

Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 32 (1941)
Heft: 2

Artikel: Die Wechselstromleistung in symbolischer Darstellung
Autor: Voigt, Hanskarl
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1057610>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 18.01.2025

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

im Ausbau ölloser Anlagen darstellt. Sie vermeidet auch die sogenannten unbrennbaren flüssigen oder halbfesten Isoliermassen, da diese keine grundsätzliche Lösung des Brandproblems bieten, stellt eine betriebstüchtige, allen Ansprüchen gewachsene, nicht durch die Spannungshöhe beschränkte Isolierungsart dar und gestattet, Hochspannungsapparate raumsparend für Ein-, Zwei- und Drei-Phasennessung zu praktischen Messaggregaten zusammenzubauen.

Die Entwicklung sicherer Trockenisolation von Hochspannungsapparaten hat daher über das Studium der «unbrennbaren» Isolierstoffe und die Untersuchung der Porzellanisolation von Hochspannungsapparaten einen Weg eingeschlagen, der mit der Anwendung der Druckgase zur Isolation der Apparate eine allen Anforderungen der Betriebssicherheit entsprechende Lösung bietet, welcher eine erfolgreiche Verbreitung beschieden sein dürfte.

Die Wechselstromleistung in symbolischer Darstellung.

Von Hanskarl Voigt, Hagen i. W.

621.3.016.2

Anhand zahlreicher Literaturstellen wird gezeigt, dass man bisher bei der symbolischen Darstellung der Wechselstromleistung die Einführung des konjugiert-komplexen Ausdruckes für den Strom- oder Spannungszeiger für notwendig hielt. Durch eine zweckmässige Schreibweise der Gleichungen kann man diese Schwierigkeit jedoch umgehen. Legt man im Zeigerschaubild den Spannungs- oder Stromzeiger in die positive reelle Achse, dann ergibt sich eine einfache Regel für die symbolische Darstellung der Wechselstromleistung.

Par de nombreux renvois littéraires l'auteur montre, que jusqu'à présent on trouvait nécessaire d'introduire dans la représentation symbolique des courants alternatifs l'expression conjuguée complexe pour les vecteurs de courant et de tension. On peut cependant éviter cette difficulté en écrivant la formule d'une façon appropriée. En plaçant, dans l'image vectorielle, le vecteur de courant ou de tension dans l'axe positif, il en résulte une règle simple pour la représentation symbolique des courants alternatifs.

Sieht man die Literatur über die «symbolische Methode» durch, dann gewinnt man den Eindruck, dass die komplexe Rechnung «zu falschen Resultaten führt, wenn man zwei Amplituden mit einander multipliziert, z. B. zur Leistungsberechnung»^{9)*)}; denn «während die Bestimmungsgleichungen für die Spannungen und die Ströme bei Gleich- und Wechselstrom dieselbe Form haben, ist das für die Leistung nicht der Fall»⁴⁾. «Das Produkt $U \cdot I$ ergibt eine Grösse ohne physikalischen Sinn»⁵⁾, es hat «nichts mit der mittleren Leistung zu tun»³⁾ und «lässt sich in keiner Weise zu dem Ausdruck für die Wirkleistung in Beziehung setzen»¹⁰⁾. «An einem einfachen Zahlenbeispiel kann man sich leicht überzeugen, dass der in der üblichen algebraischen Weise ermittelte» Ausdruck für die Leistung «falsch sein muss»¹¹⁾.

Es fehlt einerseits nicht an Versuchen, diese Schwierigkeiten als «tief begründet in der nur linearen Beziehungen zugänglichen Uebertragungsmöglichkeit der Analysis auf Wechselstromprobleme» anzusprechen¹⁵⁾, was zu der Forderung geführt hat: «Zwei komplexe Amplituden dürfen nicht miteinander multipliziert werden. Die komplexe Rechnung ist nur anwendbar, solange lineare Naturgesetze verwendet werden»⁹⁾. Die betreffenden Autoren haben dabei aber offenbar übersehen, dass dann doch zwangsläufig auch die Division, die der Multiplikation entgegengesetzte Rechenoperation, zu falschen Ergebnissen führen müsste. Tatsächlich ergibt aber die Ermittlung des komplexen Widerstandes aus dem Quotienten der komplexen Ausdrücke für Spannung und Strom einen durchaus richtigen Wert.

Die erwähnten Schwierigkeiten haben andererseits zur Folge gehabt, dass in der Literatur innerhalb der komplexen Rechnung stellenweise jede

Leistungsberechnung vermieden wird^{1) 2) 6)}, oder man verzichtet darauf, «sich in strengen theoretischen Begründungen über die richtige Lösungsweise des vorliegenden Falles zu verlieren»¹¹⁾ und begnügt sich mit einer ebensowenig befriedigenden wie überzeugenden Notlösung, oder aber es wird schliesslich unter Umgehung der Symbolik auf graphischem Wege lediglich der Ausdruck für die Wirkleistung abgeleitet¹³⁾.

Da man «zufälligerweise gerade die mittlere Leistung als reellen Teil des (halben) Produktes des einen Faktors (Spannungszeiger) mit der zum andern Faktor (Stromzeiger) konjugiert komplexen Zahl erhält»⁹⁾, muss man, um «die komplexe Schreibweise auch bei der Berechnung von Leistungen benutzen»¹⁴⁾ zu können, die auf einen Vorschlag von Steinmetz¹²⁾ zurückgehende Regel anwenden: «Der reelle Teil des Produktes aus dem Vektor der Spannung und dem konjugiert komplexen Vektor des Stromes (oder umgekehrt) ist die Wirkleistung, der imaginäre Teil ist die Blindleistung»³⁾. Dass die Anwendung dieser Regel, die sinngemäss fast in der ganzen Literatur zu finden ist^{3) 5) 7) 8) 10) 15)} rein formal mathematisch zulässig ist, hat Wallot sehr elegant nachgewiesen¹⁴⁾; trotzdem kann man sich des Eindruckes einer Gewaltmassnahme nicht erwehren, die ein unbehagliches Gefühl zurücklässt, zumal «sich eine physikalische Begründung für die Einführung des konjugiert komplexen Vektors zur Bildung der Leistungsgrössen nicht erbringen lässt»¹⁰⁾. Und der Wert einer ganzen Rechenmethode muss problematisch erscheinen, wenn sie sich eines solchen Kunstgriffes zur Erzielung richtiger Ergebnisse bedienen muss.

Uns scheinen die besprochenen Schwierigkeiten darauf zurückzuführen zu sein, dass eine zwar mathematisch auch richtige, aber unzuweckmässige Schreibweise symbolischer Ausdrücke zu einer un-

*) Siehe Literatur am Schluss der Arbeit.

zulässigen Verquickung von Phasenwinkel und Nullphasenwinkel geführt hat. Physikalische Bedeutung besitzt ganz ausschliesslich der Phasenwinkel, also der Winkel zwischen zwei Zeigern. Im zu betrachtenden Falle ist das der im allgemeinen mit φ bezeichnete Winkel zwischen dem Spannungszeiger \mathcal{U} und dem Stromzeiger \mathcal{I} . Ohne jede physikalische Bedeutung ist dagegen, wie ein Zeigerschaubild als Ganzes im Achsenkreuz angeordnet wird. Diese willkürliche Anordnung wird im allgemeinen angedeutet durch den Nullphasenwinkel φ_u zwischen Spannungszeiger und positiver reeller Achse oder durch den Nullphasenwinkel φ_i zwischen Stromzeiger und positiver reeller Achse. Zwi-

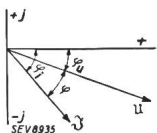


Fig. 1.

schon den genannten Winkeln besteht die aus Fig. 1 ablesbare Beziehung:

$$\varphi_i = \varphi_u \pm \varphi \tag{1}$$

Das positive Vorzeichen von φ gilt für nacheilenden, das negative für voreilenden Strom.

Bei zeitlich veränderlichen Wechselstromgrössen, mit denen wir es hier zu tun haben, bezeichnet der Nullphasenwinkel gleichzeitig den willkürlich wählbaren Augenblick, von dem an man die Zeit zählen will (Fig. 2). Hieraus geht schon hervor, dass eine Verquickung von Phasenwinkel und Nullphasenwinkel bei irgendeiner Rechenoperation nicht erfolgen darf; denn sonst würde das Ergebnis ja abhängig von der willkürlich wählbaren Grösse des Nullphasenwinkels.

Um eine Kontrolle für die Richtigkeit der späteren symbolischen Rechnung zu haben, soll der Ausdruck für die Wechselstromleistung zunächst ohne Verwendung der komplexen Zahlen ermittelt werden.

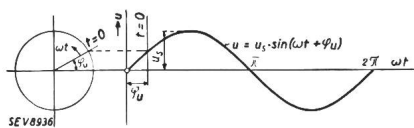


Fig. 2.

Der Augenblickswert u einer sinusförmig veränderlichen Wechselspannung mit dem Scheitelwert u_s , der Kreisfrequenz ω und dem Nullphasenwinkel φ_u wird dargestellt durch die Gleichung

$$u = u_s \sin(\omega t + \varphi_u) \tag{2}$$

Entsprechend gilt für einen sinusförmig verlaufenden Wechselstrom

$$i = i_s \sin(\omega t + \varphi_i) \tag{3}$$

Die Nullphasenwinkel φ_u und φ_i sind durch die Gl. (1) mit dem Phasenverschiebungswinkel φ zwischen Spannungs- und Stromzeiger verknüpft.

Die elektrische Leistung p ist allgemein gleich dem Produkt aus Spannung und Strom; in unserem Falle gilt also:

$$p = u \cdot i = u_s i_s \sin(\omega t + \varphi_u) \sin(\omega t + \varphi_u \pm \varphi) \tag{4}$$

Bezeichnet man mit U den Effektivwert der Spannung, mit I den des Stromes, dann wird mit $u_s = \sqrt{2} U$ und $i_s = \sqrt{2} I$ unter Verwendung der trigonometrischen Beziehung

$$\sin \alpha \cdot \sin \beta = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta) \text{ die Leistung}$$

$$p = 2 UI \left[\frac{1}{2} \cos(\mp \varphi) - \frac{1}{2} \cos(2\omega t + 2\varphi_u \pm \varphi) \right]$$

$$p = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t + 2\varphi_u \pm \varphi)$$

Das zweite Glied auf der rechten Seite dieser Gleichung formen wir noch um nach der Beziehung

$$\cos(\alpha \pm \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta \mp \sin \alpha \cdot \sin \beta$$

womit man erhält:

$$p = UI \cos \varphi - UI [\cos(2\omega t + 2\varphi_u) \cos \varphi \mp \sin(2\omega t + 2\varphi_u) \sin \varphi]$$

oder

$$p = UI \cos \varphi [1 - \cos(2\omega t + 2\varphi_u)] \mp UI \sin \varphi \sin(2\omega t + 2\varphi_u)$$

und schliesslich

$$p = UI \cos \varphi \left[1 + \sin\left(2\omega t + 2\varphi_u - \frac{\pi}{2}\right) \right] \mp UI \sin \varphi \sin(2\omega t + 2\varphi_u) \tag{5}$$

Mit Gl. (5) haben wir einen physikalisch leicht deutbaren Ausdruck für die Wechselstromleistung gefunden. Sie erscheint in zwei Sinusschwingungen zerlegt mit der Frequenz $2\omega t$ (Fig. 3). Die

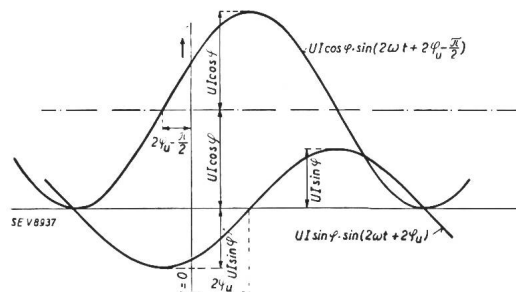


Fig. 3.

eine schwingt mit dem Scheitelwert $UI \cos \varphi$ um den Mittelwert $UI \cos \varphi$; ihr Nullphasenwinkel ist $\left(2\varphi_u - \frac{\pi}{2}\right)$. Die zweite Schwingung eilt der ersten

wegen ihres Nullphasenwinkels $2\varphi_u$ um 90° nach und hat den Scheitelwert $UI \sin \varphi$; ihr zeitlicher Mittelwert ist Null. Der zeitliche Mittelwert beider Schwingungen, also der gesamten Leistung, ist daher $UI \cos \varphi$.

$$P = UI \cos \varphi \tag{6}$$

ist die wirkliche Leistung oder «Wirkleistung» des Wechselstromkreises. Der Scheitelwert $UI \sin \varphi$ der zweiten Schwingung mit dem Mittelwert Null ist die «Blindleistung». Zwischen der Wirkleistung und der Blindleistung lässt sich eine einfache Beziehung aufstellen; multipliziert man beide Seiten der Gleichung: $1 = \cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi$ mit dem Quadrat der «Scheinleistung $P_s = UI$ », dann wird:

$$(UI)^2 = (UI)^2 \cos^2 \varphi + (UI)^2 \sin^2 \varphi \quad (7)$$

Setzen wir zur Abkürzung

$$P_q = UI \sin \varphi \quad (8)$$

dann können wir Gl. (7) schreiben:

$$P_s^2 = P^2 + P_q^2 \quad (7a)$$

Gl. (7a) lässt sich als rechtwinkliges Dreieck mit den Katheten P und P_q und der Hypotenuse N_s darstellen.

Wir gehen nun dazu über, die Wechselstromleistung mit Hilfe der symbolischen Ausdrücke für Spannung und Strom zu berechnen.

Das vollständige Symbol einer sinusförmig verlaufenden Wechselspannung mit dem Scheitelwert u_s ist:

$$u_s = u_s / \omega t \cdot / \varphi_u = u_s / \omega t + \varphi_u \quad (9)$$

Für den Strom gilt entsprechend:

$$i_s = i_s / \omega t \cdot / \varphi_i = i_s / \omega t + \varphi_i \quad (10)$$

Für die Leistung ergibt sich dann unter gleichzeitiger Berücksichtigung von Gl. (1):

$$p_s = u_s i_s = u_s i_s / 2 \omega t + 2 \varphi_u \cdot / \pm \varphi \quad (11)$$

oder in unverkürzter Schreibweise:

$$p_s = (u_s i_s \cos \varphi \pm j u_s i_s \sin \varphi) e^{j(2\omega t + 2\varphi_u)} \quad (11a)$$

Auch hier, in der symbolischen Darstellung, lässt sich die Wechselstromleistung in zwei Schwingungen aufteilen mit der Frequenz $2\omega t$, die um 90° gegeneinander verschoben sind [hier ausgedrückt durch den Faktor $\pm j$, in Gl. (5) ausgedrückt durch die Nullphasenwinkel $2\varphi_u$ und $(2\varphi_u - \frac{\pi}{2})$] und beide den Nullphasenwinkel $2\varphi_u$ besitzen. Der Scheitelwert der einen Schwingung ist $u_s i_s \cos \varphi$, der der anderen $u_s i_s \sin \varphi$.

Im allgemeinen interessiert jedoch weniger der Scheitelwert und die Frequenz der sinusförmig veränderlichen Augenblickswerte der Leistung, sondern ihr zeitlicher Mittelwert. Zu seiner Ermittlung bestimmen wir den Ausdruck für die Scheinleistung als Produkt aus den Effektivwerten, also den verkürzten Symbolen, für Spannung und Strom:

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_s &= \mathfrak{U} \mathfrak{I} = U / \varphi_u \cdot I / \varphi_i = UI / 2 \varphi_u \pm \varphi \\ &= UI / 2 \varphi_i \mp \varphi \end{aligned} \quad (12)$$

und in unverkürzter Schreibweise:

$$\begin{aligned} \mathfrak{P}_s &= (UI \cos \varphi \pm j UI \sin \varphi) e^{j2\varphi_u} \\ &= (UI \cos \varphi \mp j UI \sin \varphi) e^{j2\varphi_i} \end{aligned} \quad (12a)$$

Die Scheinleistung \mathfrak{P}_s erscheint hiernach als komplexe Zahl, die symbolisch darstellbar ist als Zeiger mit dem Modul (UI) und dem Argument φ , der mit dem Dreher $e^{j2\varphi_u}$ bzw. $e^{j2\varphi_i}$ multipliziert und somit um den $\sphericalangle 2\varphi_u$ bzw. $\sphericalangle 2\varphi_i$ im Sinne der Voreilung gedreht ist. Ein Vergleich der Gl. (12a) mit Gl. (6) und Gl. (8) zeigt, dass der

reelle Teil der Scheinleistung gleich der Wirkleistung P , der imaginäre Teil gleich der Blindleistung P_q ist.

An dieser Stelle muss nachdrücklich betont werden, dass die Darstellbarkeit der Scheinleistung, also einer skalaren Grösse, als Zeiger mit der Wirkleistung als reeller und als Blindleistung als imaginärer Komponente ohne physikalische Bedeutung und lediglich ein mathematisches Symbol ist.

Da physikalisch nur die Grösse der Scheinleistung und ihrer beiden Komponenten von Interesse, die Lage des sie darstellenden Zeigers im Achsenkreuz aber bedeutungslos ist — weil die Leistung eben keine gerichtete Grösse ist —, so kann in dem Ausdruck für die Scheinleistung der Dreher $e^{j2\varphi_u} = 1$, bzw. $e^{j2\varphi_i} = 1$ gesetzt werden, so dass wir schliesslich für die Scheinleistung den einfachen symbolischen Ausdruck

$$\mathfrak{P}_s = \mathfrak{U} \mathfrak{I} = UI \cos \varphi \pm j UI \sin \varphi = P \pm j P_q \quad (12b)$$

erhalten, dessen geometrische Veranschaulichung durch ein rechtwinkliges Dreieck mit den Katheten P und P_q seine Identität mit Gl. (7a) zeigt.

Wir können nun als Regel für die Bildung des Ausdruckes für die Wechselstromleistung formulieren:

Das Produkt der symbolischen Ausdrücke für die Effektivwerte von Spannung und Strom ergibt, wenn man in den symbolischen Ausdrücken für beide Zeiger den Dreher $e^{j2\varphi_u} = 1$ bzw. $e^{j2\varphi_i} = 1$ setzt — was ja lediglich eine Drehung des ganzen Zeigerschaubildes um den Winkel $2\varphi_u$, bzw. $2\varphi_i$ bedeutet —, für die Scheinleistung eine komplexe Zahl, deren reeller Teil die Wirkleistung und deren imaginärer Teil die Blindleistung darstellt.

Auch Hauffe⁶⁾ und Landolt⁷⁾ haben bereits von der Möglichkeit der Drehung des gesamten Zeigerschaubildes im Achsenkreuz zur Vereinfachung der Rechnung Gebrauch gemacht, offenbar aber ohne die Bedeutung, ja Notwendigkeit derselben gerade für die Leistungsberechnung zu erkennen. Hauffe schreibt: «Offenbar erleiden unsere Betrachtungen keine Beschränkung, wenn wir $\mathfrak{U} = U$ setzen. Das heisst ja nur, dass in dem allgemeinen Ansatz $\mathfrak{U} = U_0 e^{j\omega t} = U e^{j\varphi_u} e^{j\omega t}$ der Faktor $e^{j\varphi_u} e^{j\omega t} = 1$ gesetzt ist. Eine sehr einfache mögliche Lösung dieser Gleichung ist $\varphi_u = 0$, $\omega t = 0$. Wir betrachten also die Verhältnisse zur Zeit $t = 0$ und setzen fest, dass in diesem Zeitpunkt die Phase von \mathfrak{U} auch Null sei. $\mathfrak{U} = U$ ist also ein Vektor in der positiven reellen Achse.»

Wir wollen nun zum Vergleich noch den Ausdruck für den komplexen Widerstand bilden:

$$\begin{aligned} \mathfrak{Z} &= \frac{\mathfrak{U}_s}{\mathfrak{I}_s} = \frac{u_s}{i_s} \frac{/\omega t + \varphi_u}{/\omega t + \varphi_i} = \frac{u_s}{i_s} \cdot / \varphi_u - \varphi_i \\ &= \frac{u_s}{i_s} / \mp \varphi = Z / \mp \varphi = Z (\cos \varphi \mp j \sin \varphi) \end{aligned} \quad (13)$$

Selbstverständlich kann in dem Ausdruck für einen

zeitlich konstanten Widerstand kein Frequenzglied und auch kein Nullphasenwinkel auftreten; ebenso selbstverständlich musste beides aber in dem Ausdruck für die zeitlich veränderliche Leistung enthalten sein.

Literaturverzeichnis.

- 1) G. Bolz-Moeller: Leitfaden der Elektrotechnik. 1935. Teil 2: Grundlagen der Wechselstromtechnik.
- 2) L. Casper: Einführung in die komplexe Behandlung von Wechselstromaufgaben. 1929.
- 3) A. Fraenkel: Theorie der Wechselströme. 1930.
- 4) G. Haberland: Magnetismus und Wechselstromtechnik. 1937.
- 5) G. Hauffe: Die symbolische Behandlung der Wechselströme. Göschen Nr. 991.

- 6) G. Hauffe: Ortskurven der Starkstromtechnik. 1932.
- 7) M. Landolt: Komplexe Zahlen und Zeiger in der Wechselstromlehre. 1936.
- 8) A. Linker: Grundlagen der Wechselstromtheorie. 1928.
- 9) H. G. Möller: Behandlung von Schwingungsaufgaben. 1928.
- 10) O. Müller: Einführung in die symbolische Methode der Wechselstromtechnik. 1935.
- 11) H. Ring: Die symbolische Methode zur Lösung von Wechselstromaufgaben. 1928.
- 12) Ch. P. Steinmetz: Theorie und Berechnung der Wechselstromerscheinungen. 1900.
- 13) A. Thomälen: Kurzes Lehrbuch der Elektrotechnik. 1929.
- 14) J. Wallot: Einführung in die Theorie der Schwachstromtechnik. 1932.
- 15) E. Weber: Die elektrische Leistung im allgemeinen Wechselstromkreis. ETZ 1929.

Technische Mitteilungen. — Communications de nature technique.

Die elektrische Verhüttung von Eisenerzen ¹⁾.

(Nach Robert Durrer, Berlin; ETZ Bd. 61 (1940), Heft 48.)

669.187 : 621.365

Die Verhüttung von Eisenerzen im Hochofen (Fig. 1) erfolgt stets mit Zugabe von Kohle, welche die für die Durchführung des Prozesses nötige Wärme (Schmelztemperatur) zu liefern und den Erzsauerstoff zu binden hat (Reduktion der Eisenoxyde). Das flüssige Eisen nimmt bei der hohen Schmelztemperatur ca. 4% Sauerstoff auf (Aufkohlung) und es ent-

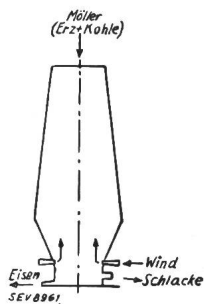
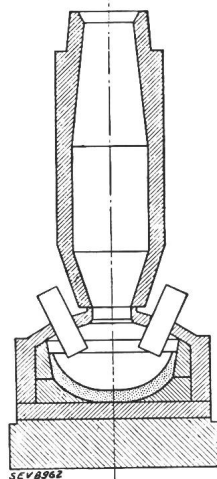


Fig. 1.
Schema
eines Blashochofens.

Fig. 2.
Elektrohochofen
mit ungeeignetem
Profil.



steht aus diesem Prozess Roheisen, welches dann im Stahl-ofen durch Entfernung des Kohlenüberschusses und anderer Begleitelemente in Stahl verwandelt wird. Die Zugabe von Kohle ist ferner zur Auflockerung der Beschickung nötig, um diese luftdurchlässig zu machen.

Im Gegensatz zum «Blashochofen» wird im elektrischen Ofen die nötige Wärme durch elektrische Energie erzeugt, indem ein Lichtbogen zwischen zwei Elektroden erzeugt wird. Dadurch ist der gesamte Kohlenverbrauch bedeutend geringer als im Blashochofen und die Luftzufuhr zur Verbrennung fällt weg.

Mit Rücksicht auf die geringe und unbefriedigende Leistung der ersten Elektrohochofen (Fig. 2), deren Form ähnlich derjenigen der Blashochofen war, wurde der Elektrodenraum beträchtlich vergrößert und die untere Verengung des Schachtes erweitert, um ein Stocken der Beschickung zu vermeiden. Es entstand der in Fig. 3 dargestellte Elektrohochofen Bauart «Grönwall», der in Schweden entwickelt wurde und sich bewährt hat. Mehrere solcher Elektrohochofenanlagen sind in Schweden auch heute noch im Betrieb.

In dem links von der Ofenhalle gelegenen Transformatorraum wird der Primärstrom auf die Ofenspannung herab-

¹⁾ R. Durrer: Metallurgie des Eisens. Verlag Chemie (erscheint demnächst).

transformiert und den Elektroden auf dem kürzesten Weg zugeführt. Bei Ofen mit sechs Elektroden werden drei Einphasentransformatoren verwendet, die auf der Primärseite in Dreieck geschaltet sind. Auf der Sekundärseite sind je zwei Elektroden mit einer Phase parallel geschaltet. Bei Ofen mit acht Elektroden wird die Umspannung mit zwei Doppel-Einphasentransformatoren in Scottscher Schaltung durchgeführt, wodurch sich auf der Sekundärseite vier Stromkreise mit je zwei parallel geschalteten Elektroden ergeben. Die Spannung der Sekundärseite kann beispielsweise in acht Stufen von 60 bis 120 V geändert werden.

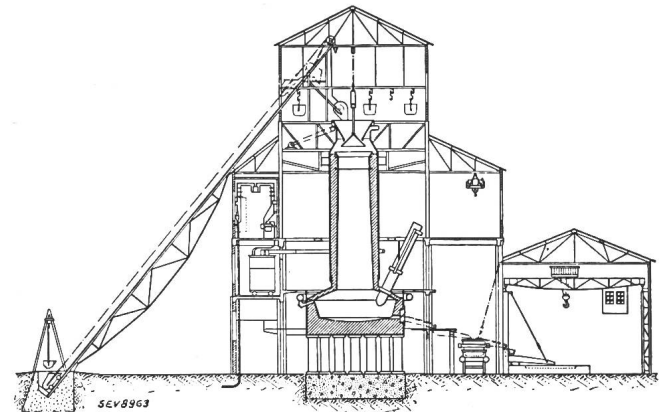


Fig. 3.
Schnitt durch eine Elektrohochofenanlage mit neuzeitlichem
«Grönwallofen».

Die Notwendigkeit, überwiegend Holzkohle als Reduktionsmittel zu verwenden, ist ein wirtschaftlicher Nachteil des elektrischen Hochofens. Es hat sich gezeigt, dass der Koks-zusatz nicht über etwa 40% der gesamten Kohlenmenge betragen darf, da sonst der Raumanteil der Kohle an der Beschickung zu gering wäre, um deren Zusammenbacken zu verhindern. Der Elektrodenverbrauch beträgt 6...8 kg pro Tonne Roheisen.

Die Erzeugung eines neuzeitlichen, mit acht Elektroden arbeitenden Elektrohochofens von etwa 6500 kW elektrischer Heizung beträgt etwa 65 t/24 h bei Verwendung reicher Erze, entsprechend einem Arbeitsverbrauch von etwa 2400 kWh/t. Diese Werte sind aber stark abhängig von den Arbeitsbedingungen, insbesondere von der verwendeten Kohle und dem verhütteten Erz.

Bei Verwendung von reichem Erz und Holzkohle beträgt der niedrigste Arbeitsverbrauch etwas über 2000 kWh/t.

Zu den entstehenden ca. 800 m³ Gichtgas mit einem Heizwert von etwa 2300 kcal/m³ sind noch etwa 1600 m³/t Umlaufgas zu rechnen, so dass ca. 2400 m³/t Gas den Ofen durchströmen, also etwas mehr als die Hälfte der Gasmenge im Blashochofen.

Der Umstand, dass im grössten Teil des Schachtes infolge der verhältnismässig niedrigen Temperatur nur wenig Arbeit