Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 66 (1975)

Heft: 24

Artikel: Scheinleistungszähler

Autor: Kamber, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915328

Nutzungsbedingungen

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

Conditions d'utilisation

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

Terms of use

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

Download PDF: 16.07.2025

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

BULLETIN

des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
de l'Association Suisse des Electriciens
des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätswerke
de l'Union des Centrales Suisses d'Electricité

Elektrotechnik – Electrotechnique

Scheinleistungszähler [1])

Von W. Kamber

621.317.785.016.26

Im Gegensatz zur Wirkleistung ist die Scheinleistung keine physikalische Grösse, sondern ein konventioneller Begriff. Ausgehend von den verschiedenen Definitionen in den Normen werden elektrische Schaltungen angegeben, welche die den Definitionen entsprechenden Rechenoperationen auf analoge Weise durchführen. Neben den kompletten und deshalb aufwendigen Schaltungen, welche die Oberschwingungen der Ströme und Spannungen berücksichtigen, werden einfache Schaltungen unter Vernachlässigung der Oberschwingungen angegeben. Schliesslich werden Verfahren zur zeitlichen Integration der Scheinleistung zwecks Bildung der Scheinenergie gezeigt. Am Schluss wird etwas ausführlicher auf die wichtigsten Bauarten und Daten analoger Multiplikatoren eingegangen, erlaubt doch erst die Entwicklung präziser und preisgünstiger elektronischer Multiplikatoren den Bau von Scheinleistungszählern.

Der zum Bau von Scheinleistungszählern gegenwärtig noch zu treibende Aufwand lässt einen allgemeinen Ersatz der heute gebräuchlichen Wirkleistungszähler durch Scheinleistungszähler fraglich erscheinen.

Contrairement à la puissance active, la puissance apparente n'est pas une grandeur physique, mais une notion conventionnelle. En partant des différentes définitions figurant dans les Normes, l'auteur indique des montages électriques qui exécutent d'une façon analogique les opérations de calcul correspondant aux définitions. Outre les montages complets et par conséquent coûteux, qui tiennent compte des harmoniques des courants et tensions, il existe des montages plus simples, en négligeant les harmoniques. L'auteur montre également des procédés d'intégration temporelle de la puissance apparente pour former l'énergie apparente. Pour terminer, il traite un peu plus en détail des genres de construction et des caractéristiques les plus importants de multiplicateurs analogiques, car c'est le développement de multiplicateurs électroniques précis et d'un prix raisonnable qui autorise la construction de compteurs de puissance apparente, dont le coût encore élevé ne semble toutefois pas devoir permettre une substitution généralisée des compteurs de puissance active usuels par des compteurs de puissance apparente.

1. Einleitung

Es ist üblich, den Verbrauchern elektrischer Energie die bezogene Wirkenergie zu verrechnen. Als Messgerät für Wechselstrom-Energie wird meistens der Induktionszähler verwendet, der zu hoher Vollkommenheit entwickelt wurde. In letzter Zeit bekannt gewordene elektronische Zähler hoher Präzision werden für die Fernübertragung der Messwerte, für die Verrechnung grosser Energiemengen und für Eichzwecke verwendet.

Elektrische Maschinen und Netze sind aber nicht für die Wirkleistung, sondern für die Scheinleistung zu dimensionieren. Um Grossabnehmer zu veranlassen, die Energie mit einem hohen Leistungsfaktor zu beziehen, d. h. Scheinleistung möglichst gleich Wirkleistung, hat man neben den Wirkleistungszählern auch Blindleistungszähler installiert und einen Tarif festgelegt, der die Bezahlung der Blindenergie entweder zu einem reduzierten Preis, oder unter einem vereinbarten Wert des Leistungsfaktors, vorsieht.

Dieses Verfahren ist für Kleinverbraucher zu aufwendig, da zwei Zähler abgelesen und verrechnet werden müssen. Ein weiterer Einwand dagegen ist die Tatsache, dass nur bei konstantem Leistungsfaktor die Scheinenergie gleich der Zeigersumme aus Wirk- und Blindenergie ist. Es wurden schon früher Versuche unternommen, die Drehzahlen von Wirk- und Blindleistungszählern geometrisch zu addieren und so die Scheinenergie zu ermitteln. Aber erst mit der Entwicklung von genauen und preisgünstigen elektronischen Schaltungen, insbesondere Multiplikatoren, wie sie aus der Analogrechentechnik bekannt sind, kann man technisch und wirtschaftlich befriedigende Schaltungen für Scheinleistungszähler aufbauen.

2. Definition der Scheinleistung

Die Scheinleistung ist eine Rechengrösse und hat nicht, wie die Wirkleistung, eine physikalische Bedeutung. Der Begriff der Scheinleistung wurde wohl hauptsächlich deshalb geschaffen, um die Grösse elektrischer Maschinen, Transformatoren, Apparate, Leitungen usw. angeben zu können. Für diesen Zweck genügen die in den Normen vorhandenen Definitionen, nicht aber um den Scheinleistungsverbrauch eines beliebigen Energiekonsumenten festzulegen. Es verwundert deshalb nicht, dass in den verschiedenen Normen unvollständige Definitionen der Scheinleistung auftreten.

[1]) Dieser Aufsatz ist eine Überarbeitung der Arbeit, die der Autor zur 21. Preisaufgabe der Denzler-Stiftung «Scheinleistungszähler» eingereicht hat, und deren Preis ihm anlässlich der 90. Generalversammlung am 6. September 1974 überreicht worden ist.

2.1 Scheinleistung im Dreiphasensystem

Die folgenden Definitionen sind sinngemäss für alle Mehrphasensysteme anwendbar.

Die CEI hat keine Definition der Scheinleistung für Dreiphasensysteme geschaffen [1][1]). Die DIN [2] geben für symmetrische Dreiphasensysteme mit symmetrischer Belastung die folgende Definition der Scheinleistung:

$$S = 3\,U\,I \tag{1}$$

worin U den Effektivwert der Sternspannung und I den Effektivwert des Leiterstromes bedeuten. Die DIN enthalten die Anmerkung, dass für beliebige unsymmetrische Mehrphasensysteme keiner der bisher gemachten Vorschläge zur allgemeinen praktischen Anwendung gelangt sei.

Für unsymmetrische Dreiphasensysteme mit unsymmetrischer Belastung und nichtsinusförmigen Spannungen und Strömen steht nur die Definition der IEEE [3] zur Verfügung. Darnach ist die Scheinleistung gleich dem Betrag des Leistungsvektors, dessen rechtwinklige Komponenten die Wirkleistung, die Blindleistung und die Verzerrungsleistung sind. Diese sollen im folgenden ausführlich behandelt werden.

Die Wirkleistung P beträgt in bekannter Weise:

$$P = \sum_{s=1}^{3} \sum_{r=1}^{\infty} {}^{r}U_s\, {}^{r}I_s \cos(\alpha_{sr} - \beta_{sr}) \tag{2}$$

Darin bedeuten:

${}^{r}U_s$ Effektivwert der s-ten Sternspannung, r-te Oberschwingung, gegen den Sternpunktleiter, bei dessen Fehlen gegen den künstlichen Sternpunkt (Schwerpunkt des Spannungsdreiecks)

${}^{r}I_s$ Effektivwert des s-ten Leiterstromes, r-te Oberschwingung

α_{sr}, β_{sr} Nullphasenwinkel von ${}^{r}U_s$ resp. ${}^{r}I_s$

Die Blindleistung ist definiert als:

$$Q = \sum_{s=1}^{3} \sum_{r=1}^{\infty} {}^{r}U_s\, {}^{r}I_s \sin(\alpha_{sr} - \beta_{sr}) \tag{3}$$

Die Verzerrungsleistung werde des einfacheren Ausdruckes wegen, und weil die Oberschwingungen in den Sternspannungen in der Regel nicht gross sind, nur für sinusförmige Spannungen U_s angegeben:

$$D = \sum_{s=1}^{3} U_s \sqrt{\sum_{r=2}^{\infty} {}^{r}I_s} \tag{4}$$

Die Verzerrungsleistung wird null, wenn Spannung und Strom die gleiche Kurvenform haben, d. h. wenn Spannung und Strom sinusförmig sind, oder wenn das System nur lineare ohmsche Widerstände enthält.

Damit wird die Scheinleistung:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \tag{5}$$

Demnach besitzt die Scheinleistung kein Vorzeichen. Deren Grösse hängt nicht davon ab, ob Wirkleistung bezogen oder geliefert wird, oder ob die Blindleistung positiv oder negativ ist. Das ist ein schwerwiegender Einwand gegen die Verwendung von Scheinleistungszählern für Verbraucher mit Betrieb in allen 4 Quadranten der komplexen Leistungsebene.

Die Scheinleistung einer Phase ist gleich dem Betrag der Vektorsumme der drei Leistungsvektoren dieser Phase, deren Komponenten P_s, Q_s, D_s mit den Gl. (2), (3), (4), ohne erstes Summenzeichen, berechnet werden. Die Scheinleistung des Dreiphasensystems ist demnach nur bei gleichem Leistungsfaktor für alle drei Phasen gleich der Summe der Scheinleistungen der drei Phasen.

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

2.2 Scheinleistung im Einphasensystem

Nach IEEE ist die Scheinleistung gleich dem Betrag des Vektors, gebildet aus Wirk-, Blind- und Verzerrungsleistung, definiert mit Hilfe der Formeln (2), (3), (4), ohne erstes Summenzeichen, und (5), also ganz analog der Definition für die dreiphasige Scheinleistung. Die Ausrechnung der Formeln (2)...(5) liefert:

$$S = U\,I \tag{6}$$

worin:

$U = \sqrt{\sum_{r=1}^{\infty} {}^{r}U^2}$ Effektivwert der Spannung

${}^{r}U$ r-te Oberschwingung der Spannung

$I = \sqrt{\sum_{q=1}^{\infty} {}^{q}I^2}$ Effektivwert des Stromes

${}^{q}I$ q-te Oberschwingung des Stromes

Ebenso definieren CEI, SEV und DIN die Scheinleistung als Produkt der Effektivwerte von Strom und Spannung.

Der Begriff des Leistungsvektors ist zu unterscheiden von der komplexen Leistung, die durch einen Zeiger in der komplexen Ebene dargestellt wird. Die komplexe Leistung ist nach IEEE auch für oberschwingungshaltige Ströme und Spannungen definiert, nach DIN und CEI nur für sinusförmige Grössen. Die Scheinleistung ist nur bei verschwindender Verzerrungsleistung gleich dem Betrag der komplexen Leistung.

3. Bestimmung der Scheinenergie

Die Bestimmung der Scheinenergie geschieht in 2 Schritten:

- Bestimmung der Scheinleistung
- Integration der Scheinleistung über die Zeit

Für die Bestimmung der Scheinleistung steht kein Messwerk nach Art eines Induktionsmesswerkes oder Dynamometers zur Verfügung. Man muss vielmehr die durch die Definition der Scheinleistung vorgeschriebene Rechnung durchführen. Es werden hiefür in dieser Arbeit analoge Methoden angegeben; die Verbesserung und Verbilligung digitaler Bausteine, man denke an die Entwicklung der Taschenrechner, werden vermutlich bald zum Auftreten von digitalen Messumformern führen. Die Arbeit verwendet im folgenden die von der IEEE gegebenen Definitionen der Scheinleistung, obwohl es durchaus plausible Gründe für andere Definitionen geben mag. Wie aus den Gleichungen (2), (3), (4) ersichtlich, gelten die Definitionen für die Scheinleistung nur für stationäre Netze; infolgedessen interessieren im folgenden die Ausgleichsvorgänge, z. B. beim Einschalten der Belastung, nicht.

3.1 Bestimmung der Scheinleistung im Drehstromsystem

3.1.1 Unsymmetrisches System mit unsymmetrischer Belastung

Die *Wirkleistung* wird im allgemeinen Fall eines Netzes mit Sternpunktleiter mit drei elektronischen Multiplikatoren M gemessen (Fig. 1). An den einen Eingang wird eine der Sternspannung proportionale Spannung, an den andern eine dem Strom im betreffenden Aussenleiter proportionale Spannung

gelegt. Der Ausgang des Multiplikators wird in einem Tiefpass gefiltert, das Gleichspannungsglied ist proportional der Wirkleistung inkl. Oberschwingungsleistung nach Gl. (2). Die Leistungswerte der drei Phasen werden zur Gewinnung der Gesamt-Wirkleistung addiert. Zwecks einfacherer Auslegung der Elektronik werden Trennwandler vorgesehen.

Nach der Definitionsgleichung (3) kann die *Blindleistung* ermittelt werden, indem Grund- und Oberschwingungen des Stromes (oder der Spannung) um 90^0 in der Phase gedreht werden und im weiteren wie bei der Wirkleistung verfahren wird. Eine gebräuchliche Schaltung ist in Fig. 2 angegeben.

Bei dieser Schaltung besteht wohl eine Phasenverschiebung zwischen den Eingangsspannungen des Multiplikators von genau $\varphi - 90^0$, unabhängig von der Frequenz, hingegen ändern bei variabler Frequenz und gleichbleibenden Netz- Strom- und Spannungswerten deren Amplituden gegenüber den Werten bei Nennfrequenz. Es resultieren die in Tabelle I angegebenen relativen Fehler der Blindleistung $\Delta Q/Q$.

Tritt in der Sternspannung eine dritte Oberschwingung von 5 % auf, und ist der Strom rechteckförmig (dritte Oberschwingung = $^1/_3$ der Grundschwingung), so kann, je nach Phasenlage, ein Fehler in der Blindleistung bis 1 % der Grundschwingungsblindleistung auftreten. Bei praktisch sinusförmigen Strömen und Spannungen werden die Fehler nicht grösser als 0,5 %, wenn die Netzfrequenz um nicht mehr als ± 10 % von ihrem Nennwert abweicht.

Es sind Schaltungen mit Allpässen bekannt [4], die keine Fehler in der Amplitude verursachen, und bei geeigneter Auslegung kleine Phasenfehler aufweisen. Ein Allpass besitzt die Frequenzganggleichung

$$\frac{\underline{U}_2}{\underline{U}_1} = \frac{1 - j\omega T}{1 + j\omega T} \tag{7}$$

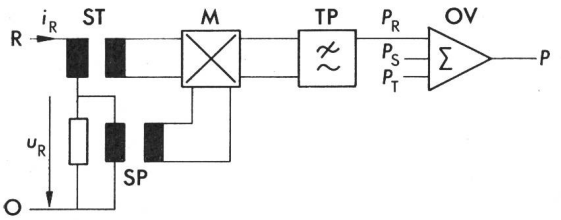

Fig. 1 Messung der Wirkleistung *P* im Dreiphasensystem

i_R	Strom im Hauptleiter Phase R
u_R	Sternspannung Phase R, gegen Nulleiter 0
P_R, P_S, P_T	Wirkleistungen der Phasen R, S, T
M	Multiplikator
TP	Tiefpassfilter
OV	Summierverstärker
ST	Stromwandler
SP	Spannungswandler

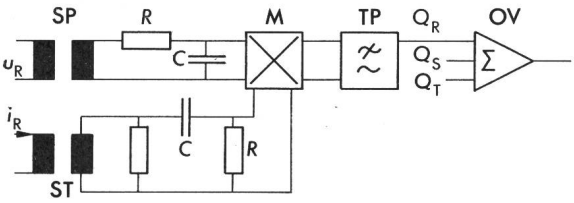

Fig. 2 Bestimmung der Blindleistung *Q* im Dreiphasensystem. Schaltung mit exakt 90^0 Phasenverschiebung zwischen Spannungs- und Strommesskanal

Q_R, Q_S, Q_T Blindleistungen der Phasen R, S, T
$RC = 1/(2\pi f_0)$
f_0 Nennfrequenz
(Weitere Bezeichnungen in Fig. 1)

Relativer Fehler der Blindleistung $\Delta Q/Q$ bei Frequenzabweichungen

Tabelle I

f/f_0	0,9	1	1,1	3	5
$\Delta Q/Q$ %	−0,55	0	−0,45	−40	−61

$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ Nennfrequenz des Netzes (Fig. 2)

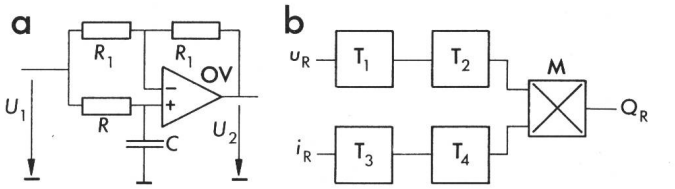

Fig. 3 a) Allpass b) Schaltung zur Erzeugung einer Phasenverschiebung um 90^0 in einem grösseren Frequenzbereich

OV Operationsverstärker
$T = RC$
T_1, T_2, T_3, T_4 Allpässe nach Fig. 3a mit

$$T_1 = \sqrt{\frac{k}{a}}\,\frac{1}{\omega_M} \quad T_2 = \sqrt{ka}\,\frac{1}{\omega_M} \quad T_3 = \sqrt{\frac{1}{ak}}\,\frac{1}{\omega_M}$$

$$T_4 = \sqrt{\frac{a}{k}}\,\frac{1}{\omega_M}$$

M Multiplikator
k, a Entwurfsparameter des Allpasses
ω_M Mittenfrequenz der Phasenschieberschaltung

und kann nach Fig. 3a mit Hilfe eines Operationsverstärkers OV realisiert werden. Nach Fig. 3b werden für Spannung und Strom je zwei und zwar verschiedene Allpässe T in Serie geschaltet. Betragen die Entwurfsparameter a = 0,1 und k = 3,8, so liegt die Phasendifferenz zwischen den beiden Kanälen über einen Frequenzbereich 0,4...2,5 ω_M innerhalb 90 ± 1^0 (ω_M Mittenfrequenz der Phasenschieberschaltung).

Die in den Fig. 2 und 3 gezeigten Schaltungen verlangen einen präzisen Abgleich und die Verwendung sehr alterungsbeständiger Komponenten. Eine andere, jedoch nur für praktisch oberschwingungsfreie Spannungen und Ströme geeignete Schaltung bedient sich elektronischer Analogschalter (Fig. 4), vermeidet diesen Nachteil und ist in einem grösseren Frequenzbereich verwendbar. Die zeitlich integrierte Spannung wird in einem Komparator oder begrenzten Verstärker in ein gegenüber der Spannung u_R um 90^0 verschobenes Rechtecksignal umgeformt. Der durch dieses Rechtecksignal gesteuerte Schalter schneidet aus dem Strom Stücke heraus, deren Mittelwert der Blindkomponente des Stromes i_R entspricht. Der Blindstrom wird schliesslich mit der gleichgerichteten Spannung multipliziert. Oberschwingungen des Stromes gehen in den Blindstrom ein, wenn auch dividiert durch die Ordnung der Oberschwingung, und verursachen einen Fehler in der Blindleistung.

Unter der wohl meist mehr oder weniger zutreffenden Voraussetzung sinusförmiger Spannungen wird die *Verzerrungsleistung* entsprechend Gl. (4) mit einer Schaltung nach Fig. 5 bestimmt. Die Oberschwingungen $r \geqq 2$ des Stromes werden in einem aktiven Hochpassfilter HP herausgefiltert. Deren Effektivwert wird nach Fig. 8 oder Fig. 9 gebildet und mit dem Effektivwert der Spannung (oder auch dem Gleichrichtwert) multipliziert.

Der Aufwand für die Bestimmung der Verzerrungsleistung ist beträchtlich, aber kaum zu umgehen, wie folgendes Beispiel

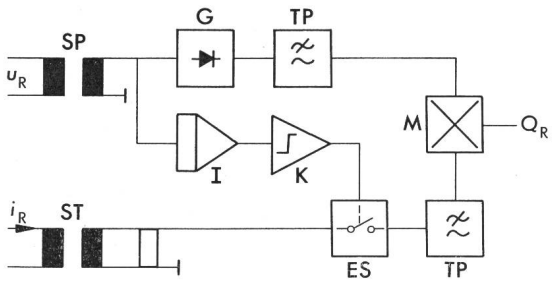

Fig. 4 Bestimmung der Blindleistung Q_R der Phase R bei oberschwingungsfreien Spannungen und Strömen

I Integrator — M Multiplikator
K Komparator — ES Elektronischer Schalter
G Gleichrichter — SP Spannungswandler
TP Tiefpassfilter — ST Stromwandler

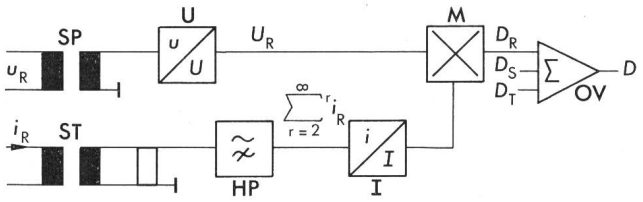

Fig. 5 Bestimmung der Verzerrungsleistung D im Dreiphasensystem

HP Hochpassfilter — SP Spannungswandler
I, U Effektivwertumformer — ST Stromwandler
M Multiplikator — OV Summierverstärker

zeigt: Bei sinusförmiger Spannung und rechteckförmigem Strom beträgt die Verzerrungsleistung 43,5 % der Scheinleistung; deren Vernachlässigung würde zu einem Fehler von −10 % in der Scheinleistung führen.

Aus den totalen Wirk-, Blind- und Verzerrungsleistungen P, Q, D der drei Phasen ist nunmehr entsprechend Gl. (5) die *Scheinleistung* zu bilden, was nach Fig. 6 erfolgen kann.

3.1.2 Bestimmung der Scheinleistung im symmetrischen Drehstromsystem mit unsymmetrischer Belastung, mit Hilfe symmetrischer Komponenten

Die Methode der symmetrischen Komponenten ist zwar bei einem beliebigen Drehstromnetz anwendbar, ist jedoch nur bei symmetrischem Netz mit unsymmetrischer Belastung und sinusförmigen Strömen und Spannungen einfach zu realisieren. In diesem Fall ist nämlich [5]

$$S = 3\,U\,I_1 \tag{8}$$

worin

U Effektivwert der Sternspannung
$I_1 = |\underline{I}_1|$ Effektivwert der Mitkomponente des Stromsystems

Mit

$$\underline{I}_1 = \frac{1}{3}\,(\underline{I}_R + \underline{a}\,\underline{I}_S + \underline{a}^2\,\underline{I}_T) \tag{9}$$

$\underline{a} = e^{j2\pi/3}$

$\underline{I}_R, \underline{I}_S, \underline{I}_T$ Zeiger der Leiterströme

Zur Bestimmung der Mitkomponente $\underline{I}_1$ sind demnach der Strom $\underline{I}_S$ um 120° ($\underline{a}$), der Strom $\underline{I}_T$ um 240° ($\underline{a}^2$) zu drehen; dies kann mit einer (120°), resp. zwei (240°) Schaltungen in Serie nach Fig. 7a erfolgen.

Die Schaltung zur Bestimmung der Mitkomponente ist in Fig. 7b angegeben. Der Effektivwert der Ausgangsspannung des Summierverstärkers ist proportional I_1. Damit ist die dreiphasige Scheinleistungsbestimmung auf das Problem der einphasigen Scheinleistung zurückgeführt, wofür im Abschnitt 3.2 Lösungen angegeben werden.

Die Schaltung verlangt eine in engen Grenzen genaue Netzfrequenz und eng tolerierte, alterungsbeständige Komponenten. Man kann jedoch, ähnlich wie bei der Bestimmung der Blindleistung, sechs elektronische Schalter verwenden, welche durch die Sternspannungen, bzw. die um 90° gedrehten Sternspannungen, gesteuert werden, die Wirk- und Blindkomponente des Mitstromes bestimmen, und diese geometrisch addieren, analog Fig. 6. Damit wird die Schaltung in einem grösseren Frequenzbereich verwendbar.

3.1.3 Bestimmung der Scheinleistung im symmetrischen und symmetrisch belasteten Dreiphasensystem

Die Scheinleistung ist entsprechend Gl. (1) wie beim Einphasensystem zu ermitteln.

3.2 Bestimmung der Scheinleistung im Einphasensystem

3.2.1 Bestimmung aus Wirk-, Blind- und Verzerrungsleistung

Die Messung der Wirkleistung erfolgt nach Fig. 1 (ohne Summierverstärker). Die Blindleistung wird nach einer der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen Methoden (Fig. 2, 3, 4), die Verzerrungsleistung nach Fig. 5 bestimmt, jeweils ohne Summierverstärker für die drei Phasenwerte. Hieraus ist nach Fig. 6 die Scheinleistung zu ermitteln.

3.2.2 Bestimmung aus den Effektivwerten von Spannung und Strom

Entsprechend Gl. (6) sind die Effektivwerte von Strom und Spannung zu multiplizieren. Zur Bildung des Effektivwertes einer Spannung oder eines Stromes stehen prinzipiell zwei elektronische Methoden zur Verfügung, einmal mit Hilfe ther-

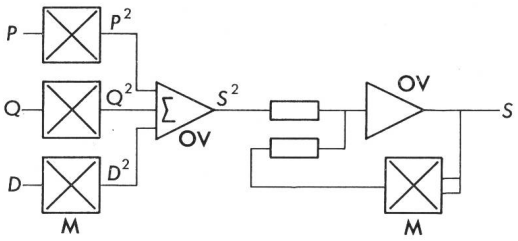

Fig. 6 Bestimmung der Scheinleistung S aus deren Komponenten P, Q, D

M Multiplikatoren
OV Operationsverstärker

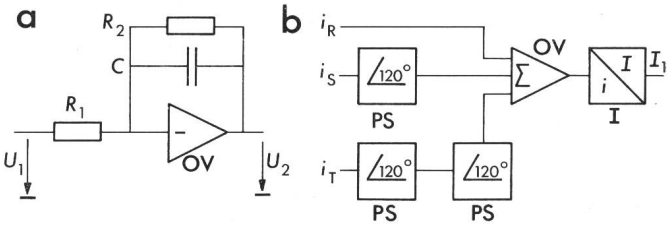

Fig. 7 a) Schaltung zur Erzeugung einer Phasendrehung von U_2 gegen U_1 um 120° b) Bildung der Mitkomponente I_1 des Stromes aus den Leiterströmen i_R, i_S, i_T

OV Operations- resp. Summierverstärker

$\omega R_2 C = \sqrt{3}/2 \qquad R_2/R_1 = \sqrt{7}/2$

PS um 120° phasenverschiebende Netzwerke nach Fig. 7a

I Effektivwertumformer

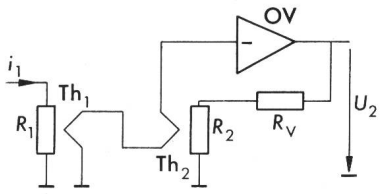

Fig. 8 Thermoumformer zur Erzeugung einer dem Effektivwert des Stromes i_1 proportionalen Gleichspannung U_2

R_1, R_2 beheizte Widerstände
R_V Vorwiderstand
Th_1, Th_2 Thermoelemente
OV Operationsverstärker

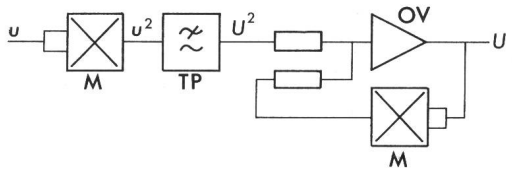

Fig. 9 Effektivwertumformer mit Multiplikatoren

M Multiplikator
TP Tiefpassfilter
OV Operationsverstärker

mischer Umformer, und dann durch analoge Berechnung aus der Definitionsgleichung des Effektivwertes.

Eine Ausführungsform des thermischen Umformers ist in Fig. 8 [6] angegeben. Der umzuformende Wechselstrom i_1 wird dem Heizwiderstand R_1 zugeführt, dessen Temperatur mit einem Thermoelement Th_1 gemessen wird. Ein zweiter, identisch aufgebauter, ebenfalls mit Thermoelement versehener Widerstand R_2 wird durch den Ausgangsstrom eines Verstärkers beheizt. Die Differenzspannung der beiden Thermoelemente wird einem Verstärker mit hoher Verstärkung zugeführt. Der Gleichstrom im zweiten Umformer stellt sich automatisch so ein, dass diese Differenzspannung zu 0 wird. Der Strom im zweiten Heizwiderstand und U_2 sind proportional dem für die Erwärmung massgebenden Effektivwert von i_1, sofern R_2+R_V konstant ist.

Die rechnerischen Verfahren gehen von der Definitionsgleichung des Effektivwertes aus (T Periodendauer):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T u^2\,\mathrm{d}t} \tag{10}$$

Quadrat und Quadratwurzel können mit logarithmischen Verstärkern gebildet werden, oder mit Multiplikatoren, wie in Fig. 9 angegeben. Die Wechselspannung

$$u = U_1\sqrt{2}\sin(\omega t+\varphi_1) + U_2\sqrt{2}\sin(2\,\omega t+\varphi_2) + \ldots$$

wird in einem Multiplikator quadriert; an dessen Ausgang erscheint die Spannung

$$u' = \frac{1}{\mathrm{E}}\left\{\sum_{r=1}^{\infty} {}^{r}U^2 + \text{Wechselglieder}\right\} \tag{11}$$

Darin ist E eine Recheneinheit (meist 10 V). Werden die Wechselglieder ausgefiltert und die verbleibende Gleichspannung radiziert (Rechenverstärker mit Multiplikator im Rückkopplungszweig), so folgt

$$U = \sqrt{\sum_{r=1}^{\infty} {}^{r}U^2} \tag{12}$$

also der Effektivwert von u. Das Blockschema der Messeinrichtung ist in Fig. 10 wiedergegeben. Das Verfahren erfordert total 5 Multiplikatoren.

3.2.3 Bestimmung der Grundschwingungs-Scheinleistung mit Hilfe eines einzigen Multiplikators

Wenn nur die Grundschwingungs-Scheinleistung ${}^1S = {}^1U\,{}^1I$ interessiert, oder wenn Spannung und Strom sinusförmig sind, kann die Scheinleistung mit Hilfe eines einzigen Multiplikators nach Fig. 11 ermittelt werden. Die Schaltung liefert ausserdem die Grundschwingungs-Wirkleistung ${}^1P = {}^1U\,{}^1I\cos\varphi_1$ ohne grossen Aufwand, was einen gemischten Tarif mit Wirk- und Scheinenergieverrechnung erlauben würde. Aus Spannung und Strom werden in je einem Bandpassfilter mit der Netzfrequenz als Mittenfrequenz die Oberschwingungen ausgefiltert. Die Grundschwingungen ${}^1u$ und ${}^1i$ werden miteinander multipliziert, und man erhält eine zur Augenblicksleistung der Grundschwingung proportionale Spannung

$${}^1p = {}^1U\,{}^1I\left\{\cos(\alpha_1-\beta_1) - \cos(2\,\omega_N\,t+\alpha_1+\beta_1)\right\} \tag{13}$$

wobei ω_N die Netzfrequenz bedeutet. Die Amplitude des Wechselgliedes ist gleich der gesuchten Scheinleistung. Sie kann mittels Hochpassfilter und Gleichrichtung, oder mittels eines Schwingungsbreite-Detektors (peak-to-peak) gewonnen werden. Das Gleichglied liefert die Wirkleistung. Ein Nachteil der Schaltung ist die durch die Filter eingeführte Frequenzabhängigkeit.

4. Zeitliche Integration der Scheinleistung

Die als Spannungsmesswert anfallende Scheinleistung muss über die Zeit integriert werden, um die Scheinenergie zu erhalten. Dazu verwendet man zweckmässigerweise ein gemischtes analog-digitales Verfahren, und zwar aus folgenden Gründen:

- Auftreten von Driftfehlern im analogen Integrator
- Erhaltung des Zählergebnisses bei Netzausfall

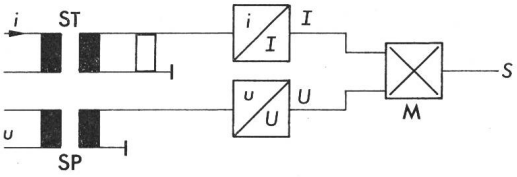

Fig. 10 Bestimmung der Scheinleistung S aus den Effektivwerten U und I von Spannung u und Strom i

I, U Effektivwertumformer
M Multiplikator
ST Stromwandler
SP Spannungswandler

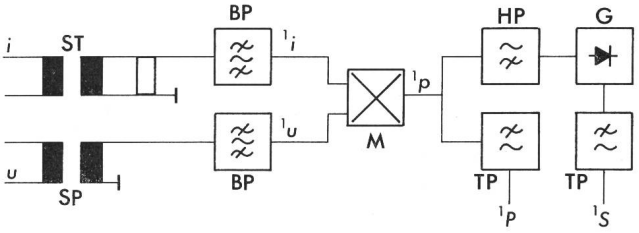

Fig. 11 Bestimmung der Grundschwingungsscheinleistung ${}^1S$ und der Wirkleistung ${}^1P$ mit einem einzigen Multiplikator

BP Bandpassfilter
HP Hochpassfilter
TP Tiefpassfilter
G Gleichrichter
M Multiplikator
ST Stromwandler
SP Spannungswandler

Eine einfache Lösung stellt ein geschalteter Integrator dar. Die Ausgangsspannung des Integrators wird in einem Komparator mit einer Referenzspannung verglichen. Wenn die Ausgangsspannung des Integrators die Referenzspannung überschreitet, stellt ein Reedrelais den Integrator auf 0 zurück, und die Integration beginnt von neuem. Die Ausgangsimpulse des Komparators werden in einem mechanischen Zählwerk gezählt.

5. Multiplikatoren für Scheinleistungszähler

Qualität und Preis von Scheinleistungszählern werden massgebend durch die erforderlichen Multiplikatoren beeinflusst. Die häufigsten Verfahren zur Multiplikation zweier elektrischer Spannungen sind die folgenden:

- Parabelverfahren
- Pulsbreite-Pulshöhe-Multiplikation (time division, mark space) [7]
- Sägezahnverfahren
- Transconductance-Verfahren [8]
- Feldeffekt-Transistoren
- Hall-Generatoren [9]

Von diesen Verfahren scheinen sich besonders das Pulsbreite-Pulshöhe-Modulationsverfahren und das Transconductance-Verfahren durchzusetzen.

Beim Pulsbreite-Pulshöhe-Modulationsverfahren werden Impulse einer um einige Grössenordnungen über der Netzfrequenz liegenden Frequenz moduliert, derart, dass das Tastverhältnis durch die eine der beiden Eingangsgrössen, die Pulshöhe durch die andere moduliert wird, so dass der arithmetische Mittelwert der Impulse dem Produkt der beiden Eingangsgrössen entspricht. Solche Multiplikatoren können bis zu sehr hoher Genauigkeit gebaut werden, werden doch auf dem Markt Leistungsmessumformer mit derartigen Multiplikatoren mit einer Genauigkeit von $\pm$ 0,5 ‰ angeboten. Multiplikatoren mit $\pm$ 0,1 % sind für etwa Fr. 500.– erhältlich. Ein Dreiphasen-Scheinleistungszähler benötigt je nach Aufbau der Messeinrichtung für die Verzerrungsleistung bis zu 16 Multiplikatoren, u. U. verschiedener Präzision.

Das Transconductance-Verfahren (auch Stromverteilungssteuerung genannt) benützt die nichtlinearen Kennlinien aktiver Halbleiterbauelemente. Die Schaltung enthält nur Transistoren, Dioden und Widerstände, verlangt enge Kopplung der Elemente und lässt sich deshalb besonders gut als integrierte Schaltung realisieren. Solche Multiplikatoren sind mit einer Genauigkeit von $\pm$ 0,5 % zu etwa Fr. 100.– erhältlich. Sie sind knapp ausreichend für Scheinleistungszähler Klasse 2. Grossbereichzähler allerdings wären mit Bereichsumschaltung zu bauen.

6. Schlussfolgerungen

In den vorstehenden Ausführungen sind gangbare Wege zum Bau von Scheinleistungszählern aufgezeigt worden. Noch nicht so weit ist die internationale Normung, die noch festzulegen hat, was man unter Scheinleistung zu verstehen hat. Ein Verbrauchstarif, der nur die Scheinenergie in Betracht zieht, ist in einigen Fällen (eigene Erzeugungsanlagen mit Rücklieferung ans Netz) nicht anwendbar. Ausserdem sind die Kosten der elektrischen Energie nicht nur von der Scheinenergie, sondern auch von der Wirkenergie abhängig. An eine allgemeine Einführung von Scheinleistungszählern kann erst gedacht werden, wenn die Preise für Multiplikatoren um eine Grössenordnung gefallen sind.

Literatur

[1] Vocabulaire électrotechnique international. Deuxième édition. Groupe 05: Définitions fondamentales. Publication de la CEI 50(05), 1956.

[2] Wechselstromgrössen. DIN 40110, Februar 1972.

[3] Dictionary of electrical and electronics terms. IEEE Standard 100-1972. (ANSI C42.100-1972).

[4] *S. Hahold:* Ein Messgerät mit breitbandigem Zwei-Phasen-Netzwerk zur Vektordarstellung einer harmonischen Grösse. Elektronik 13(1964)4, S. 105...108.

[5] *H. Neumann:* Das Messen mit elektrischen Geräten. Berlin u.a., Springer-Verlag, 1960.

[6] *L. G. Cox* and *N. L. Kusters:* An automatic RMS/DC comparator. Trans. IEEE IM 23(1974)4, S. 322...325.

[7] *H. Vonarburg* und *J. H. de Vries:* Elektronischer Elektrizitätszähler hoher Präzision. Bull. SEV 62(1971)7, S. 371...378.

[8] *J. Bazali:* Analog-Multiplikatoren. Verfahren und Anwendungen. Elektroniker 12(1973)8, S. EL 1...EL 5 + Nr. 9, S. EL 1...EL 8.

[9] *W. Heinrich:* Leistungsmessumformer mit Feldplattenwiderständen. ATM -(1968)394, S. R 133...R 135.

Adresse des Autors:

Walter Kamber, dipl. El.-Ing. ETHZ, Birchstrasse 247, 8052 Zürich