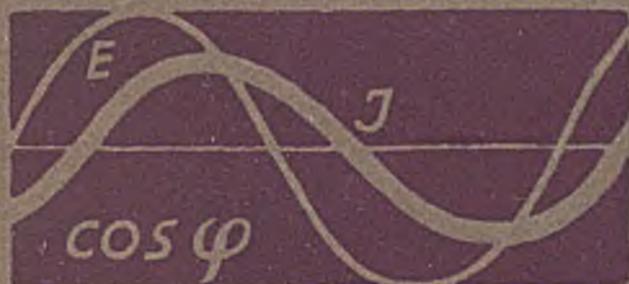


Die Blindströme

die zu ihrer Berücksichtigung dienenden
Zähler und deren Anwendung
zur Verrechnung der elektrischen Energie



Siemens-Schuckert

Die Blindströme,
die zu ihrer Berücksichtigung dienenden
Zähler und deren Anwendung
zur Verrechnung der elektrischen Energie

Von Dr.-Ing. W. v. Krukowski
Oberingenieur im Zählerwerk der SSW.

Erweiterter Sonderabdruck
aus dem „cos φ “ Sonderheft der Siemens-Zeitschrift



SIEMENS-SCHUCKERT

Die Blindströme,

die zu ihrer Berücksichtigung dienenden Zähler und deren Anwendung zur Verrechnung der elektrischen Energie.

I. Einleitung.

Hohe Phasenverschiebung, also niedriger Leistungsfaktor, hat in vielerlei Beziehung einen ungünstigen Einfluß auf die Wirtschaftlichkeit des Betriebes von Wechsel- und Drehstrom-Elektrizitätswerken. Die Verbesserung des Leistungsfaktors, also Vermeidung von Blindströmen, ist deshalb von großer Wichtigkeit. Die Stromabnehmer haben an und für sich kein besonderes Interesse daran, die Energie bei einem für das Kraftwerk günstigen Leistungsfaktor zu entnehmen. Dies trifft jedoch nur so lange zu, als für die Verrechnung nur die Angaben des Kilowattstundenzählers zugrunde gelegt werden, denn in diesem Falle wird der Einfluß der Blindströme nicht berücksichtigt. Anders liegen die Verhältnisse, wenn bei der Verrechnung auch die Blindströme berücksichtigt werden, so daß der Abnehmer finanziell daran interessiert ist, mit möglichst günstigem Leistungsfaktor zu arbeiten. Er wird dann auch angehalten, Maßnahmen zu treffen, seinen Leistungsfaktor auf einen günstigeren Wert zu bringen. In diesem Sinne können die tariflichen Maßnahmen zur Verbesserung des Leistungsfaktors führen, zum mindesten ist es möglich, die durch den Blindstrom verursachten Kosten in Rechnung zu stellen.

Ähnlich liegen die Verhältnisse bei parallel arbeitenden Werken. In diesem Falle hat im allgemeinen jedes Werk Interesse daran, mit einem für die anderen Kraftwerke ungünstigen Leistungsfaktor zu arbeiten.

Es sind schon früher Vorschläge zur Berücksichtigung der Blindströme bei der Verrechnung der elektrischen Energie gemacht und auch verschiedene hierzu erforderliche Meßgeräte vorgeschlagen worden. Der älteste Vorschlag stammt wohl von Benischke¹⁾. Praktisch wurde bis vor kurzem nur in Italien und in der Schweiz das von Arnò angegebene Verrechnungsverfahren gelegentlich angewandt. Die hierzu erforderlichen Zähler wurden vor dem Kriege von den SSW in größerer Zahl geliefert. Die ersten Blindverbrauchszähler wurden wohl von den SSW, und zwar im Jahre 1912, gebaut. Im allgemeinen blieb jedoch der Blindstrom unberücksichtigt. Erst während des Krieges und insbesondere in den letzten zwei Jahren stieg das Interesse an der Berücksichtigung der Blindströme, und zwar macht sich diese Bewegung nicht nur in Deutschland, sondern auch in anderen Ländern bemerkbar. In Deutschland wurde das Interesse an der Berücksichtigung der Blindströme durch die von Bußmann beim Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerk (R.W.E.) eingeführten Tarife geweckt²⁾.

Welche Bedeutung man der Frage der Blindströme und deren Bekämpfung

¹⁾ Benischke: „Berechnung des Strompreises bei Wechselströmen“. Vortrag, gehalten auf der 7. Jahresversammlung des V. D. E. in Hannover. ETZ 20, S. 454, 1899.

²⁾ Bußmann: „Die Phasenverschiebung in Drehstromnetzen und ihre Berücksichtigung bei Verbrauchsmessungen“, ETZ 39, S. 93 und 105, 1918.

zur Zeit beimißt, ersieht man daraus, daß die Vereinigung der Elektrizitätswerke am 11. November 1921 in Berlin eine besondere „cos φ “=Tagung veranstaltet hat¹⁾.

Im folgenden wird zuerst ein kurzer Überblick über die ganze „cos φ “=Frage gegeben und dann diese etwas eingehender vom Standpunkte der Verrechnung der elektrischen Energie betrachtet. Dabei werden insbesondere die für die Erfassung der Blindströme in Betracht kommenden Zähler und deren Anwendung behandelt.

Der Einfachheit halber werden die theoretischen Betrachtungen, besonders die Diagramme, meist auf Einphasenstrom bzw. auf eine Phase des Drehstromsystems beschränkt.

II. Definitionen und Bezeichnungen.

Bis jetzt fehlt es noch an einheitlichen Definitionen und Bezeichnungen für die bei der Behandlung der Blindströme in Frage kommenden Größen und Einheiten. Manches Gebräuchliche ist zum mindesten nicht exakt und zum Teil sogar irreführend. Es mögen deshalb im folgenden einige Vorschläge hierzu gemacht werden.

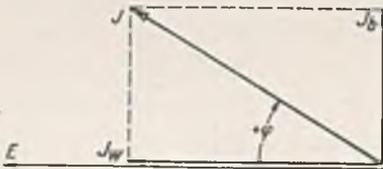


Abb. 1. Zerlegung eines Stromes in seine Komponenten.

Abb. 1 zeigt das Diagramm einer Wechselstromanlage. E ist die Netzspannung, J der entnommene Strom, der um den Winkel φ gegen E verschoben ist, und zwar, wie dies meist der

Fall ist, im nachteilenden Sinne. E und J sind Effektivwerte.

Die Leistung N ist dann

$$N = E J \cos \varphi = E J_w$$

wobei $J_w = J \cos \varphi$ die in Phase mit E liegende Komponente des Stromes ist. J_w wird neuerdings als Wirkstrom bezeichnet (früher oft Wattstrom). Zur besonderen Unterscheidung von anderen weiter unten angeführten, ähnlichen Größen wird N gelegentlich auch Wirkleistung genannt und mit N_w bezeichnet.

$$\cos \varphi = \frac{J_w}{J} \text{ ist der Leistungsfaktor.}$$

Meist wird φ bei nacheilendem Strom als positiv, bei voreilendem als negativ angenommen. Ist φ kleiner als 90° , so ist $\cos \varphi$ bei Nacheilung und Voreilung positiv. Bei Phasenverschiebungen über 90° ist $\cos \varphi$, also auch die Leistung N , negativ. Dieser Fall entspricht vom Standpunkt eines Kraftwerkes oder Netzes einer negativen Lieferung, d. h. einem Energiebezug.

Die auf E bzw. J_w senkrecht stehende Komponente des Stromes

$$J_b = J \sin \varphi$$

hat nur Einfluß auf die Größe des Gesamtstromes, nicht auf die Größe der Leistung und wird deshalb als Blindstrom (früher wattloser Strom) bezeichnet.

¹⁾ Als Einleitung zur Tagung hat die Vereinigung die Sondernummer 298b ihrer Mitteilungen herausgegeben. Die Referate und Diskussion der Tagung sollen in einem weiteren Sonderheft der Mitteilungen wiedergegeben werden.

Folgende Beziehungen sind noch von Wichtigkeit:

$$J^2 = J_w^2 + J_b^2 \quad \text{und} \quad J = \sqrt{J_w^2 + J_b^2}$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{J_b}{J_w}$$

$$N_b = E J \sin \varphi$$

Die Größe N_b wird analog der (Wirk-) Leistung N oft als Blindleistung bezeichnet. Dieser Ausdruck ist jedoch irreführend und ungenau. Die Leistung = Effekt ist eine nicht nur in der Elektrotechnik gebräuchliche, physikalisch als die in der Zeiteinheit geleistete Arbeit, vollständig definierte Größe. Es dürfte sich empfehlen, für N_b einen anderen Ausdruck zu gebrauchen, und zwar erscheint hierfür „Blindlast“ recht zweckmäßig.

Da φ beim Übergang von Nacheilung zur Voreilung sein Vorzeichen ändert, so ändert sich dabei auch das Vorzeichen von $\sin \varphi$ und N_b , und zwar ist bei nacheilendem Strom die Blindlast als positiv, bei voreilem als negativ anzunehmen.

Eine weitere wichtige Größe ist die „Scheinlast“:

$$N_s = E J$$

Aus gleichen Gründen, wie oben angeführt, erscheint der gebräuchliche Ausdruck „Scheinleistung“ unzulässig.

Aus N , N_b und N_s läßt sich die Phasenverschiebung φ aus den Beziehungen

$$\cos \varphi = \frac{N}{N_s} \quad \text{und} \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{N_b}{N}$$

berechnen.

Die (Wirk-) Leistung N wird in der Praxis in Watt (W) bzw. Kilowatt (kW) gemessen. Die entsprechenden Einheiten für die Blindlast werden oft als Blindwatt oder Blindkilowatt bezeichnet. Diese Bezeichnungen erscheinen nach dem Obigen gleichfalls nicht empfehlenswert. Zweckmäßiger erscheinen dagegen die Bezeichnungen Blindvoltampere (bVA) und Blindkilovoltampere (bkVA). Die Einheit der Scheinlast ist das Voltampere (VA) bzw. Kilovoltampere (kVA).

Wird die Leistung N während der Zeit t entnommen, so berechnet sich die Arbeit (Energie) oder der Verbrauch (Wirkverbrauch) zu

$$A = N \cdot t = E J \cos \varphi \cdot t = E J_w \cdot t$$

Schwankt die Leistung während eines bestimmten Zeitintervalls t_1 bis t_2 , so ist die gesamte Arbeit $A = \int_{t_1}^{t_2} N \cdot dt$, wobei das Integralzeichen die Summe der einzelnen Produkte aus Leistung und zugehöriger Zeit bedeutet.

Entsprechend ist der Blindverbrauch

$$A_b = N_b \cdot t = E J \sin \varphi \cdot t = E J_b \cdot t$$

$$\text{bzw. } A_b = \int_{t_1}^{t_2} N_b \cdot dt$$

und der Scheinverbrauch

$$A_s = N_s \cdot t = E \cdot J \cdot t$$

$$\text{bzw. } A_s = \int_{i_1}^{i_2} N_s \cdot dt$$

Für die Verrechnung der elektrischen Energie ist noch von Wichtigkeit die »mittlere« Phasenverschiebung φ_m , die sich aus den Beziehungen

$$\cos \varphi_m = \frac{A}{A_s}, \text{ bzw. } \operatorname{tg} \varphi_m = \frac{A_b}{A}$$

berechnet. φ_m ist nur bei konstantbleibenden Belastungsverhältnissen während der ganzen Registrierperiode identisch mit der Phasenverschiebung φ .

Bei Drehstrom kann von einem Leistungsfaktor streng genommen nur bei symmetrischer Belastung gesprochen werden. Bei unsymmetrischer Belastung sind im allgemeinen die Phasenverschiebungen in den drei Phasen verschieden, und es ist eine besondere Definition des „mittleren“ Leistungsfaktors erforderlich¹⁾.

Zusammenstellung der Formelzeichen und Einheiten.

Größe	Formelzeichen	Einheit		Zusammenhang mit anderen Größen
		Name	Zeichen	
Spannung	E	Volt Kilovolt	V kV	— —
Stromstärke	J	Ampere	A	—
Phasenverschiebungswinkel	φ	Grade (elektrische)	°	—
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	—	—	$\cos \varphi = \frac{J_w}{J} = \frac{N}{N_s} = \frac{A}{A_s}$
—	$\operatorname{tg} \varphi$	—	—	$\operatorname{tg} \varphi = \frac{J_b}{J_w} = \frac{N_b}{N} = \frac{A_b}{A}$
Wirkstrom	J_w	Ampere	A	$J_w = J \cos \varphi$
Blindstrom	J_b	Ampere	A	$J_b = J \sin \varphi$
Leistung	N	Watt Kilowatt	W kW	$N = E J \cos \varphi = E J_w$
Blindlast	N_b	Blindvoltampere Blindkilovoltampere	bVA bkVA	$N_b = E J \sin \varphi =$ $= E J_b$
Scheinlast	N_s	Voltampere Kilovoltampere	VA kVA	$N_s = E J$
Arbeit, Energie, (Wirk-)Verbrauch	A	Wattstunden Kilowattstunden	Wh kWh	$A = E J \cos \varphi \cdot t =$ $= E J_w \cdot t$
Blindverbrauch	A_b	Blindvoltampere- stunden Blindkilovoltampere- stunden	bVAh bkVAh	$A_b = E J \sin \varphi \cdot t =$ $= E J_b \cdot t$
Scheinverbrauch	A_s	Voltamperestunden Kilovoltamperestunden	VAh kVAh	$A_s = E J \cdot t$

¹⁾ Siehe hierzu Voller: „Der Leistungsfaktor und seine Messung“. Helios 26, S. 169, 177, 193 u. 201; 1920.

Der Wirkverbrauch wird in der Praxis in Watt- bzw. Kilowattstunden (Wh bzw. kWh) gemessen. Für den Blind- und Scheinverbrauch ergeben sich nach dem Obigen die Einheiten Blindvoltamperestunde (bVAh) oder Blindkilovoltamperestunde (bkVAh) bzw. Voltamperestunde (VAh) oder Kilovoltamperestunde (kVAh). Die gebräuchlichen Bezeichnungen Blindwattstunde und Blindkilowattstunde erscheinen wiederum unzweckmäßig.

In der Tafel auf Seite 6 sind die Ergebnisse der obigen Betrachtungen nochmals übersichtlich zusammengestellt.

Es ist auch vorgeschlagen worden, das Blindvoltampere mit »Sin«, entsprechend das Blindkilovoltampere mit »Kilosin« zu bezeichnen. Hiernach ist die Einheit des Blindverbrauches die Sin-Stunde bzw. Kilosin-Stunde. Der von Schweden herrührende Name Sin ist auch neuerdings von der Zählerkommission des V. D. E. angenommen worden.

Ferner wurde auch für das Blindvoltampere der Name »Dob« (Abkürzung von Dolivo Dobrowolski) vorgeschlagen. Diese stark verstümmelte Abkürzung eines Namens erscheint auch nicht besonders glücklich. Ferner wäre es wohl zweckmäßig, nach einem Namen nicht für die Einheit der Blindlast sondern für die Einheit des Blindverbrauches zu suchen¹⁾.

III. Die Entstehung der Blindströme.

Die Entstehung der Blindströme ist an die Erregung elektrischer oder magnetischer Felder gebunden. Die zur Erzeugung elektrischer Felder erforderlichen „Ladeströme“ sind voreilende, also nach dem Obigen negative Blindströme. Sie spielen praktisch in Starkstromnetzen nur bei Hochspannungskabeln und Freileitungen bei sehr hohen Spannungen eine nennenswerte Rolle. Die zur Erregung magnetischer Felder nötigen nacheilenden, also positiven Blindströme, sind in erster Linie die Magnetisierungsströme von Transformatoren, Asynchronmotoren sowie der mit Induktivität behafteten Leitungen, die als den Stromverbrauchern vorgeschaltete Induktivitäten zu betrachten sind. Diese Magnetisierungsströme spielen bei Stromerzeugungs- und Verteilungsanlagen eine viel wichtigere Rolle als die Ladeströme.

In Abb. 2 ist durch den Generator G ein Kraftwerk schematisch angedeutet. Je nach den Belastungsverhältnissen kann man sich die Stromverbraucher durch einen Ohmschen Widerstand R , eine Selbstinduktion L oder eine Kapazität C dargestellt denken. An den Ohmschen Widerstand R allein würde das Kraftwerk nur den positiven Wirkstrom J_w liefern (Abb. 3), an die reine Induktivität L nur den positiven Blindstrom J'_b und an die reine Kapazität C nur den negativen Blindstrom J''_b . Sind gleich-

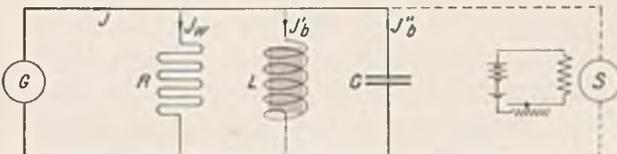


Abb. 2. Belastungsschema eines Kraftwerkes.

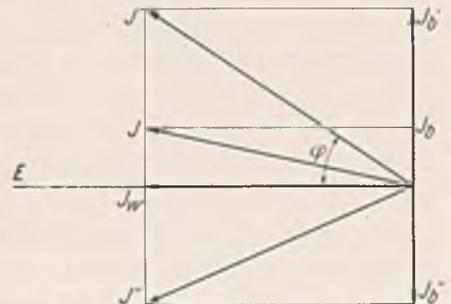


Abb. 3. Diagramm der Ströme zu Abb. 2.

¹⁾ Siehe hierzu ETZ 40 S. 304 1919, 41 S. 660 1920, 42 S. 69 u. 985 1921.

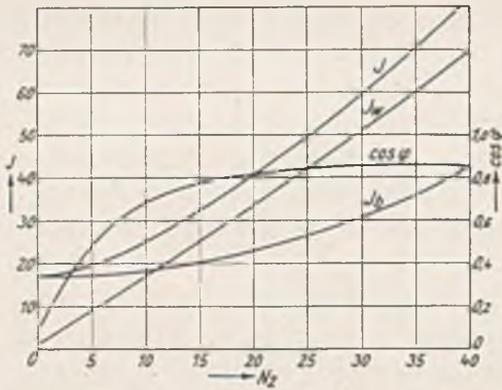


Abb. 4. Ströme und Leistungsfaktor eines Asynchronmotors in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung N_2 , Vollast 30 kW.

zeitig die Induktivität und die Kapazität angeschlossen, so ist der gesamte zu liefernde Blindstrom J_b gleich der (arithmetischen) Differenz von J'_b und J''_b und hat das Vorzeichen des größeren der beiden Ströme (hier J_b). Bei induktionsfreier Belastung ist der gesamte vom Kraftwerk zu liefernde Strom J_w , die abgegebene Leistung $N = E J_w$. Ist gleichzeitig mit R noch die Induktivität L angeschlossen, so wird bei gleichbleibender Leistung der gesamte Strom

$$J' = \sqrt{J_w^2 + J_b^2}$$

geliefert. Ist außer R nur die Kapazität C angeschlossen, so ergibt sich entsprechend der Gesamtstrom J'' . Beim gleichzeitigen Anschluß aller drei Verbraucher ist der Gesamtstrom J . Wie man leicht sieht, wirkt die Kapazität phasenkompensierend. Man kann einen voreilenden Blindstrom auch als einen von dem Verbraucher an das Netz gelieferten, vom Standpunkt des Verbrauchers positiven Blindstrom auffassen. Wird J''_b größer als J_b , so wird der gesamte Strom voreilend. Die Parallelschaltung eines Ohmschen Widerstandes und einer reinen Induktivität ist z. B. die einfachste Ersatzschaltung eines Transformators und anderer auf den Transformator in elektrischer Beziehung zurückzuführenden Stromverbraucher, also in erster Linie eines Asynchronmotors. Ein leerlaufender Transformator oder Asynchronmotor würde, falls er keine Verluste hätte, sich wie die reine Induktivität L verhalten. Seine Belastung entspricht dem Parallelschalten des Ohmschen Widerstandes R .

Es ist noch zu berücksichtigen, daß beim Asynchronmotor mit wachsender Belastung der Blindstrom gleichfalls steigt. Immerhin fällt bei Belastung die Phasenverschiebung ($\cos \varphi$ steigt). Abb. 4 zeigt beispielsweise das Verhalten eines Asynchronmotors für 30 kW.

Der von der Selbstinduktion L aufgenommene nachteilige Magnetisierungsstrom J_b hat eine solche Größe, daß das von ihm erregte magnetische Wechselfeld eine der Netzspannung E gleichgroße und ihr entgegengesetzt gerichtete (Gegen-) EMK induziert, die also der Netzspannung das Gleichgewicht hält.

Ein besonderer Fall liegt vor, wenn der zur Erzeugung des Feldes nötige Magnetisierungsstrom ganz oder zum Teil nicht vom Drehstromnetz, sondern von anderer Seite zugeführt wird. Wird dabei der gerade erforderliche Magnetisierungsstrom durch solche Fremderregung zugeführt, so verhält sich der Verbraucher trotz seines induktiven Charakters wie ein Ohmscher Widerstand. Er nimmt aus dem Netz nur den zur Arbeitsleistung und Verlustdeckung nötigen Wirkstrom auf. Wird zuviel Magnetisierungsstrom zugeführt, so muß das Netz einen entsprechend starken negativen, entmagnetisierenden Blindstrom liefern, man kann sagen, es wird vom Verbraucher der überschüssige Magnetisierungsstrom an das Netz geliefert. Der Verbraucher hat jetzt kapazitiven Charakter. Wird zu wenig Magnetisierungsstrom zugeführt, so nimmt der Verbraucher die

Fehlmenge vom Netz auf, oder der Verbraucher liefert ans Netz voreilenden, negativen Blindstrom.

Ein kennzeichnendes Beispiel ist die Synchronmaschine, bei der das magnetische Feld durch den in der Feldwicklung fließenden Gleichstrom erzeugt wird. Wir denken uns jetzt in unserer Anlage (Abb. 2) noch die Synchronmaschine S, wie gestrichelt gezeichnet, angeschlossen. Läuft die Maschine als Motor, so nimmt sie, wenn das ganze magnetische Feld von der Gleichstromseite aus erzeugt wird, nur den Wirkstrom J_w'' (Abb. 5) auf. Sie arbeitet also mit $\cos \varphi = 1$. Da der Belastungsstrom entmagnetisierend wirkt, so braucht der Motor bei starker Belastung mehr Erregerstrom als bei schwacher. Wird der Motor übererregt, erhält er also zu

viel Magnetisierungsstrom von der Gleichstromseite, so nimmt er von der Drehstromseite aus einen entmagnetisierenden, das heißt negativen, voreilenden Blindstrom J_b'' auf. Das Kraftwerk liefert daher kapazitiven Strom. Der Gesamtstrom eilt gleichfalls der Spannung vor. Umgekehrt entnimmt der untererregte

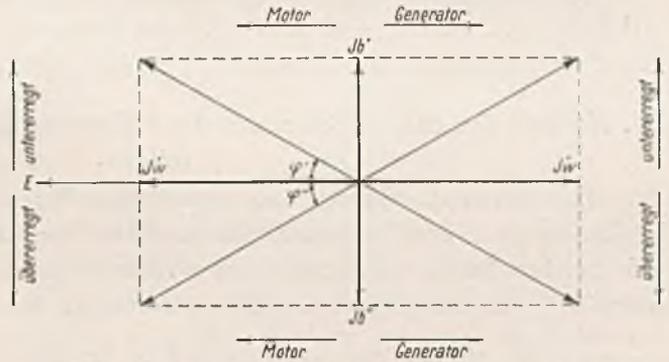


Abb. 5. Stromdiagramm einer Synchronmaschine.

Synchronmotor die Fehlmenge an Magnetisierungsstrom vom Netz. Das Kraftwerk liefert also positiven nacheilenden Blindstrom J_b' ; der gesamte Strom ist also nacheilend.

Wird dieselbe Maschine mechanisch angetrieben, läuft sie also als Synchron-generator, der parallel mit dem Kraftwerk aufs Netz arbeitet, so liefert sie einen Wirkstrom J_w'' ans Netz. Dieser hat eine entgegengesetzte Richtung wie beim Arbeiten als Motor. Er ist vom Standpunkt des Kraftwerkes G ein negativer Strom. Da die Lage der Netzspannung, an der die Synchronmaschine liegt, unverändert geblieben ist, so ist auch die Lage der EMK, also auch die des Feldes der Maschine, unverändert geblieben. Wird das ganze zur Induzierung der EMK erforderliche Feld von der Gleichstromseite aus erzeugt, so arbeitet die Maschine wiederum mit $\cos \varphi = 1$ und gibt ans Netz nur den reinen Wirkstrom J_w'' ab. Wird der Generator S untererregt, so muß seiner Drehstromwicklung, wie früher beim Motor, vom Kraftwerk G ein magnetisierender, also positiver Blindstrom J_b' zugeführt werden. Betrachtet man diesen dagegen vom Standpunkt des Generators S, so eilt er dem Wirkstrom, den dieser liefert, vor; der Generator S liefert also bei Untererregung voreilenden Strom ans Netz. Dieser ist für das Kraftwerk G schädlich. Bei Übererregung des Generators S muß das Kraftwerk einen negativen, entmagnetisierenden Strom J_b'' liefern, oder man kann sagen, der Generator liefert nacheilenden Strom ans Netz, wirkt in diesem Falle also phasenkompensierend. Diese Art der Phasenkompensation hat auch in der Praxis eine große Bedeutung. Die Phasenkompensationsmaschine kann dabei unter Umständen nur zur Lieferung von Blindstrom heran-

gezogen werden. Bemerkenswert ist, daß die Synchronmaschine bei Übererregung sowohl als Motor wie als Generator als Phasenkompensator wirkt, denn die Richtung der Blindströme ist von der Richtung des Wirkstromes unabhängig. Verwendet man z. B. einen Turbogenerator zur Phasenkompensation, so kann er also als Motor oder Generator laufen, je nach der Menge des der Turbine zugeführten Dampfes.

Es möge noch, um Mißverständnissen vorzubeugen, ausdrücklich hervorgehoben werden, daß im vorstehenden der Einfachheit halber die Spannungsabfälle in der Maschine vernachlässigt worden sind, da diese für die Betrachtungen unwesentlich sind.

Die weitere wichtige Schlußfolgerung, die aus dem obigen Beispiel klar ersichtlich ist, ist die, daß durch falsche Erregung ein stromlieferndes Werk die Phasenverschiebung eines zweiten parallel arbeitenden Werkes verschlechtert.

IV. Einfluß der Blindströme auf die Stromerzeugungs- und Stromverteilungsanlage.

Die durch die Blindströme verursachte Phasenverschiebung hat in vielerlei Beziehung einen ungünstigen Einfluß auf die Stromerzeugung und Stromverteilung. Bei gleicher Leistung, also gleichem Wirkstrom J_w , ist bei Phasenverschiebung durch das Hinzukommen des Blindstromes J_b der Gesamtstrom J im Verhältnis $\frac{1}{\cos \varphi}$ größer als bei $\cos \varphi = 1$ ($\varphi = 0$). Er berechnet sich nach dem Obigen zu $J = \sqrt{J_w^2 + J_b^2}$.

Der elektrische Teil des Kraftwerkes und die Leitungsanlage müssen demnach für eine höhere Stromstärke, d. h. eine höhere Scheinlast, die bei gleichbleibender Spannung der Stromstärke, also $\frac{1}{\cos \varphi}$, proportional ist, bemessen werden. Abb. 6 zeigt den Verlauf der Größe $(\frac{1}{\cos \varphi} - 1)$ als Funktion von $\cos \varphi$. Dies ist die relative Erhöhung des Stromes bzw. der Scheinlast gegenüber dem Wert bei $\cos \varphi = 1$. Diese Größe multipliziert mit 100 gibt die prozentuale Erhöhung. In der Abbildung gilt für die, für den Bereich $\cos \varphi = 1$ bis 0,5 herab gezeichnete, ausgezogene Kurve der rechts angeschriebene Ordinatenmaßstab, für die gestrichelte, die für den ganzen Bereich gilt, der zehnmal kleinere links angeschriebene Maßstab.

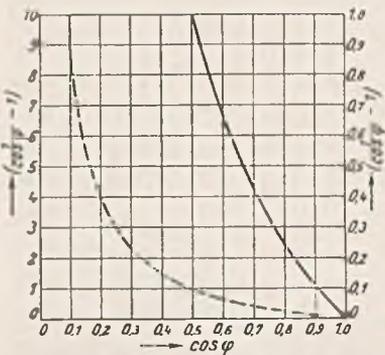


Abb. 6. $(\frac{1}{\cos \varphi} - 1)$ in Abhängigkeit von $\cos \varphi$.

Es ist zu berücksichtigen, daß für die Bemessung der Maschinen und Leitungen die Stromwärmeverluste und die durch diese hervorgerufene Erwärmung maßgebend sind. Diese Verluste sind dem Quadrate der Stromstärke J proportional. Da $J^2 = J_w^2 + J_b^2$ ist, so kann man sagen, daß die durch die Phasenverschiebung bedingten Zusatzverluste bei gegebener Maschinen- oder Leitungsanlage unmittelbar proportional dem Quadrate des hinzugekommenen

Blindstromes sind. Die Verluste ergeben sich also unmittelbar als Summe der getrennt berechneten Stromwärmeverluste durch den Wirk- und Blindstrom. Aus diesem Grunde schlägt Rüdberg¹⁾ als Maß für die durch die Phasenverschiebung verursachte Verschlechterung nicht den Leistungsfaktor, sondern die Verlustvermehrung, d. h. das Verhältnis

$$\frac{J_b^2}{J_w^2} = \frac{N_b^2}{N_w^2} = \operatorname{tg}^2 \varphi,$$

vor. Den Verlauf dieser Größe als Funktion von $\cos \varphi$ zeigt Abb. 7, die entsprechend der Abb. 6 gezeichnet ist.

Da J proportional $\frac{1}{\cos \varphi}$ ist, so sind die Gesamtverluste proportional $\frac{1}{\cos^2 \varphi}$.

Abb. 7 stellt auch den Verlauf der Größe $(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1)$ als Funktion von $\cos \varphi$ dar, da $\frac{1}{\cos^2 \varphi} = \operatorname{tg}^2 \varphi + 1$ ist.

Von Interesse ist nach dem Obigen noch das Verhältnis des Blindstromes zum Wirkstrom bei verschiedenen Phasenverschiebungen. Aus diesem Grunde ist in Abb. 8 unter Annahme eines Wirkstromes gleich 1 der Blindstrom in Abhängigkeit von $\cos \varphi$ eingetragen. Die Kurve stellt natürlich auch das Verhältnis zwischen Blindlast und Leistung dar, d. h. den Verlauf von $\operatorname{tg} \varphi$ in Abhängigkeit von $\cos \varphi$.

Außer der Notwendigkeit, mit Rücksicht auf die Blindströme die Anlage reichlicher zu bemessen oder bei einer bestehenden Anlage höhere Verluste in Kauf zu nehmen, bringen die positiven Blindströme einen weiteren Nachteil in bezug auf Erhöhung der Spannungsabfälle in der Leitung mit sich. Abb. 9a zeigt das entsprechende Diagramm²⁾. Hierin bedeutet E die Spannung am Ende der Leitung (Spannung bei den Verbrauchern), J den um den Winkel φ in Nacheilung gegen E befindlichen Strom. Die Spannung E_1 am Anfange der Leitung ergibt sich dann durch Hinzufügung des Ohmschen Spannungsabfalles $J \cdot R$ und des induktiven Spannungsabfalles $J \cdot \omega L$. In der Praxis spielt meist nicht der geometrische Spannungsabfall ε (die Hypotenuse des Spannungsabfalldreiecks) eine Rolle, sondern die arithmetische Differenz $\Delta = E_1 - E$. Da E und E_1 im Verhältnis zu ε in Wirklichkeit sehr groß sind, so ist E praktisch parallel E_1 und Δ praktisch gleich der Strecke Δ' , die sich als Abstand des Endpunktes von E und der Projektion des End-

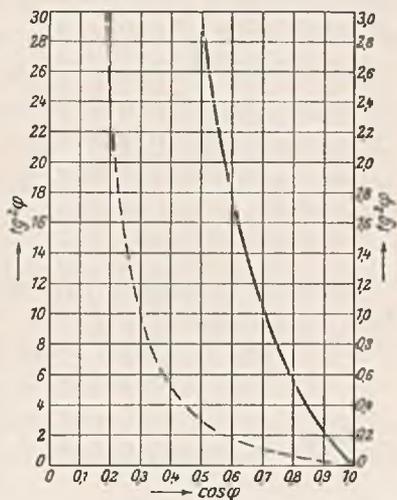


Abb. 7. $\operatorname{tg}^2 \varphi$ in Abhängigkeit von $\cos \varphi$.

¹⁾ R. Rüdberg: „Blindstrom, seine Ursachen und Wirkungen in Wechselstromanlagen“. Siemens-Zeitschrift 2, S. 1 u. 58, 1922.

²⁾ Bei Drehstrom gilt das Diagramm für Phasenspannungen; die verketteten Spannungen ergeben sich durch Multiplikation der entsprechenden Werte mit $\sqrt{3}$.

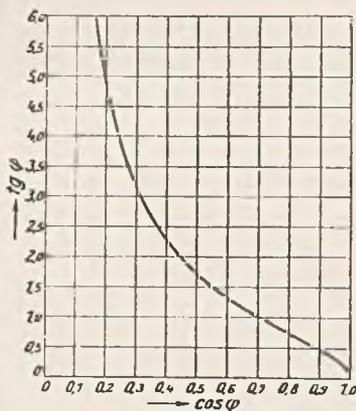


Abb. 8. $\operatorname{tg} \varphi$ in Abhängigkeit von $\cos \varphi$.

punktes von E_1 auf E ergibt. Die Verhältnisse lassen sich besonders bequem übersehen, wenn man, wie Burger es tut¹⁾, die Spannungsabfälle für den Wirk- und Blindstrom getrennt aufträgt (Abb. 9b). Man sieht dann deutlich, daß Δ' , also praktisch auch Δ , nur durch den Ohmschen Abfall des Wirkstromes und den induktiven Abfall des Blindstromes bedingt ist. Dagegen beeinflussen die auf E senkrecht stehenden Spannungsabfälle nur die Größe der Phasenverschiebung α zwischen E_1 und E .

Es läßt sich deutlich erkennen, daß schon bei verhältnismäßig kleinen Werten von $\cos \varphi$ die Differenz Δ durch den Blindstrom wesentlich beeinflusst wird, da der induktive Widerstand der Leitung in der Größenordnung des Ohmschen liegt und meist sogar etwas größer als dieser ist. Ferner ist noch bei verhältnismäßig guten Werten von $\cos \varphi$ der Blindstrom im Verhältnis zum Wirkstrom ziemlich groß, so z. B. bei $\cos \varphi = 0,8$ schon 75 v. H. des Wirkstromes (Abb. 8). Der induktive Widerstand bei der Frequenz 50 beträgt, bezogen auf eine Leitung, bei Freileitungen in den meisten Fällen etwa 0,5 Ohm je Kilometer.

Bei voreilem Strom ist der induktive Spannungsabfall durch den in diesem Falle negativen Blindstrom entgegengesetzt gerichtet wie bei nacheilem Strom. Er bewirkt hier eine Verminderung der Spannungsdifferenz Δ und kann sogar eine Spannungserhöhung zur Folge haben. Dagegen wird die Phasenverschiebung α zwischen E_1 und E vergrößert. Diese Verhältnisse werden durch Abb. 9c veranschaulicht, in der der Strom die gleiche Größe und Phasenverschiebung hat wie in Abb. 9b, jedoch im voreilem Sinne.

In derselben Weise, wie ein voreilem Belastungsstrom, wirkt auch der Ladestrom der Leitung, der jedoch nur bei sehr hohen Spannungen von Bedeutung ist. Aus dem Obigen ist auch ersichtlich, daß die Erzeugung von voreilem oder nacheilem Blindstrom am Ende der Leitung ein Mittel zur Regelung der Spannung bei den Verbrauchern ist. Allerdings ist diese Regelung mit den durch den Blindstrom verursachten zusätzlichen Verlusten verbunden.

Nach dem Obigen läßt sich auch ohne Aufstellung des Diagramms die Spannungsdifferenz $\Delta' \approx \Delta$ berechnen.

$$\Delta' \approx \Delta = J_w R + J_b \cdot \omega L.$$

Ferner berechnet sich die Phasenverschiebung α zwischen E_1 und E aus den Beziehungen

$$\sin \alpha = \frac{J_w \cdot \omega L - J_b R}{E_1} \approx \frac{J_w \cdot \omega L - J_b R}{E + \Delta'}.$$

Dabei ist zu beachten, daß bei voreilem Strom $J_b R$ negativ wird.

¹⁾ O. Burger: „Parallelbetrieb von Kraftwerken“. „Cos φ“ – Sonderheft der Siemens-Zeitschrift, S. 74, November 1921.

V. Mittel zur Verbesserung des $\cos \varphi$.

Der Leistungsfaktor in den Anlagen kann grundsätzlich auf zweierlei Weise verbessert werden, und zwar einerseits, indem die angeschlossenen Maschinen und Apparate derart ausgebildet werden, daß sie mit günstigem $\cos \varphi$ arbeiten, andererseits indem man an geeigneten Stellen der Stromverteilungsanlage besondere Maschinen und Apparate aufstellt, die voreilenden Strom aufnehmen, bzw., was dasselbe ist, nacheilenden Strom ans Netz liefern, so

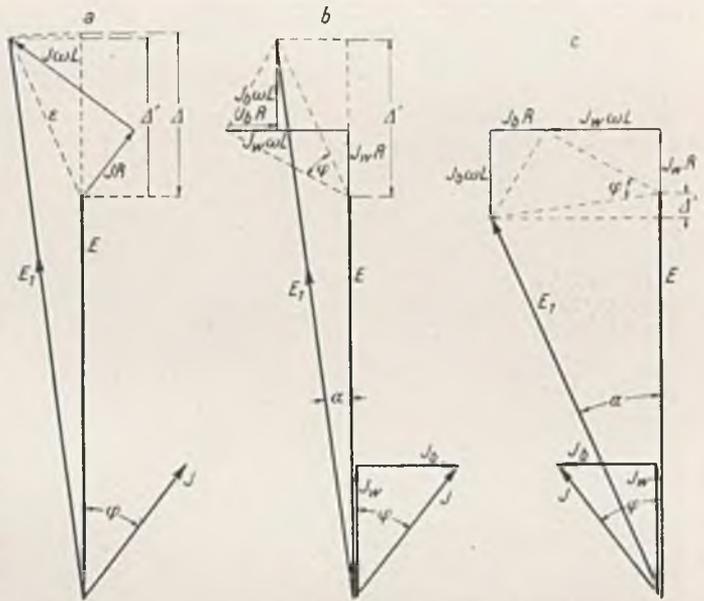


Abb. 9. Diagramme des Spannungsabfalls einer Leitung bei positivem und negativem Blindstrom.

daß das Kraftwerk von diesen Strömen entlastet wird. Die Betrachtungsweise der besonderen Phasenkompensationseinrichtungen als Erzeuger von nacheilendem Blindstrom ist wesentlich bequemer und verständlicher.

Das erste Verfahren, d. h. Vermeidung der Blindströme überhaupt, ist das günstigere, läßt sich jedoch in der Praxis nicht überall durchführen.

Die wichtigsten Mittel zur Vermeidung unnützer Blindströme bei den Verbrauchern sind die folgenden:

1. Richtige Wahl der Größe der angeschlossenen Transformatoren und Motoren. Es werden sehr oft zu große Transformatoren und Asynchronmotoren gewählt, die schlecht belastet sind und deshalb mit schlechtem $\cos \varphi$ arbeiten (siehe hierzu Abb. 4). Besonders ungünstig liegen in dieser Beziehung die Verhältnisse in den landwirtschaftlichen Anlagen. Hier wurde vorgeschlagen, die Verhältnisse dadurch zu verbessern, daß man Asynchronmotoren verwendet, die bei geringer Belastung in Stern geschaltet sind, bei hoher in Dreieck¹⁾. Ferner ist von großer Wichtigkeit, daß die Netzspannung nicht zu hoch ist, da bei zu hoher Spannung die Blindströme stark anwachsen.

2. Bei größeren Asynchronmotoren kann die Phasenverschiebung durch Anwendung besonderer Phasenschieber kompensiert werden. Diese Phasenschieber beruhen darauf, daß der für den Motor erforderliche Magnetisierungsstrom, ähnlich wie dies bei einer Synchronmaschine der Fall ist, nicht vom Netz dem Ständer, sondern dem Läufer durch den Phasenschieber zugeführt wird. Es gibt verschiedene Arten solcher Phasenschieber, von denen einige (Vibrator von Kapp) eine besondere Gleichstromerregung haben, die anderen eine solche nicht benötigen. Bei diesen wird der Magnetisierungsstrom mittelbar dem Netz

¹⁾ Siehe hierzu z. B. F. Hoppe: „Dreschmotor in Sparschaltung für landwirtschaftliche Kleinkraft“. Mitteilung der Vereinigung der EW, 20, Nr. 298b, S. 19, 1921.

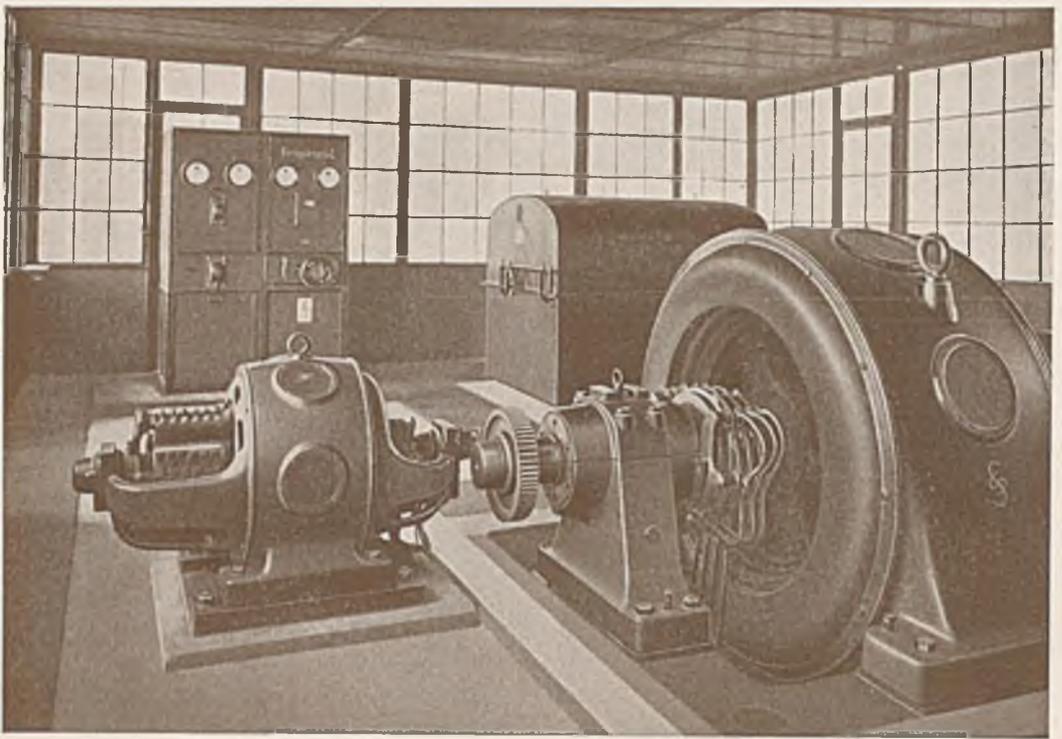


Abb. 10. Walzwerkmotor mit Phasenschieber für eine Fertigstraße im Metallwerk der SSW.

entnommen. Die Blindlast ist jedoch wesentlich geringer als bei der Magnetisierung vom Ständer aus, denn die zur Erzeugung eines bestimmten magnetischen Feldes erforderliche Blindlast ist der Frequenz des Magnetisierungsstromes proportional. Diese Frequenz ist beim Läufer sehr gering. Ferner unterscheiden sich die verschiedenen Arten dadurch, daß einige nur bei starkbelastetem Motor wirken, die anderen auch bei niedriger Belastung. Unter Umständen können die Motoren überkompensiert werden, so daß sie sogar nachteiligen Blindstrom ans Netz liefern.

Die Verwendung von Phasenschiebern beschränkt sich allerdings nur auf größere Asynchronmotoren. Abb. 10 zeigt beispielsweise einen Walzwerkmotor mit Phasenschieber¹⁾.

3. Am günstigsten sind in bezug auf Phasenverschiebung die Synchronmotoren, jedoch war ihr Anwendungsbereich durch die Notwendigkeit des Anwerfens und Synchronisierens bis vor kurzem auf größere Einheiten beschränkt. Neuerdings ist es gelungen, Synchronmotoren bei kleinem Drehmoment ohne Synchronisieren ans Netz anzulegen und in allerletzter Zeit werden Synchronmotoren mit asynchronem Anlauf gebaut, die auch unter Vollastdrehmoment

¹⁾ Näheres über Phasenschieber siehe: Caspari „Mittel zur Verbesserung der Phasenverschiebung“. Vortrag gehalten in den Hochschulfortbildungskursen für Elektrotechnik in Essen, September 1919; R. Rüdberg „Über Phasenschieber und ihre Verwendung zur Verbesserung des Leistungsfaktors von Drehstrommotoren“. Elektrische Kraftbetriebe und Bahnen. 1914, S. 425 und 469 (auch als Sonderabdruck erschienen); R. Rüdberg „Blindstrom, seine Ursachen und Wirkungen in Wechselstromanlagen“. Siemens-Zeitschrift, 2, S. 1 u. 58, 1922.

anlaufen können. Es fehlt auch nicht an Versuchen, Synchronmotoren für ganz kleine Leistungen zu bauen. Nähere Daten über solche Maschinen sind jedoch noch nicht bekannt geworden. Synchronmotoren können noch in erhöhtem Maße als die kompensierten Asynchronmotoren auch zur Lieferung von nachteilendem Blindstrom ans Netz herangezogen werden. Es ist günstig, daß ein solcher Synchronmotor, wenn seine Erregung derart eingestellt ist, daß er bei Vollast mit $\cos \varphi = 1$ arbeitet, bei geringer Belastung nachteilenden Strom ans Netz liefert. Abb. 11 zeigt beispielsweise das Verhalten eines Synchronmotors der SSW mit asynchronem Anlauf und angebauter Erregermaschine¹⁾. Die Vollastleistung des Motors beträgt 30 kW. Seine Erregung ist so eingestellt, daß er bei Vollast mit $\cos \varphi = 1$ arbeitet.

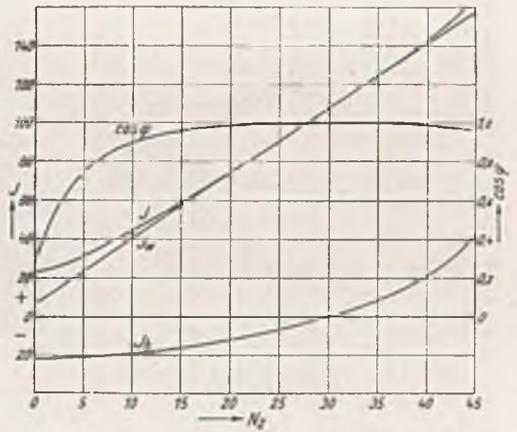


Abb. 11. Ströme und Leistungsfaktor eines Synchronmotors in Abhängigkeit von der abgegebenen Leistung N_2 bei konstantem Erregerstrom, entsprechend $\cos \varphi = 1$ bei Vollast (30 kW).

Das zweite Verfahren, d. h. die Kompensation der Blindströme durch Aufstellung besonderer nachteilenden Strom liefernder, bzw. voreilenden Strom aufnehmender Maschinen und Apparate, kommt überall dort in Frage, wo die Blindströme bei den Verbrauchern selbst nicht zu vermeiden sind. In kleinem Maße wirken als solche blindstromerzeugende Einrichtungen die ans Netz angeschlossenen überkompensierten Synchron- und Asynchronmotoren (siehe oben). Diese Kompensation wird jedoch meist nicht genügen, so daß besondere Blindstromerzeuger aufgestellt werden müssen. Als solche kommen in Betracht:

1. Sogenannte Synchronphasenschieber, d. h. übererregte Synchronmaschinen, die nur zur Abgabe von nachteilendem Blindstrom bestimmt sind. Sie unterscheiden sich von normalen Synchronmotoren nur unwesentlich. Abb. 12 zeigt beispielsweise einen solchen Synchronphasenschieber der SSW. In vielen Fällen können auch im Netz vorhandene Synchrongeneratoren als Phasenschieber verwendet werden, wobei es oft vorteilhaft ist, Vorkehrungen zu treffen, um die Antriebsmaschine abkuppeln zu können²⁾. Ferner können natürlich auch die Phasenschieber zur Abgabe elektrischer oder mechanischer Leistung mit herangezogen werden.

2. Kondensatoren. Die Verwendung dieser als Phasenschieber ist sehr naheliegend und im Prinzip sehr einfach, jedoch bietet bis jetzt die praktische Ausbildung brauchbarer Kondensatoren Schwierigkeiten. Auch stellen sich die Kondensatoren bis jetzt teurer in der Anschaffung als Synchronphasenschieber; andererseits werden von Anhängern der Kondensatoren zu ihren Gunsten die kleinen Verluste angeführt.

¹⁾ Ist eine Gleichstromquelle vorhanden, so wird die Erregung an diese angeschlossen, so daß sich die Erregermaschine erübrigt.

²⁾ Siehe hierzu Hajek: „Eine bemerkenswerte Kraftanlage zur Verbesserung des Leistungsfaktors“. „Cos φ “ — Sonderheft der Siemens-Zeitschrift, S. 80, November 1921.

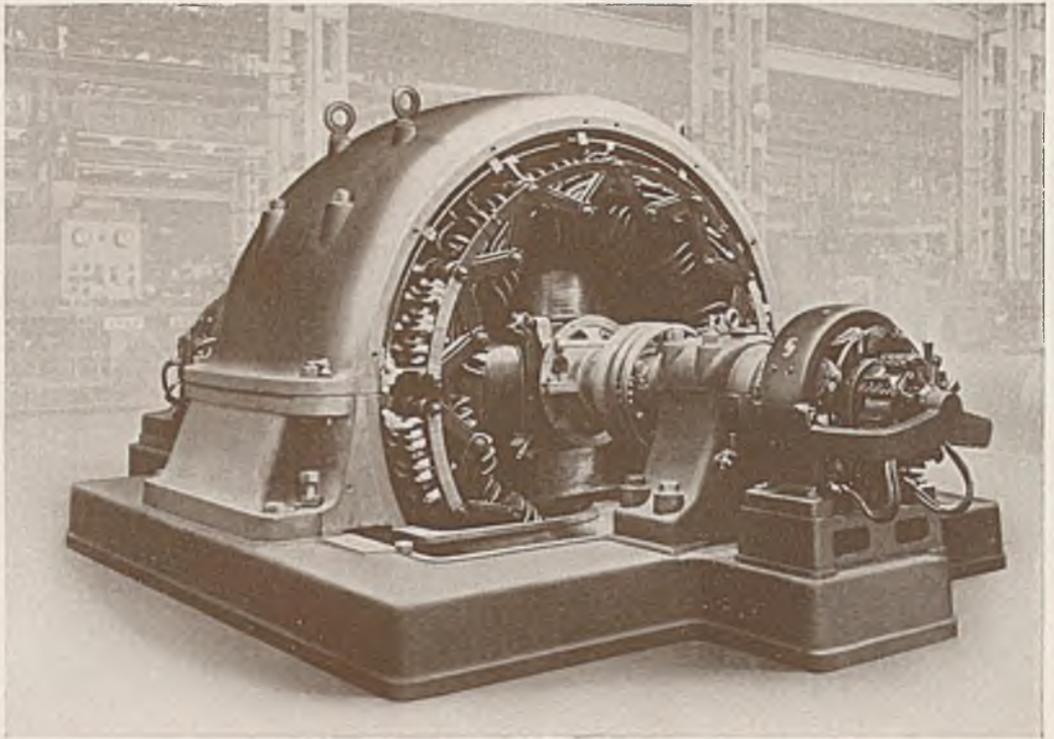


Abb. 12. Schnellaufender Synchronphasenschieber für starke Blindlast.

Von großer Wichtigkeit ist die richtige Wahl des Aufstellungsortes von Phasenschiebern. Am günstigsten ist es, sie in unmittelbarer Nähe der mit hoher Phasenverschiebung arbeitenden Abnehmer aufzustellen. Da man jedoch aus betriebstechnischen Gründen nur wenig Phasenschieber verwenden möchte, so muß von Fall zu Fall die Frage des richtigen Aufstellungsortes geprüft werden. Im allgemeinen kommt hierfür der Schwerpunkt der Belastung in Betracht. Bei Verwendung von Kondensatoren ist eine weitgehendere Unterteilung natürlich leichter durchzuführen als bei Synchronphasenschiebern. Dies ist als weiterer Vorteil der Kondensatoren anzusehen.

In gewissen Fällen können jedoch auch Phasenschieber, die im stromliefernden Kraftwerk selbst laufen, von Vorteil sein. Als solche Phasenschieber kommen allerdings nur einige der Generatoren des Kraftwerkes selbst in Frage. In diesem Fall kann erreicht werden, daß ein Teil der Turbo-Generatoren mit kleiner Phasenverschiebung, soweit dies die Turbinen zulassen, mit $\cos \varphi = 1$ arbeiten und die anderen Generatoren nur als Phasenschieber laufen. Bei dieser Betriebsweise können die Turbinen voll belastet werden und arbeiten mit höherem Wirkungsgrad. In gewissen Fällen hat sich dieses Arbeitsverfahren in der Praxis als wirtschaftlich erwiesen. Hierauf wurde auch auf der „ $\cos \varphi$ “ Tagung der Vereinigung der Elektrizitätswerke aufmerksam gemacht. Solche Phasenschieber im Kraftwerk selbst vermindern natürlich nicht den gesamten vom Kraftwerk zu liefernden Blindstrom.

Bei Kraftübertragung mit sehr hoher Spannung muß auf die nicht unbedeutlichen Ladeströme der Leitung Rücksicht genommen werden. Diese stellen

eine kapazitive Belastung dar, in dem jedes Leitungselement einen bestimmten Ladestrom aufnimmt. Hieraus ergibt sich ein Ladestrom, der am größten im Kraftwerk ist und nach dem Ende der Leitung zu abnimmt. In diesem Falle ist es mit Rücksicht auf die Leitungsverluste unter Umständen zweckmäßig, an bestimmte Stellen des Netzes nacheilenden Blindstrom zu liefern. Wie man die Blindströme zu verteilen hat, läßt sich auf eine bequeme Weise mit Hilfe von „Strombildern“ übersehen, auf deren Vorteile Lommel bei der „ $\cos \varphi$ “-Tagung der Vereinigung der Elektrizitätswerke aufmerksam gemacht hat¹⁾.

Es möge an einem einfachen Beispiel die Anwendung eines Strombildes gezeigt werden:

Es sei eine auf ihrer ganzen Länge in gleicher Weise beschaffene 110 kV²⁾ Freileitung von 150 km Länge gegeben (Abb. 13). Sie wird vom Kraftwerk G gespeist. In der Mitte befindet sich ein Abnehmer A1 und am Ende ein Abnehmer A2. Der Ladestrom der Leitung betrage

je Phase und km 0,187 A, insgesamt also je Phase $0,187 \times 150 = 28$ A. Dieser Ladestrom nimmt, vom Kraftwerk aus gesehen, bis zum Ende der Leitung linear ab. Er ist in den Strombildern (Abb. 14) mit J_c bezeichnet. In diesen Bildern sind als Abszisse die Abstände vom Kraftwerk, als Ordinate die Ströme aufgetragen. Die durch die Ströme verursachten Leitungsverluste sind proportional dem Widerstand der Leitung und dem Mittelwert der Quadrate der Stromstärken, also der mittleren Ordinate der J^2 -Kurve, die in Abb. 14a gestrichelt eingezeichnet ist. Würde am Ende der Leitung ein positiver Blindstrom von 14 A entnommen, so würde sich das in Abb. 14b gezeichnete Strombild ergeben. Dabei hat der positive Blindstrom auf der ganzen Leitung den gleichen Wert. Man braucht die J^2 -Linie gar nicht zu zeichnen, um zu sehen, daß der quadratische Mittelwert des resultierenden Blindstromes in diesem Fall kleiner ist als in Abb. 14a. In Abb. 14c ist angenommen, daß am Ende der Leitung ein positiver Blindstrom von 7 A,

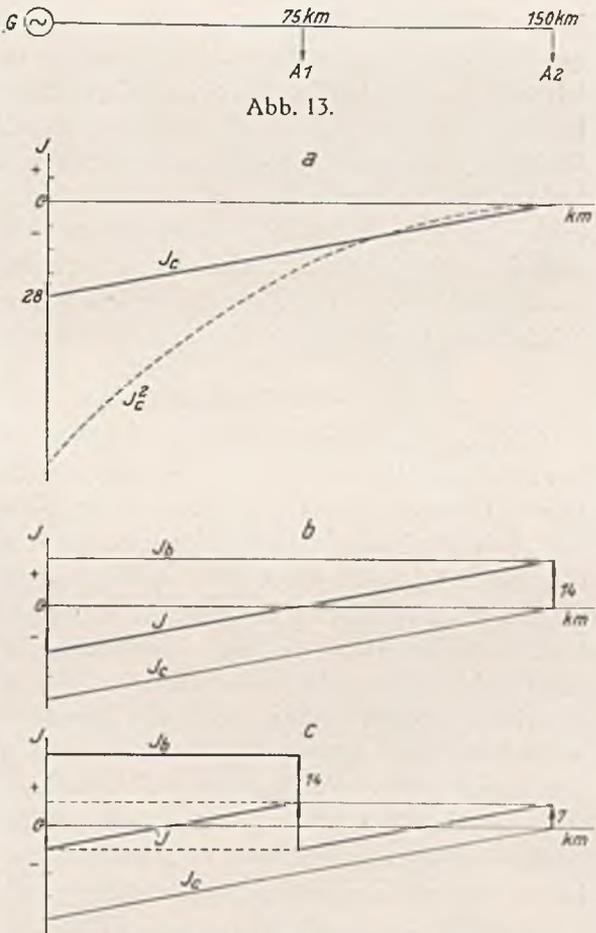


Abb. 13 und 14. Verteilung der Blindströme auf einer Fernleitung.

¹⁾ Siehe hierzu auch Kühle: „Über den Einfluß von Kompensations-Drosselspulen auf die Betriebsverhältnisse in Hochspannungs-Kabelleitungen“. ETZ 34, 733, 1913.

²⁾ Die Spannungsabfälle, insbesondere auch die induktiven, mögen für die Betrachtung vernachlässigt werden.

in der Mitte von 14 A entnommen wird. Man sieht, daß in diesem Falle der quadratische Mittelwert des Blindstromes noch viel kleiner geworden ist. Der letzte Belastungsfall ist also besonders günstig. Die entnommenen Wirkströme brauchen im vorliegenden Falle nicht berücksichtigt zu werden, da nach dem Obigen (siehe Seite 10) die durch die Blind- und Wirkströme verursachten Verluste unmittelbar addiert werden können. In ähnlicher Weise können die Strombilder auch bei komplizierteren Stromverteilungsanlagen angewandt werden, wobei zu beachten ist, daß bei Leitungen, deren Teile verschiedene Querschnitte haben, in den Strombildern als Abszisse nicht die Längen, sondern die Widerstände einzutragen sind.

VI. Parallelarbeiten von Kraftwerken¹⁾.

Wie oben bereits gezeigt, können durch entsprechende Erregung von Synchronmaschinen²⁾ die von ihnen abgegebenen Blindströme beeinflußt werden. Diese Tatsache ist von größter Wichtigkeit bei parallel arbeitenden Werken.

Für die Frage, wie die Generatoren von parallel arbeitenden Werken erregt sein müssen, sind zwei Gesichtspunkte maßgebend. Erstens müssen die Generatoren nach Möglichkeit so erregt werden, daß die gesamten entstehenden Verluste tunlichst klein werden. Zweitens können rein betriebstechnische Gründe für die Verteilung der Blindströme maßgebend sein. Es lassen sich keine allgemeinen Regeln geben, wie die Blindströme verteilt werden müssen. Insbesondere muß bei großen Kraftübertragungen von Fall zu Fall diese Frage eingehend geprüft werden und die Verteilung der Wirk- und Blindlast gegebenenfalls von einer besonderen Zentralstelle geregelt werden. Um die Verhältnisse nachträglich völlig zu übersehen und in Zukunft günstig zu gestalten, ist in solchen Fällen der Einbau registrierender Leistungs- und Phasemesser unbedingt erforderlich.

Arbeiten kleinere Werke mit größeren parallel, wie dies beispielsweise in Industriebezirken oft der Fall ist, so erscheint hier eine einfache Regel für die Art des Parallelarbeitens erwünscht. Als solche dürfte in vielen Fällen vorgeschrieben werden, daß der Strom von allen parallelarbeitenden Werken etwa bei gleicher Phasenverschiebung wie die im Mittel im Netz herrschende geliefert wird. Nach den jetzigen Erfahrungen dürfte ein Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0,6$ bis $0,8$ praktisch in Frage kommen. Die Werke werden hierbei durch Einbau entsprechender Zähler daran interessiert, richtig zu arbeiten. In den einzelnen Verbindungsleitungen müssen natürlich auch hier zweckmäßigerweise Phasenzeiger eingebaut werden. Abb. 15 zeigt einen für die Überwachung des Betriebes bei parallelarbeitenden Kraftwerken sehr zweckmäßigen Phasenzeiger der Siemens & Halske A.-G. für 4 Quadranten.

Dabei ist das Arbeiten der verschiedenen Kraftwerke mit gleicher Phasenverschiebung im allgemeinen nur dann möglich, wenn die Spannungsabfälle in den Verbindungsleitungen vernachlässigt werden können. Dieser Fall trifft praktisch

¹⁾ Siehe hierzu Burger a. a. O. (S. 12, Fußnote.)

²⁾ Auf Asynchronwerke näher einzugehen, dürfte wegen deren bis jetzt geringer Bedeutung nicht notwendig sein. Näheres hierüber siehe Kyser: „Die Ausrüstung kleiner Wasserkraftwerke mit Asynchron- oder Synchrongeneratoren im Parallelbetrieb mit großen Dampfkraftwerken“. Siemens-Zeitschrift 1, S. 118 und 152, 1921.

nur dann zu, wenn mehrere Kraftwerke auf ein und dasselbe Netz arbeiten. Sind dagegen längere Verbindungsleitungen zwischen den Kraftwerken vorhanden und müssen bestimmte Spannungswerte eingehalten werden, so bedingen die Spannungsabfälle eine bestimmte Verteilung der Blindströme (siehe hierzu Seite 11). Die Verhältnisse ändern sich, falls die Spannungsregelung durch Drehtransformatoren vorgenommen wird.

Wie die Verhältnisse bei Vernachlässigung der Spannungsabfälle liegen, möge an einem Beispiel erläutert werden.

Abb. 16 zeigt in einpoliger Darstellung die Schaltung der Anlage. Kraftwerk I liefert Strom an sein Netz I, das den Strom J_1 aufnimmt. Kraftwerk II liefert den Strom J_2 an sein Netz II. Außerdem können die Kraftwerke sich gegenseitig durch die Verbindungsleitung unterstützen. Der von einem Kraftwerk an das andere gelieferte Strom ist dabei J_a . In der Verbindungsleitung ist zwecks Verrechnung ein Zähleraggregat Z eingeschaltet. Es möge beispielsweise der Fall behandelt werden, in dem das Kraftwerk II das Kraftwerk I unterstützt, also Leistung an I abgibt. Dies ist durch den Pfeil in der Verbindungsleitung angedeutet. Die Netzspannung betrage $E = 20$ kV, und zwar bei beiden Werken. Die Verbraucher, die ans Netz I angeschlossen sind, nehmen die Leistung $N_1 = 41\,600$ kW auf, $\cos \varphi = 0,8$ ($\varphi \approx 37^\circ$), $\sin \varphi = 0,6$. Entsprechend ist die Leistung im Netz II $N_2 = 6930$ kW, $\cos \varphi = 0,8$. Daraus ergeben sich die Verbrauchsströme zu

$$J_1 = \frac{N_1}{\sqrt{3} \cdot E \cos \varphi} = \frac{41\,600}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 0,8} = 1500 \text{ A}^1).$$

Die beiden Komponenten des Stromes ergeben sich zu

$$J_{w1} = J_1 \cos \varphi = 1500 \cdot 0,8 = 1200 \text{ A, und}$$

$$J_{b1} = J_1 \sin \varphi = 1500 \cdot 0,6 = 900 \text{ A.}$$

Entsprechend für Netz II

$$J_2 = \frac{6930}{20 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{3}} = 250 \text{ A; } J_{w2} = 250 \cdot 0,8 = 200 \text{ A und } J_{b2} = 250 \cdot 0,6 = 150 \text{ A.}$$

In Abbildung 17:19 ist die Verteilung der Ströme und deren Lage bei verschiedenen Erregungen der beiden Werke veranschaulicht, wobei in allen Fällen angenommen ist, daß das Werk II einen Wirkstrom von 400 A entsprechend einer Leistung von 13 900 kW an das Werk I abgibt. Der Spannungsvektor ist in diesem Falle vertikal gezeichnet. Es ist dabei angenommen, daß die Netzspannung von Werk I konstant gehalten wird.

Abb. 17 zeigt den Fall, in dem beide Kraftwerke ihre Generatoren so erregen, daß sie den Strom bei gleicher Phasenverschiebung φ , wie die in den Netzen herrschende, liefern. Kraftwerk II liefert dabei (Abb. 17b) an seine Verbraucher den Strom J_2 und durch die Verbindungsleitung den Strom J_a . Die Ampere-



Abb. 15. Leistungsfaktormesser, 360° Ausschlag, geschlossen.

¹⁾ N_1 in kW und E in kV.

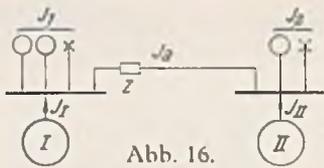


Abb. 16.

zahlen der Blindströme sind in der Zeichnung eingeschrieben. Dann muß das Kraftwerk I den Strom J_I abgeben, der sich als Differenz des gesamten an das Netz I zu liefernden Stromes J_1 und des vom Kraftwerk II herübergelieferten Stromes J_a ergibt. Zur Bildung der Differenz wird das Stromdreieck J_a vom Ende von J_1 aus abgetragen. Die Ströme J_1, J_I, J_a, J_2 und J_{II} sind in Abb. 17c nochmals vom Nullpunkt aus aufgetragen.

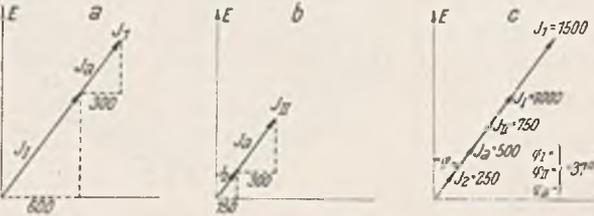


Abb. 17.

In Abb. 18 ist der Fall dargestellt, in dem das Werk II seine Generatoren derart untererregt hat, daß sein gesamter Strom J_{II} (Abb. 18b) in Phase mit der Spannung liegt. Das Werk II arbeitet also denkbar günstig, nämlich mit $\cos \varphi = 1$, weil es an das Netz I voreilenden Blindstrom abgibt. Hieraus folgt (Abb. 18a), daß das Werk I den gesamten Blindstrom J_{bI} und noch den zur Kompensierung von J_a erforderlichen Blindstrom zu liefern hat. Es liefert insgesamt 1050 A Blindstrom gegenüber 600 A bei richtiger Erregung von Werk II. Die Phasenverschiebung von J_I beträgt etwa $52,5^\circ$, $\cos \varphi_I = 0,61$. In Abb. 18c sind die einzelnen Vektoren vom Nullpunkt aus nochmals eingetragen.

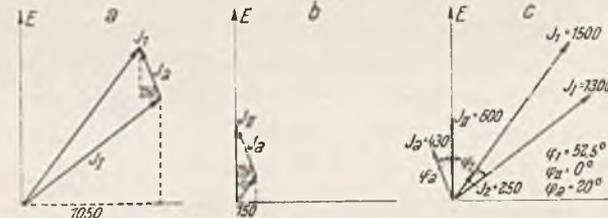


Abb. 18.

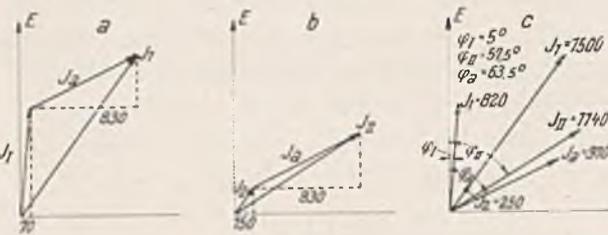


Abb. 19.

Abb. 16–19. Stromverteilung bei zwei parallel arbeitenden Netzen.

schiebung von J_I beträgt etwa $52,5^\circ$, $\cos \varphi_I = 0,61$. In Abb. 18c sind die einzelnen Vektoren vom Nullpunkt aus nochmals eingetragen.

Abb. 19 zeigt den Fall, in dem das Werk II seine Generatoren übererregt hat, so daß es einen Blindstrom von 830 A ans Netz I liefert. Es arbeitet dabei mit einer Phasenverschiebung von etwa $57,5^\circ$, $\cos \varphi_{II} = 0,54$. In diesem Fall arbeitet das Werk I, wie aus Abb. 19a ersichtlich, sehr günstig. Es hat nur den restlichen Blindstrom von 70 A abzugeben. Seine Phasenverschiebung beträgt nur etwa 5° , $\cos \varphi_I \approx 1$.

Wie aus den Abb. 17–19 ersichtlich, ist es auch ohne weiteres möglich, die Verhältnisse auch ohne Aufstellung der Diagramme zu übersehen, indem man die Blindströme unter Berücksichtigung ihres Vorzeichens addiert. Die Summe des von Werk I und Werk II über die Verbindungsleitung zu liefernden Blindstromes muß stets gleich sein dem an die Verbraucher I zu liefernden Blindstrom. Liefert das Werk II nacheilenden, also positiven Blind-

strom, so muß das Werk I nur die Fehlmenge liefern; liefert das Werk II voreilenden, also negativen Blindstrom, so muß das Werk I nicht nur den gesamten Blindstrom der Verbraucher I aufbringen, sondern auch noch den voreilenden Blindstrom kompensieren.

VII. Meßgeräte zur Bestimmung des Verbrauches.

Zur Messung des Verbrauches an elektrischer Arbeit dienen in erster Linie Zähler, die im folgenden etwas eingehender behandelt werden. In Ausnahmefällen kommen noch neben den Zählern selbstschreibende (registrierende) Meßgeräte, insbesondere Leistungszeiger (Wattmeter) und Phasenzeiger ($\cos \varphi$ -Zeiger oder φ -Zeiger) in Betracht¹⁾. Für Wechsel- und Drehstromanlagen kommen folgende Zählerarten in Frage: 1. Kilowattstundenzähler, 2. Blindverbrauchzähler, 3. Scheinverbrauchzähler, 4. Amperestundenzähler, 5. Amperequadratstundenzähler, 6. Voltquadratstundenzähler, 7. Zeitzähler.

Ferner sind folgende Tarifvorrichtungen in Verbindung mit den Zählern von Wichtigkeit: Doppelzählwerk, Höchstverbrauchzeiger, Überverbrauchzählwerk. In gewissen Fällen kommen noch dazu als Nebenapparate Schaltuhren und Kontaktrelais.

Sollen bei der Verrechnung die Blindströme berücksichtigt werden, so genügt der kWh-Zähler allein nicht. Seine Angaben bilden aber auch in diesem Fall die wichtigste Grundlage zur Verrechnung.

Von einigen ganz besonderen Fällen abgesehen, werden zur Zeit für Wechsel- und Drehstrom nur Induktionszähler (Ferraris-Zähler) verwendet. Sie sind durch ihren einfachen Aufbau, große Meßgenauigkeit und Betriebssicherheit allen anderen Zählerarten weit überlegen. Ein besonderer Vorteil dieser Zähler liegt dabei im Fehlen von Bürsten und Kollektor. Die Induktionszähler eignen sich auch vorzüglich zur Ausbildung als Zähler für die Berücksichtigung des Blindstromes.

Blindstromes.

Wegen der großen Bedeutung des Induktionszählers dürfte es für Nichtzählerfachleute erwünscht sein, seine Wirkungsweise wenigstens ganz kurz zu erläutern. Das Eingehen auf Einzelheiten ist hier natürlich nicht möglich²⁾.

Es möge das Prinzip

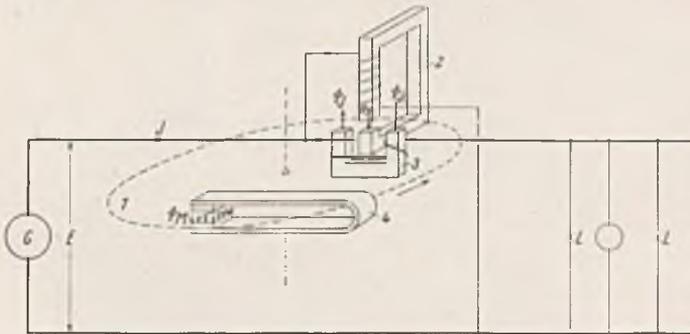


Abb. 20. Schematische Darstellung eines Induktionszählers.

¹⁾ S. hierzu Keinath: „Die Messung von Wirkleistung, Blindleistung, Scheinleistung und Leistungsfaktor“, „Cos φ “-Sonderheft der Siemens-Zeitschrift, S. 19, November 1921, auch als Sonderabdruck erschienen.

²⁾ Näheres siehe Dr.-Ing. J. A. Möllinger: „Wirkungsweise der Motorzähler und Meßwandler“, Berlin 1917.

Dr.-Ing. K. Schmiedel: „Wirkungsweise und Entwurf der Motor-Elektrizitätszähler“, Stuttgart 1916.

Dr.-Ing. W. v. Krukowski: „Vorgänge in der Scheibe eines Induktionszählers und der Wechselstromkompensator als Hilfsmittel zu deren Erforschung“, Berlin 1920.

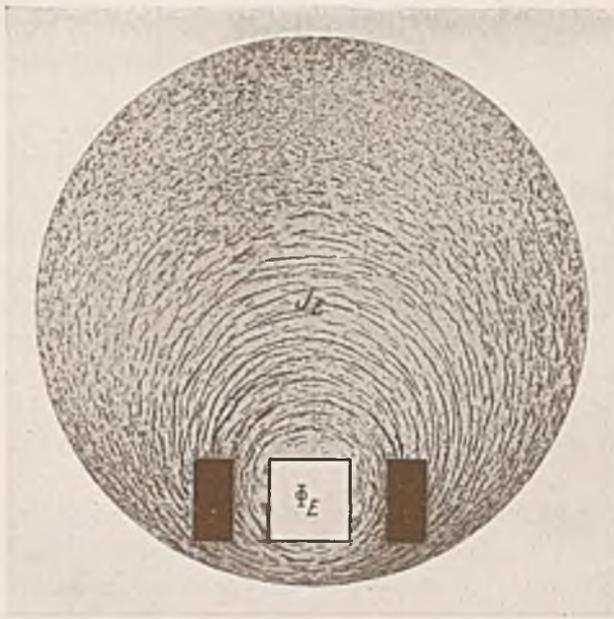


Abb. 21. Verlauf der durch Φ_E induzierten Scheibenströme.

Stromtriebfluß Φ_J wird von dem Stromeisen 3, dessen Bewicklung vom Verbrauchstrom J durchflossen ist, erzeugt. Außerdem wird die Scheibe vom Fluß Φ_M des permanenten Magneten 4 durchsetzt. G ist der Generator bzw. das Stromliefernde Werk und L die aus Lampen und einem Motor bestehende Belastung.

Die Wechselflüsse Φ_E und Φ_J induzieren in der Scheibe elektromotorische Kräfte, die ihrerseits Ströme in der Scheibe zur Folge haben. Den Verlauf dieser Ströme veranschaulichen die Abb. 21 und 22. Ein Teil der von Φ_E induzierten Strömung J_E verläuft im Bereiche des Flusses Φ_J ; desgleichen verläuft ein Teil der durch Φ_J induzierten Strömung J_J im Bereich von Φ_E ²⁾.

Dies hat ein Drehmoment D zur Folge, das proportional dem Produkte der beiden Flüsse und dem Sinus des (zeitlichen) Phasenverschiebungswinkels ψ der beiden



Abb. 22. Verlauf der durch Φ_J induzierten Scheibenströme.

¹⁾ Nach Möllinger, a. a. O. S. 73.
²⁾ In Wirklichkeit stellt sich in der Scheibe eine einzige resultierende Strömung ein. Für die theoretischen Betrachtungen ist jedoch die getrennte Betrachtung jeder Strömung bequemer.

Flüsse Φ_E und Φ_J ist, also

$$D = C_D \Phi_E \Phi_J \sin \psi$$

C_D ist eine Proportionalitätskonstante, deren Größe durch die Bauart des Zählers bedingt ist. Dreht sich die Scheibe unter dem Einfluß des Drehmomentes D , so werden durch den Fluß Φ_M des permanenten Magneten in der Scheibe Ströme induziert, die etwa nach Abb. 23 verlaufen. Sie haben eine solche Richtung, daß durch ihr Zusammenwirken mit dem Fluß Φ_M ein Bremsmoment B zustande kommt. Dieses ist proportional der Drehzahl n (Umdrehungszahl in der Zeiteinheit) der Scheibe. Es besteht also die Beziehung

$$B = C_B n$$

C_B ist wiederum eine Proportionalitätskonstante.

Da im stationären Zustand das Bremsmoment gleich dem Drehmoment sein muß, so ist

$$C_B n = D \text{ oder } n = \frac{D}{C_B},$$

d. h., die Drehzahl n ist dem Drehmoment D proportional.

Bildet man nun den Zähler so aus, daß das Drehmoment proportional der Leistung $N = EJ \cos \varphi$ in der Anlage ist, so wird auch die Drehzahl proportional der Leistung und die gesamte Umdrehungszahl des Zählers in einer gewissen Registrierperiode proportional dem Produkte der Leistung und der Zeit, d. h. der Arbeit $A = N \cdot t$. Diese Umdrehungszahl wird von dem mit der Achse der Scheibe gekuppelten, in der Abbildung fortgelassenen Zählwerk angezeigt. Das Übersetzungsverhältnis zwischen der Scheibenachse und dem Zählwerk wird meist so gewählt, daß das Zählwerk unmittelbar Kilowattstunden oder deren dekadisches Vielfache anzeigt.

Die Triebflüsse Φ_E und Φ_J sind der Netzspannung E bzw. dem Verbrauchsstrom J proportional. Soll der Zähler bei allen Phasenverschiebungen richtig zeigen, so muß sein Drehmoment auch $\cos \varphi$ proportional sein. Da es andererseits nach dem Obigen proportional $\sin \psi$ ist, so folgt hieraus, daß $\sin \psi = \cos \varphi$ sein muß, oder $\psi = 90^\circ - \varphi$. Bei $\varphi = 0$, also induktionsfreier Belastung ist $\psi = 90^\circ$. (Φ_E eilt dabei Φ_J nach.) Dies nennt man „ 90° Abgleichung“. Da der Stromtriebfluß nahezu in Phase mit dem Strom ist, so muß also der Spannungtriebfluß um etwa 90° der Spannung nacheilen.

Die konstruktive Ausführung der Zähler und ihrer messenden Systeme ist sehr verschieden. Abb. 24 und 25 zeigen den bekannten Einphasen-Zähler der SSW, Modell W 5. Dieser zeichnet sich durch einen besonders übersicht-

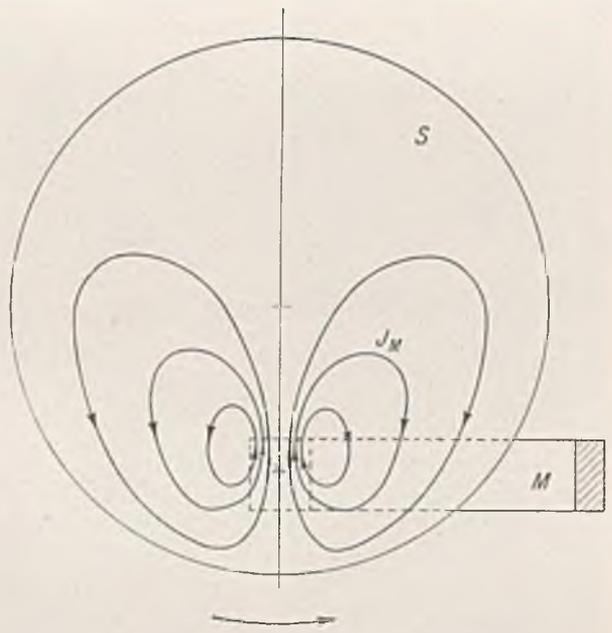


Abb. 23. Verlauf der vom Bremsmagneten induzierten Ströme.

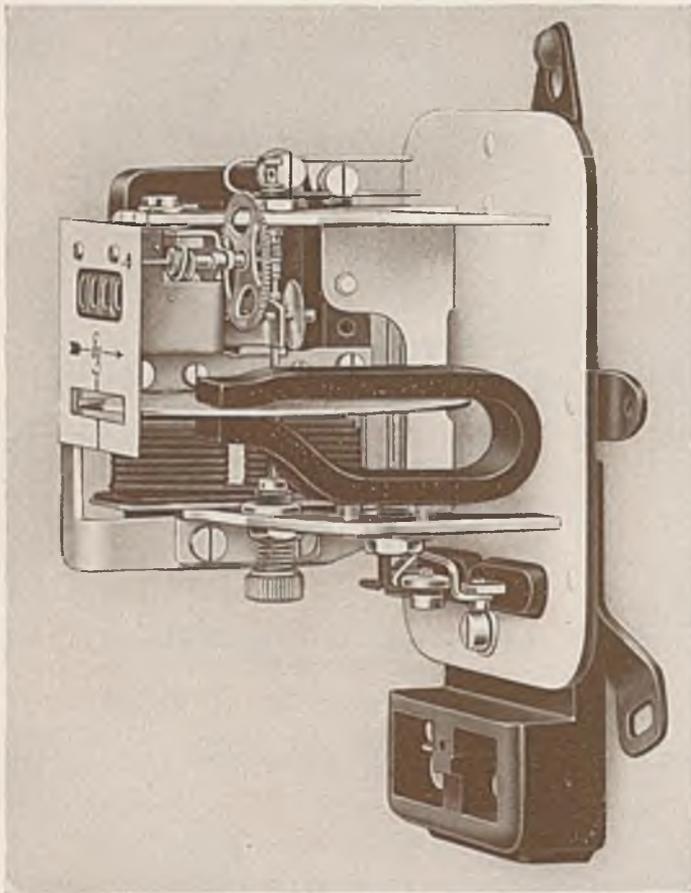


Abb. 24. Einphasenzähler, Modell W5, offen.

lichen Aufbau sowie die sorgfältigste Durchbildung aller Einzelteile aus. Es würde hier zu weit führen, auf die Einzelheiten einzugehen¹⁾.

Bei Drehstrom ergibt sich die Gesamtleistung oder die Gesamtarbeit als Summe der Leistungen oder Arbeiten in den drei Phasen. Bei Dreileiteranlagen genügen zur Messung des Effektes zwei nach der sogenannten Zweiwattmeterschaltung (Abb. 26) angeschlossene Wattmeter. Die Gesamtleistung ergibt sich als Summe der Leistungen, die von beiden Wattmetern angezeigt werden, wobei auf das Vorzeichen der Einzelleistungen zu achten ist. Entsprechend kann die Arbeit mit Hilfe von zwei in derselben Weise geschalteten Ein-

phasenzählern gemessen werden. In der Praxis werden meist besondere Drehstromzähler benutzt, von denen die beiden messenden Systeme, die sonst ähnlich ausgebildet sind wie beim Einphasenzähler, auf Scheiben, die auf einer gemeinsamen Achse sitzen, wirken. Die Drehmomente werden hier also selbsttätig summiert, und der Zähler zeigt die ganze Drehstromarbeit an. Abb. 27 und 28 zeigen beispielsweise einen modernen Drehstromzähler Modell D7 der SSW. Dieser Zähler ist nach ähnlichen Grundsätzen wie der W5-Zähler aufgebaut.

Der Beweis der Richtigkeit der von Aron angegebenen Zweiwattmeterschaltung läßt sich auf folgende einfache Weise erbringen. In Abb. 29a sind zwei getrennte Stromerzeuger G1 und G2, die auf die Belastungen B1 und B2 arbeiten, gezeichnet. Die gesamte abgegebene Leistung läßt sich durch die zwei gleichfalls gezeichneten Wattmeter messen. Man kann nun (Abb. 29b) zwei Leitungen, und zwar diejenigen, in denen keine Wattmeterstromspulen eingeschaltet sind, durch eine für beide Netze gemeinschaftliche Rückleitung ersetzen, ohne daß sich dabei die Stromverteilung ändert. Die beiden Wattmeter messen nach wie vor die gesamte aufgenommene Leistung richtig. Man kann für jedes

¹⁾ Siehe hierzu die Druckschrift der SSW: Kleinabnehmerzähler W5 für Einphasenwechselstrom.

Netz mit drei Leitungen eine Ersatzschaltung finden, bei der das Netz durch zwei einzelne Netze nach Abb. 29a ersetzt ist. Dieser Beweis zeigt auch deutlich, daß die Zweiwattmeterschaltung in Netzen mit drei Leitungen immer zulässig ist und an keine Voraussetzungen über die Symmetrie der Spannungen oder dergleichen gebunden ist.

Ferner läßt sich ohne weiteres erkennen, daß diese Schaltung auch für Meßgeräte, die die Blind- oder Scheinlast bzw. den Blind- oder Scheinverbrauch, sowie beliebige Kombinationen von diesen messen, ohne weiteres anwendbar ist, wenn man zwei zur Messung der entsprechenden Größe im Einphasensystem verwendbare Meßgeräte nach der Zweiwattmeterschaltung anschließt. Der obige Beweis läßt sich ohne weiteres auch für die Richtigkeit der Messung mit n Meßgeräten bei $n + 1$ Leitungen durchführen.

Für die Vierleiterdrehstromanlagen ergibt sich daraus die in Abb. 30 dargestellte Dreiwattmeterschaltung. Diese ist insofern leichter verständlich als die Zweiwattmeterschaltung, weil man ohne weiteres erkennt, daß jedes Wattmeter die Leistung der zugehörigen Phase mißt. Die Vierleiterzähler haben entsprechend drei messende Systeme.

Abb. 31 zeigt beispielsweise die Innenansicht des nach den gleichen Grundsätzen wie der D7-Zähler gebauten Vierleiterzählers Modell D8 der SSW¹⁾.

In Verbindung mit den kWh-Zählern und auch mit den anderen Zählerarten wird noch eine Reihe von Zusatzapparaten benutzt. Auf alle diese Apparate hier einzugehen, verbietet der zur Verfügung stehende Raum, außerdem haben viele dieser Apparate mit der Berücksichtigung des Blindstromes nichts zu tun. Es mögen aus diesem Grunde nur die wichtigsten, oben aufgezählten Apparate behandelt werden,

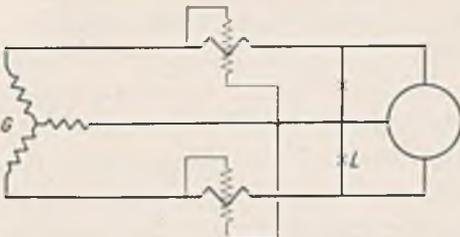


Abb. 26. Zweiwattmeterschaltung.

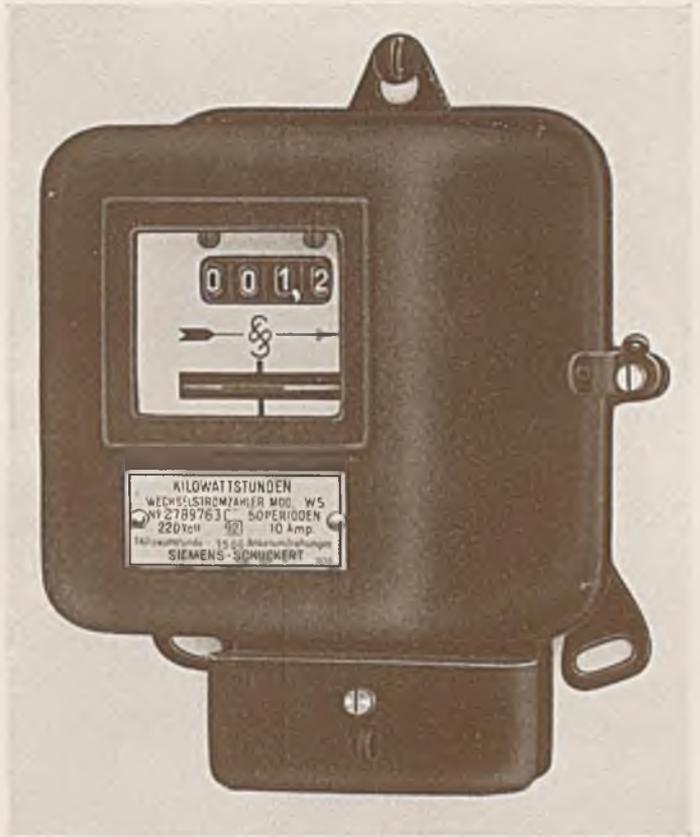
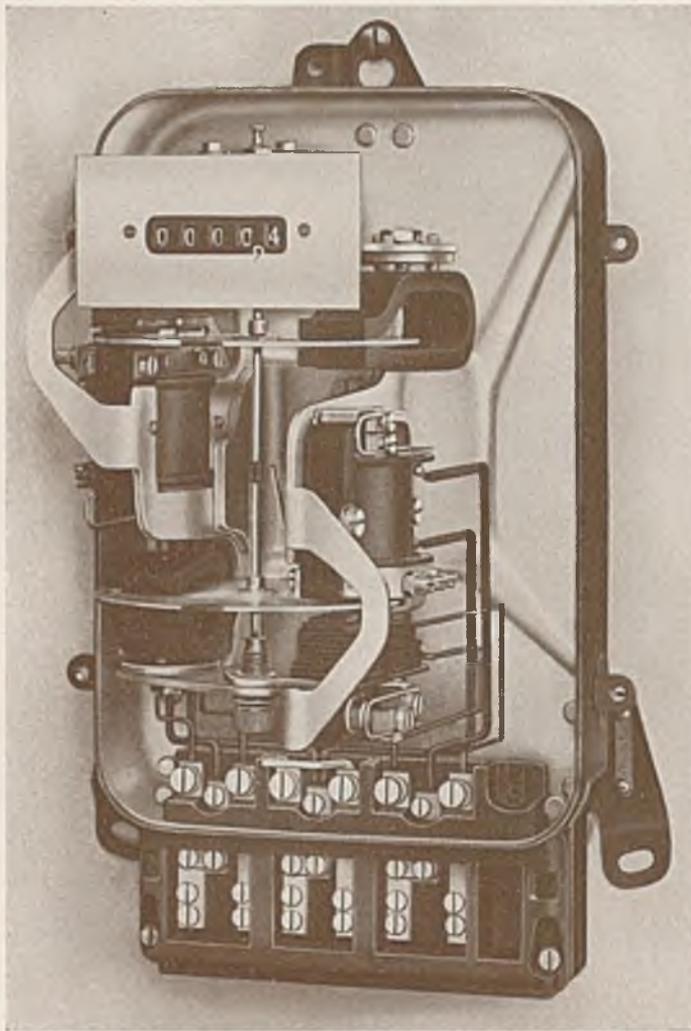


Abb. 25. Einphasenzähler, Modell W5, geschlossen.

¹⁾ Näheres über den D7- und D8-Zähler siehe Druckschrift 1100 der SSW.



• Abb. 27. Drehstrom-Dreileiterzähler, Modell D7, offen.

und zwar der Einfachheit halber zuerst als Zusatzapparate zu den kWh-Zählern. Ihre Anwendung auf die anderen Zählerarten ergibt sich dann ohne weiteres.

Der einfachste Zusatzapparat ist das Doppelzählwerk. Dieses erlaubt eine getrennte Registrierung bzw. Verrechnung der zu verschiedenen Zeiten gelieferten Energie. Die Umschaltung von einem Zählwerk auf das andere geschieht mit Hilfe eines durch eine Umschaltuhr betätigten Relais. Es ist jedoch in gewissen Fällen, wie weiter gezeigt wird, zweckmäßig, die Umschaltung von einem Zählwerk auf das andere auch in Abhängigkeit von der Belastungsart oder dergleichen vorzunehmen.

Eine weitere wichtige Einrichtung ist das Überverbrauchzählwerk.

Bei diesem wird der Ver-

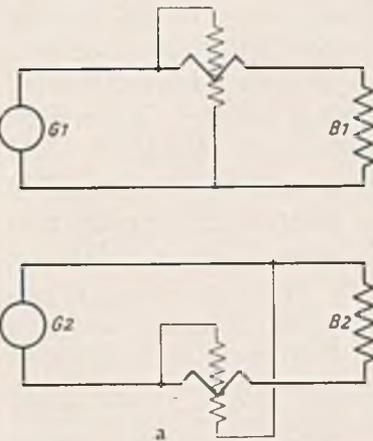
brauch registriert, der einer über einer bestimmten festgelegten Belastungsgrenze liegenden Last entspricht. Die mit solchen Zählwerken versehenen Subtraktions-, Überverbrauch- oder Spitzenzähler werden in der Praxis in verschiedener Weise ausgeführt. Für kleinere Lasten kommen Zähler in Frage, die mit einem normalen Zählwerk ausgerüstet sind, der Zähler selbst erhält jedoch eine bestimmte, auf mechanischem oder elektrischem Weg erzeugte Gegenkraft, so daß er erst bei einer gewissen Belastung anläuft und dann die Überverbrauchmenge registriert. Die SSW bauen einen solchen Zähler als Modell W5s. Die Zähler für größere Verbrauchsmengen sind derart durchgebildet, daß sie bei jeder Belastung laufen und auch den gesamten Verbrauch auf einem normalen Zählwerk registrieren. Außerdem ist ein mechanisch oder elektrisch angetriebenes Uhrwerk vorhanden, das mit einer dauernd konstanten Geschwindigkeit läuft. Dieses Uhrwerk ist mit dem Zählwerk durch ein Differentialgetriebe verbunden, das seinerseits das Überverbrauchzählwerk antreibt. Bis zur Subtraktionsgrenze ist die Geschwindigkeit des

Zählers kleiner als die des Uhrwerkes, und das Überverbrauchs-zählwerk zeigt nichts an. Bei Überschreitung der Subtraktionsgrenze wird von letzterem die überschüssige Energie angezeigt. Die SSW bauen solche Überverbrauchs-zählwerke in Verbindung mit ihren Gleich-, Wechsel- und Drehstromzählern. Mit diesen Spitzenzählern sind nicht zu verwechseln die seltener vorkommenden Zähler, die bis zu einer gewissen Belastung stillstehen und nach Überschreitung dieser Belastung die gesamte Energie zählen (Vergütungszähler).

Wichtiger als das Subtraktionszählwerk ist der Höchstverbrauchsanzeiger, Maximumzeiger. Dieser wird neben dem normalen oder Doppelzählwerk eingebaut und erlaubt, die maximal vom Verbraucher erreichte Belastung abzulesen, wobei als



Abb. 28. Drehstrom-Dreileiterzähler, Modell D7, geschlossen.



Maximalbelastung nicht das momentane Maximum registriert wird, sondern der höchste Wert der mittleren Belastung, der während einer bestimmten

Registrierperiode, meist 15 oder 30 Minuten, auftritt. Dieser Wert ist, wie noch näher gezeigt wird, für die Tarifierung richtiger als der momentane Höchstwert, der in einem Augenblick erreicht worden ist. Dieser

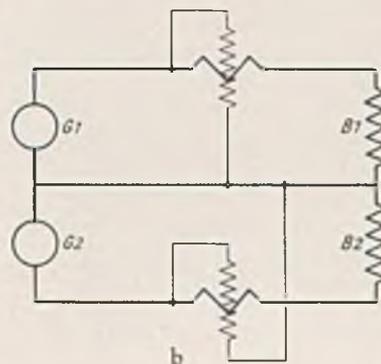


Abb. 29. Beweis der Richtigkeit der Zweiwattmeterschaltung.

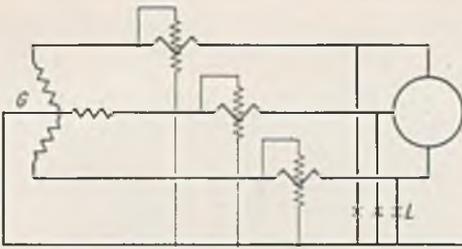


Abb. 30. Dreiwattmeterschaltung.

Zählerachse angetrieben. Es befindet sich normalerweise in Eingriff mit dem Zahnrad Z 2, an dem sich der Mitnehmerstift S befindet. Es sei angenommen, daß dieser Stift anfangs am Anschlag O anliegt und der Schleppzeiger am Anfang der Skala steht. Entsprechend der Belastung des Zählers wird dann Z 2 in der Pfeilrichtung gedreht, und der Stift nimmt den Zeiger mit. Am Schluß der Registrierperiode, beispielsweise einer Viertelstunde, wird durch eine im Zähler

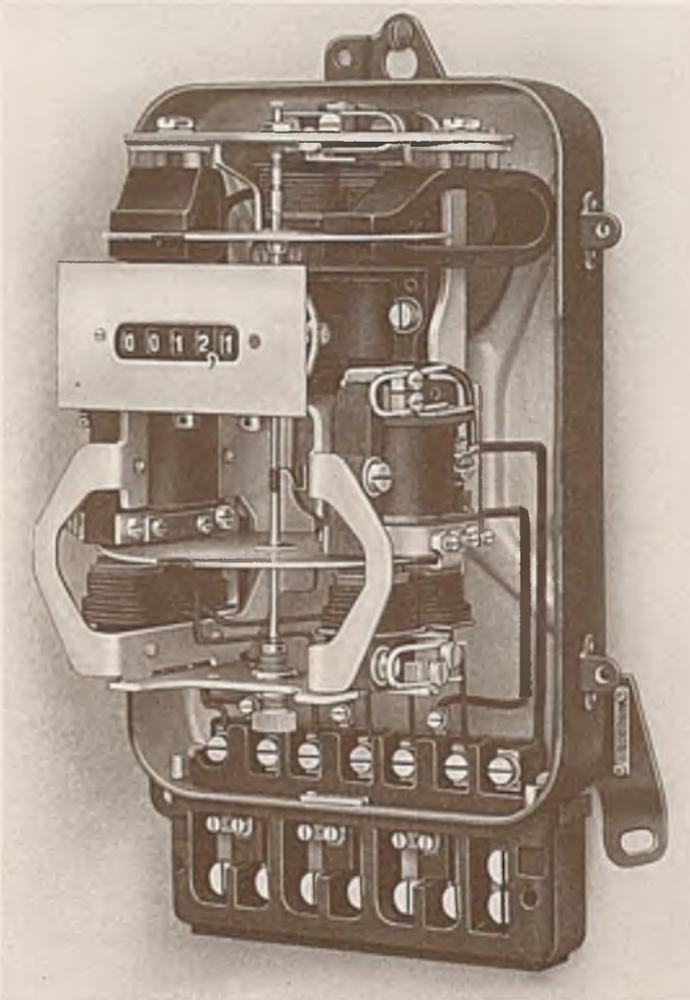


Abb. 31. Drehstrom-Dreileiterzähler Modell D8, offen.

könnte z. B. am Streifen eines registrierenden Wattmeters oder mit Hilfe eines an einem Wattmeterzeiger angebrachten Schleppzeigers angezeigt werden. Die verbreitetste Form des Maximumzählers beruht auf folgendem Grundsatz.

Das Zahnrad Z 1¹⁾ Abb. 32 (oberer Teil) wird unter Zwischenschaltung entsprechender Übersetzungsräder von der

Zählerachse angetrieben. Es befindet sich normalerweise in Eingriff mit dem Zahnrad Z 2, an dem sich der Mitnehmerstift S befindet. Es sei angenommen, daß dieser Stift anfangs am Anschlag O anliegt und der Schleppzeiger am Anfang der Skala steht. Entsprechend der Belastung des Zählers wird dann Z 2 in der Pfeilrichtung gedreht, und der Stift nimmt den Zeiger mit. Am Schluß der Registrierperiode, beispielsweise einer Viertelstunde, wird durch eine im Zähler eingebaute Uhr oder eine getrennte Schaltuhr mittels eines Relais das Zahnrad Z 1 in der Richtung des Pfeiles nach links gezogen und außer Eingriff mit Z 2 gebracht. In diesem Moment wird durch die Feder F 2 das Zahnrad Z 2 in seine Anfangslage zurückgedreht, der Schleppzeiger bleibt dagegen auf dem erreichten Teilstrich stehen. Unmittelbar danach wird der Eingriff der beiden Zahnräder wieder hergestellt. Das Spiel beginnt von neuem. Ist der vom Stift S zurückgelegte Weg jetzt größer, so wird der Schleppzeiger weiterbewegt. Er bleibt stets auf seinem höchsten Wert stehen. Es ist ohne weiteres ersichtlich, daß der

¹⁾ Nach Möllinger: „Der phasenverschobene Strom, seine Messung und Bekämpfung“. Mitteilungen der Vereinigung der Elektrizitätswerke, 20, Nr. 298 b, S. 7, 1921. Auch als Sonderabdruck erschienen.

Weg des Mitnehmerstiftes proportional der Umdrehungszahl des Zählers, also dem Verbrauch während des betreffenden Zeitabschnittes ist. Der Schleppzeiger zeigt den höchsten Wert des Verbrauches an. Diese Wege sind auch ein Maß für die mittleren Belastungen, die während der einzelnen Perioden auftreten. Auf diese Weise kann der Schleppzeiger den höchsten Wert der mittleren Belastung angeben. Dem Maximumzeiger in dieser Form haftet jedoch noch der Nachteil an, daß man an ihm nur den höchsten erreichten Belastungswert ablesen kann. Es ist jedoch, wenigstens bei sehr großen Abnehmern, erwünscht, auch die einzelnen mittleren Belastungen zu kennen. Dies ist erreichbar durch Ergänzung des Maximumzeigers durch eine Schreibvorrichtung, und zwar auf folgende Weise: Man läßt auf einer mit Z2 konzentrischen Rolle einen Faden, an dem eine Schreibvorrichtung hängt, laufen, Abb. 32 (unten). Gleichzeitig mit dem Fortschreiten des Stiftes S wird das Schreibwerk gehoben, und auf dem Registrierstreifen, der durch ein Uhrwerk fortbewegt wird, entsteht eine schräg aufsteigende Linie. Beim Entkuppeln von Z1, also Zurückgehen von Rad Z2, fällt das Schreibwerk; auf dem Papier entsteht dabei eine senkrechte Linie. Die Aufzeichnung auf dem Registrierstreifen sieht dann aus, wie es die Abbildung andeutet. Die einzelnen Spitzen der Registrierkurve entsprechen den einzelnen Wegen des Mitnehmers, sie sind also ein Maß für die mittleren Belastungen in den einzelnen Registrierperioden. Rechts in der Abbildung ist der zugehörige Verlauf der Last angedeutet. Es ist noch zu bemerken, daß die ansteigenden Linien nur dann gerade Linien sein würden, wenn die Belastungen in den einzelnen Registrierperioden konstant wären. Abb. 33 und 34 zeigen einen ausgeführten schreibenden Höchstverbrauchzähler Modell D7 mr der SSW.

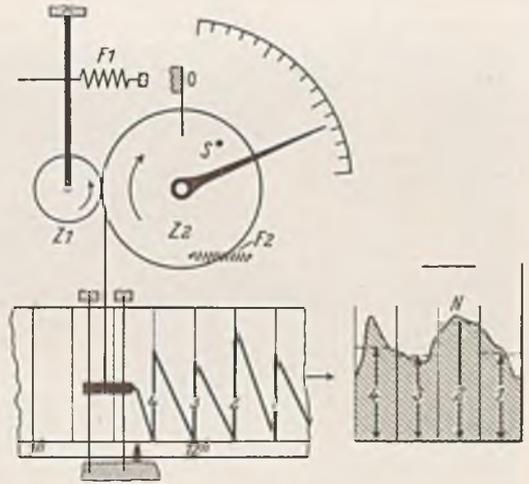


Abb. 32. Schematische Darstellung eines Höchstverbrauchzählers mit angebautem Schreibwerk.

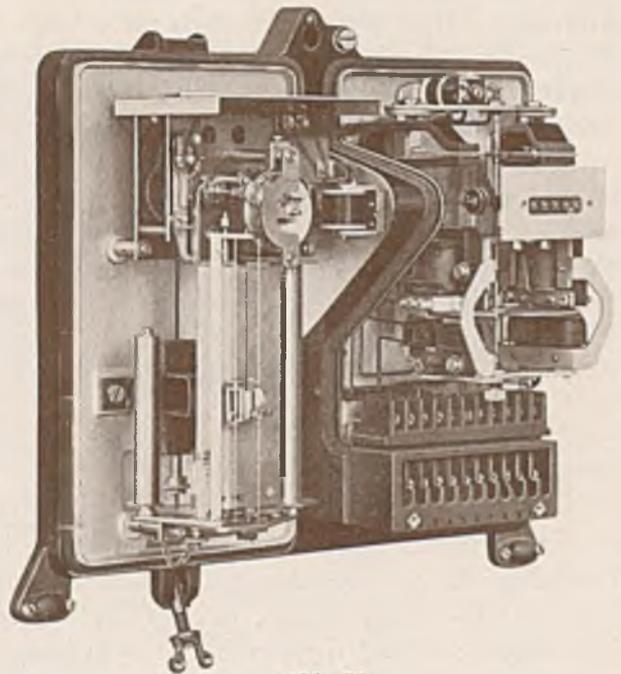


Abb. 33.

Schreibender Höchstverbrauchzähler Modell D7 mr, offen.

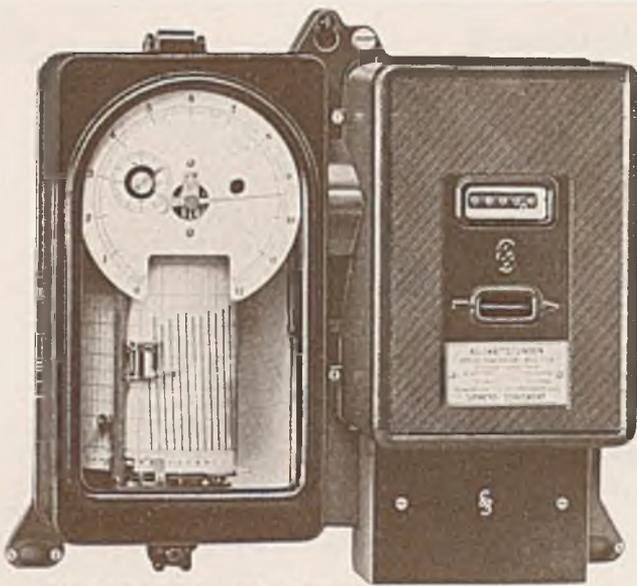


Abb. 34. Schreibender Höchstverbrauchzähler D7mr, geschlossen.

Die Einphasen- und Drehstromzähler werden gewöhnlich nur für Stromstärken bis etwa 100 A und Spannungen bis etwa 500 V gebaut. Für höhere Stromstärken sowie höhere Spannungen werden die Zähler unter Zwischenschaltung von Strom- und Spannungswandlern angeschlossen. Dabei ist es zur Zeit üblich, die Zählwerke so einzurichten, daß sie direkt, also unter Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses der Wandler, den Verbrauch angeben. Es ist aber zweckmäßiger, von diesem Verfahren abzugehen und die Zähler so ein-

zurichten, daß sie den Verbrauch, bezogen auf die Sekundärseite der Wandler, anzeigen. Der wirkliche Verbrauch ergibt sich durch Multiplikation mit einer Konstante $C = \frac{E_1 J_1}{E_2 J_2}$, wo E_1 und J_1 die primäre Spannung und Stromstärke und E_2 und J_2 die entsprechenden sekundären Größen bedeuten. Dabei sind zweckmäßig die Sekundärseiten der Wandler und die Zähler für 5 A und 100 V zu bemessen. Diese Werte sind auch neuerdings als normal vorgeschlagen worden. Bis jetzt wurde als Sekundärspannung bei Spannungswandlern gewöhnlich 110 V gewählt. In der Übergangszeit werden von den SSW auf Wunsch auch Spannungswandler für 110 V mit einer Anzapfung für 100 V geliefert.

Es empfiehlt sich allgemein, bei komplizierten Apparaten auch bei Stromstärken unter 100 A stets die Zähler für 5 A zu nehmen und über Stromwandler anzuschließen. Dadurch wird die Möglichkeit gegeben, Reserveapparate auf Lager zu halten, und bei Änderung der Belastung der Anlage brauchen nur die Stromwandler ausgewechselt zu werden. Dies ist besonders vorteilhaft bei Zähleraggregaten, die aus mehreren Apparaten bestehen. Ferner lassen sich Zähler für niedrige Stromstärken genauer eichen.

Es mögen jetzt die oben aufgezählten, zur Messung verschiedener Größen bestimmten Zählerarten näher betrachtet werden.

1. Kilowattstundenzähler, Wirkverbrauchzähler (kWh-Zähler).

Die Angaben dieses Zählers bilden, wie bereits oben gesagt, die wichtigste Grundlage für die Verrechnung elektrischer Energie, auch dann, wenn Blindströme berücksichtigt werden sollen. Er zeigt den Wirkverbrauch $A = EJ \cos \varphi \cdot t$ an. Seine Wirkungsweise und die verschiedenen in Frage kommenden Modelle sind bereits oben beschrieben. Es möge hier nur betont werden, daß die sogenannten Drehstromzähler für gleichbelastete Phasen, also einfache Zähler, die nur ein messendes System haben und äußerlich dem Einphasenzähler gleichen, unter

keinen Umständen als kWh-Zähler verwendet werden sollten, da die Annahme der völlig symmetrischen Belastung, auch in den Fällen, wo nur Drehstrom-Motoren angeschlossen sind, in der Praxis nie mit genügender Genauigkeit erfüllt ist. Ferner ist bei diesen Zählern leicht Betrugsmöglichkeit gegeben. Solche Zähler werden neuerdings in Deutschland auch nicht mehr beglaubigt.

2. Blindverbrauchzähler, Sinuszähler.

Dieser zeigt den Blindverbrauch $A_b = EJ \sin \varphi \cdot t$ in kVAh an. Als Zusatzapparate kommen bei diesem Zähler bis jetzt praktisch in Frage: das Doppelzählwerk und der Höchstverbrauchzeiger.

Seiner Bauart nach unterscheidet sich der Sinuszähler nur wenig vom kWh-Zähler, dagegen ist die gegenseitige Lage der Flüsse Φ_E und Φ_J hier anders. Sein Drehmoment D muß proportional dem Produkte der Netzspannung, des Netzstromes und dem $\sin \varphi$ sein. Daraus folgt nach dem Obigen, daß der Phasenverschiebungswinkel ψ zwischen den beiden Flüssen gleich der Phasenverschiebung φ der Anlage sein muß. Also $\psi = \varphi$. Bei induktionsfreier Belastung in der Anlage, $\varphi = 0$, müssen also die beiden Flüsse in Phase liegen. (Beim kWh-Zähler 90° Phasenverschiebung.) Die Erfüllung dieser Bedingung macht gewisse praktische Schwierigkeiten. Ihr wird meistens in der Weise entsprochen, daß die Spannungsspulen nicht zwischen die gleichen Leiter wie beim kWh-Zähler gelegt sind, sondern gewissermaßen dadurch fremd erregt werden, daß sie an andere Leitungen des Dreiphasensystems angeschlossen werden. Diese Schaltung ist natürlich nur bei Drehstromanlagen verwendbar. Die Zähler, die so geschaltet sind, zeigen nur dann richtig, wenn das Spannungsdreieck des Netzes symmetrisch ist. Diese Annahme darf jedoch praktisch gemacht werden. Es sind auch Schaltungen vorgeschlagen worden, bei denen die Spannungsspulen an die gleichen Spannungen gelegt werden, wie beim kWh-Zähler. Es ist noch fraglich, ob es gelingt, bei Anwendung dieser Schaltungen wirklich einwandfreie Apparate zu bauen. Bei den SSW-Sinus-Zählern ist die Fremderregung angewendet. Sie müssen unter Berücksichtigung der Drehfeldrichtung (genau nach dem beigegebenen Schaltbild) angeschlossen werden, was bei kWh-Zählern empfehlenswert, aber nicht unbedingt erforderlich ist. Die Außenschaltung der Zähler ist genau dieselbe wie die der kWh-Zähler gleichen Modells. Beim Sinuszähler kommen auch Drehstromzähler für gleichbelastete Phasen in Frage, da hier die Genauigkeit der Messung nicht so groß zu sein braucht wie bei der Bestimmung des Wirkverbrauches. Solche Zähler sind sogar in kleineren Anlagen mit einseitiger Glühlampenbelastung verwendbar, da die Blindströme nur durch die an alle drei Phasen angeschlossenene Motoren hervorgerufen werden, so daß die Genauigkeit der Messung nur durch die Verschiedenheiten dieser Blindströme beeinflusst wird.

3. Scheinverbrauchzähler, Kilovoltamperestundenzähler.

Diese registrieren den Scheinverbrauch $A_s = EJ \cdot t$ in kVAh. Ihre Angaben sollen also nur dem Produkte des Stromes und der Spannung proportional, von der Phasenverschiebung der Anlage dagegen unabhängig sein. Die Frage des Baues eines bei allen Phasenverschiebungen richtig zeigenden

Scheinverbrauchzählers ist bis jetzt noch nicht gelöst. Es läßt sich auch noch nicht übersehen, ob die Vorschläge, die in dieser Richtung gemacht worden sind, zur Durchbildung praktisch einwandfreier Apparate führen werden. Die Schwierigkeit besteht, wie leicht ersichtlich ist, darin, das Drehmoment des Zählers von der Phasenverschiebung in der Anlage unabhängig zu machen, da ja die Strom- und Spannungsflüsse normalerweise ihre gegenseitige Lage mit der Änderung der Phasenverschiebung der Anlage ändern.

Für einen gewissen begrenzten, jedoch für viele Fälle praktisch genügenden Bereich von $\cos \varphi$ lassen sich jedoch Scheinverbrauchzähler bauen. Ihre Arbeitsweise wird aus folgender Überlegung klar.

Der Cosinus von Winkeln, die schon verhältnismäßig viel von 0° abweichen, ist noch praktisch gleich 1. Es ergeben sich z. B. folgende Werte:

Winkel in Graden	± 0	5	10	15	20	25
Cosinus	1	0,996	0,985	0,966	0,940	0,906

Daraus folgt, daß ein normaler kWh-Zähler, dessen Angaben proportional $\cos \varphi$ sind, in der Nähe von $\varphi = 0$ praktisch kVAh anzeigt, und zwar würde z. B. bei 20° Phasenverschiebung ein genau geeichter kWh-Zähler als kVAh-Zähler einen Fehler $\Delta = -6$ v. H. haben¹⁾.

Baut man einen Induktionszähler derart, daß die motorisch wirksamen Flüsse Φ_E und Φ_I nicht bei $\varphi = 0$, sondern bei einer anderen Phasenverschiebung φ_0 gegeneinander um 90° verschoben sind, und stellt den Zähler so ein, daß er bei dieser Phasenverschiebung kVAh anzeigt, so wird er im Bereich der Phasenverschiebung $\varphi_0 \pm 20^\circ$ wiederum kVAh mit einer Genauigkeit von 0 bis -6 v. H. anzeigen.

Bei einem von 0° abweichenden Wert von φ_0 entspricht der Änderung des Winkels um $\pm 20^\circ$ ein größerer Bereich von $\cos \varphi$ als bei $\varphi_0 = 0^\circ$. Beispielsweise bei $\varphi_0 = 45^\circ$ entspricht einer Änderung des Winkels von $45^\circ + 20^\circ = 65^\circ$ bis $45^\circ - 20^\circ = 25^\circ$, eine Änderung von $\cos \varphi$ von 0,42 bis 0,91. Ein solcher Zähler, der bei 45° sein größtes Drehmoment hat und dabei kVAh richtig anzeigt, würde also in Grenzen von $\cos \varphi \approx 0,4$ bis $\cos \varphi \approx 0,9$ keinen größeren Fehler als -6 v. H. haben. Es läßt sich nun

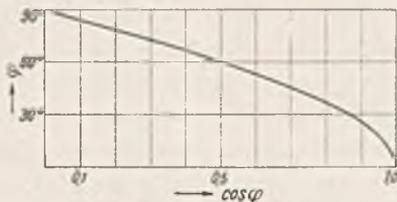


Abb. 35. Cosinuslinie.

ohne weiteres der Zähler so einstellen, daß er bei der mittleren Phasenverschiebung von 45° ($\cos \varphi = 0,71$) einen Plusfehler von 3 v. H. zeigt. Dann liegen seine Angaben in den genannten Grenzen der Phasenverschiebung innerhalb ± 3 v. H.

Das Obige wird deutlich veranschaulicht durch Abb. 35, in welcher der Winkel φ in Abhängigkeit von $\cos \varphi$ eingetragen ist. Drehstromzähler nach diesem Grundsatz werden von SSW gebaut. Sie sind überall dort verwendbar, wo man sicher ist, daß die Phasenverschiebung in dem auf dem Zähler angegebenen Bereich von $\cos \varphi$ bleibt. Die üblichen Grenzen sind die angeführten, $\cos \varphi = 0,4$ bis $0,9$. Diese entsprechen Anlagen mit Asynchronmotoren. Diese Zähler

¹⁾ Der Bereich von $\cos \varphi$, in dem der kWh-Zähler praktisch richtig kVAh anzeigt, ist in diesem Fall natürlich nur $\cos \varphi = 0,94$ bis 1 (induktiv und kapazitiv).

werden auch in Verbindung mit Doppelzählwerken und Höchstverbrauchzeigern gebaut. Ihre Spannungsspulen sind wie die des $\sin \varphi$ -Zählers „fremd-erregt“. Die Außenschaltung ist die gleiche wie die der kWh-Zähler des gleichen Modells. Beim Anschluß der Zähler muß jedoch die Richtung des Drehfeldes unbedingt beachtet werden. kVAh-Zähler für gleiche Belastung der drei Phasen kommen ebensowenig wie entsprechende kWh-Zähler in Frage.

Aus dem Obigen ist deutlich sichtbar, daß solche kVAh-Zähler für kleine Phasenverschiebungen, die wenig von 0° verschieden sind, praktisch nicht verwendbar sind, ferner, daß ein und derselbe Zähler nicht gleichzeitig für induktive und kapazitive Belastung benutzt werden kann.

Auf ähnlichem Grundsatz wie der beschriebene kVAh-Zähler beruhen auch alle Zähler, deren Angaben eine Kombination des Wirkverbrauches und Scheinverbrauches oder Wirkverbrauches und Blindverbrauches ist. Zur ersten Art gehören die eingangs erwähnten Arnò-Zähler. Diese Zähler sind stets, wie der kVAh-Zähler, nur Geräte, die in einem gewissen Bereich von $\cos \varphi$ praktisch richtig zeigen. In Wirklichkeit zeigen alle solchen Geräte eine kombinierte Größe A_C , die sich zu $A_C = E \cdot J \cdot t \cdot (C_1 \cos \varphi + C_2 \sin \varphi)$ ergibt. Dieses wird aus folgender Überlegung klar.

Man kann sich den Spannungstriebfluß Φ_E , der irgendeine bestimmte Lage gegen die Spannung hat, stets in zwei Komponenten zerlegt denken, von denen die eine senkrecht zur Richtung des Stromtriebflusses bei $\cos \varphi = 1$, also $\varphi = 0$ ist, die andere in Phase mit diesem Stromtriebfluß liegt. Durch Zusammenwirken der ersten (Sinus-Komponente des Flusses) kommt ein Drehmoment zustande, das proportional $\cos \varphi$, also dem Wirkverbrauch, ist. Durch Zusammenwirken der zweiten Komponente, der Cosinus-Komponente, kommt ein Drehmoment zustande, das proportional $\sin \varphi$, also dem Blindverbrauch ist. In einem gewissen Bereich von φ ist $C_1 \cos \varphi + C_2 \sin \varphi$ praktisch gleich eins, d. h. die Angaben in diesem Bereich sind praktisch unabhängig von der Phasenverschiebung. Der Zähler zeigt also in diesem Bereich den Scheinverbrauch an. Diese Überlegung ist gleichzeitig eine andere Darstellung der Wirkungsweise des beschriebenen kVAh-Zählers.

Die Arnò-Zähler sind derart eingestellt, daß sie in einem gewissen Bereich von $\cos \varphi$ die Größe $A_C = (\frac{2}{3} E \cdot J \cdot \cos \varphi + \frac{1}{3} E \cdot J) \cdot t$ registrieren.

Allgemein ist von der Verwendung von Zählern, deren Zählwerke kombinierte Größen anzeigen, dringend abzuraten, da in diesem Falle die wichtigste Größe, nämlich die Energie, nicht abgelesen werden kann. Die Verwendung eines solchen Zählers in Verbindung mit einem kWh-Zähler ist dagegen zwecklos. Wenn man zwei Zähler verwenden will, so wird man an Stelle des kombinierten Zählers entweder einen $\sin \varphi =$ Scheinverbrauchzähler oder J^2 -Zähler wählen. (Siehe weiter unten.)

4. Amperestundenzähler (Ah-Zähler).

Diese sind bei Gleichstrom für Kleinabnehmer sehr verbreitet und könnten auch bei Wechselstrom in gewissen Fällen vorteilhaft angewendet werden; ihre Konstruktion macht hier jedoch technische Schwierigkeiten, da ihr Drehmoment, das proportional dem Produkte der beiden vom Strom erzeugten Flüsse sein muß,

normalerweise die Tendenz hat, quadratisch zu verlaufen. Nur durch besondere Maßnahmen läßt sich ein nahezu linearer Verlauf erreichen¹⁾. Die bis jetzt gebauten Amperestundenzähler für Wechselstrom befriedigen jedoch nicht, so daß diese Zählerart praktisch noch ohne Bedeutung ist.

5. Amperequadratstundenzähler, J^2 -Zähler.

Diese registrieren das Produkt $J^2 \cdot t$. Ein solcher Zähler kann beispielsweise derart gebaut werden, daß an Stelle der Spannungsspule eines normalen kWh-Zählers eine mit stärkerem Draht bewickelte, der Stromspule parallel geschaltete Spule angewendet wird. J^2 -Zähler werden von den SSW in Form der W5J-Zähler und der Drehstromzähler D7J und D8J gebaut. Außer dem normalen Zählwerk kommt bei diesen Zählern noch die Anwendung von Doppeltzählwerken und Höchstverbrauchzeigern in Frage.

6. Voltquadratstundenzähler, E^2 -Zähler.

Diese registrieren die Größe $E^2 \cdot t$. Sie werden von den SSW als Modell W5E gebaut. Dabei wird das Übersetzungsverhältnis des Zählwerkes normalerweise so gewählt, daß es bei der Nennspannung, für die der Zähler bestimmt ist, Betriebsstunden anzeigt. Dies ist für die meisten Fälle besonders vorteilhaft.

7. Zeitzähler.

Diese registrieren nur die Zeitdauer, während der sich eine Anlage unter Spannung oder Strom befindet. Für die Berücksichtigung der Blindströme haben sie jedoch nur als Ersatz für den E^2 -Zähler, dem sie jedoch unterlegen sind, eine gewisse Bedeutung. Es sind meist Uhrwerke, die bei Strom oder Spannungslosigkeit festgehalten sind und dann durch Strom oder Spannung freigegeben werden.

VIII. Allgemeine Grundlagen für die Verrechnung elektrischer Arbeit.

Die Festlegung des Verkaufspreises für elektrische Energie muß sich naturgemäß auf deren Gesteungskosten stützen. Diese berechnen sich zu $G = F + B$, wo F die „festen“, B die „beweglichen“ Kosten sind. Die Aufteilung der Kosten in feste und bewegliche läßt sich nur annähernd durchführen. Im wesentlichen setzen sich die festen Kosten zusammen aus Verzinsung und Amortisation des Anlagekapitals, kurz Anlagekosten, dem größten Teil der Gehälter und Löhne sowie der Unterhaltungskosten, ferner den Kosten, die durch einen Abnehmer, gewissermaßen durch sein Vorhandensein allein, verursacht werden. Hierzu gehören die Kosten des Anschlusses der erforderlichen Meßgeräte (Zähler) und die Kosten der Ablesung, Verrechnung und Einkassierung. Diese Kosten spielen bei Kleinabnehmern eine wesentliche Rolle. Die beweglichen sind die Kosten für Brennstoff, Schmiermittel und ein kleinerer Teil der Gehälter und Löhne sowie der Unterhaltungskosten²⁾. Die festen Kosten sind zum größten Teil abhängig von der höchsten, vom Werk zu erzeugenden bzw. zu verteilenden Last, die beweglichen von dem Verbrauch.

¹⁾ Theoretisch wäre es auch noch möglich, die Bremskraft in anderer als linearer Abhängigkeit von der Drehzahl verlaufen zu lassen. Diesbezügliche Versuche waren bis jetzt auch noch ergebnislos.

²⁾ Der Einfachheit halber sollen die Betrachtungen beispielsweise auf Dampfkraftwerke beschränkt werden.

Bei Gleichstrom sind die festen Kosten abhängig von der höchsten erzeugten Leistung in kW, die beweglichen von den gelieferten kWh. Noch bis vor kurzem hat man auch bei Wechsel- und Drehstrom diese Größen bei der Verrechnung zugrunde gelegt. Dies ist aber, wie bereits aus den Betrachtungen in Abschnitt IV (Seite 10) hervorgeht, nicht richtig, vielmehr sind die festen Kosten im wesentlichen von der größten Scheinlast abhängig, die beweglichen von der gelieferten Energie und vom $\cos \varphi$.

Für die Bemessung des elektrischen Teiles des Kraftwerkes und des Verteilungsnetzes ist nicht die Wirkleistung, sondern die Scheinlast maßgebend. Auch dabei muß noch der $\cos \varphi$ berücksichtigt werden, da bei gleicher Scheinlast und schlechtem $\cos \varphi$ die Anlage teurer ausfällt als bei besserem $\cos \varphi$ ¹⁾, denn bei hoher induktiver Phasenverschiebung müssen die Generatoren in bezug auf Erregung und die Leitungen wegen des höheren Spannungsabfalles reichlicher bemessen werden. Für die Abmessungen des Antriebsteiles, also der Turbinen und der Kesselanlagen, ist an und für sich die größte abzugebende Wirkleistung maßgebend. Arbeitet ein Kraftwerk mit höherer Phasenverschiebung als beim Projektieren vorgesehen, so kann es höchstens die vorgesehene Scheinlast liefern. Dabei ist der Dampfteil nicht voll belastet; er ist aber trotzdem voll ausgenutzt, da es mit Rücksicht auf die volle elektrische Belastung nicht möglich ist, den Dampfteil weiter zu belasten. Man ersieht also, daß es richtig ist, die festen Kosten auch in diesem am häufigsten vorliegenden Fall als Funktion der Scheinlast zu betrachten. Dieser Umstand wird meist bei Betrachtungen über Tarife übersehen.

Anders liegen die Verhältnisse in dem kaum praktisch vorkommenden Fall, daß die Anlage mit besserem $\cos \varphi$ als vorgesehen arbeitet. Hier ist die Höchstbelastung durch den Dampfteil gegeben, und der Anteil der Anlagekosten wäre für diesen nach der Wirkleistung zu berechnen; für den elektrischen Teil nach der Scheinlast, die dieser Wirkleistung bei dem bei der Projektierung vorgesehenen $\cos \varphi$ entspricht.

Diese beiden Fälle mögen durch Beispiele erläutert werden. Es sei ein Kraftwerk und ein Leitungsnetz für 1000 kVA bei $\cos \varphi = 0,8$ gebaut worden. Demnach ist der Dampfteil für $1000 \cdot 0,8 = 800$ kW bemessen. Arbeiten die Abnehmer anstatt mit $\cos \varphi = 0,8$ mit $\cos \varphi = 0,6$ und 1000 kVA, so ist der Dampfteil nur mit 600 kW belastet. Er kann aber trotzdem nicht weiter ausgenutzt werden, da die Turbine fest mit dem elektrisch voll belasteten Generator gekuppelt ist und deshalb nicht zur weiteren Leistungsabgabe verwendet werden kann. In Wirklichkeit wird der Generator überhaupt kaum 1000 kVA bei $\cos \varphi = 0,6$ noch abgeben können. Die Preisstellung müßte also so vorgenommen werden, daß die abgegebene Leistung mindestens entsprechend 1000 kVA bewertet wird.

Arbeitet dieselbe Anlage mit $\cos \varphi = 1$, so ist der Dampfteil bei Entnahme von $800 \text{ kW} = 800 \text{ kVA}$ bereits voll belastet, und die Generatoren können mit Rücksicht auf die Dampfturbinen und Kessel nicht weiter belastet werden. Die festen Kosten entsprechen wiederum 1000 kVA. Daraus sieht man, daß in jedem Fall für die festen Kosten die Scheinlast, nicht die Wirklast maßgebend

¹⁾ Hier ist stillschweigend nacheilender Strom angenommen.

ist, wobei genau genommen bei deren Festlegung die Größe von $\cos \varphi$ noch besonders berücksichtigt werden muß.

Auch bei den beweglichen Kosten ist es nicht richtig, allein die abgegebene Arbeit in kWh in Rechnung zu setzen, denn zu den Kosten der wirklich abgegebenen kWh kommen noch hinzu die Kosten der Stromwärmeverluste.

Die Stromstärke ergibt sich zu $J = \frac{N}{E \cos \varphi}$. Sie ist also, falls die Spannung

E und die Leistung N konstant sind, proportional $\frac{1}{\cos \varphi}$. Die dem Quadrate

des Stromes proportionalen Stromwärmeverluste sind demnach proportional $\frac{1}{\cos^2 \varphi}$.

Desgleichen steigen mit fallendem $\cos \varphi$ die Erregerverluste der Generatoren, ferner fällt der Wirkungsgrad der Turbine. Der Einfachheit halber darf vielleicht ange-

nommen werden, daß die gesamten Verluste proportional $\frac{1}{\cos^2 \varphi}$ sind.

Wie in Abschnitt IV gezeigt, ist bei gleicher abgegebener Leistung die durch die Phasenverschiebung bedingte Verlustvermehrung gleich den Verlusten, die durch die Blindströme allein verursacht würden. Diese Verlustvermehrung

ist proportional $tg^2 \varphi = \frac{1}{\cos^2 \varphi} - 1$. Man kann also die Erhöhung der beweglichen Kosten bei Phasenverschiebung gegenüber den Kosten bei $\cos \varphi = 1$ proportional $tg^2 \varphi$ setzen. (Siehe hierzu Abb. 8.)

Als Grundlage für die Festlegung des Anteils an den festen Kosten, die von den einzelnen Abnehmern zu tragen sind, dienen normalerweise die Angaben des Maximumzählers. Würde die maximale Belastung bei allen Abnehmern zeitlich zusammenfallen, so könnten auf Grund der Ablesung des Maximumzeigers die festen Kosten genau bestimmt werden. In der Praxis trifft jedoch diese Bedingung im allgemeinen nicht zu, vielmehr erreicht die Belastung ihr Maximum bei verschiedenen Abnehmern zu verschiedener Zeit. In diesem Falle ist eine wirklich richtige Festlegung des Anteils an den festen Kosten schwierig. Man muß hierbei den Verlauf der Belastungskurve des Kraftwerkes und der in Frage kommenden Abnehmer berücksichtigen. In den meisten Fällen wird man jedoch die festen Kosten auf Grund der Angaben der Maximumzeiger so verteilen, als ob das Maximum bei allen Abnehmern gleichzeitig auftreten würde. Diese Art ergibt für das stromliefernde Werk im allgemeinen verhältnismäßig hohe Werte. Zuweilen wird die Maximumeinrichtung zu gewissen Tageszeiten außer Betrieb gesetzt. Diese Maßnahme kann zur Erhöhung des Verbrauches und Erhöhung der Benutzungstundenzahl beitragen. Besonders günstig lassen sich die Tarife bei Verwendung eines schreibenden Maximumzählers gestalten.

Ferner sei an dieser Stelle ausdrücklich festgestellt, daß die maximale mittlere Belastung, die vom Maximumzähler angezeigt wird, zur Festlegung der festen Kosten richtiger ist als das momentane Maximum der Belastung. Denn die Belastbarkeit des elektrischen Teiles einer Stromerzeugungs- und Verteilungsanlage ist durch Stromwärmeverluste bedingt, für die die kurzzeitigen hohen Belastungen, wie solche beispielsweise beim Anlassen von Motoren und dgl.

auftreten, bedeutungslos sind. Sowohl die festen Kosten, bezogen auf eine kWh, als auch die beweglichen fallen um so geringer aus, je gleichmäßiger die Belastung ist (je größer die Benutzungsstundenzahl ist). Die ideale Belastung eines Kraftwerkes ist eine ganz konstante Belastung bei $\cos \varphi = 1$. Ausgehend von dieser Tatsache baut Buchholz einen besonderen Tarif auf, bei dem die Abnehmer auf Grund einer „Güteziffer“ beurteilt werden. Die Güteziffer ist am größten, wenn ein Abnehmer seine Anlage konstant mit $\cos \varphi = 1$ gleichmäßig in allen drei Phasen belastet. Weicht die Belastung von dieser Art ab, so sinkt die Güteziffer, und der Abnehmer muß seine Energie teurer bezahlen. Die sehr sinnreichen Überlegungen von Buchholz dürften jedoch praktisch für die Tarifierung nicht in Betracht kommen, da bei ihnen der Abnehmer nur nach den von ihm verursachten Verlusten beurteilt wird. Zwei Abnehmer, welche die gleiche Güteziffer haben, können dabei eine ganz verschiedene Höchstbelastung erreicht haben, so daß der Anteil der Bereitstellungskosten bei ihnen sehr verschieden sein muß. Bei Anwendung des Buchholzschen Tarifes werden die Verbraucher überhaupt wenig Wert darauf legen, gleichmäßig die Anlage zu belasten, da kurzzeitige sehr hohe Belastungen bei der Verrechnung zu wenig in Erscheinung treten. Ferner haftet dem Buchholzschen Tarif der Nachteil an, daß zu seiner Anwendung außer einem kWh-Zähler noch ein J^2 -Zähler und ein E^2 - oder Zeitzähler erforderlich ist. Wollte man den Tarif von Buchholz in bezug auf bessere Berücksichtigung der Bereitstellungskosten noch besser ausbauen, so müßte man den Meßgerätsatz noch durch einen Maximumzeiger ergänzen, wodurch die Anordnung noch um ständlicher wird¹⁾.

Es ist überhaupt praktisch anzustreben, so einfache Verrechnungsverfahren wie möglich anzuwenden. Die Beurteilung der Güte eines Abnehmers nach den Stromwärmeverlusten wäre nur dann richtig, wenn nur ein Abnehmer an das Kraftwerk angeschlossen wäre. In anderen Fällen ist das ganze Berechnungsverfahren hinfällig. Dies wird aus folgendem Beispiel klar:

Es sei angenommen, daß ein Abnehmer einen Strom von 5 A entnimmt. Dann wären die Stromwärmeverluste proportional $5^2 = 25$. Belastet derselbe Abnehmer seine Anlage mit 10 A, so sind die Stromwärmeverluste proportional $10^2 = 100$. Diese Werte können durch einen J^2 -Zähler bestimmt werden. Denken wir uns nun, daß der erste Abnehmer seine Anlage nach wie vor mit $J_1 = 5$ A belastet und ein zweiter Abnehmer, der an dieselbe Leitung angeschlossen ist, gleichfalls mit $J_2 = 5$ A, dann sind die für das Kraftwerk maßgebenden Verluste proportional $(J_1 + J_2)^2 = J_1^2 + J_2^2 + 2J_1 J_2 = (5 + 5)^2 = 10^2 = 100$. Die Summe der Angaben der bei den beiden Abnehmern eingebauten J^2 -Zähler ist jedoch proportional $J_1^2 + J_2^2 = 5^2 + 5^2 = 25 + 25 = 50$. Die Fehler bei Berücksichtigung der Verluste werden bei Anwesenheit von mehr Abnehmern noch größer. Praktisch kommt es nur in Frage, daß man durch Anwendung von Zählern, die auch den Blindverbrauch berücksichtigen, die Kosten der Energie vom $\cos \varphi$ abhängig macht.

¹⁾ Näheres hierzu siehe J. A. Möllinger: „Die Buchholzschen Vorschläge zur Verrechnung des induktiven Verbrauches.“ Bericht für die Zählerkommission des V. D. E. Mitteilungen der Vereinigung der Elektrizitätswerke, 20, Nr. 280, 1921 (auch als Sonderabdruck erschienen).

Der Leistungsfaktor kann bei der Tarifierung auf verschiedene Weise berücksichtigt werden, entweder nur beim Preis für die kWh oder bei der Festlegung der Bereitstellungskosten, endlich bei beiden Posten.

Der Grundpreis der kWh kann beispielsweise unter Annahme von $\cos \varphi = 1$ festgelegt werden. Zu diesem Preis kommt dann ein Zuschlag in Abhängigkeit vom mittleren Leistungsfaktor, der zweckmäßigerweise etwa proportional $\operatorname{tg}^2 \varphi$ gewählt wird.

Bei kleineren Abnehmern kann der mittlere $\cos \varphi$ auf Grund von Messungen, die bei einigen als charakteristisch anzunehmenden Abnehmern gemacht worden sind, festgelegt werden. Bei größeren Abnehmern wird der mittlere $\cos \varphi$ auf Grund der Angaben des Wirkverbrauchzählers und eines Scheinverbrauchzählers oder Blindverbrauchzählers festgelegt, und zwar berechnet sich aus der Angabe A des Wirkverbrauchzählers und A_s des Scheinverbrauchzählers für die gleiche

Registrierperiode der „mittlere“ Leistungsfaktor zu $\cos \varphi_m = \frac{A}{A_s}$. Entsprechend

ergibt sich unter Zugrundelegung der Angabe A_b des Blindverbrauchzählers, $\operatorname{tg} \varphi_m = \frac{A_b}{A}$ ¹⁾. Aus dem Wert $\operatorname{tg} \varphi$ kann dann φ und $\cos \varphi$ bestimmt werden.

Es ist aber zweckmäßig, den Preis unmittelbar in Abhängigkeit von $\operatorname{tg} \varphi$ abzustufen. Die Anwendung des Blindverbrauchzählers ist zweifellos zweckmäßiger als die des Scheinverbrauchzählers, weil dieser nur für Leistungsfaktoren unter 0,9 brauchbar ist, und zwar entweder nur induktiv oder nur kapazitiv. Auf diese Weise ist er gerade bei Abnehmern, die ihren $\cos \varphi$ infolge tariflicher Maßnahmen verbessern, nicht mehr brauchbar.

Kommt beim Abnehmer auch voreilende Stromentnahme vor, so muß, falls sie von größerer Bedeutung ist, ein besonderer Blindverbrauchzähler für voreilenden Strom angewandt werden. Beide Blindverbrauchzähler erhalten in diesem Fall Rücklaufhemmung. Spielt der voreilende Verbrauch nur eine untergeordnete Rolle, so kann man sich mit einem einzigen Blindverbrauchzähler ohne Rücklaufhemmung begnügen. Dieser Zähler läuft bei voreilendem Strom rückwärts. Dies hat zur Folge, daß die mittlere Phasenverschiebung kleiner ausfällt.

Nach dem Vorgang von Bußmann²⁾ wird zuweilen der Preis der kWh für eine bestimmte als normal angenommene Phasenverschiebung φ_0 festgelegt und entsprechend den Angaben des Blind- und Wirkverbrauchzählers werden Zuschläge oder Abschläge in folgender Weise vorgenommen:

Es wird aus den Angaben A des Wirkverbrauchzählers der dem zugrunde gelegten Normalleistungsfaktor $\cos \varphi_0$ entsprechende positive Blindverbrauch A_{b0} berechnet. Übersteigt der Blindverbrauch diesen Wert, so werden proportional dem Überschuß Zuschläge berechnet, bei Unterschreitung bzw. negativem Blindverbrauch werden Abschläge gemacht (umgekehrt bei Stromlieferung seitens eines fremden Werkes). So ist z. B. unter Zugrundelegung eines normalen Leistungsfaktors $\cos \varphi_0 = 0,7$ entsprechend $\varphi_0 \approx 45^\circ$, der Blindverbrauch A_{b0} gleich dem Wirkverbrauch A . Für die Bestimmung der Zuschläge bzw. Abschläge ist hier dann die Differenz zwischen Blindverbrauch A_b und Wirkverbrauch A maßgebend.

¹⁾ Siehe Seite 6.

²⁾ Siehe Fußnote 2 Seite 5.

Bei einem Normalleistungsfaktor $\cos \varphi_0 = 0,8$ $\operatorname{tg} \varphi_0 = 0,75$ ist für die Verrechnung maßgebend die Differenz Δ des Blindverbrauches und 75 v. H. des Wirkverbrauches, also $\Delta = A_b - 0,75 \cdot A$.

Allgemein ist $\Delta = A_b - A \cdot \operatorname{tg} \varphi_0$.

Berücksichtigt man, daß der Blindverbrauch zusätzliche Verluste verursacht, so muß der Preis einer bkVAh etwa im gleichen Verhältnis zum Preis der kWh stehen, wie die Verluste zu der bei $\cos \varphi = 1$ gelieferten Energie stehen. Demnach müßten die bkVAh mit etwa 10 v. H. der kWh berechnet werden.

Bei Festlegung der Bereitstellungskosten in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung können verschiedene Wege eingeschlagen werden.

Man kann den Höchstverbrauch in kVA auf Grund der Angaben eines Scheinverbrauchzählers mit Maximumzeiger messen, oder man bestimmt die Scheinlast aus Angaben von zwei Maximumzeigern, die an einem Wirk- und einem Blindverbrauchzähler angebracht sind. Theoretisch richtig kann nach dem zweiten Verfahren die Messung nur mit Hilfe schreibender Höchstverbrauchzähler ausgeführt werden, da nur dann mit Sicherheit der mit dem größten Wirkverbrauch gleichzeitig auftretende Blindverbrauch bestimmt werden kann. Bei Verwendung eines einfachen Maximumzeigers könnte es vorkommen, daß der höchste Wert, der vom Maximumzeiger des Blindverbrauchzählers angezeigt wird, nicht zur Zeit des größten Wirkverbrauches aufgetreten ist. Soweit es sich jedoch um Anlagen handelt, in denen nur Transformatoren und Asynchronmotoren (also keine Synchron- oder kompensierte Asynchronmotoren) eingebaut sind, kann angenommen werden, daß die Angaben der beiden Maximumzeiger auch wirklich zeitlich zusammengehören, denn der größte Wirkverbrauch wird zu der Zeit auftreten, wo die meisten Transformatoren und Motoren eingeschaltet sind, d. h. die Blindlast den höchsten Wert hat. Es ist noch zu berücksichtigen, daß der Leistungsfaktor bei Höchstbelastung stets besser sein wird als der durchschnittliche Wert. Dieser kann gegebenenfalls auch bei der Bestimmung der Bereitstellungskosten eingesetzt werden, falls kein Maximumzeiger am Blindverbrauchzähler vorhanden ist.

IX. Verrechnungsarten in verschiedenen Fällen.

Es ist hier natürlich nicht möglich, genaue Vorschläge für jeden einzelnen Verrechnungsfall zu geben. Es möge hier nur zusammengestellt werden, welche Verrechnungsverfahren grundsätzlich bei einzelnen Abnehmergruppen als zweckmäßig erscheinen und welche Zählerarten dabei erforderlich sind, und zwar im wesentlichen nur unter dem Gesichtspunkte der Berücksichtigung der Phasenverschiebung.

Im folgenden ist als Grundgedanke die möglichste Einfachheit der Tarife und Meßgeräte angenommen. Die vielen umständlichen Tarife, die vorgeschlagen und zum Teil auch eingeführt worden sind, können nach dem Obigen die Verkaufspreise doch nicht genau den Gestehungskosten anpassen und bringen deshalb mehr Nachteile als Vorteile mit sich. Es wird im folgenden zwischen reinen Abnehmern und Abnehmern, die zeitweise auch Strom liefern, unterschieden werden; ferner werden diese nach ihrer Größe klassifiziert. Wie man

die einzelnen Gruppen dabei wählt, ist mehr oder weniger eine Gefühlssache, und für verschiedene Werke können wesentlich andere Gruppierungen in Frage kommen.

A. Reine Abnehmer.

1. Kleinabnehmer, größte entnommene Leistung bis 3 kW.

a) Abnehmer bis 0,5 kW. Hierunter fallen die kleinsten Abnehmer, die Strom vorwiegend für Licht- und in geringen Mengen für Kraftzwecke entnehmen. Als Kraftverbraucher kommen bei diesen Abnehmern nur Bügeleisen, Wasserkocher und vielleicht vereinzelt kleine Motoren (Haartrockenapparate, Tischventilatoren) in Betracht. Da letztere verhältnismäßig selten vorkommen, und jedenfalls nur ganz vorübergehend im Betrieb sind, so kann die Belastung hier stets als induktionsfrei angenommen werden. Für die Verrechnung genügt also ein kWh-Zähler, und zwar entsprechend dem einphasigen Anschluß solcher Abnehmer ein Einphasenzähler. Bei diesen Abnehmern spielen die festen Kosten für den Anschluß des Zählers, der Zählerablesung, Verrechnung und Einkassierung der Beträge eine sehr wesentliche Rolle. Dagegen können in den meisten Fällen die Bereitstellungskosten des Werkes vernachlässigt werden. Die festen Kosten können dabei auf zweierlei Weise Berücksichtigung finden; entweder bemißt man den Preis der kWh unter Berücksichtigung der mittleren von solchen Abnehmern entnommenen kWh-Zahl so hoch, daß die festen Kosten im allgemeinen mitgedeckt werden. Diese Verrechnungsart hat den Nachteil, daß bei einzelnen Abnehmern, die einen besonders niedrigen Verbrauch haben, die festen Kosten nicht gedeckt werden. Dieser für das Werk unwesentliche Nachteil wird durch den gerechteren Gebührentarif vermieden, bei dem der Abnehmer eine feste Grundgebühr entrichtet, deren Höhe auf verschiedene Weise festgelegt werden kann, und dann einen verhältnismäßig niedrigen kWh-Preis zahlt.

In gewissen Fällen kommt auch die Verwendung billiger Subtraktionszähler in Frage. Dabei tritt an Stelle der Grundgebühr eine entsprechend bemessene Pauschalgebühr. Vom Abnehmer wird außerdem nur der Überverbrauch bezahlt. Dieses Verrechnungsverfahren ist in Deutschland jedoch sehr wenig in Anwendung.

b) Abnehmer von 0,5 bis 3 kW. Hierzu gehören in erster Linie Abnehmer mit kleinen Induktionsmotoren und vereinzelt größere Lichtabnehmer (Villen u. dgl.). Für diese Abnehmer werden meist Drehstrom-Kilowattstundenzähler verwendet. Sie können mitunter noch durch ein Doppeltarifzählwerk ergänzt werden, falls diese Abnehmer in solcher Zahl vorkommen, daß eine Verbesserung der Gleichmäßigkeit ihrer Belastung für das Werk von Bedeutung ist. Bei der Bestimmung des Preises der kWh kann ein mittlerer Erfahrungswert für den $\cos \varphi$, etwa 0,6, zugrunde gelegt werden. Der Einbau besonderer Blindverbrauchszähler erscheint hier gleichfalls überflüssig. Es dürfte auch nicht ungerecht sein, daß auf diese Weise die Abnehmer mit reiner Lichtbelastung gewissermaßen für die bei ihnen nicht herrschende Phasenverschiebung zu zahlen haben, da sie durch ihre wesentlich kürzere Benutzungszahl zum mindesten nicht günstiger sind als die kleinen Kraftabnehmer.

2. Mittlere Abnehmer, etwa 3 bis 100 kW.

a) Abnehmer mit 3 bis 20 kW. Bei diesen Abnehmern empfiehlt sich neben dem Einbau eines Drehstrom-Kilowattstundenzählers, gegebenenfalls mit Doppelzählwerk, noch der Einbau eines Blindverbrauchszählers, und zwar eines Zählers für gleichbelastete Phasen. Mit Hilfe dieses Zählers ist es möglich, den kWh-Preis auf eine einfache Weise nach dem $\cos \varphi$ abzustufen. Die Anwendung dieser Maßnahmen kommt jedoch auch bei diesen Abnehmern nur dann in Betracht, wenn man damit rechnen kann, daß sie durch Wahl entsprechender Motoren, die möglichst voll belastet laufen, ihren $\cos \varphi$ auf einen besseren Wert bringen können. Ist die Art des Betriebes derart, daß der Abnehmer keine Möglichkeit hat, seinen $\cos \varphi$ zu verbessern, so dürfte auch in diesen Fällen der Einbau besonderer, den Blindstrom berücksichtigender Zähler nur eine unnütze Komplikation darstellen.

b) Abnehmer mit 20 bis 100 kW. Soweit diese Abnehmer gezwungen sind, ihre Belastung auf mehrere kleine Motoren zu verteilen, sind sie genau wie die unter a) angeführten zu behandeln. In denjenigen Fällen, wo die einzelnen Motoren für mindestens 30 kW bemessen sind, werden die Abnehmer gegebenenfalls wegen der Abstufung des Preises es vorziehen, Synchronmotoren einzubauen. Auch in diesem Fall dürfte ein Blindverbrauchszähler für gleichbelastete Phasen noch genügen.

3. Großabnehmer über 100 kW.

a) Abnehmer von 100 bis 1000 kW. Bei diesen Abnehmern spielt die Berücksichtigung von $\cos \varphi$ eine Rolle bei der Preisfeststellung für eine kWh oder für den Anteil an festen Kosten; gegebenenfalls für beide Fälle. Zur Verrechnung sind hierbei erforderlich: ein kWh-Zähler mit Maximumzeiger, der gegebenenfalls je nach den Belastungsverhältnissen des Kraftwerkes zeitweise, beispielsweise in der Nacht, außer Betrieb gesetzt werden kann und ein oder zwei Blindverbrauchszähler für ungleich belastete Phasen, die gegebenenfalls auch noch mit Maximumzeigern ausgerüstet werden. Unzweckmäßig erscheint nach dem Obigen die Verwendung von Scheinverbrauchszählern.

b) Abnehmer über 1000 kW. Diese dürften durch besondere Tarifmaßnahmen zum Ausgleich der Belastung des Kraftwerkes und Verbesserung des $\cos \varphi$ nach Möglichkeit herangezogen werden. Wie dies im einzelnen geschehen kann, läßt sich kaum allgemein sagen. Bei solchen Abnehmern lohnt es sich, von Fall zu Fall die Verrechnungsart genau zu erwägen. Als Meßgeräte kommen hier in erster Linie schreibende Höchstverbrauchszähler, und zwar sowohl für den Wirk- als auch für den Blindverbrauch in Betracht.

B. Abnehmer, die auch Energie an das Netz liefern.

Bei diesen wird meist die abgenommene und gelieferte Energie getrennt verrechnet. Auch in den Fällen, wo für die beiden Richtungen der gleiche Preis vereinbart ist, ist eine getrennte Registrierung notwendig. Die hierzu erforderlichen Meßgeräte und deren Anordnung sind schematisch aus Abb. 36 a¹⁾ ersichtlich. Dabei ist die Verrechnung vom Standpunkt eines der Werke betrachtet.

¹⁾ Entnommen aus dem Vortrag von Möllinger, a. a. O. (siehe Fußnote Seite 28).

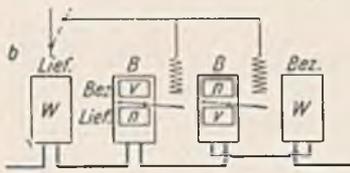
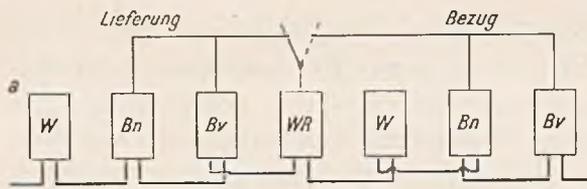


Abb. 36.
 Meßanordnung für Stromlieferung und -bezug unter Verwendung von Blindverbrauchszählern.

Von diesem Standpunkt aus ist die Abgabe der Energie an das zweite parallel arbeitende Werk eine Lieferung, und die vom anderen Werk gelieferte Energie ein Energiebezug. Es sind hierbei folgende Meßgeräte erforderlich: je ein Kilowattstundenzähler, Wirkverbrauchszähler (W) für Lieferung und Bezug. Beide mit Rücklaufhemmung, wobei die Stromspulen des für Bezug bestimmten Zählers gegenüber dem

für Lieferung bestimmten umgepolt sind, entsprechend der Tatsache, daß der bezogene Strom als negativ zu betrachten ist (s. Abb. 5). Zur Verrechnung des Blindverbrauches sind für Lieferung zwei Blindverbrauchszähler mit Rücklaufhemmung erforderlich, von denen der eine, Bn, den nacheilenden, also positiven Blindstrom, der andere, Bv, den voreilenden, also negativen registriert. Die Stromspulen des zweiten Zählers müssen wiederum umgepolt sein. Derselben sind für die Registrierung des beim Bezug aufgetretenen Blindstromes zwei weitere Blindverbrauchszähler Bn und Bv erforderlich. Wie im Abschnitt III gezeigt worden ist, hat aber ein abgegebener, nacheilender Blindstrom die gleiche Richtung wie ein gelieferter voreilemender und umgekehrt. Dies hätte zur Folge, daß stets zwei Blindverbrauchszähler laufen würden, und es wäre keine Trennung der bei der Lieferung der Energie in verschiedenen Richtungen auftretenden Blindströme möglich. Deshalb werden die Spannungsspulen der Blindverbrauchszähler unter Zwischenschaltung eines wattmetrischen Relais WR angeschlossen. Dieses ist seiner Bauart nach einem Drehstromzähler ähnlich¹⁾. Bei Lieferung in einer Richtung werden nur die Spannungsspulen des einen Paares der Blindverbrauchszähler, bei Lieferung in der anderen, die des zweiten eingeschaltet. Nach dem Obigen besteht also der vollständige Zählersatz aus mindestens sieben Apparaten mit den zugehörigen mindestens zwei Strom- und Spannungswandlern. Außerdem kommen oft je ein Kontrollwirkverbrauchszähler für jede Richtung hinzu. Die Verwendung von Kontrollblindverbrauchszählern erscheint dagegen überflüssig. Bei Anwendung von Kontrollzählern müssen auch zwei Sätze von Meßwandlern angewandt werden. Der Anschluß der Kontrollzähler an die gleichen Wandler, an welche die Hauptzähler angeschlossen sind, macht die ganze Kontrollschaltung wertlos. Die oben angedeutete Anordnung wird bis jetzt allgemein angewandt. Eine wesentliche Vereinfachung bildet folgende, vom Verfasser vorgeschlagene, neuerdings von den SSW gelieferte Anordnung, Abb. 36b. An Stelle von vier Blindverbrauchszählern werden bei dieser nur zwei Blindverbrauchszähler mit Doppelpaarlwerken verwendet. Einer der Zähler registriert stets den vom Standpunkt des Hauptwerkes positiven Blindstrom, der andere den negativen. Die Trennung für beide Richtungen der Energielieferung geschieht dadurch, daß bei einer Richtung der Blindverbrauch auf dem einen Zählwerk registriert wird,

¹⁾ Es würde eigentlich genügen, das wattmetrische Relais als Apparat für symmetrische Belastung der drei Phasen, also nur mit einem Triebssystem, auszuführen.

bei der anderen auf dem anderen. Die Umschaltung von dem einen Zählwerk auf das andere besorgt eine Kontaktvorrichtung, die an einem der Wirkverbrauchszähler an Stelle der normalen Rücklaufhemmung eingebaut ist. Auf diese Weise ist ein besonderes wattmetrisches Relais entbehrlich¹⁾. Die neue Schaltung hat den Vorteil der größeren Übersichtlichkeit; ferner sind die Meßwandler weniger belastet, so daß eine höhere Meßgenauigkeit erzielt wird²⁾.

Es möge noch kurz die Berücksichtigung der Eisen- und Kupferverluste in Transformatoren mit Hilfe der E^2 - und J^2 -Zähler erwähnt werden. Diese Messung steht insofern im Zusammenhang mit der Berücksichtigung des Blindverbrauches, als die reinen Magnetisierungsströme von Transformatoren und Maschinen Blindströme sind und deshalb von Wirkverbrauchszählern nicht erfaßt werden. Sie kommt in erster Linie in Frage für Messung der an kleine Transformatorstationen gelieferten Energie unter Vermeidung der hochspannungsseitigen Messung. Würde man in diesem Fall die Energie nur mit einem auf der Sekundärseite angeschlossenen kWh-Zähler messen, so würde die gemessene Energie um den Betrag der Eisen- und Kupferverluste des Transformators zu klein. Man kann diesen Meßfehler durch einen gewissen Preiszuschlag ausgleichen. Der Abnehmer hat aber dabei keine Veranlassung, dafür zu sorgen, daß sein Transformator nicht unnütz eingeschaltet bleibt. Diesem Übelstand kann abgeholfen werden, indem man sekundär einen mit einem Spannungsrelais ausgerüsteten Zeitzähler einbaut. Dieser zeigt dann die Zeitdauer der Einschaltung des Transformators. Die Angaben des Zählers multipliziert mit den Eisenverlusten des Transformators in einer Stunde geben den gesamten Eisenverlust an, der zweckmäßigerweise entsprechend der hohen Phasenverschiebung des Leerlaufstromes des Transformators zu einem verhältnismäßig hohen Preissatz zu berechnen ist. Dem normalen Zeitzähler haftet jedoch der Nachteil an, daß er die durch die Spannungsänderungen verursachten Änderungen in den Eisenverlusten nicht berücksichtigt. Diese Verluste können etwa proportional dem Quadrate der Spannung angenommen werden. Man schaltet deshalb zweckmäßig an Stelle eines normalen Zeitzählers einen E^2 -Zähler ein, dessen Angaben also proportional E^2 sind, demnach auch proportional den Eisenverlusten. Wird der Zähler so gebaut, daß er bei normaler Spannung Stunden anzeigt, so ergeben seine Angaben multipliziert mit dem Eisenverlust des Transformators bei dieser normalen Spannung den gesamten Eisenverlust, auch wenn die Betriebsspannung schwankt. Ein E^2 -Zähler kann sogar dann gelegentlich am Platze sein, wenn die Energiemessung hochspannungsseitig vorgenommen wird. Seine

¹⁾ Bei Verwendung der früheren Schaltung könnte man grundsätzlich auch das besondere Umschalte-Relais vermeiden. Jedoch erfordert diese Schaltung das wechselweise Anschließen von je vier Spannungsspulen. Dies kann mit einem Hilfskontakt, der im kWh-Zähler eingebaut ist, praktisch nicht ausgeführt werden.

²⁾ Allgemein kann das Doppeltarifzählwerk in Abhängigkeit von einer Größe, auf die der Zähler selbst nicht unmittelbar reagiert, umgeschaltet werden, so z. B. könnte das Zählwerk eines Wirkverbrauchszählers in Abhängigkeit von der Richtung des Drehmomentes eines Sinus-Gerätes oder von der Zeigerstellung eines Phasennessers umgeschaltet werden. Auf diese Weise kann z. B. die Verrechnung des Wirkverbrauches in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung vorgenommen werden.

Anwendung dürfte in gewissen Fällen auch bei Motoren zu empfehlen sein; sie ist aber bis jetzt nicht üblich.

Will man beim Transformator bei der sekundären Messung auch die Kupferverluste berücksichtigen, so kann dies durch Einbau von J^2 -Zählern geschehen.

Außer bei kleinen Transformatorstationen kommt die Anwendung der E^2 - und J^2 -Zähler auch bei sehr hohen Spannungen in Betracht (100 kV), wo man nach Möglichkeit auf der Oberspannungsseite jegliche Meßgeräte vermeidet.
