

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 55 (1964)
Heft: 12

Artikel: Die Blindenergie beim Wechselstrom : ein Beitrag zu ihrer physikalischen Deutung
Autor: Schindler, E.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-916730>

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: 07.01.2026

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

Energie-Erzeugung und -Verteilung

Die Seiten des VSE

Die Blindenergie beim Wechselstrom

Ein Beitrag zu ihrer physikalischen Deutung

von E. Schindler, Zürich

1. Einleitung

Die Übertragung elektrischer Energie geschieht heutzutage fast ausschliesslich mit Wechselstrom. Seine Vorteile gegenüber dem Gleichstrom sind bekannt; er bringt aber doch auch einige Erschwerungen mit sich. Mit der Spannung U , der Stromstärke I , der Leistung $U \cdot I$ und der Arbeit $UI \cdot t$ sind die wesentlichen Grössen bei Gleichstrom gegeben. Anders bei Wechselstrom. Hier kommen weitere, das Vorstellungsvermögen belastende Begriffe, wie Leistungsfaktor, Blindstrom, Blindenergie usw., hinzu.

Jedes Verteilwerk ist daran interessiert, die Energie mit möglichst gutem Leistungsfaktor, d. h. mit möglichst geringem Blindanteil zu übertragen. Vielfach werden durch zusätzliche Tarifierordnungen die hierfür notwendigen Massnahmen vorgeschrieben. Werkvertreter kommen daher recht häufig in die Lage, mit Energiekunden über Leistungsfaktorfragen zu sprechen, wobei es nicht einfach ist, sie leichtverständlich zu beantworten.

In diesem Aufsatz wird versucht, einen kleinen Beitrag in diesem Sinne zu leisten.

2. Der Gleichstromkreis als Vergleichsbasis

Es genügt, die Vorgänge über die Dauer einer Wechselstromperiode zu untersuchen, weil sich ja anschliessend stets das gleiche Geschehen wiederholt. Sie misst bei der üblichen Frequenz von 50 Hz $1/50$ s bzw. 20 ms. (Fig. 1)

Wir wählen als Vergleichsbasis eine vorerst rein ohm'sche Impedanz von 1Ω , an die eine konstante Gleichspannung von

$U = 10$ V gelegt wird. Sie erzeugt eine ebenfalls konstante Stromstärke von 10 A.

In Fig. 1 sind vier Grössen graphisch dargestellt:

Die Spannung U , die Stromstärke I , die Leistung $U \cdot I$ von 100 Watt, — alles zur Abszisse parallele Geraden —, ferner die im Zeitabschnitt von 20 ms an die Impedanz abgegebene Energiemenge von 2000 mWs (die schraffierte Fläche ist ein Mass dafür). Der Maßstab in Originalgrösse beträgt 20 mWs/cm^2 .

3. Der Energiefluss bei Wechselstrom

3.1 Allgemeines

Anstelle der konstanten Gleichspannung wirke nun eine sinusförmige Wechselspannung von 50 Hz mit einem Effektivwert von 10 Volt (Fig. 2). Ihr Momentanwert ist gegeben durch die Beziehung

$$u = U_{max} \sin(\omega t) \quad (1)$$

wobei

$$U_{max} = 10 \sqrt{2} = 14,14 \text{ V beträgt.}$$

Die Impedanz soll weiterhin 1Ω betragen; ihr ohm'scher und induktiver (bzw. kapazitiver) Anteil lasse sich aber derart regulieren, dass die Phasenlage des Stromes zwischen 0° und $\pm 90^\circ$ stetig verändert werden kann. Der durch die Impedanz fließende Strom erreicht eine Stärke von 10 A (Effektivwert), wobei der Momentanwert mit

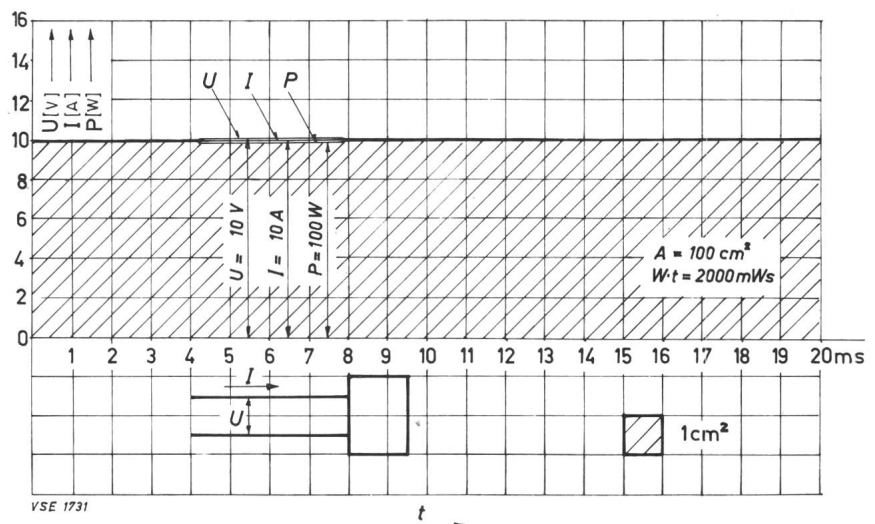
$$i = I_{max} \sin(\omega t \pm \varphi) \quad (2)$$

zu errechnen ist.

Fig. 1
Verlauf der Spannung, der Stromstärke und der Leistung bei $U = 10$ V Gleichspannung und $R = 1 \Omega$ über $t = 20$ ms (1 Periode dauert bei 50 Hz: 20 ms)

U Spannung: Skalenwert $\cdot 1$
 I Stromstärke: Skalenwert $\cdot 1$
 P Leistung: Skalenwert $\cdot 10$
 t Zeit
 w Energie

Energiemaßstab: $1 \text{ cm}^2 \hat{=} 20 \text{ mWs}$
unten links: Verbraucher, Impedanz
 $Z = 1 \Omega$



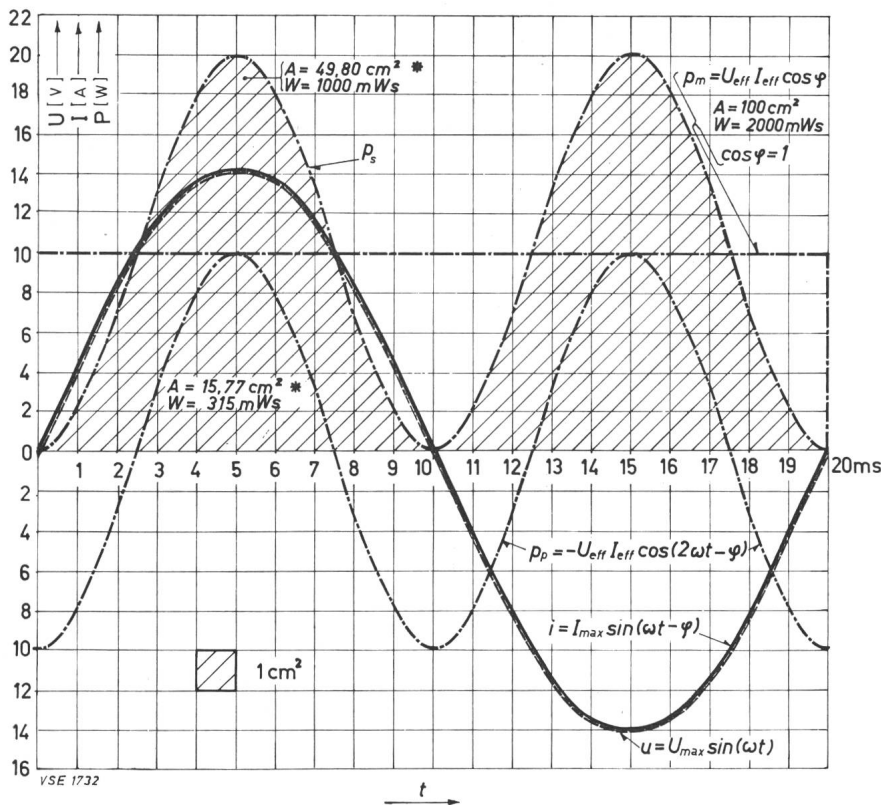


Fig. 2
Verlauf der Spannung, der Stromstärke und der Leistung in einer Periode bei $U = 10 \text{ V}$, $R = 1 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$ und $\cos \varphi = 1$
 U Spannung: Skalenwert $\cdot 1$
 I Stromstärke: Skalenwert $\cdot 1$
 P Leistung: Skalenwert $\cdot 10$
 u Momentanwert der Spannung
 i Momentanwert des Stromes
 p_p Pendelleistung
 p_m Mittelwertleistung
 p_s Summenleistung
 t Zeit
 w Energie
 Energiemaßstab: $1 \text{ cm}^2 \cong 20 \text{ mWs}$
 * Planimetrierter Flächenwert

Dabei sind:

$$I_{max} = 10 \sqrt{2} = 14,14 \text{ A}$$

φ = Phasenwinkel des Stromes zur Spannung, wobei das - Zeichen für zeitliche Nacheilung, das + Zeichen für Voreilung gegenüber der Spannung gilt.

Der momentane Leistungswert ist das Produkt aus u und i

$$p = u \cdot i = U_{max} \sin(\omega t) \cdot I_{max} \sin(\omega t \pm \varphi)$$

Diese Formel lässt sich entwickeln zu:

$$p = U_{eff} I_{eff} [\cos(\pm \varphi) - \cos(2\omega t \pm \varphi)] \quad (3)$$

Die über eine Periodendauer abgegebene Energie beträgt:

$$w = U_{eff} I_{eff} \int_0^T [\cos(\pm \varphi) - \cos(2\omega t \pm \varphi)] dt$$

oder ausgewertet: Wenn t_2 das Ende und t_1 den Anfang der Zeitmessung bedeuten:

$$w = U_{eff} I_{eff} \left[t \cos(\pm \varphi) - \frac{1}{2\omega} \sin(2\omega t \pm \varphi) \right]_{t_1}^{t_2} \quad (4)$$

Viel anschaulicher lassen sich die Dinge anhand einiger Diagramme darstellen und erläutern. Diese Diagramme zeigen den Strom in verschiedenen willkürlich gewählten Phasen-

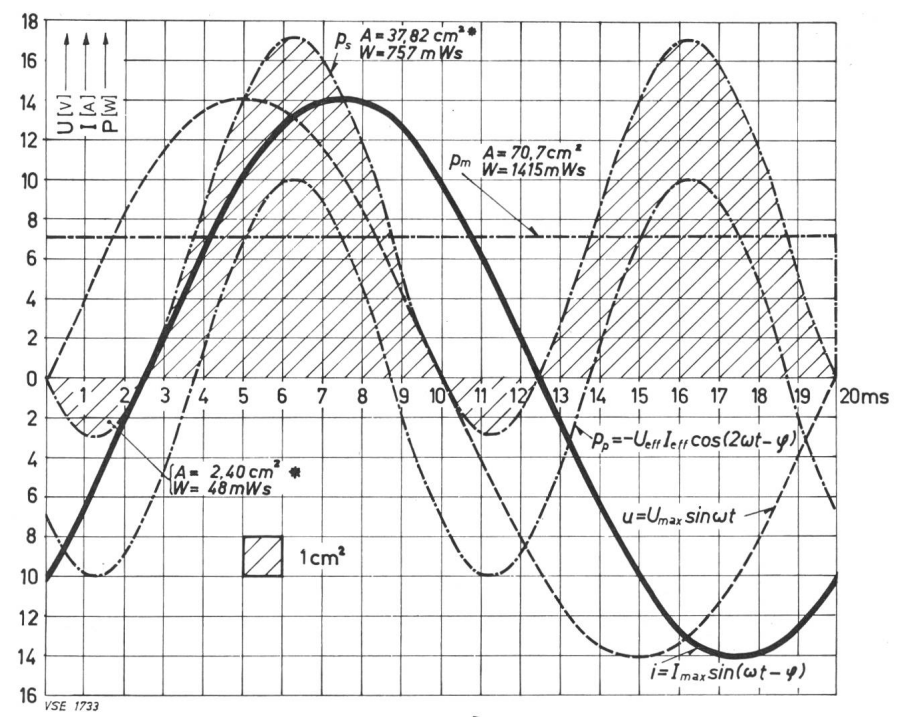


Fig. 3

Verlauf der Spannung, des Stromes und der Leistung in einer Periode bei $U_{eff} = 10 \text{ V}$, $Z = 1 \Omega$, $f = 50 \text{ Hz}$, $\varphi = +45^\circ$, $\cos \varphi = 0,707$

übriige Bezeichnungen wie in Fig. 2

Fig. 4

Verlauf der Spannung, des Stromes und der Leistung in einer Periode bei $U_{eff} = 10\text{ V}$, $Z = 1\ \Omega$, $f = 50\text{ Hz}$, $\varphi = +63^\circ$, $\cos \varphi = 0,454$

übrige Bezeichnungen wie in Fig. 2
 Punktierter Fläche: Hilfsmittel zur Bestimmung des Flächeninhalts mittels Abzählen der Quadrate

lagen und zwar:

	Phasenwinkel φ	Leistungsfaktor $\cos \varphi$
Fig. 2:	0°	1
Fig. 3:	$+45^\circ$	0,707
Fig. 4:	$+63^\circ$	0,454
Fig. 5:	$+90^\circ$	0
Fig. 6:	-63°	0,454

3.2 Verlauf der Leistungskurve

Die Leistungskurve p kann mit Hilfe der Formel (3) errechnet werden. Man kann aber auch auf vereinfachte Weise Schritt für Schritt das Produkt aus Momentanwert der Spannung und dem dazugehörigen Momentanwert des Stromes bilden.

Die Formel (3) zeigt, dass sich die Leistungskurve aus 2 Komponenten zusammensetzt:

Das erste Glied: $U_{eff} I_{eff} \cos(\pm \varphi)$ ist der allgemein bekannte Ausdruck für die Wirkleistung. In den Figuren 2 ... 4 und 6 ist sie mit «Mittelwertleistung» p_m benannt. Das Vorzeichen von φ hat keinen Einfluss auf die Energierichtung, da der Cosinus in beiden Fällen positiv ausfällt.

Das zweite Glied: $-U_{eff} I_{eff} \cos(2\omega t \pm \varphi)$ wird in der Praxis einfach weggelassen. Es stellt einen mit doppelter Netzfrequenz hin und her schwingenden Leistungsanteil ohne energietransportierende Wirkung dar; natürlich belastet er aber zusätzlich die Verteilnetze.

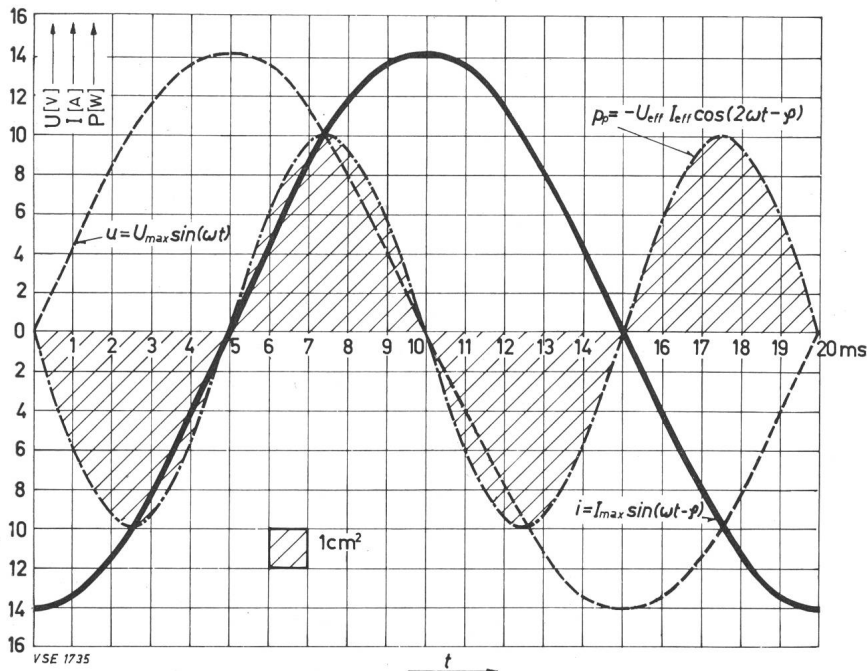
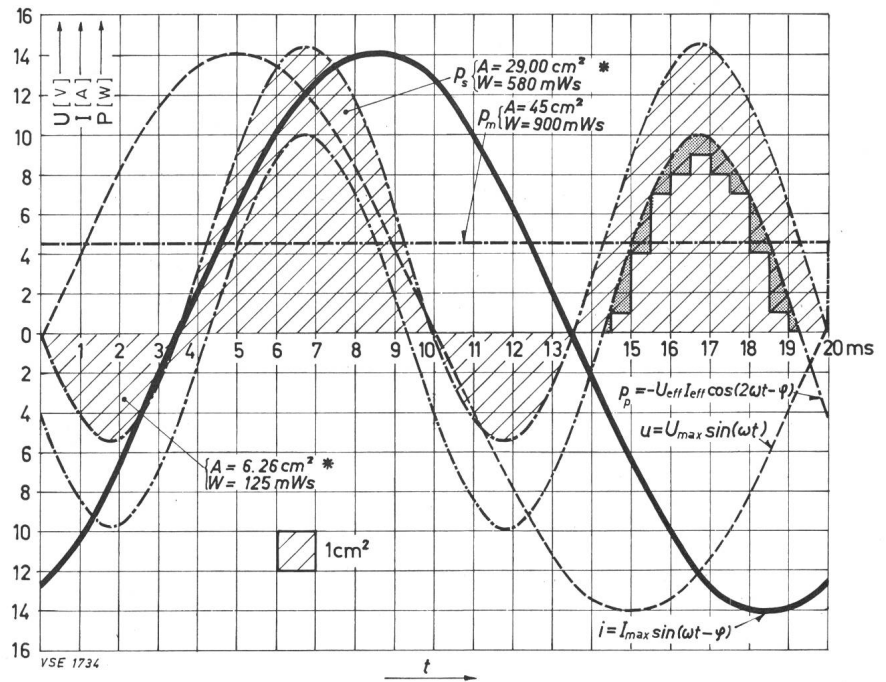


Fig. 5

Verlauf der Spannung, des Stromes und der Leistung in einer Periode bei $U_{eff} = 10\text{ V}$, $Z = 1\ \Omega$, $\varphi = +90^\circ$, $\cos \varphi = 0$
 übrige Bezeichnungen wie in Fig. 2



Er ist in allen Figuren mit «Pendelleistung» p_p bezeichnet. Beim Leistungsfaktor 0 ist er allein wirksam.

Die «Summenleistungskurve» p_s stellt, wie man sich leicht überzeugen kann, eine mit doppelter Netzfrequenz schwingende Sinuskurve dar, deren Nulllinie im Abstand $U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$ parallel zur Abszissenachse verläuft.

3.3 Die abgegebene Energiemenge in Funktion des Leistungsfaktors

Genau wie in Fig. 1 ist auch hier die von der Leistungskurve p und der Abszissenachse eingeschlossene Fläche ein Mass für die Energieabgabe an der Impedanz. Sie lässt sich mit Formel (4) errechnen, (oder aber durch Planimetrieren graphisch ermitteln).

Es ist von Interesse, drei Fälle hervorzuheben:

- 3.3.1 Situation bei Phasenwinkel $\varphi = 0^\circ$;
 Leistungsfaktor $\cos \varphi = 1$; (Fig. 2)

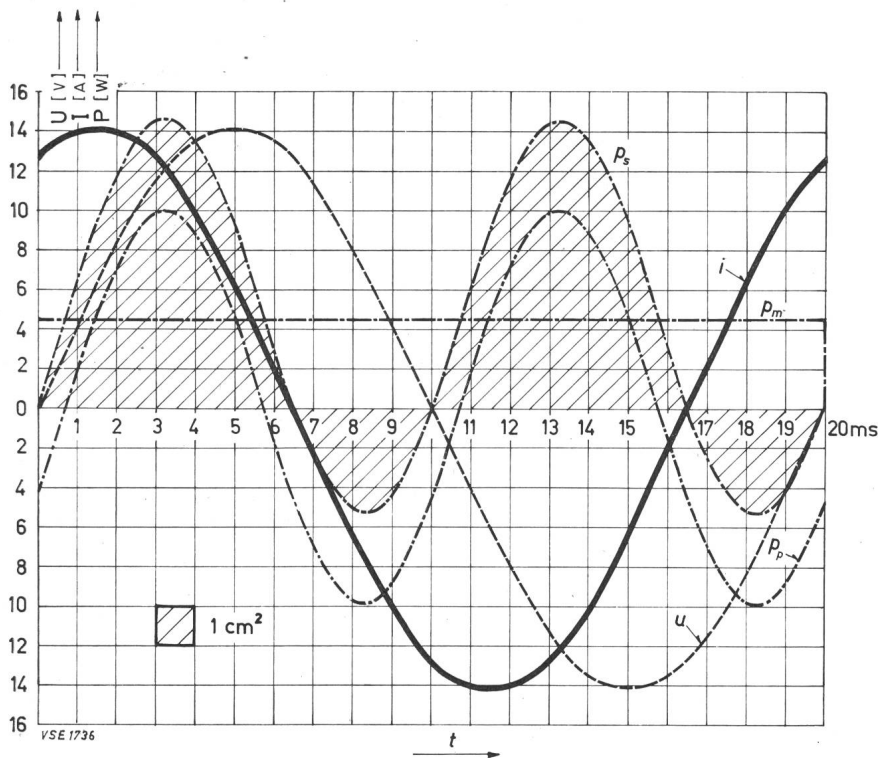


Fig. 6
 Verlauf der Spannung, des Stromes und der Leistung in einer Periode bei $U_{eff} = 10\text{ V}$, $Z = 1\ \Omega$, $f = 50\text{ Hz}$, $\varphi = -63^\circ$, $\cos \varphi = 0,454$
 übrige Bezeichnungen wie in Fig. 2

Die Leistungskurve schwingt ausschliesslich oberhalb der Abszissenachse. Die beiden von der Kurve eingeschlossenen Flächen messen zusammen 2000 cm^2 ; sie sind also gleich gross wie die in Fig. 1 ermittelte Rechtecksfläche. Der nicht phasenverschobene Wechselstrom gibt also, über die Periodendauer gemessen, die gleiche Energiemenge ab wie der Gleichstrom in Fig. 1, mit dem Unterschied, dass die Abgabe beim Wechselstrom impulsartig erfolgt.

3.3.2 Situation bei Phasenwinkeln $\varphi > 0^\circ$, jedoch $\neq \pm 90^\circ$;
 Leistungsfaktor $\cos \varphi < 1 > 0$; (Fig. 3, 4, 6)

Mit kleiner werdendem Leistungsfaktor verschiebt sich die Mittellinie der Leistungskurve bei gleichgrossbleibendem «Pendelleistungs»-Anteil in Richtung zur Abszissenachse. Da-

durch wird ein zunehmend grösser werdender Anteil der Energiefläche negativ.

Ein Teil der an die Impedanz abgegebenen Energiemenge wird demzufolge nach jedem Impuls sofort wieder an das speisende Netz zurückgegeben. Die Impedanz behält lediglich die Differenzen zwischen positivem und negativem Energiebetrag.

3.3.3 Situation bei Phasenwinkel $\varphi = \pm 90^\circ$;

Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0$; (Fig. 5)

Der Wirkleistungsanteil $U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$ verschwindet ganz. Zurück bleibt der Pendelleistungsanteil $-U_{eff} I_{eff} \cos(2\omega t \pm \varphi)$.

Das Vorzeichen von φ beeinflusst lediglich dessen Phasenlage. Bei negativem Vorzeichen muss man sich den Verlauf um 5 ms früher beginnend vorstellen.

Fig. 7
 Energiebilanz innerhalb einer Wechselstromperiode in Funktion des Leistungsfaktors

- E Energiebetrag
- S Scheinleistung
- Q Blindleistung
- P_w Wirkleistung
- P_m Mittelwertleistung = Wirkleistung
- P_s Summenleistung

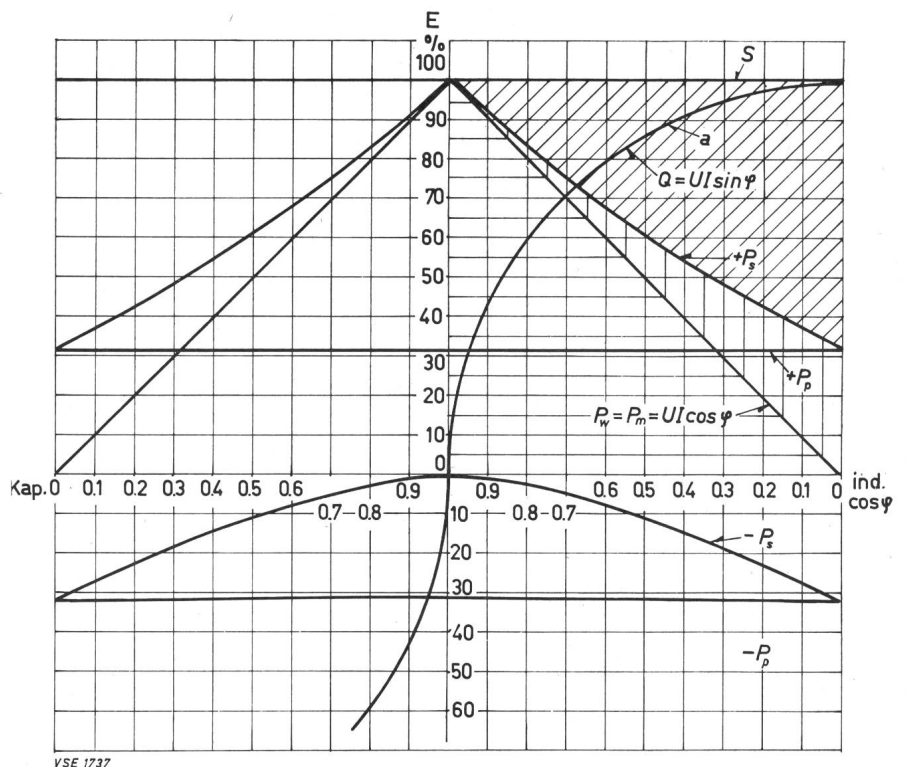
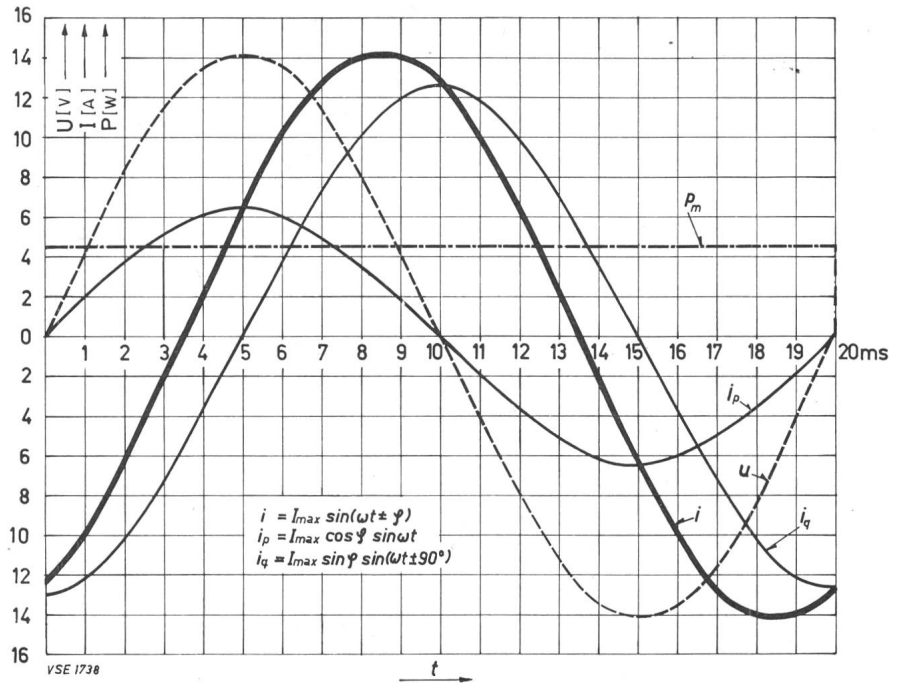


Fig. 8

Verlauf der Spannung, des Stromes und der Leistung in einer Periode bei $U_{eff} = 10\text{ V}$, $Z = 1\ \Omega$, $\varphi = +63^\circ$, $\cos \varphi = 0,454$
 Zerlegung des Stromes in Wirk- und Blindstrom: Erweiterung zu Fig. 5
 i_p Wirkstrom
 i_q Blindstrom
 übrige Bezeichnungen wie in Fig. 2



Es findet also auch bei $\cos \varphi = 0$ eine Verschiebung elektrischer Energie statt, allerdings wird der in einer Viertelperiode abgegebene Betrag im nächsten Viertel wieder vollständig an das speisende Netz zurückgegeben. In der Impedanz verbleibt nichts.

3.4 Die Energiebilanz bei Wechselstrom

Der phasenverschobene Verlauf zwischen Spannung und Strom hat, wie die Bilder zeigen, zwei Folgen:

1. Es wird weniger Energie übertragen, was durch die kleiner werdenden Plusflächen verdeutlicht wird. Die Erklärung hierfür ist einfach, gibt es doch genügend analoge Beispiele, die zeigen, dass zwei Kräfte weniger Effekt entwickeln, sobald sie zeitlich nicht mehr koordiniert wirken.

2. Von der der Impedanz zugeführten Energie wird ein Teil (Minusflächen) gleich wieder an das speisende Netz zurückgegeben.

Fig. 7 vermittelt eine Übersicht über die im Spiele stehenden Energieanteile. Bei Leistungsfaktor 0,5 beispielsweise werden noch rund 61% des bei $\cos \varphi = 1$ möglichen Energiebetrages dem Verbraucher zugeführt. Davon gibt dieser laufend 11% wieder an die Energiequelle zurück. Ihm verbleiben 50%, was dem durch den Leistungsfaktor gegebenen Wirkbetrag entspricht. Bei $\cos \varphi = 0$ pendeln dauernd 31,8% des Vollbetrages zwischen Energiequelle und Verbraucher hin und her.

Für die voreilenden Phasenlagen wäre der links von der Ordinate liegende Quadrant massgebend.

3.5 Die Definition der Blindgrößen

Bekanntlich lässt sich jede Sinuskurve von der Form: $i = I_{max} \sin(\omega t \pm \varphi)$ beliebig in zwei oder mehrere Kurven gleicher Frequenz, aber unterschiedlicher Amplitude und Phasenlage zerlegen.

Üblich ist die Zerlegung in die 2 Komponenten:

$$i_p = I_{p\ max} \sin \omega t$$

in Phase mit der Spannung

und
$$i_q = I_{q\ max} \sin(\omega t \pm 90^\circ)$$

mit $\pm 90^\circ$ Phasenverschiebung zur Spannung.

In Fig. 8 ist der in Fig. 4 um 63° phasenverschobene Strom in diese 2 Komponenten zerlegt.

Es ist leicht nachweisbar, dass

$$I_{p\ max} = I_{max} \cdot \cos \varphi$$

und

$$I_{q\ max} = I_{max} \cdot \sin \varphi$$

ist.

Somit wird dann:

$$i_p = I_{max} \cos \varphi \cdot \sin \omega t$$

$$i_q = I_{max} \sin \varphi \sin(\omega t \pm 90^\circ)$$

Da der Strom i_p in Phase mit u verläuft, erzeugt er in Analogie zu Fig. 2 eine Wirkleistung von

$$P = U_{eff} I_{p\ eff} = U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$$

Wir finden hier den gleichen Ausdruck wieder wie im ersten Glied in Formel (3). Im gleichen Sinne wird nun $I_{q\ eff} = I_{eff} \sin \varphi$ als *Blindstrom* und das Produkt $U_{eff} I_{eff} \sin \varphi$ als *Blindleistung* Q definiert.

Der so definierte Begriff in Funktion des Leistungsfaktors aufgetragen, ergibt die Kurve a in Fig. 7. Die Leistungskurve $p = U_{eff} I_{eff} [\cos \varphi - \cos(2\omega t \pm \varphi)]$ (Formel 3) und der Ausdruck $U_{eff} I_{eff} \cos \varphi$ für die Wirkleistung sind abgeleitet aus der Grundformel $p = u \cdot i$, wobei u und i gleichzeitig auftretende Momentanwerte sind.

Das Produkt $u \cdot i$ stellt somit Leistung im physikalischen Sinne dar, ebenso die daraus abgeleiteten Beziehungen. Der Ausdruck $U_{eff} I_{eff} \sin \varphi$ hingegen hat seinen Ursprung nicht in der Grundformel $u \cdot i$. Er stellt vielmehr das Produkt einer Spannung und einer zeitlich *nicht* mit ihr korrespondierenden Stromstärke dar. Blindleistung bzw. Blindenergie sind somit reine Definitionsgrößen, jedoch keine Begriffe im physikalischen Sinne.

Adresse des Autors:

E. Schindler, Ing., Oberbetriebsleiter der Elektrizitätswerke des Kantons Zürich (EKZ), Zürich.