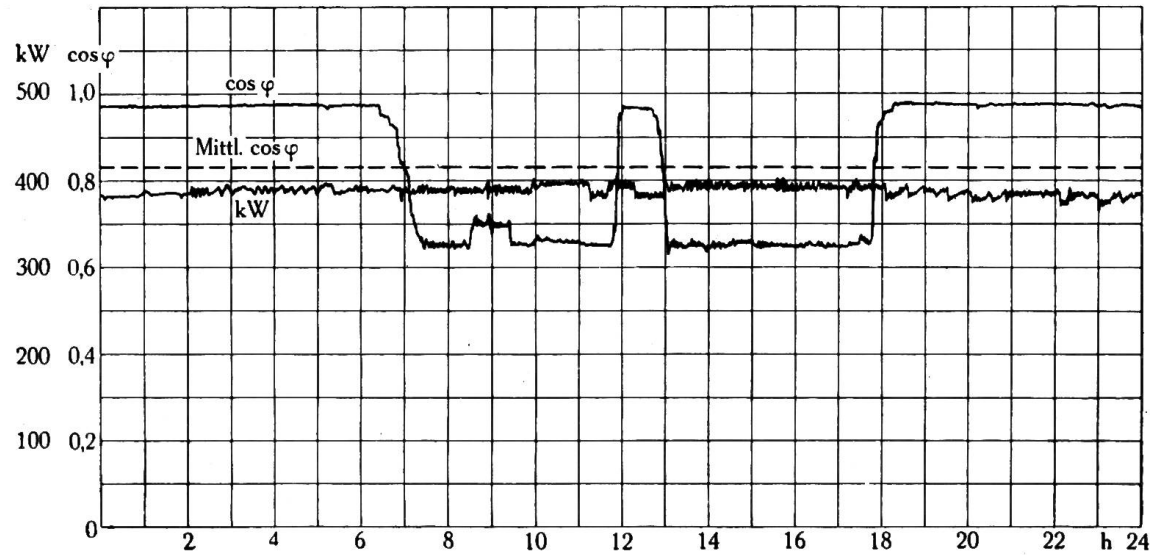

Fig. 12. Werktagsdiagramm eines grösseren Fabrikunternehmens.
Wegen der Heizkörper und Boiler ist der Leistungsfaktor nachtsüber und über die Mittagspause = 0,98.
Mittlerer Leistungsfaktor 0,827.

Tagesblindverbrauch zahlen müsste. Würden die Stromlieferungsbedingungen noch eine Preisermässigung vorsehen für Stromverbraucher, welche mit einem mittleren

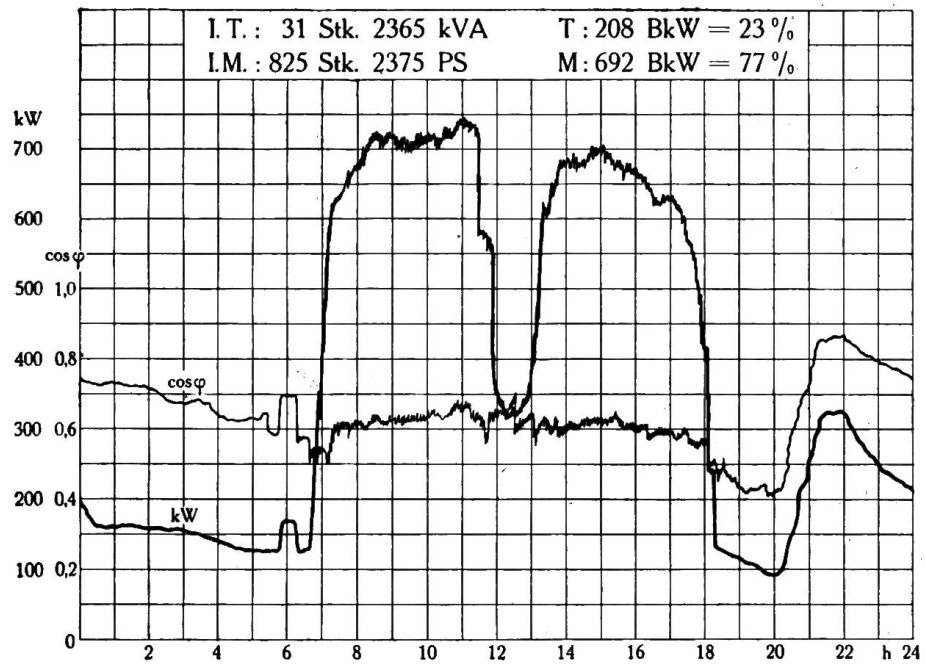

Fig. 13. Diagramm der Tagesbelastung eines gemischten Netzes:
Leitungen Ober- und Unter-Wädenswil, 8000 Volt, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (Donnerstag, 22. Mai 1924).
Der Leistungsfaktor während der Arbeitszeit ist tiefer als in der Nacht (ziemlich viel Beleuchtung).

Leistungsfaktor über 0,8 arbeiten, so müsste diese Fabrikunternehmung auch noch auf die Tagesenergie einen Rabatt bekommen, d. h. noch eine Prämie für ungünstigen Blindleistungsverbrauch während den höchsten Leistungsspitzen. Dieses Beispiel zeigt,

dass hier mit dem gewöhnlichen Tarif nicht das erreicht wird, was eigentlich beabsichtigt ist und dass auch für den Blindverbrauch ein Staffeltarif nötig wäre, um das Ziel zu erreichen.

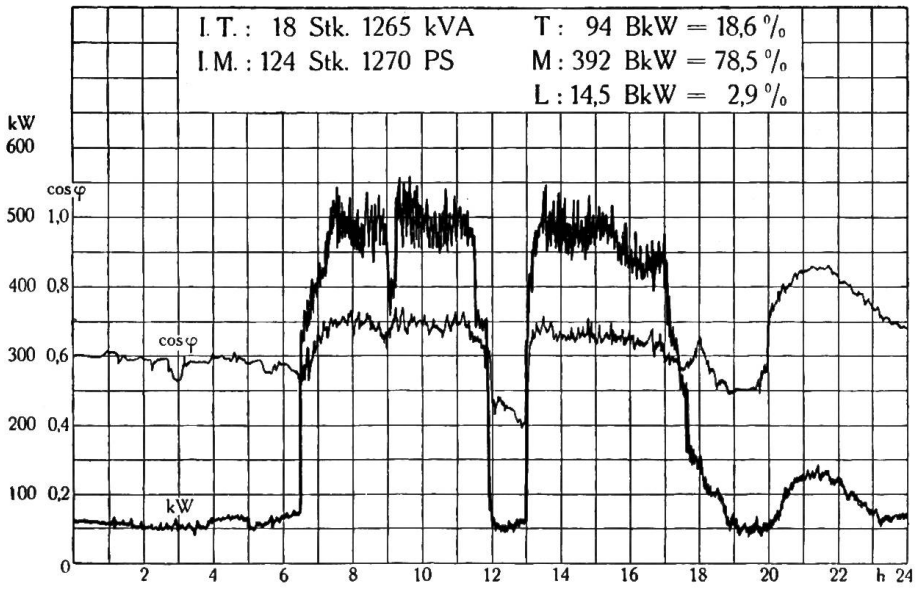

Fig. 14. Diagramm der Tagesbelastung eines gemischten Netzes:
Leitung Safenwil, 8000 Volt, Kraftwerk Olten-Gösgen (22. Mai 1924).
Nachtsüber steht der Leistungsfaktor noch tiefer als während der Tageszeit (wenig Beleuchtung).

In den Fig. 13 und 14 sind noch zwei Beispiele der Tagesdiagramme zweier gemischter Netze angeführt (Fig. 13 Leitungen Ober- und Unter-Wädenswil, Fig. 14 Leitung Safenwil). Ein prinzipieller Unterschied zwischen den beiden Diagrammen

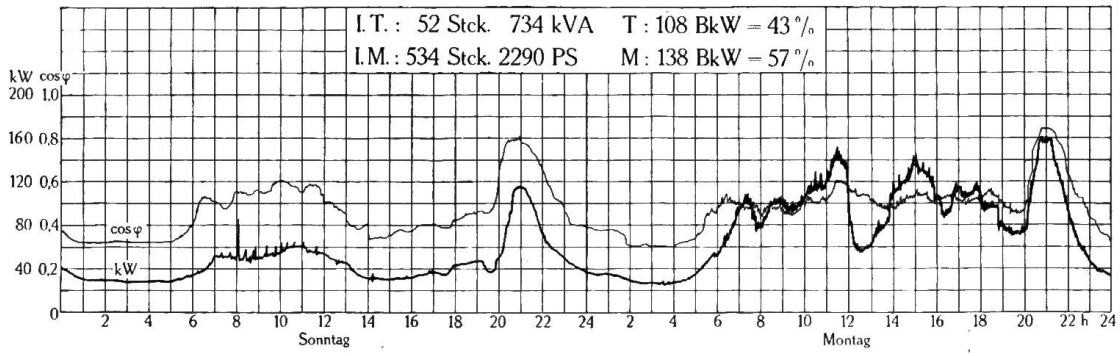

Fig. 15. Verlauf der Belastung und des Leistungsfaktors am Sonntag und Montag in einem rein landwirtschaftl. Betrieb:
Leitung „Dinhard", 8000 Volt, Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (18. und 19. Mai 1924).
Für landwirtschaftliche Netze ist charakteristisch, dass Motorenbetrieb den Leistungsfaktor bedeutend verbessert.
In der Nacht erreicht er den Wert 0,3 bis 0,4. Am Tag sehr unregelmässige Belastung.

besteht nur während der Nachtzeit. Im ersten Bild ist der Leistungsfaktor (ziemlich viel Beleuchtung) höher als während der Arbeitszeit, im zweiten Bild (weniger Beleuchtung) sind die Verhältnisse umgekehrt, der Motorbetrieb verbessert noch den cos φ!

Viel ungünstiger liegen die Verhältnisse bei landwirtschaftlichen Netzen, wo die Belastung im allgemeinen nur einen sehr kleinen Prozentsatz der installierten Leistung beträgt. Dies ist aus dem Diagramm Fig. 15 ersichtlich, welches einem rein landwirtschaftlichen Betrieb (Leitung „Dinhard", E. K. Z.) entspricht.

Nimmt man nun an, dass mit Ausnahme der Stadt Basel alle angeführten Beispiele der verschiedenen Netze durch ein Grosskraftwerk gespeist werden und dass

sie ihre Energie mittels einer gemeinsamen Hochspannungsleitung beziehen, so bekommt man für diese Leitung auf der Generatorseite im Kraftwerk ein Tages-

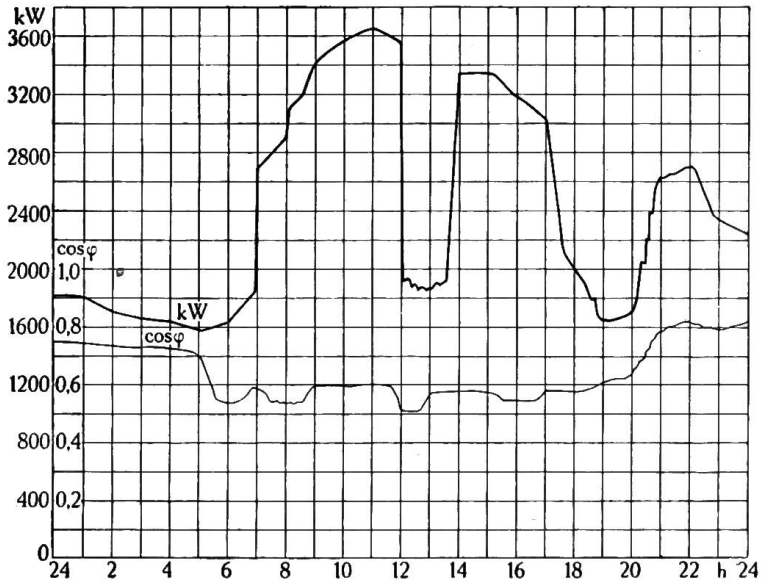

Fig. 16.
Summeneinfluss auf Grosskraftwerke:
Diagramm der Tagesbelastung einer hypothetischen Hochspannungsleitung.
Summe der Diagramme 9 und 11—15.
Tagsüber sehr schlechter Leistungsfaktor (0,5—0,6) und folglich sind Ausnützung und Wirkungsgrad der Anlage schlecht.

diagramm, welches ungefähr wie das Diagramm der Fig. 16 aussehen wird. Dieses Bild zeigt aber, dass der Leistungsfaktor einer solchen Leitung wegen der Hoch-

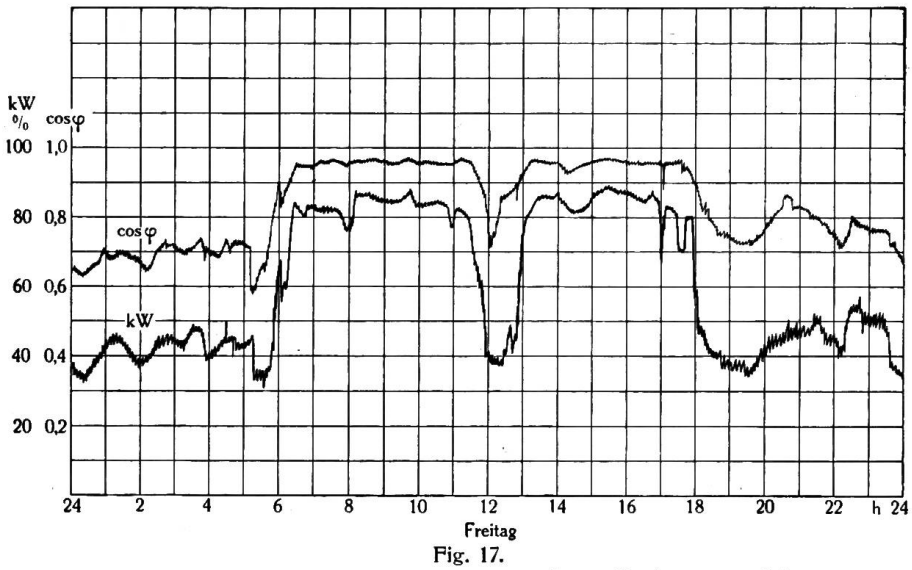

Fig. 17.
Diagramm der Tagesbelastung einer kompensierten Hochspannungsleitung.
Tagsüber ist die Leitung kompensiert auf cos φ = 0,95 und kann deswegen voll ausgenützt werden.

spannungs-Auf- und -Abtransformatoren noch ungünstiger ist und dass er während der Tageszeit zwischen 0,5 ÷ 0,6 schwankt. Die Ausnützung der Anlage ist in solchen Verhältnissen um 25 bis 37 % schlechter als bei cos φ = 0,8 und um 37 bis 47 % als bei cos φ = 0,95 (d. h. bei einer Kompensierung, die wirtschaftlich möglich ist)

und ihr Wirkungsgrad um mehrere Einheiten tiefer als bei oben genannten Leistungsfaktoren. Eine zielbewusste Kompensierung bietet in solchen Fällen sichere und grosse wirtschaftliche Vorteile; als Beispiel dafür sei auf Fig. 17 hingewiesen, welche das Belastungsdiagramm einer kompensierten, vollausgenützten „Export"-Leitung wiedergibt.

Ein Teil der oben angeführten Diagramme wurde mit Hilfe eines registrierenden Drehstromphasenmeters der Firma Trüb-Täuber aufgenommen. Ich spreche an dieser Stelle der Firma Trüb-Täuber für die leihweise Ueberlassung dieses Instrumentes noch meinen Dank aus. Dieses Instrument ist für unsymmetrisch belasteten Drehstrom gebaut und seine Genauigkeit ist, wie man aus der Eichkurve der Fig. 18 ersehen kann, sogar bei grossen Unsymmetrien eine sehr gute.

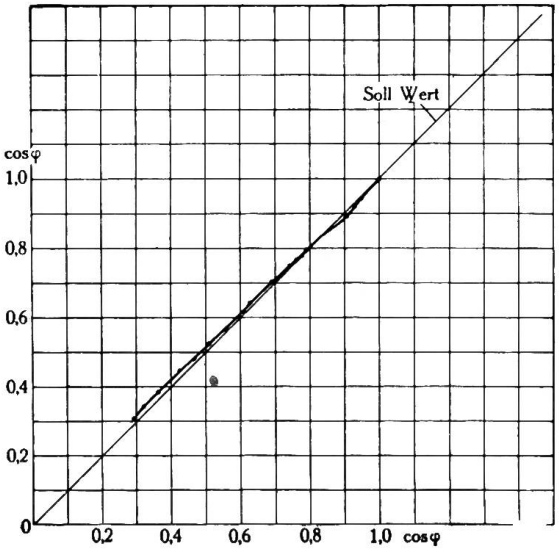

Fig. 18.
Eichkurve eines registrierenden Phasenmeters für unsymmetrischen Drehstrom.
Fabrikat Trüb-Täuber, Zürich.
(Abszissen: cos φ abgelesen.)
(Ordinaten: cos φ im Netz.)

Fig. 19[1]) zeigt ein, durch einen registrierenden Blindleistungsmesser „Maxigraph" (Fabrikat Landis & Gyr), direkt aufgenommenes Diagramm des Blindleistungsverbrauches an der Leitung „Dinhard" (Elektrizitätswerke des Kantons Zürich). Die stark ausgezogene Kurve, welche aus einem anderen gleichzeitig aufgenommenen Registrierstreifen entnommen ist, stellt den Leistungsverbrauch (kW) dar. Die Registrierung des Blindverbrauches geschieht in diesem Instrument mittels Aufzeichnung einer gewissen Anzahl Ordinaten pro Stunde. Dies wird mit Hilfe eines mit Schreibvorrichtung ausgerüsteten Klettermechanismus, welcher alle 10 Minuten in Bewegung gesetzt wird, ausgeführt.

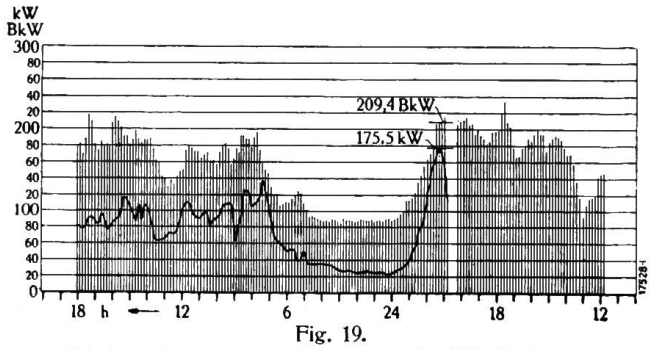

Fig. 19.
Direkt aufgenommenes Diagramm der Blindbelastung mittels „Maxigraph" (Fabrikat Landis & Gyr A.-G., Zug).
Leitung „Dinhard", 8000 V, Elektrizitätswerke des Kt. Zürich.
Dickgezeichnete Kurve ist aus einem anderen Registrierstreifen entnommen und stellt die Wattbelastung dar. Die Blindbelastung ist durch einzelne Ordinaten registriert.

Ein ähnliches Diagramm zeigt Fig. 20[1]), das im Unterwerk Mattenbach (Elektrizitätswerke des Kantons Zürich) an der ankommenden Hochspannungsleitung aufgenommen wurde. Wie ich bereits erwähnt habe, vereinfacht diese direkte Messung der Blindleistung in einzelnen Netzteilen die Ausrechnung des gemeinsamen Leistungsfaktors bedeutend und gibt für eine richtige Verrechnung des Blindverbrauches allein die nötigen Anhaltspunkte.

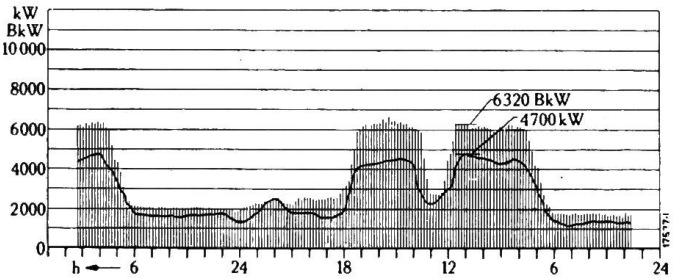

Fig. 20.
Direkt aufgenommenes Diagramm der Blindbelastung mittels „Maxigraph" (Fabrikat Landis & Gyr A.-G., Zug).
Unterwerk Mattenbach, 45 kV, Elektrizitätswerke des Kt. Zürich.

Nach dieser allgemeinen Orientierung über die heutigen Verhält-

[1]) Diese Figuren, welche mit einem Versuchsapparat aufgenommen wurden, hat mir in entgegenkommender Weise Herr Direktor Gysel überlassen.

nisse in einigen charakteristischen Netzen gehe ich über auf die prozentuale Verteilung der Blindleistung auf Transformatoren, Leitungen und Motoren.

Für die Netzteile für welche die Anzahl der Motoren und Transformatoren und ihre Einzelleistungen, die Daten der Leitung und die Verteilung der einzelnen Objekte

Prozentuale Verteilung des Blindleistungsverbrauches auf Leitungen, Motoren und Transformatoren nach Messresultaten. Tabelle I.

Leitung	Betrieb	Freileitungen %	Motoren %	Transformer %	cos φ
„Rankwage", Olten-Gösgen, 8000 V .	gemischt, Landw., Fabriken . . .	6,8	75,2	18,0	0,61
„Schönenwerd", Olten-Gösgen, 8000 V	gemischt, vorwiegend Industrie .	82,5		17,5	0,67
"Safenwil", Olten-Gösgen, 8000 V . .	gemischt, Industrie	2,9	78,5	18,6	0,7
„Wädenswil", E. K. Z., 8000 V . . .	kleine Fabriken, Stadt Wädenswil	77,0		23,0	0,62
„Dinhard", E. K. Z., 8000 V	Landwirtschaft .	57,0		43,0	0,52
„Fürstenland", St. G. A. K. W., 10 000 V	Landwirtsch. 40% Kleingewb. 60%	4,5	70,5	25,0	0,68
„Feuertalen-Stein-Gaienhofen", Kanton Schaffhausen, 10 000 V	gemischt, vorw. Landwirtschaft .	73,0		27,0	0,715
Fabrikanlage	Fabrik	84,0		16,0	0,57

im Netz, ebenso wie die totalen max. Belastungsverhältnisse bekannt waren, ergaben die Auswertungen die in der Tabelle I zusammengestellten prozentualen Verteilungen

Prozentuale Verteilung des Blindleistungsverbrauches auf Motoren und Transformatoren nach Angaben der E. W. und Geschäftsberichte. Tabelle III.

Netz	Betrieb	Transformatoren %	Motoren %
E. W. Basel [1]	Städtisches Netz	19	81
E. W. Aarau	Städtisches Netz	20	80
E. W. Baden	Städtisches Netz (mit BBC) . .	23	77
E. W. Interlaken	–	**36** – 26 – 22	**64** – 74 – 78 [3]
E. W. Genf	Städtisches Netz	**57** – 45 – 40	**43** – 55 – 60 [3]
E. W. Elektra Birseck	–	**22** – 16 – 13	**78** – 84 – 87 [3]
E. K. Z. [2]	–	**24** – 17 – 14	**76** – 83 – 86 [3]
Entreprises Electriques Fribourgeoises . .	ca. 33% Landwirtschaft . .	**52** – 40,5 – 35	**48** – 59,5 – 65 [3]
E. W. Bern	Städtisches Netz	**25** – 17 – 14	**75** – 83 – 86 [3]

[1] Das Kabelnetz der Stadt Basel kompensiert ca. 5 bis 6% der Blindleistung der Belastung.
[2] Die Auftransformatoren des liefernden Werkes (NOK) eingerechnet.
[3] Unter Annahme, dass 50%—80%—100% aller Motoren gleichzeitig im Betrieb sind und zwar mit 3/4 Last.

des Blindleistungsverbrauches. Die Tabelle II enthält einige Angaben über die Anschlusswerte bezw. max. Belastung der gemessenen Netzteile. Da der Leistungsfaktor gerade in der Zeit der Höchstbelastung wegen der möglichst grössten Aus-

Installierte Leistung der Motoren und Transformatoren nach direkten Angaben der Elektrizitätswerke. Tabelle II.

Netz	Betrieb	Spitzenbelastung	Ab-Transformatoren											Motoren								Entnommen aus:
			Total		Ueber 100 kVA			21÷99 kVA			Unter 20 kVA			Total		Ueber 15 PS			Unter 15 PS			
		kW	Stück	Σ Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Mittlere Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Mittlere Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Mittlere Leistung kVA	Stück	Σ Leistung PS	Stück	Σ Leistung PS	Mittlere Leistung PS	Stück	Σ Leistung PS	Mittlere Leistung PS	
„Rankwage", Olten-Gösgen, 8000 V	gemischt, Landwirtschaft, Fabriken, St. Olten	2800	121	8817	29	4615	159	73	3920	54	19	282	14,8	2300	7734	108	3968	37	2192	3766	1,71	Angaben von Olten-Aarbg. v. 30. Mai 1924
„Schönenwerd", Olten-Gösgen, 8000 V	gemischt, vorwiegend Industrie	750	22	2260	13	1780	138	9	480	53,4		keine		514	2511	35	642	18,0	479	1869	3,9	Angaben von Olten-Aarbg. v. 30. Mai 1924
„Safenwil", Olten-Gösgen, 8000 V	gemischt, Industrie	500	18	1265	6	800	133	5	350	70	7	115	16,5	124	1270	16	824	51,5	108	446	4,1	Angaben von Olten-Aarbg. v. 30. Mai 1924
„Wädenswil", E. K. Z., 8000 V	Industrie, St. Wädenswil	725	31	2365	6	925	153	20	1350	67,75	5	90	18	825	2375	17	647	38,0	808	1728	2,14	Brief der E. K. Z. vom 4. Juni 1924
„Dinhard", E.K.Z.	Landwirtschaft	140	52	734		keine		11	425	38,6	41	309	7,6	534	2291	5	120	24	529	2171	4,1	Brief der E. K. Z. vom 4. Juni 1924
„Fürstenland", St. G. A. K. W., 10000 V	Landwirtsch. 40 % Kleingewerbe 60 %	660	60	1608				Mittlere Leistung: 26,8 kVA [1]						794	1859	5	95	19	789	1764	2,24	Brief d. St. G. A. K. W. vom 7. Juni 1924
„Feuertalen", E. W. Kt. Schaffhausen, 10000 V	gemischt, vorwiegend Landwirtschaft	644	42	1738	4	655	163	16	775	48	22	308	14	690	2527	10	390	39	680	2137	3,14	Brief d. E. W. Kt. Schaffh. v. 3. Juni 1924
Fabrikanlage	Fabrik	450	9	1450	6	1100	183		keine		4	60	15	334	2100	37	855	23	297	1245	4,2	—

[1]) Genaue Angaben fehlen.

nützbarkeit der Anlagen von Bedeutung ist, beziehen sich im folgenden alle Angaben über prozentuale Verteilung auf diese Belastung.

Die Resultate, die aus den Jahresberichten der verschiedenen Werke errechnet wurden, ergaben je nach den Annahmen stark voneinander abweichende Verhältnisse. Die Tabelle III, welche diesbezügliche Zahlen enthält, muss kurz erläutert werden. Die Verhältnisse in den städtischen Netzen der Elektrizitätswerke in Basel, Aarau und Baden konnten, weil alle Unterlagen vorhanden, ziemlich genau bestimmt werden. Da der Leistungsfaktor der übrigen Netze bei Höchstbelastung unbekannt war, sind zur Bestimmung der prozentualen Verteilung des Blindverbrauches der Motoren und Transformatoren die drei nachstehenden Annahmen gemacht worden: Der Blindverbrauch der Motoren ist unter der Annahme, dass 50, 80 und 100 % aller Motoren gleichzeitig in Betrieb sind und zwar jeweils mit $^3/_4$ Belastung, bestimmt worden. Deswegen findet man in der Tabelle III drei verschiedene Zahlen. Wie aus nachstehender Untersuchung hervorgeht, ist die erste Annahme, d. h. dass höchstens 50 %

Installierte Leistung der Motoren und Transformatoren nach Angaben der Elektrizitätswerke und Geschäftsberichte. Tabelle IV.

Netz	Spitzenbelastung	Transformatoren																Motoren								Entnommen aus:
		Total		Auf-Transformat.			Ab-Transformatoren											Total		Ueber 15 PS			Unter 15 PS			
							Total		Ueber 100 kVA			21÷99 kAV			Unter 20 kVA											
	kW	Stück	Σ Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Mittlere Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Mittlere Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Mittlere Leistung kVA	Stück	Σ Leistung kVA	Mittlere Leistung kVA	Stück	Σ Leistung PS	Stück	Σ Leistung PS	Mittlere Leistung PS	Stück	Σ Leistung PS	Mittlere Leistung PS	
E. W. Basel	11000	313	32350	keine			313	32350	134	27400	205	109	4550	42	70	250	3,6	6330	39500	330	19000	58,0	6000	20500	3,4	Brief des E. W. Basel v. 6. Juni 1924
E. W. Aarau	9060	260	16200	keine			260	16200	Mittlere Leistung: = 62,5 kVA									2001	8533	10	1688	168,8	1991	6845	3,4	Brief des E. W. Aarau v 27. Mai 1924
E. W. Baden	2750	195	9220	keine			195	9220	21	3300	158	113	5512	49	61	408	6,7	2035	12961	178	4658	26,0	1857	8303	4,45	Brief des E. W. Baden v. 27. Mai 1924
E. W. Interlaken	767	61	2030	keine			61	2030	1	344	344	34	1460	41	26	226	8,7	192	1120	Mittlere Leistung: 5,9 PS [1]						Geschäftsbericht über das Betriebsjahr 1922
E. W. Genf	16000	4362	68057	16	35100	2200	4346	32957	447 Stck., 27466 kVA, 61,5 kVA mittel						3899	5491	1,4	2537	14546	51	4086	80,0	2486	10460	4,2	Geschäftsbericht über das Betriebsjahr 1922
E. W. Elektra-Birseck	5200	200	14732	keine			200	14732	Mittlere Leistung: 74 kVA [1]									3355	13421	3	340	113	3352	13081	4,1	Geschäftsbericht über das Betriebsjahr 1922
E. K. Z.	36000	(1)	(1)	(43000 NOK) [1]			1142	99700	Mittlere Leistung: 87 kVA [1]									17753	125000	Mittlere Leistung: 7,1 PS [1]						Geschäftsbericht über das Betr'jahr 1920 u. 1921
Entr. Electr. Fribourgeoises (E. E. F.)	(1)	ca. 2200	94000	ca. 39000 [2]			2124	50730	203	35000	172	217	9500	43,6	1704	6230	3,65	4368	18160	Mittlere Leistung: 4,15 PS [1]						Geschäftsbericht über das Betriebsjahr 1921
E. W. Bern	11000	302	18377	keine			302	18377	27	7800	260	193	10154	52,5	82	1143	14	3555	14200	30	1590	53	3525	12610	3,6	Brief vom 8. Juli 1924 u. Geschäftsbericht 1922

[1]) Genaue Angaben fehlen.
[2]) Berechnet auf Grund der Generatorenleistung.

aller installierten Motoren mit $^3/_4$ Last gleichzeitig in Betrieb sind, die wahrscheinlichste und die errechneten Werte sind in der Tabelle durch fette Ziffern hervorgehoben. Rechnet man unter diesen Annahmen den Leistungsverbrauch der Motoren aus, so bekommt man die Zahlen der Tabelle V. Die Betrachtung des

Leistungsverbrauch der Motoren unter Annahme, dass 25 %–50 %–80 %–100 % der Gesamtzahl gleichzeitig im Betrieb sind und zwar jeweils mit $^3/_4$ Last. Tabelle V.

Netz	Vorgekommene höchste Netzbelastung (Winterspitze) kW	Berechneter Leistungsverbrauch in kW bei 25 % aller Motoren gleichzeitig im Betrieb mit $^3/_4$ Last	50	80	100
E. W. Interlaken	767	191	**382**	610	765
E. W. Genf	16 000	2 450	**4 900**	7 800	9 800
E. W. Elektra Birseck . . .	5 200	**2 312**	4 625	7 400	9 250
E. W. des Kantons Zürich .	36 000	**21 000**	42 000	67 500	84 000
E. W. Bern	11 000	2 438	**4 875**	7 800	9 750

Diagrammes des Tages höchster Belastung und der Vergleich der Spitzenleistungen dieser Netze mit berechneten Leistungsaufnahmen der Motoren ergibt, dass am wahrscheinlichsten nur 50 bezw. 25 % aller Motoren im Betrieb sind. Uebrigens, wenn man in den obigen Annahmen $^3/_4$ Last durch Halblast ersetzt, so bekommt man für prozentuale Verteilung des Blindverbrauches ziemlich ähnliche Resultate, wie die der Tabelle III. Einen Ueberblick über die Anschlusswerte und Spitzenleistungen aller in dieser letzteren Tabelle enthaltenen Netze gibt die Tabelle IV.

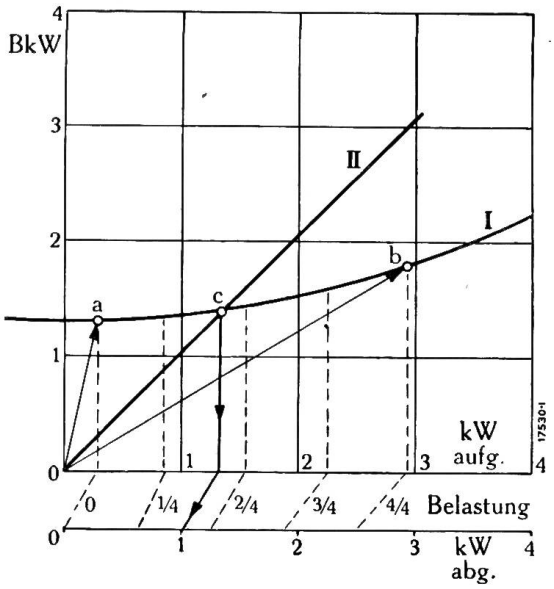

Fig. 21.
Vereinfachtes Kreisdiagramm eines 4 poligen 2,5 kW Kurzschlussmotors (mittlere Leistung der installierten Motoren an der Leitung „Rankwage").
I Belastungskreis des Motors:
a = Leerlaufpunkt;
b = Normallastpunkt.
II Gerade mit Neigung = $= \frac{\text{Motorenblindbelastung}}{\text{Motorenwattbelastung}}$ des Netzes.
c = gesuchter Belastungspunkt.

Es hat mich interessiert, die Anzahl und die Belastung der Motoren, die sich gleichzeitig in den gemessenen Netzteilen im Betrieb befanden, zu bestimmen. Dazu wurde ein einfaches Verfahren verwendet, welches allerdings keinen Anspruch auf Genauigkeit machen kann, da man dabei mit mittlerer Leistung der angeschlossenen Motoren rechnen muss. Es verschafft jedoch einen Anhaltspunkt in dieser Frage. Ein Beispiel soll dieses Verfahren erläutern.

Aus der Spitzenbelastung (2800 kW) der Leitung „Rankwage" wurden 100 kW (ca. 3,6 %) für Transformatoren- und Leitungsverluste abgezogen. Da die Spitzenbelastung um 3 Uhr nachmittags gemessen wurde, darf man annehmen, dass die übrigen 2700 kW hauptsächlich für Motorenbetrieb verwendet worden sind. Aus dem totalen Blindleistungsverbrauch ergibt sich, nach Abzug des Blindleistungsverbrauches der Transformatoren und der Leitung, der Motorenblindverbrauch zu 2800 BkW. Die mittlere Leistung der angeschlossenen Motoren bekommt man, indem man ihre Summenleistung von 5700 kW durch ihre Anzahl (2300 Stück) dividiert: $\frac{5700 \text{ kW}}{2300} = 2{,}5$ kW.

Den weiteren Rechnungen liegt die Annahme zugrunde, dass man es mit 4poligen Kurzschlussmotoren dieser Leistung zu tun hat. In Fig. 21 ist ein vereinfachtes Kreisdiagramm, in welchem die Ordinaten die Blindkilowatt und die Abszissen die aufgenommenen Kilowatt bezeichnen, für Motoren dieses Typus angegeben. Zeichnet man nun eine Gerade, deren Neigung dem Verhältnis $\frac{2800 \text{ BkW}}{2700 \text{ kW}} = 1{,}036$ gleich ist, so bestimmt ihr Schnittpunkt mit dem Kreis die gesuchte Leistungsaufnahme und den Blindverbrauch eines Motors. Durch den Uebergang zu der unteren Abszissenachse, auf der die abgegebenen kW dargestellt sind, bekommt man die Belastung eines Motors. Dieses graphische Verfahren ergibt für die Leitung „Rankwage" einen Verbrauch von 1,4 BkW und 1,35 kW pro Motor, bei einer Leistungsabgabe von ca. 1 kW. Die Anzahl der im Betrieb befindlichen Motoren ist somit $\frac{2800}{1{,}4} = \frac{2700}{1{,}35} = 2000$ Stück, d. h. 87 % aller Motoren, und ihre durchschnittliche Belastung beträgt $\frac{1{,}0 \text{ kW}}{2{,}5 \text{ kW}} \cdot 100 = 40$ %. Die Ergebnisse solcher Berechnungen für die Anlageteile der Tabelle I sind in der Tabelle VI zusammengestellt.

Annähernd prozentuale Anzahl der gleichzeitig im Betrieb befindlichen Motoren und deren Belastung.

Tabelle VI.

Leitung	Betrieb	Anschlusswert			Motoren gleichzeitig in Betrieb Drehzahl 1500 %	Belastung der Motoren %
		Anzahl Motoren	Summen Leistung kW	Mittlere mot. Leistg. kW		
„Rankwage", Olten-Gösgen, 8000 V	gemischt, Landw., Fabr., Stadt Olten	2300	5700	2,5	87	40
„Schönenwerd", Olten-Gösgen, 8000 V	gemischt, vorwiegend Industrie .	514	1850	3,6	69	46
„Safenwil", Olten-Gösgen, 8000 V	gemischt, Industrie	224	935	7,5	68,5[1])	35[1])
„Wädenswil", E.K.Z., 8000 V	kleine Fabriken, Stadt Wädenswil	825	1745	2,1	64,8	47,8
„Dinhard", E. K. Z., 8000 V	Landwirtschaft .	534	1662	3	17	33,3
„Fürstenland", St. G. A. K. W., 10000 V	Landwirtsch. 40 % Kleingewb. 60 %	794	1360	1,75	60,6	65,8
„Feuertalen", E. W. Kant. Schaffhausen, 10000 V .	vorwieg. Landwirtschaft . . .	690	1860	2,7	56,5	43,4
Fabrikanlage, 4000 V . .	Industrie . . .	334	1549	4,65	52,4	34,4

[1]) Motordrehzahl 1000 T/min.

Die Zahlen dieser Tabellen lassen etwa folgendes erkennen:

Der Blindleistungsverbrauch in den Leitungen bildet in den meisten Fällen nur einen unbedeutenden Prozentsatz der gesamten Blindleistung.

Für städtische Werke und Werke mit stark gemischtem Betrieb ist der Anteil der Blindleistung der Transformatoren etwa 20 bis 25 % und der Motoren etwa 80 bis 75 %. Für rein industrielle Betriebe ist der Einfluss der Transformatoren etwas kleiner. Die Blindleistung, verursacht durch die vielen kleinen Transformatoren, ist in landwirtschaftlichen Netzen relativ sehr gross und erreicht fast den Wert von 50 %; er ist noch beträchtlich für Netze mit vorwiegend landwirtschaftlichem Betrieb (30 bis 40 %). Die Induktionsmotoren, welche in den meisten Fällen nur schwach belastet sind, verursachen fast in allen Netzen den Hauptteil der Blindleistung.

Die Summennennleistung in kVA der total installierten Transformatoren ist etwa 2- bis 3mal grösser als die maximale Tagesspitze in kW für mehr städtische und industrielle Betriebe und bis 5mal grösser für rein landwirtschaftliche Betriebe. Die Summennennleistung in kW der total installierten Motoren ist etwa 1- bis 3mal grösser als die maxiamale Tagesspitze in kW für mehr städtische und industrielle Betriebe und bis 16mal grösser für rein landwirtschaftliche Betriebe.

Diese wenigen Zahlen zeigen deutlich den ungünstigen Einfluss, den die landwirtschaftlichen Netze auf den Leistungsfaktor haben.

IV. Die Mittel zur Bekämpfung des schlechten Leistungsfaktors.

Wie bereits gesagt, kann im allgemeinen durch die Konstruktionsänderung der Leitungen keine wesentliche Verbesserung des Leistungsfaktors erreicht werden.

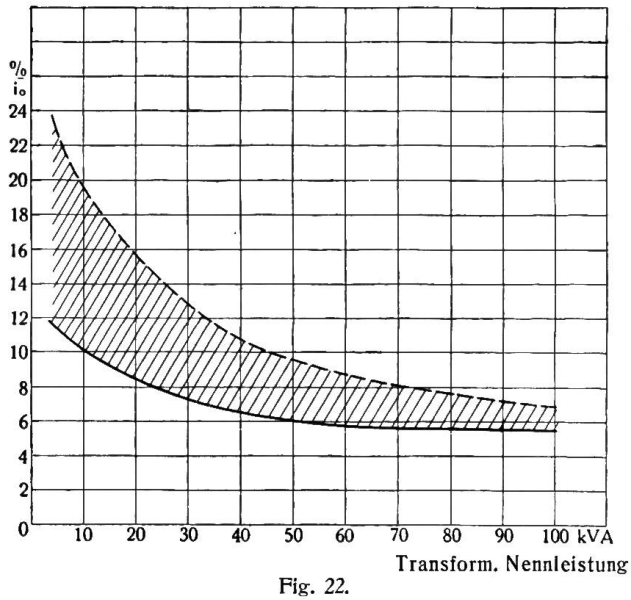

Fig. 22.
Leerlaufstrom der geschachtelten und nicht geschachtelten Kleintransformatoren. 10000 Volt-Typen.
Obere Kurve: Leerlaufstrom der Transformatoren mit Stossfugen.
Untere Kurve: Leerlaufstrom der geschachtelten Transformatoren.

Bei den Grosstransformatoren dürften die Verhältnisse ähnlich liegen. Der Magnetisierungsstrom von Kleintransformatoren bis ca. 100 kVA kann durch eine zielbewusste Konstruktion noch verkleinert werden. Soll die Verkleinerung der Blindleistung eines Kleintransformators gleichzeitig mit günstigen Leerlaufverlusten erreicht werden, so ist dies nur durch Schachtelung der Bleche möglich. Durch diese Verbesserung dürften bald, besonders in Netzen mit landwirtschaftlichem Charakter, gute Resultate erzielt werden.

Fig. 22 stellt die prozentualen Leerlaufströme der 10 kV Kleintransformatoren verschiedener Ausführungen in Funktion der Nennleistung dar. Die punktierte Kurve entspricht der Ausführung mit Stossfugen und gibt ein ungefähres Bild über den Blindverbrauch solcher Transformatoren, wie sie auf dem Markt bis ca. 1914 zu finden waren. Die Leerlaufströme der jetzt gebauten Transformatoren gleicher Konstruktion dürften günstigere Werte besitzen und die entsprechende Kurve dürfte etwa zwischen den beiden Kurven der Fig. 22 liegen. Die voll ausgezogene Kurve dieser Abbildung zeigt, dass durch die Schachtelung der Eisengestelle der Leerlaufstrom noch wesentlich verkleinert werden kann. Dabei ist besonders zu betonen, dass auch die Leerlaufverluste um ca. 10 % zurückgehen, so dass diese Ausführungsform in diesen beiden Hinsichten dem Transformator mit Stossfugen vorzuziehen ist.

Für die Motoren wurde bereits darauf hingewiesen, dass dieselben in ihrer Leistung möglichst gut der Arbeitsmaschine angepasst werden sollen und dass der Kurzschlussankermotor mit wesentlichem Vorteil bis zu ca. 6 kW Verwendung finden sollte. Der Kurzschlussankermotor mit seiner Einfachheit im Aufbau, Installation und Bedienung und seinen guten elektrischen Eigenschaften ist und bleibt der geeignetste Motor für Landwirtschaft und Kleingewerbe. Es ist schade, dass diesem Motortypus wegen seinem etwas grösseren Anlaufstrom oft so viele Schwierigkeiten in der Anwendung entgegenstehen. Dieser etwas grössere Anlaufstrom bedeutet für den Betrieb lediglich einen Schönheitsfehler und eine Umgehung der Kurzschlussmotoren bringt für das Werk keine Vorteile, sondern wegen der Leistungsfaktorverschlechterung nur Nachteile. Die Leistungsfaktorverbesserung, die mit dem Kurzschlussankermotor erzielt werden könnte, stellt einen ganz annehmbaren materiellen Gewinn dar, der ohne

besondere Mehrkosten erzielt wird. Es ist in dieser Beziehung interessant, die amerikanische Praxis, die fast nur den Motor mit Kurzschlussanker kennt, mit der europäischen zu vergleichen.

Es wäre hier noch zu untersuchen, ob der Leistungsfaktor der auf dem Markt käuflichen Induktionsmotoren noch zu verbessern und wenn ja, wie viel er zu verbessern wäre. Um dies zu erreichen, müsste entweder die magnetomotorische Kraft für den Luftspalt, d. h. kleiner Luftspalt, oder die Streuung verkleinert werden, welch letzteres eine grössere Anzahl Nuten bedingt, oder es wären eventuell beide Massnahmen gleichzeitig anzuwenden. Die erste Massnahme geht auf Kosten der Betriebssicherheit, was auf keinen Fall zulässig erscheint und die zweite, bei sonst gleichen Verhältnissen, auf Kosten des Preises. Fig. 23 zeigt, wie die Mehrpreise der Motoren mit besserem Leistungsfaktor zunehmen. Die auf diese Weise erzielte Verbesserung des Motors und zum Schluss auch die totale Verbesserung des Leistungsfaktors im ganzen Netze stehen in keinem annehmbaren Verhältnis zu den aufgewendeten Kosten.

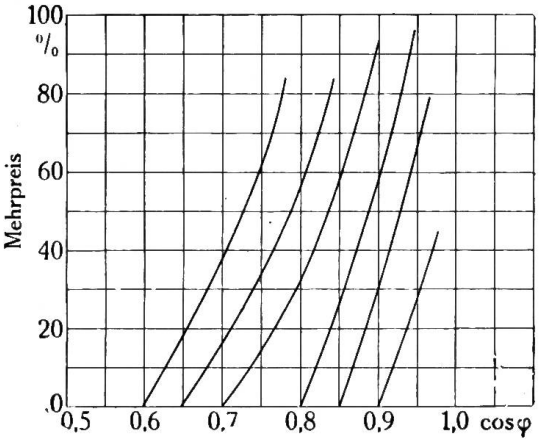

Fig. 23.
Mehrpreis von Induktionsmotoren mit verbessertem Leistungsfaktor (berechnet unter Annahme der Aufstellung neuer Typenreihen).

Diese Ueberlegungen zeigen, dass hier nicht mehr viel zu erwarten ist. Uebrigens ist bei Kleinmotoren ungefähr die gleiche Verbesserung des Leistungsfaktors durch Einführung der Kurzschlussankermotoren

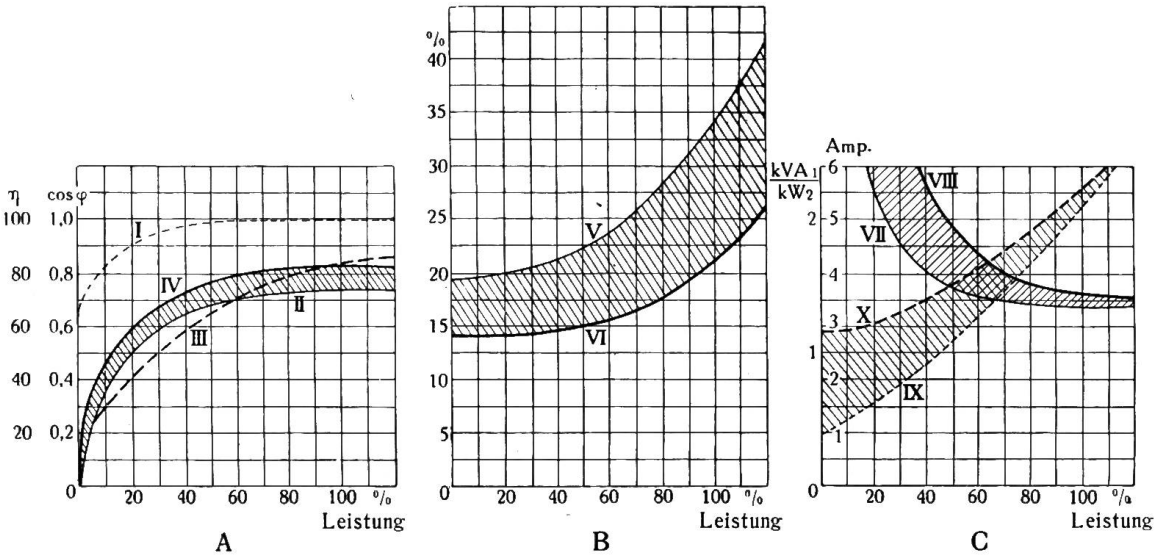

Fig. 24. Vergleich zwischen 1,5 kW kompensiertem Motor und normalem Asynchronmotor mit Schleifringrotor.

A: I Leistungsfaktor des kompensierten Motors.
II Wirkungsgrad des kompensierten Motors.
III Leistungsfaktor des normalen Asynchronmotors.
IV Wirkungsgrad des normalen Asynchronmotors.

B: V Verluste des kompensierten Motors } in % der Nenn-
VI Verluste des normalen Asynchronmotors } leistung.

C: VII Leistungsaufnahme in kVA pro abg. kW des kompensierten Motors.
VIII Leistungsaufnahme in kVA pro abg. kW des normalen Asynchronmotors.
IX Strom des kompensierten Motors in Ampere.
X Strom des normalen Asynchronmotors in Ampere.

an Stelle der Schleifringmotoren erreichbar, wobei man gleichzeitig den grossen Vorteil des kleineren Preises und der Einfachheit erreicht.

Die kompensierten Kleinmotoren erzeugen die nötige Blindleistung selbst und arbeiten im wesentlichen bei allen Belastungen mit einem Leistungsfaktor gleich 1. Ich kann auf die verschiedenen Arten dieser kompensierten Kleinmotoren nicht eingehen und muss mich beschränken, ihre Vor- und Nachteile zu behandeln. Der kompensierte Kleinmotor, der in seinen Anfängen schon sehr alt ist, ist als Mittel zur Verbesserung des Leistungsfaktors sehr geeignet und hat daher mit Recht grosses Aufsehen erregt. Es ist schade, dass dieser interessanten Seite so viele Nachteile gegenüber stehen. Die Fig. 24 enthält die Arbeitskurven eines 1,5 kW kompensierten Motors und diejenige eines normalen Induktionsmotors mit Schleifringanker. Der Leistungsfaktor kann beim kompensierten Motor bei Teillasten auch voreilend sein; dies hängt von der Einstellung der Bürsten am Kollektor ab. Je stärker aber der Motor übererregt ist, umso niedriger ist sein Wirkungsgrad. Die Verluste der kompensierten Kleinmotoren, besonders für die kleinen Motortypen, sind bedeutend grösser als bei Induktionsmotoren (Fig. 24 B) und dementsprechend ist auch der Wirkungsgrad wesentlich niedriger (Fig. 24 A). Was den Scheinleistungsverbrauch anbetrifft, so ist der Unterschied zwischen kompensiertem und Schleifringmotor bei Vollast nicht mehr von Bedeutung (Fig. 24 C). In Fig. 25 sind die Ergebnisse einer hypothetischen Untersuchung aufgetragen. Die unteren Kurven stellen den prozentualen Zuwachs des Motoranschlusswertes in einigen Netzen während der letzten sieben Jahre dar. Nimmt man an, dass seit 1916 ausschliesslich solche Motoren angeschlossen wurden, welche bei allen Lasten mit $\cos \varphi = 1$ arbeiten, so verbessert sich der Leistungsfaktor des Netzes vom Ausgangswert 0,65 nach den oberen Kurven dieser Figur. Wie daraus ersichtlich ist, wäre die Verbesserung unter solchen Verhältnissen eine sehr erfreuliche. Es ist nur schade, dass, wie bereits gesagt, diese Vorteile so teuer erkauft werden müssen. Wie wir später noch sehen werden, dürfte in Zukunft das gleiche Resultat durch Anwendung von statischen Kondensatoren auf einfachere und billigere Weise bei gutem Wirkungsgrad erreicht werden.

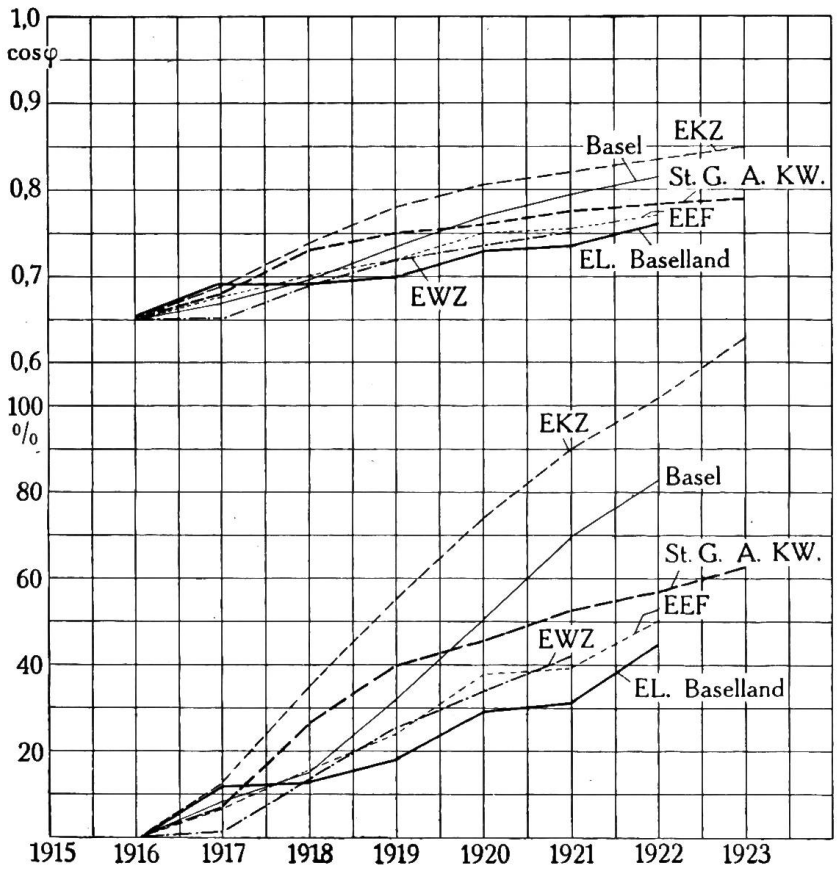

Fig. 25.
Verbesserung des Leistungsfaktors in verschiedenen Netzen durch Anschluss von kompensierten Motoren.
Abszissen: Jahre.
Ordinaten unten: Prozentualer Zuwachs der Motoranschlusswerte.

Ausser diesen Nachteilen des kompensierten Kleinmotors kommen noch weitere hinzu. Er ist in seinem Aufbau für einen Kleinmotor mit Kollektor und Schleifringen und dauernd aufliegenden Bürsten und Zusatzwicklung schon ziemlich kom-

pliziert und daher teuer (ca. 30 % teurer als Motoren mit Schleifringrotor und ca. 80 bis 100 % teurer als Motoren mit Kurzschlussrotor). Auch die vermehrte Wartung dürfte für die Einführung in das Kleingewerbe und Landwirtschaft eine gewisse Schwierigkeit bieten. Für grössere Fabrikbetriebe wie z. B. B. B. C. mit ca. 1700 installierten Kleinmotoren, könnte ich mir seine Einführung wegen der vermehrten Wartung nicht denken. Eine einfache Ueberschlagsrechnung zeigt übrigens, dass die Kompensierung durch Kleinmotoren, die die Blindleistung selbst erzeugen, für

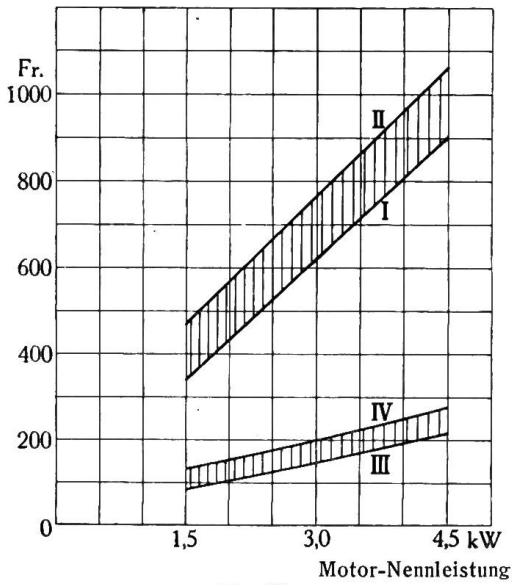

Fig. 26.
Jährliche Betriebskosten in Franken von Motoren mit Kurzschlussrotor und kompensierten Motoren.
I Jährliche Betriebskosten des Kurzschlussmotors bei 2400 stündigem Betrieb.
II Jährliche Betriebskosten des kompensierten Motors bei 2400 stündigem Betrieb.
III Jährliche Betriebskosten des Kurzschlussmotors bei 300 stündigem Betrieb.
IV Jährliche Betriebskosten des kompensierten Motors bei 300 stündigem Betrieb.
Amortisationsdauer: 15 Jahre.
Verzinsung: 5 %.
Zu I und II: Strompreis nach Tarif V des Elektrizitätswerkes des Kantons Schaffhausen.
Zu III und IV: Strompreis nach Tarif IV des Elektrizitätswerkes des Kantons Schaffhausen.

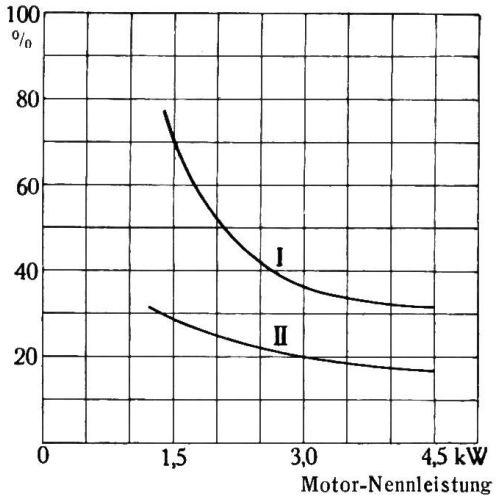

Fig. 27.
Ermässigung auf den Strompreis, welche nötig ist, um die Rentabilität der kompensierten Motoren zu erzielen.
I Bei 300 stündigem Betrieb (Landwirtschaft).
II Bei 2400 stündigem Betrieb (Industrie).

die Abonnenten sehr unwirtschaftlich ist, solange die Elektrizitätswerke die entsprechenden Rabatte auf die Strompreise nicht gewährleisten können. Da diese Rentabilitätsrechnungen und ihre in den Fig. 26 und 27 dargestellten Resultate allgemeines Interesse bieten dürften, führe ich sie an dieser Stelle etwas ausführlicher an.

Allen nachstehenden Berechnungen liegen folgende Annahmen zugrunde: Eine Amortisationsdauer von 15 Jahren, ein Zinsfuss von 5 %, während der Preis der kompensierten Kleinmotoren um 25 % höher als der der entsprechenden Schleifringmotoren angenommen wird. Die jährliche mittlere Belastung der Motoren beträgt in unseren Rechnungen 50 %. Diese letzte Annahme scheint mir durch die Tabelle VI genug begründet zu sein. Nachstehend ist einerseits die Rentabilitätsrechnung der kompensierten Kleinmotoren für einen Fabrikbetrieb mit 2400 jährlichen Betriebsstunden und anderseits das gleiche für landwirtschaftlichen Betrieb mit 300 Betriebsstunden durchgeführt. Die Stromlieferungsbedingungen sind den Tarifen des Elektrizitätswerkes des Kantons Schaffhausen entnommen worden. Fast ganz gleiche Resultate ergeben sich auch nach Tarifen der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich.

3 kW Kurzschlussrotor-Motor Motorpreis Fr. 334.–	3 kW kompensierter Motor Motorpreis Fr. 600.–

1. Fabrikbetrieb, 2400 Betriebsstunden.

Tarif: 15 Cts./kW (Tarif V, Elektrizitätswerk des Kantons Schaffhausen).

Amortisation . .	4,6 %		Amortisation . .	4,6 %	
Verzinsung . . .	5,0 %		Verzinsung . . .	5,0 %	
Wartung	2,0 %		Wartung	5,0 %	
Feste Unkost. (total)	11,6 % =	Fr. 38.80	Feste Unkost. (total)	14,6 % =	Fr. 87.50
Stromverbrauch:			Stromverbrauch:		
$1{,}5 \text{ kW} \cdot 2400 \text{ h} \frac{1}{0{,}855}$			$1{,}5 \text{ kW} \cdot 2400 \text{ h} \frac{1}{0{,}745}$		
= 4210 kWh			= 4840 kWh		
Stromkosten:			Stromkosten:		
2410 kWh · 0,15 Fr.			4840 kWh · 0,15 Fr.		
	= Fr. 631.–			= Fr. 725.–	
6 % Rabatt .	= Fr. 37.90		7 % Rabatt .	= Fr. 50.80	
Strompreis .	Fr. 593.10	Fr. 593.10	Strompreis .	Fr. 674.20	Fr. 674.20
Jährliche Betriebskosten . .		**Fr. 631.90**	Jährliche Betriebskosten . .		**Fr. 761.70**

Die Differenz: 761.70 – 631.90 = Fr. 129.80 kann durch einen Rabatt von $\frac{129.80}{674.20}$ 100 = **19,3** % ausgeglichen werden.

2. Landwirtschaftlicher Betrieb, 300 Stunden.

Tarif IV des Elektrizitätswerkes des Kantons Schaffhausen.
Grundpreis: Fr. 10.– pro PS oder kW.
Konsumpreis: 16 Cts./kWh.

Amortisation . .	4,6 %		Amortisation . .	4,6 %	
Verzinsung . . .	5,0 %		Verzinsung . . .	5,0 %	
Wartung	1,0 %		Wartung	1,5 %	
Feste Unkost. (total)	10,6 % =	Fr. 35.40	Feste Unkost. (total)	11,1 % =	Fr. 66.60
Stromverbrauch:			Stromverbrauch:		
$1{,}5 \text{ kW} \cdot 300 \frac{1}{0{,}855}$			$1{,}5 \text{ kW} \cdot 300 \frac{1}{0{,}745}$		
= 526 kWh			= 605 kWh		
Stromkosten:			Stromkosten:		
526 kWh · 0,16 Fr. . .	=	Fr. 84.40	605 kWh · 0,16 Fr. . .	=	Fr. 97.–
Grundpreis		Fr. 30.–	Grundpreis		Fr. 30.–
Jährliche Betriebskosten . .		**Fr. 149.80**	Jährliche Betriebskosten . .		**Fr. 193.60**

Die Differenz: 193.60 – 149.80 = Fr. 43.80 kann durch einen Rabatt von $\frac{43.80}{127.-}$ 100 = **34,4** % ausgeglichen werden.

Analoge Rechnungen für 4,5 kW und 1,5 kW Motoren ergeben folgende Prozentsätze für Vergütung auf Strompreise (Fig. 27):

4,5 kW Motor: Fabrikbetrieb 17,1 %, Landwirtschaftsbetrieb 31,5 %.
1,5 kW Motor: Fabrikbetrieb 28,7 %, Landwirtschaftsbetrieb 70,0 %.

Ob solche Rabatte gewährleistet werden können, müssen die Elektrizitätswerke entscheiden. Die schraffierten Flächen der Fig. 26 geben noch Aufschluss über die Verteuerung des Betriebes bei Verwendung der kompensierten Kleinmotoren an Stelle der Kurzschlussankermotoren.

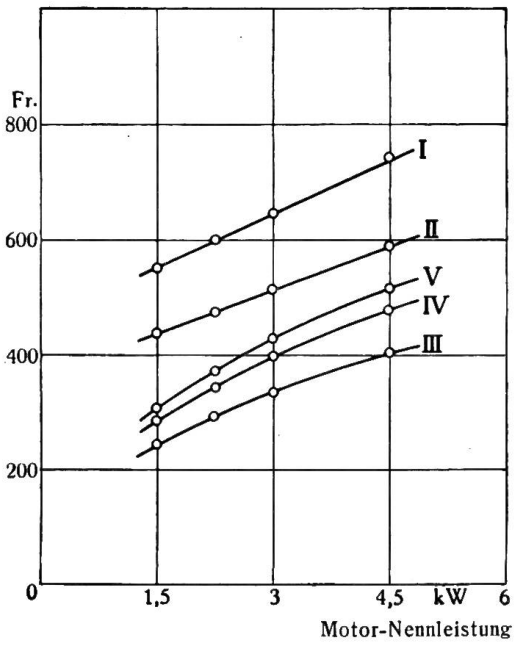

Fig. 28.
Preise der kompensierten Kleinmotoren, Schleifring- und Kurzschlussmotoren und Preise der letzteren mit statischen Kondensatoren.

I Preise der kompensierten Motoren.
II „ „ Schleifringmotoren, 1500 T./min.
III „ „ Kurzschlussmotoren, 1500 T./min.
IV „ „ Kurzschlussmotoren mit Kondensator bei 500 Volt Netzspannung.
V „ „ Kurzschlussmotoren mit Kondensator bei 380 Volt Netzspannung.

Zu IV und V: Kompensierung des Motors auf $\cos \varphi = 0{,}7$ bei Leerlauf und auf $\cos \varphi = 0{,}97$ bei Vollast.

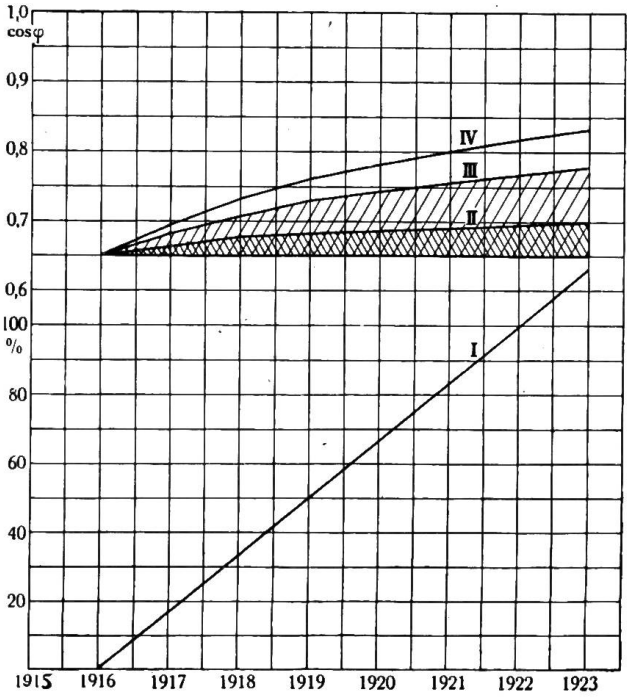

Fig. 29.
Verbesserung des Leistungsfaktors durch Anschluss kompensierter Motoren und geschachtelter Transformatoren in einem landwirtschaftlichen Netz.

I Prozentualer Zuwachs des Anschlusswertes der Motoren.
II Verbesserung des Leistungsfaktors durch Anschluss geschachtelter Transformatoren allein.
III Verbesserung des Leistungsfaktors durch Anschluss von kompensierten Motoren allein.
IV Verbesserung des Leistungsfaktors durch Anschluss kompensierter Motoren und geschachtelter Transformatoren.

Abszissen: Jahre.
Ordinaten unten: Prozentualer Zuwachs d. Motoranschlusswertes.

In diesem Zusammenhang soll hier noch auf die statischen Kondensatoren zur Verbesserung des Leistungsfaktors hingewiesen werden. Mit denselben würde, wie bereits gesagt, das gleiche Resultat erreicht, wie mit dem kompensierten Motor. Sie hätten den Vorteil der Einfachheit und geringer Verluste; sie könnten an jeden Motor noch nachträglich angebaut werden, ohne die Wartung zu verteuern und, was sehr wichtig ist, durch ihre allgemeine Anwendung könnte eine sehr rasche Entlastung des Netzes erreicht werden. Versuche in grösserem Stil sind in Frankreich und England gemacht worden. Diese Kondensatoren liessen sich bis jetzt aber sehr schwer einführen, da sie das teuerste Mittel bildeten. Nach den letzten orientierenden Preisen grosser Spezialfirmen[2]) scheinen die Aussichten heute günstiger zu sein. Eine Ueberschlagsrechnung der Kosten der Ausrüstung der kleinen Kurzschlussmotoren mit Kondensatoren für eine Kompensierung bei Leerlauf auf $\cos \varphi = 0{,}7$ und bei Vollast auf $\cos \varphi =$ ca. 0,97 führt zu den Resultaten, welche in der Fig. 28 dargestellt sind. Daraus ist zu entnehmen, dass auf diese Weise kompensierte Kurzschlussrotor-Kleinmotoren bei Spannungen von 380 bis 500 Volt noch billiger als einfache Schleifringmotoren sind.

[2]) Die Preislisten sind leider nach der Generalversammlung eingetroffen, deswegen konnte ich nachstehende Ausführungen nicht in meinem Vortrage angeben.

Eine Untersuchung auf Grund gleicher Annahmen wie diejenige, die zu den Resultaten der Fig. 25 führte, gibt für ein landwirtschaftliches Netz (Leitung „Dinhard") unter Anwendung der beiden oben besprochenen Mittel (geschachtelten Kleintransformatoren und kompensierten Kleinmotoren oder auch Motoren, die mit statischem Kondensator kompensiert werden) die Kurven der Fig. 29. Der mittlere jährliche Zuwachs des Motoranschlusswertes beträgt in dieser Figur 17 %, was ungefähr der Entwicklung der eigenen Netze der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich entspricht. Je nachdem man die beiden Mittel einzeln oder zusammen anwendet,

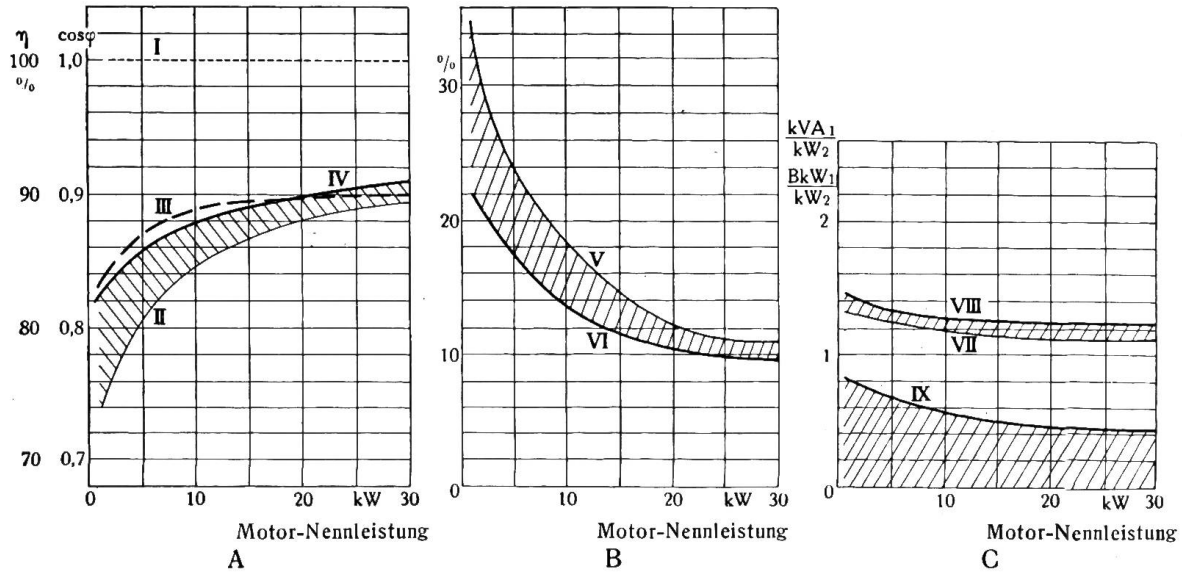

Fig. 30. Vergleich zwischen Asynchronmotoren und Synchroninduktionsmotoren, bis Nennleistungen von 30 kW, Drehzahl 1500, f = 50.

A: I Leistungsfaktor (cos φ = 1) der Synchroninduktionsmotoren.
II Wirkungsgrad der Synchroninduktionsmotoren.
III Leistungsfaktor der 3phasigen Induktionsmotoren.
IV Wirkungsgrad „ „ „

B: V Verluste in % der Nennleistung der Synchroninduktionsmotoren.
VI „ „ % „ „ „ Induktionsmotoren.

C: VII Leistungsaufnahme in kVA pro abg. kW der Synchroninduktionsmotoren.
VIII „ „ „ „ „ „ „ Induktionsmotoren.
IX Blindleistungsverbrauch in BkW pro abg. kW der Induktionsmotoren.

verbessert sich der Leistungsfaktor des Netzes nach den Kurven II, III oder IV, welche zeigen, dass auch mit geschachtelten Kleintransformatoren in den landwirtschaftlichen Netzen viel zu erreichen ist.

Bei den synchronisierten Asynchronmotoren liegen die Verhältnisse grundsätzlich gleich wie bei den kompensierten Kleinmotoren. Da aber diese Motoren nur für grössere Leistungen gebaut werden, so werden die Nachteile der kompensierten Kleinmotoren hier praktisch umgangen, jedenfalls, wie es aus den Fig. 30 und 31 hervorgeht, bei Leistungen über ca. 50 bis 100 kW. Bei kleineren Motoren ist der Unterschied im Wirkungsgrad mit den gewöhnlichen Induktionsmotoren bedeutend. Die synchronisierten Asynchronmotoren haben den Vorteil, dass sie bei grossem Anlaufmoment relativ kleine Stromstösse ins Netz geben und dass sie überkompensiert werden können.

Fig. 32 zeigt die charakteristischen Kurven eines synchronisierten Asynchronmotors. Die Kurve I stellt den Wirkungsgrad einer mit cos φ - Regler ausgerüsteten Maschine dar, die auf konstanten Leistungsfaktor gleich 1 reguliert wird. Die Kurve III zeigt den Leistungsfaktor bei verschiedenen Lasten, der sich bei Nicht-Nachregulierung der Erregung ergibt, wenn der Leistungsfaktor bei Normallast gleich 1 eingestellt wird. Die Kurve II zeigt den Verlauf des Wirkungsgrades für diesen letzten Fall.

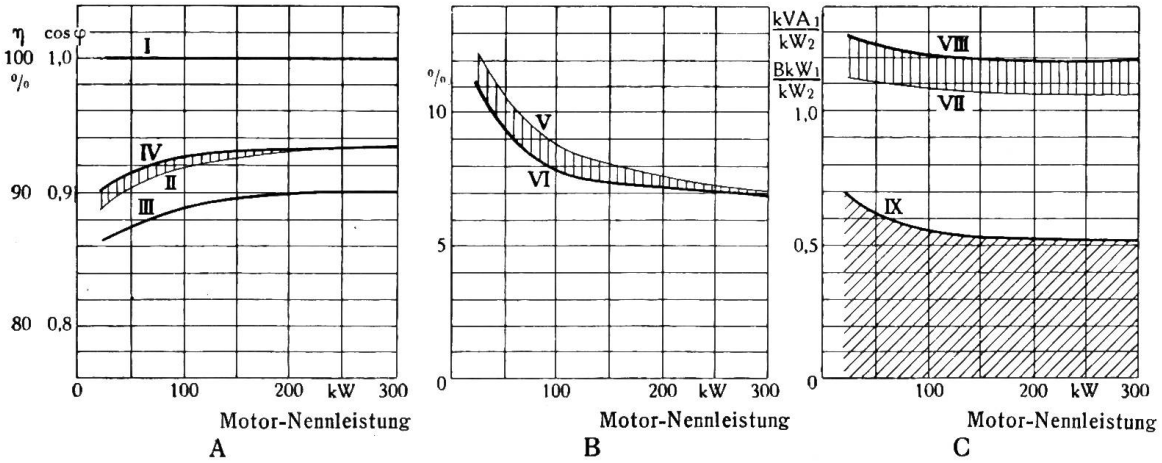

Fig. 31. Vergleich zwischen Synchroninduktionsmotoren und Indnktionsmotoren grösserer Leistungen, Drehzahl 1000, f = 50.

A: I Leistungsfaktor (cos φ = 1) der Synchroninduktionsmotoren bei 4/4 Last.
II Wirkungsgrad der Synchroninduktionsmotoren bei 4/4 Last.
III Leistungsfaktor der 3phasigen Induktionsmotoren bei 4/4 Last.
IV Wirkungsgrad „ „ „ „ 4/4 „

B: V Verluste in % der Nennleistung der Synchroninduktionsmotoren bei 4/4 Last.
VI „ „ % „ „ „ Induktionsmotoren bei 4/4 Last.

C: VII Leistungsaufnahme in kVA pro abg. kW der Synchroninduktionsmotoren bei 4/4 Last.
VIII „ „ „ „ „ „ „ Induktionsmotoren bei 4/4 Last.
IX Blindleistungsverbrauch in BkW der Induktionsmotoren.

Ganz ähnliche Eigenschaften wie vorige Typen besitzen auch die Grossmotoren mit angebautem oder getrennt aufgestelltem Phasenkompensator. Die erreichte Kompensierung hängt bei gegebener Kompensatortype von der Belastung des Hauptmotors ab. Bei Leerlauf kommt der Kompensator nicht zur Wirkung, da dabei der Rotorstrom fast Null ist, aber schon bei geringer Teillast verbessert er den Lei-

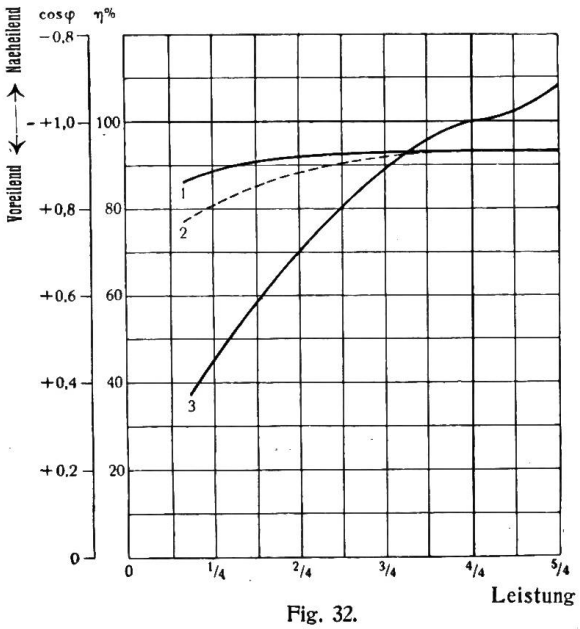

Fig. 32.
Wirkungsgradkurven des Synchroninduktionsmotors.
Leistung 118 kW, Spannung 220 Volt, Drehzahl 1000, f = 50.

1 Wirkungsgrad mit automatischem Phasenregler (Leistungsfaktor cos φ = 1 konstant).
2 Wirkungsgrad ohne automatischen Phasenregler (Erregung nicht nachreguliert, daher Leistungsfaktor variabel).
3 Leistungsfaktor (cos φ) ohne automatischen Phasenregler bei konstant bleibender Erregung.

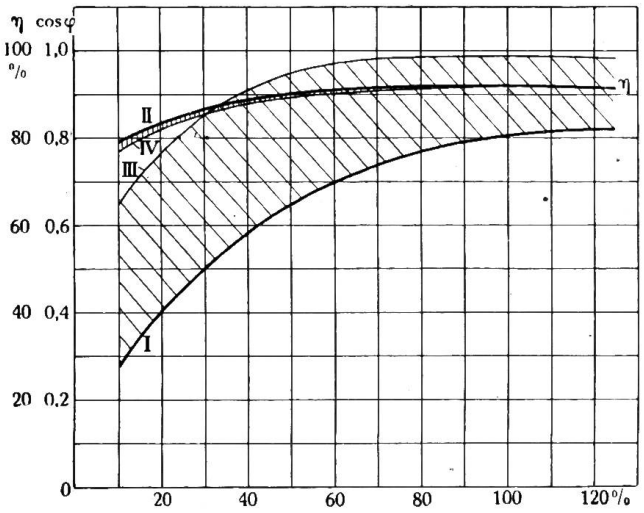

Fig. 33.
Leistungsfaktor und Wirkungsgrad eines Induktionsmotors mit und ohne Phasenkompensator.
Motorleistung 550 PS, Drehzahl 214, 5000 Volt, f = 50.

I Leistungsfaktor ohne Phasenkompensator.
II Wirkungsgrad „ „
III Leistungsfaktor mit Phasenkompensator.
IV Wirkungsgrad „ „

Abszissen: Leistung des Motors in Prozenten der Nennleistung.

stungsfaktor (Fig. 33) und erreicht in der Regel bei ca. $^1/_3$ Last den Wert der Einheit. Der Phasenkompensator lässt keine nennenswerte Ueberkompensation zu. Der Hauptmotor behält seinen Asynchroncharakter und wird, dank dem Kompensator, stärker überlastbar.

Der Synchronmotor ist eines der vorzüglichsten Mittel zur Verbesserung des Leistungsfaktors. Gegenüber dem synchronisierten Asynchronmotor hat er schlechtere Anlaufverhältnisse, aber dafür wegen dem grossen Luftspalt eine viel flachere Regulierkurve. Er eignet sich deshalb besonders gut zur Phasenkompensation bezw. Ueberkompensation und gleichzeitig zur Spannungsregulierung.

Die bis jetzt besprochenen Mittel sind alles Mittel, die in ihrer Hauptaufgabe zur Abgabe von Wattleistung bestimmt sind. Es gibt vereinzelte Fälle, in welchen mit Vorteil zur Phasenkompensation ganz besondere Synchronmaschinen (Synchronkondensatoren) aufgestellt werden können oder müssen. Wann dies mit Vorteil geschehen soll, sind rein wirtschaftliche Fragen, die nur von Fall zu Fall entschieden werden können.

V. Anwendung der besprochenen Mittel in verschiedenen Anlageteilen.

In den Netzen der niederen Verbraucherspannungen ist eine Entlastung, d. h. eine Verbesserung des Leistungsfaktors, möglich durch bessere Anpassung der Motoren an die Arbeitsmaschinen. Es sollte hier die Ueberlastbarkeit der Motoren mehr ausgenützt werden. Schon die Anwendung dieser Massnahmen allein dürfte eine wesentliche Verbesserung des Leistungsfaktors zur Folge haben. Als Induktionsmotoren kleinerer Leistung, bis etwa 6 kW, sollten die einfachen, billigen und betriebssicheren Kurzschlussankermotoren immer mehr zur Anwendung kommen. Dieselben könnten ausserdem mit gutem Wirkungsgrad, ohne grosse Kosten und ohne die Preise für einen Schleifringmotor zu erreichen, mit statischen Kondensatoren kompensiert werden.

Die allgemeine Einführung der kompensierten Kleinmotoren, welche ein sehr wirksames Kompensationsmittel für Verteilungsnetze bilden, ist wegen zu hoher Betriebskosten kaum möglich. Denn alle Massnahmen, welche die Verbesserung des Leistungsfaktors einer Anlage bezwecken, sollten, um erfolgreich zu sein, nicht zum Vorteil des einen und zum Nachteil des anderen der beiden Beteiligten (Stromlieferant und Abonnent) führen, sondern zum Vorteil der beiden.

In den Netzteilen der niederen Hochspannung (6 bis 20 kV) kann durch vorsichtige Wahl der Transformatoren in ihrer Grösse ebenfalls viel erreicht werden. Die Kleintransformatoren mit geschachtelten Kernen, die bei gleichzeitig kleinstem Leerlaufstrom kleinste Verluste haben, können besonders in landwirtschaftlichen Netzen, wie gezeigt wurde, eine ganz wesentliche Verbesserung bringen.

Bei grösseren Verbrauchern, wie z. B. Fabrikanlagen, welche mit schlechtem $\cos \varphi$ arbeiten und neben vielen Kleinmotoren auch langsamlaufende oder schlecht ausgenützte Grossmotoren besitzen, ist es vorteilhaft, nur diese letzteren durch Phasenkompensatoren oder Erregermaschinen zu kompensieren, wodurch eine wesentliche Verbesserung des Leistungsfaktors der Anlage erzielt wird. Wenn die Rotorwicklungen es zulassen, wird man mit Vorteil diese Grossmotoren so stark übererregen, dass sie die Lieferung des Blindstromes der sämtlichen Kleinmotoren übernehmen.

In Mittelspannungsnetzen kann durch die Wahl der Transformatoren und dem ausschliesslichen Anschluss von kompensierten Grossmotoren, die auch hier zum Teil überkompensiert arbeiten müssten, sicher eine ganz wesentliche Hebung des Leistungsfaktors erreicht werden. Synchron-Induktionsmotoren und Synchronmotoren, welche mit Belastung arbeiten, können immer mit wirtschaftlichem Vorteil zur Abgabe des voreilenden Stromes herangezogen werden. Sie sind daher überall, wo die Betriebsverhältnisse es zulassen, zu empfehlen. Die wirtschaftliche Anwendbarkeit der leerlaufenden Synchronmotoren, welche zur Phasenschiebung (Synchron-Kon-

densatoren) und zur Spannungsregulierung aufgestellt werden müssen, ist von Fall zu Fall zu untersuchen. Es gibt oft Fälle, wo ihre Aufstellung in Hauptknotenpunkten des Netzes, ausser den Vorteilen der einfachen Spannungsregulierung, eine wesentliche Verringerung der Kupferverluste in Hochspannungsleitungen und Hochspannungsabtransformatoren zur Folge hat, so dass die Betriebskosten (Amortisation, Verzinsung, Stromkosten, Wartung) solcher Motoren durch erzielte Ersparnisse mit Ueberschuss gedeckt werden können.

Für Hochspannungsleitungen, welche grosse Leistungen auf grosse Entfernungen zu übertragen haben und gleichzeitig voll ausgenützt werden müssen, kommt nur eine Kompensation mittels leerlaufenden oder belasteten Synchronmotoren in Frage. Die Ausnützungsmöglichkeit einer Fernleitung kann hierdurch um 25 bis 50 % erhöht werden.

Die richtige und rasche Lösung der Verbesserung des Leistungsfaktors hat bei uns in sehr vielen Fällen dadurch noch eine Erschwerung erfahren, dass zwischen dem Erzeuger und Verbraucher oft mehrere Wiederverkäufer bestehen, von denen jeder nur ein Teilinteresse an der Lösung dieser Frage hat. Eine rasche Lösung ist nur denkbar durch Zusammenarbeiten aller Beteiligten, wozu nicht in letzter Linie der Abonnent gehört.

Ueber Verwertung der elektrischen Energie im Inland.

Vortrag von Herrn *E. Boder*, Betriebsleiter der Elektrizitäts- und Wasserversorgung der Stadt Olten, gehalten am 21. Juni 1924 in Sitten vor dem Verbande Schweiz. Elektrizitätswerke.

Der Referent gibt eine allgemeine Uebersicht der verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten der elektrischen Energie in der Schweiz, auf dem Gebiete der Wärmestromabgabe im Haushalt und der thermischen Verwertung des Stromes in Gewerbe und Industrie. Er zeigt, wie durch gegenseitiges Zusammenarbeiten zwischen Produzenten, Wiederverkäufern, Fabrikanten und Abnehmern neue Absatzgebiete noch erschlossen werden können. Der Verfasser kommt allerdings zum Schluss, dass die Durchführung eines für Stromproduzenten wie für Stromkonsumenten passenden Programmes meistens mit wirtschaftlichen Schwierigkeiten verbunden ist.

L'auteur donne une vue d'ensemble des différentes formes d'utilisation de l'énergie électrique en Suisse dans le domaine spécial des applications calorifiques, soit à la maison, soit dans la petite et la grande industrie. Il entrevoit l'ouverture de débouchés nouveaux par une collaboration bien comprise entre producteurs, revendeurs, fabricants et consommateurs. L'auteur constate toutefois que la réalisation d'un programme de mise en valeur plus complète de l'énergie encore inutilisée aujourd'hui n'ira pas toujours sans certaines difficultés d'ordre économique.

Die fortgesetzten und zum Teil unberechtigten Angriffe auf die Elektrizitätsversorgung unseres Landes haben nach und nach auf fast alle Unternehmungen übergegriffen und äussern sich allgemein durch steten Druck auf die Energiepreise. Wir finden diese Erscheinung auch bei jenen Werken, welche die Energie zu Vorkriegspreisen abgeben. Ursache dieser Erscheinung ist der gesteigerte Energieexport, welcher bedingt war durch den plötzlichen Rückgang des Inlandabsatzes zu Beginn der Industriekrise im Jahre 1921 und durch die ursprünglich zur Deckung des erwarteten Inlandbedarfes gesteigerte Energieproduktion.

In Fachkreisen ist man sich darüber klar, dass in jenem Zeitpunkt keine Abnehmer im Inland zu finden gewesen wären; der einzige Weg zur Deckung des Ausfalles fand sich im Export. Nachdem nun jene Periode als abgeschlossen betrachtet werden darf, und namentlich seitdem sich die Kohlenpreise wieder zu stabilisieren beginnen, tritt die Inlandversorgung wieder in vermehrtem Masse in den Vordergrund.

Die neuen Aufgaben liegen vorwiegend auf dem Gebiete der Wärmestromabgabe im Haushalt und der thermischen Verwertung der elektrischen Energie in Gewerbe und Industrie. In den neuesten Tarifen einiger grosser Werke finden wir