Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 5 (1914)
Heft: 7

Artikel: Theorie und Berechnung der Spannungswandler
Autor: Wirz, Emil
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1056632

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: 22.08.2025

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

Theorie und Berechnung der Spannungswandler.

Von Dr.-Ing. *Emil Wirz,* Burgdorf.

I. Teil. Einphasenspannungswandler.

In einem früher erschienenen Aufsatze [1]) wurde gezeigt, wie sich die Arbeitsgleichungen für Messtransformatoren ableiten und wie sich aus diesen Arbeitsgleichungen speziell die Stromwandler berechnen lassen.

Die vorliegende Arbeit soll sich nun damit befassen auch für Spannungswandler Arbeitsbedingungen aufzustellen, nach welchen sich diese Apparate zahlenmässig berechnen lassen, da bekanntlich in der modernen Messtechnik die Spannungswandler ebenso wie die Stromwandler eine bedeutende Rolle spielen und diese wie jene mit gewissen Ungenauigkeiten behaftet sind, die unter Umständen ihre Anwendung in Frage stellen.

In der oben erwähnten Arbeit wurde gezeigt, dass sich bei Stromwandlern diese Ungenauigkeiten sehr wohl auf ein Minimum reduzieren lassen, wenn bei der Dimensionierung derselben gewisse Gesetzmässigkeiten beachtet werden. Ganz beseitigen werden sich dieselben wohl nie lassen, da sie durch die Arbeitsübertragung im Eisen bedingt sind und zudem noch durch äussere Umstände, wie Periodenzahlschwankungen, Kurvenform des Stromes und der Spannung und nicht im mindesten durch Ueberspannungserscheinungen die Messgenauigkeit beeinträchtigt wird.

Bei Spannungstransformatoren oder kurz Spannungswandlern, die also im Gegensatz zu Stromwandlern die Spannung zu transformieren haben, liegen die Verhältnisse insofern einfacher, wie bei jenen, als diese im allgemeinen an eine konstante Spannung angeschlossen werden und dadurch sich in ihrer Berechnungsweise wesentlich den Grosstransformatoren nähern. Durch die Konstanz der Netzspannung zeigen diese daher auch eine viel geringere Abhängigkeit von den Magnetisierungsgrössen und lassen sich deshalb auch genau wie Grosstransformatoren in rohen Grenzen vorausberechnen. In den weitaus meisten Fällen fordert aber der Bau solcher Spannungswandler nicht nur eine rohe Vorausberechnung, sondern der Konstrukteur will vielmehr zum Voraus wissen, ob das Material gut ausgenützt und vor allem ob der Spannungswandler tatsächlich seinen Anforderungen genügt. In dieser Hinsicht sind mir sowohl in der Literatur als auch in meiner Tätigkeit bei verschiedenen Firmen keine streng richtigen und allgemein gültigen Berechnungsmethoden für Spannungswandler bekannt geworden, durch welche es auch nur näherungsweise möglich wäre, das Verhalten derartiger Apparate unter den verschiedensten Betriebsbedingungen vorauszuberechnen. Wie schon bereits in der Arbeit über Stromwandler erwähnt wurde, sind überhaupt über das Gebiet der Messtransformatoren in der Literatur noch sehr wenig Arbeiten zu verzeichnen und die noch für die Praxis von einigem Interesse wären, sind in ihrer gegebenen Form für den Konstrukteur wertlos, da sie meistens langwierige Versuche voraussetzen [2]), für welche die Praxis im allgemeinen kein allzu grosses Interesse zeigt und vor allem keine Zeit zu solchen besitzt, da der niedrige Verkaufspreis derartiger Apparate keine kostspieligen und zeitraubenden Versuche, wenigstens in kleineren Werken, mehr zulässt. Mit dieser Arbeit soll deshalb versucht werden, auf theoretischer Grundlage Bedingungen herzuleiten, aus welchen sich die Abmessungen und das Verhalten eines Spannungswandlers auf wenige Prozent genau vorausberechnen lässt. Die Bedingungen, die im allgemeinen ein guter Spannungswandler erfüllen muss, sind die gleichen wie für Stromwandler und sind

[1]) Ein Beitrag zur Theorie und Berechnung der Stromwandler vom Verfasser. Bulletin des S. E. V., Heft 11. 1913.

[2]) Hier möge nur die wichtigste von allen Arbeiten, nämlich von Keinath, München 1909, erwähnt sein, die wesentlichen Aufschluss über derartige Apparate gibt, jedoch für die Vorausberechnung ungeeignet ist.

bereits früher von Görner [3]) aufgestellt worden. Der Uebersichtlichkeit halber mögen dieselben hier nochmals wieder gegeben werden.

Ein guter Spannungswandler muss folgende Bedingungen erfüllen:

1) Geringe Abweichung der Proportionalität zwischen der Primär- und Sekundärspannung.
2) Kleine Phasenabweichung zwischen Primär- und Sekundärspannung.
3) Unabhängigkeit des Uebersetzungsverhältnisses von der Periodenzahl in den denkbar weitesten Grenzen.
4) Gleiche Kurvenformen der Primär- und Sekundärspannung.
5) Unabhängigkeit von der Sekundärbelastung innerhalb gewisser Grenzen.

Von diesen Anforderungen ausgehend, welche ein guter Spannungswandler erfüllen muss, soll nun im folgenden gezeigt werden, wie sich aus den Arbeitsgleichungen Beziehungen für die Berechnung der Abmessungen für ein Minimum von Fehlern herleiten lassen.

1. Allgemeines und Vorbedingungen.

Bevor wir zur Aufstellung der Arbeitsgleichungen eines Spannungswandlers übergehen, mögen zuerst einige allgemeine Begriffe bezüglich der Phasenabweichung zwischen Primär- und Sekundärspannung beziehungsweise der räumlichen Richtung dieser Spannungsvektoren etwas näher betrachtet werden, da der Verfasser dieser Zeilen den Eindruck gewonnen hat, dass man in den massgebenden Kreisen der Werke, die sich mit der Herstellung derartiger Apparate befassen, über diese räumliche Lage der Spannungsvektoren nicht recht im klaren ist.

Ich halte diese Vorbemerkungen über diese räumliche Lage der einzelnen Vektoren schon deshalb als nützlich und angebracht, weil einerseits dieselben besonders bei Dreiphasenspannungswandlern in Stern- oder Dreieckschaltung oder auch bei der bekannten *V*-Schaltung bei Nichtbeachtung der richtigen Phasenfolge zu ganz falschen Messresultaten führen und anderseits um in den später aufzustellenden Diagrammen über die räumliche und zeitliche Lage der Spannungsvektoren Unklarheiten zu vermeiden.

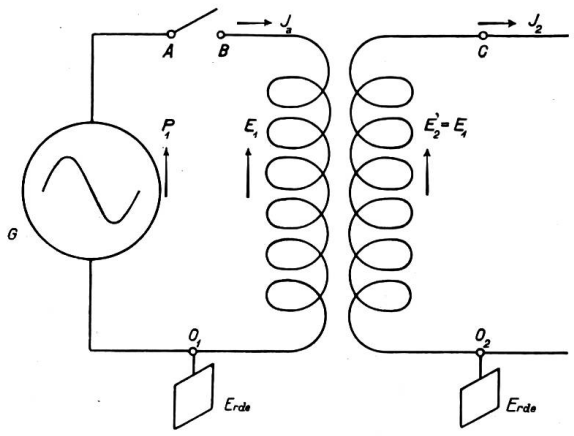

Fig. 1.

Die Kenntniss der Theorie und Arbeitsweise des allgemeinen Transformators soll dieser Arbeit wiederum vorausgesetzt werden und soll dieselbe nur insoweit wiederholt werden, als es eben die Theorie der Spannungswandler unumgänglich erfordert, da sonst diese Arbeit den zur Verfügung stehenden Raum weit übersteigen würde und die Theorie des allgemeinen Transformators in bekannten Lehrbüchern ausführlich genug behandelt ist [4]).

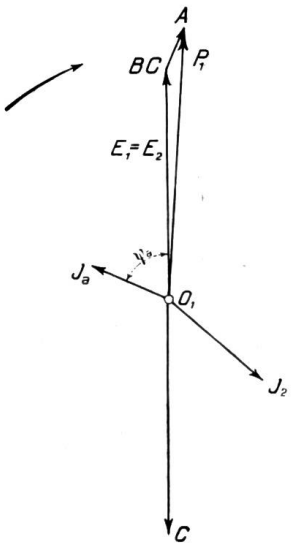

Fig. 2.

Ferner soll sich diese Arbeit vorwiegend nur mit Einphasentransformatoren befassen und die Dreiphasenspannungswandler einer späteren Arbeit vorbehalten bleiben.

Um die räumlichen Richtungen der einzelnen EMKe zu erkennen, betrachten wir im folgenden einen Transformator, der auf der Primärseite an einen Wechselstromgenerator *G* angeschlossen ist und dessen Sekundärwicklung vorerst offen oder was dasselbe ist, der Transformator unbelastet ist, Fig. 1.

Wir wollen ferner die beiden Pole O_1 und O_2 der Primär- und Sekundärwicklung an Erde legen und lassen dann auch in den späteren Potentialdiagrammen wie üblich den

[3]) Bulletin des S. E. V., Heft 6. 1911.

[4]) Siehe z. B. Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. II, 2. Auflage.

Ursprung des Koordinatensystems mit O_1 zusammenfallen. Das Potential der zweiten Klemme A des Generators wird dann durch den Punkt A dargestellt. Das Potential wächst also räumlich von O_1 nach A zu. Nun erzeugt aber der Kraftfluss im Transformator eine E M K E_1, wenn der Schalter bei $\overline{AB}$ geschlossen wird, d. h. es entsteht eine von Windung zu Windung grösser werdende Potentialdifferenz, die ebenfalls von O_1 ausgehend nach A wächst.

Den Vektor der induzierten E M K können wir somit räumlich nur durch einen Vektor $\overline{O_1B}$ darstellen, der fast mit $\overline{O_1A}$ zusammenfällt und die Potentialdifferenz beider Vektoren P_1 und E_1 verursachen dann einen Strom in der Primärwicklung des Transformators, der in bildlicher Darstellung, in der Richtung vom grösseren bis zum kleineren Potential fliessen wird.

Nehmen wir nun an beide Wicklungen wären im gleichen Sinne gewickelt, so wird in der Sekundärwicklung eine E M K E_2 induziert, die von O_2 gegen C von Windung zu Windung wächst. Sind dann beide Wicklungen noch vollkommen gleich, so wird im Diagramm Fig. 2. das Potential $\overline{O_2C}$ mit demjenigen $\overline{O_1B}$ zusammenfallen oder aber da $\overline{O_2C}$ im Sekundärkreis die treibende Spannung darstellt, wird in *bildlicher* Darstellung in diesem Falle der Sekundärstrom I_2 auch in der gleichen Richtung wie *Ia* fliessen oder mit andern Worten:

Wenn beide Wicklungen im gleichen Sinne gewickelt sind, so stellen die zwei Anfänge und ebenso die zwei Enden derselben phasengleiche Pole dar, d. h. die beiden Spannungen sind räumlich nur um den kleinen Phasenabweichungswinkel ψ_e gegeneinander verschoben. Sind dagegen beide Wicklungen in entgegengesetzter Richtung gewickelt, so stellen Anfang Primär und Ende Sekundär und umgekehrt phasengleiche Pole dar, oder aber beide Anfänge und beide Enden der Wicklungen stellen um $180^0 \pm \psi_e$ verschobene Pole dar.

Hier sind wir am ersten Ziele angelangt und erhalten das beachtenswerte Resultat, dass zur richtigen Schaltung eines Transformators die räumliche und nicht die zeitliche Phasenlage der Spannungsvektoren massgebend ist und diese durch den Wicklungssinn beider Wicklungen bestimmt ist.

Im Diagramm Fig. 2. sind ausser den Spannungsvektoren auch noch der Magnetisierungsstrom I_a und der Sekundärstrom I_2 eingetragen, die aber beide nur *zeitlich* und *nicht räumlich* wie die ersteren dargestellt werden können.

Zur graphischen Darstellung der einzelnen Vorgänge beim Transformator benutzt man nun verschiedene Arten von Diagrammen, nämlich Potentialdiagramme und Zeitdiagramme. Die ersteren haben mehr bezug auf den Raum, wir werden sie im folgenden fast ausschliesslich benutzen, während die Zeitdiagramme mehr auf die zeitliche Phasenlage bezug haben [4]).

Die Potentialdiagramme haben den Vorzug, dass in ihnen die Verbindungslinien zweier Punkte direkt die Spannungsdifferenz angibt, welche zwischen diesen Punkten besteht und zugleich auch angeben ob die Primärwicklung Strom aufnimmt oder abgibt.

2. *Theorie und Grundgleichungen.*

Zur Aufstellung der Hauptgleichungen gehen wir wiederum vom allgemeinen Transformator aus und legen unseren Betrachtungen die bereits früher abgeleiteten Hauptgleichungen eines Transformators zu Grunde. Zur Rechnung möge wiederum zum Teil die symbolische Darstellungsweise benutzt und im Gegensatz zu Stromwandlern, Vektordiagramme zur Klärung der teilweise verwickelten Verhältnisse herangezogen werden.

Für den allgemeinen Transformator mit gleichen Primär- und Sekundärwicklungen lauten dann die Hauptgleichungen:

---

[4]) In der Arbeit über Stromwandler wurden fast ausschliesslich nur Zeitdiagramme benutzt, da sich Ströme nur zeitlich darstellen lassen, jedoch gilt auch für Stromwandler das oben gesagte bezüglich der phasengleichen Pole, sodass hierbei die Phasenverschiebung der Ströme ψ_i oder $180 \pm \psi_i$ werden kann.

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{P}_1 &= \mathfrak{C}_1\,\mathfrak{P}_2 + \mathfrak{C}_2\,\mathfrak{J}_2\,\mathfrak{z}_{1k}\\ \mathfrak{J}_1 &= \mathfrak{C}_2\,\mathfrak{J}_2 + \mathfrak{C}_1\,\mathfrak{P}_2\,\mathfrak{y}_{10}\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1)^{5})$$

Aus diesen Beziehungen geht hervor, dass sich sowohl die primäre Spannung wie auch der primäre Strom aus je zwei Komponenten zusammensetzen, nämlich aus einer Kompenente, die für den äussern sekundären Kreis notwendig ist und aus der Komponente, die für die Arbeitsübertragung im Eisen und zum Teil für die Kupferverluste in den Wicklungen aufgebracht werden muss.

In der Regel kommt nun dem Spannungswandler die Aufgabe zu, hohe Spannungen in solche niederen Potentials zu transformieren, sodass wir bei solchen Transformatoren immer verschieden grosse Wicklungen, also auch Primär und Sekundär verschieden grosse Windungszahlen besitzen, welch letztere Eigenschaft *in der Gleichung 1)* berücksichtigt werden muss.

Wie schon früher bei Stromwandlern gezeigt wurde, kann diese letztere Eigenschaft dadurch berücksichtigt werden, indem alle sekundären Grössen auf das Primärsystem oder die Primärgrössen auf das Sekundärsystem reduziert werden. Im folgenden wollen wir uns zum ersteren Fall entschliessen und alle Sekundärgrössen auf das Primärsystem reduzieren [6]). Dann lauten die Hauptgleichungen eines Spannungswandlers ganz allgemein:

$$\left.\begin{aligned}\mathfrak{P}_1 &= \mathfrak{C}_1\,\mathfrak{P}'_2 + \mathfrak{C}_2\,\mathfrak{J}'_2\,\mathfrak{z}_{1k}\\ \mathfrak{J}_1 &= \mathfrak{C}_2\,\mathfrak{J}'_2 + \mathfrak{C}_1\,\mathfrak{P}'_2\,\mathfrak{y}_{10}\end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 1\,a)$$

Hierin bedeuten dann:

$$\mathfrak{C}_1 = \frac{\mathfrak{P}_{10}}{\mathfrak{P}'_2} = C_1\,e^{j\Psi_1} = 1 + \mathfrak{z}_1\,\mathfrak{y}_a = C_{1a} + jC_{1\beta}$$

eine komplexe Zahl, die das Verhältnis zwischen der primären Leerlaufspannung und der Sekundärspannung angibt.

$$\mathfrak{C}_2 = \frac{\mathfrak{J}_{1k}}{\mathfrak{J}'_2} = C_2\,e^{j\Psi_2} = 1 + \mathfrak{z}'_2\,\mathfrak{y}_a = C_{2\alpha} + jC_{2\beta}$$

das Verhältnis zwischen dem primären und dem sekundären Kurzschlusstrom,

$$\mathfrak{z}_{1k} = \mathfrak{z}_1 + \frac{\mathfrak{z}'_2}{\mathfrak{C}_2} = \mathfrak{z}_1 + \frac{\mathfrak{z}'_2}{1 + \mathfrak{z}'_2\,\mathfrak{y}_a} = \mathfrak{z}_1 + \frac{\mathfrak{z}'_2}{C_{2\alpha} + jC_{2\beta}}$$

die gesamte Kurzschlussimpedanz und schliesslich

$$\mathfrak{y}_{10} = \frac{\mathfrak{y}_a}{\mathfrak{C}_1} = \frac{\mathfrak{y}_a}{1 + \mathfrak{z}_1\,\mathfrak{y}_a} = \frac{\mathfrak{y}_a}{C_{1\alpha} + jC_{1\beta}}$$

die Leerlaufadmittanz des Primärkreises. Ebenso sind dann die auf Primär reduzierten Sekundärgrössen

$$\mathfrak{P}'_2 = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)\mathfrak{P}_2 \;;\; \mathfrak{J}'_2 = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)\mathfrak{J}_2 \quad \text{und} \quad \mathfrak{z}'_2 = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 \mathfrak{z}_2$$

Die Vorgänge beim allgemeinen Transformator können nun ebenso wie sie in Gleichung 1a) mathematisch formuliert sind, auf graphischem Wege dargestellt werden und gestatten so zusammen mit der symbolischen Darstellungsweise eine klare Uebersicht über die gesamten Verhältnisse im Transformator.

Zu diesem Zwecke wählen wir ein rechtwinkliges Koordinatensystem, in welchem ein für alle Male die Ordinatenachse als die reelle und die Abscissenachse als die imaginäre Achse festgesetzt wird. Zur graphischen Darstellung der einzelnen Vektorgrössen ist noch eine weitere Festsetzung notwendig, nämlich die Festsetzung der Quadranten, in welchen die Ströme bezw. die Spannungen dargestellt werden. Wie in der Arbeit über Stromwandler, werden wir im folgenden auch die Ströme bezw. die Admittanzen im ersten Quadranten

---

[5]) Siehe Bulletin des S. E. V. Heft 11. 1913.

[6]) Im folgenden sind die reduzierten Grössen wiederum mit dem Index (') versehen.

darstellen und setzen daher als I. Quadranten denjenigen links von der Ordinatenachse fest und lassen die Vektoren im Sinne des Uhrzeigers rotieren und numerieren die übrigen im Sinne der rotierenden Zeitlinie.[7]) Dabei ist dann zu beachten, dass immer ein positiver Phasenwinkel mit negativem Vorzeichen und umgekehrt erscheint. Die Spannungen bezw. die Impedanzen stellen wir dann im VI. Quadranten dar. Im folgenden gehen wir nun von der Spannungsgleichung aus

$$\mathfrak{P}_1 = \mathfrak{C}_1 \mathfrak{P}'_2 + \mathfrak{C}_2 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k}$$

und ersetzen darin $\mathfrak{P}'_2$ durch $\mathfrak{P}'_2 = \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A$, worin $\mathfrak{z}'_A$ die auf Primär reduzierte Impedanz des Belastungsstromkreises darstellt.

Graphisch kann die Gleichung $\mathfrak{P}_1 = \mathfrak{C}_1 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A + \mathfrak{C}_2 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k}$ dargestellt werden, indem wir in der Ordinatenachse den Sekundärstrom $\mathfrak{J}'_2$ auftragen.[8])

Der Vektor $\mathfrak{C}_1 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A = C_1 I'_2 Z'_A e^{-j(\varphi_A - \psi_1)}$ schliesst dann mit dem Strome $\mathfrak{J}'_2$ den Winkel $\varphi_A - \psi_1$ und ebenso der Vektor $\mathfrak{C}_2 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k} = C_2 I'_2 Z_{1k} e^{-j(\varphi_{1k} - \psi_2)}$ den Winkel $\varphi_{1k} - \psi_2$ ein.

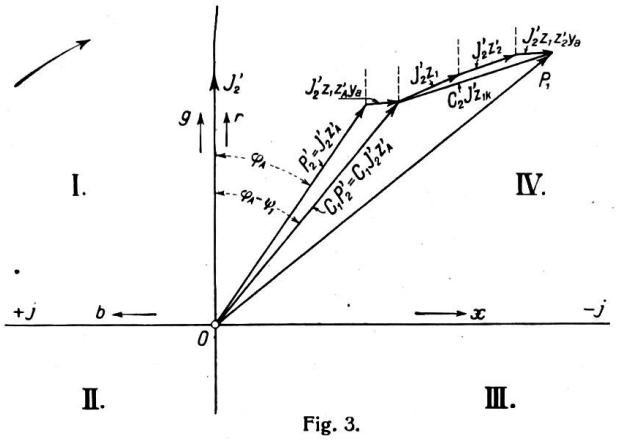

Fig. 3.

Potentialdiagramm eines Spannungswandlers.

Im Diagramm Fig. 3 ergibt sich sodann die Primärspannung P_1 als geometrische Summe beider Vektoren. Die sekundäre Klemmenspannung muss daher umso kleiner werden, je grösser der Sekundärstrom bezw. der Vektor $\mathfrak{C}_2 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k}$ ist und die Phasenverschiebung zwischen P_1 und P'_2 muss um so grösser werden, je grösser die Differenz der Winkel $\varphi_{1k} - \psi_2 - (\varphi_A - \psi_1)$ wird.

Diese Vektoren $\mathfrak{C}_1 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A$ u. $\mathfrak{C}_2 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k}$ können noch zerlegt werden, da sie aus mehreren Vektoren zusammengesetzt sind.

Es ist nämlich

$$\mathfrak{C}^1 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A = [1 + \mathfrak{z}_1 \mathfrak{y}_a] \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A = \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A + \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A \mathfrak{z}_1 \mathfrak{y}_A$$

worin $\mathfrak{z}_1$ die Impedanz der Primärwicklung und $\mathfrak{y}_a$ die Erregeradmittanz des Primärkreises darstellt, ebenso ist dann

$$\mathfrak{C}_2 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k} = [1 + \mathfrak{z}'_2 \mathfrak{y}_a] \left[\mathfrak{z}_1 + \frac{\mathfrak{z}'_2}{1 + \mathfrak{z}'_2 \mathfrak{y}_a} \right] \mathfrak{J}'_2$$

$$= \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_1 + \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_2 + \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_1 \mathfrak{z}'_2 \mathfrak{y}_a$$

worin $\mathfrak{z}'_2$ die Impedanz der Sekundärwicklung bedeutet.

Im Diagramm Fig. 3 sind diese einzelnen Vektoren ebenfalls eingezeichnet.

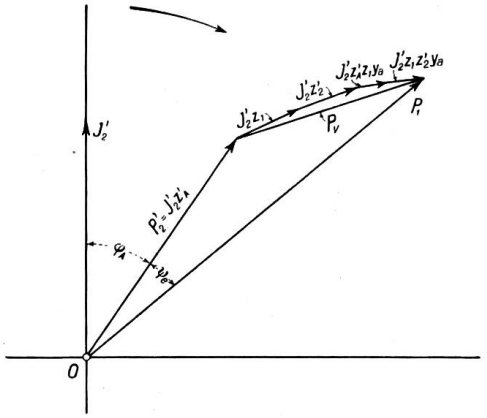

Fig. 4.

Potentialdiagramm der Fig. 3 mit anderer Gruppierung der Vektoren.

Der Uebersichtlichkeit halber wollen wir im folgenden noch eine andere Gruppierung der einzelnen Vektoren vornehmen. Ziehen wir nämlich alle Vektoren, die zur gesamten Verlustspannung im Transformator gehören, zusammen, so ist dann

$$\mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A \mathfrak{z}_1 \mathfrak{y}_a + \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_2 \mathfrak{z}_1 \mathfrak{y}_a = [\mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A + \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_2] \mathfrak{z}_1 \mathfrak{y}_a = \mathfrak{E}'_2 \mathfrak{z}_1 \mathfrak{y}_a$$

---

[7]) Diese Festsetzung des Drehsinnes der Vektoren entspricht nicht den Festsetzungen der I. E. C., um diese vorliegende Arbeit noch in gleicher Weise wie diejenige über Stromwandler behandeln zu können, weil sonst leicht Verwechslungen möglich wären.

[8]) Mit derselben Leichtigkeit hätte auch die Spannung P'_2 in der Ordinatenachse aufgetragen werden können, jedoch wäre dann der Charakter des Impedanzdiagrammes nicht mehr gewahrt gewesen und die Zerlegung der einzelnen Vektoren unübersichtlich geworden.

oder da ja im reduzierten Diagramm $\mathfrak{E}_1 = \mathfrak{E}'_2$ ist, so ergibt sich

$$\mathfrak{E}'_2\, \mathfrak{z}_1\, \mathfrak{y}_a = \mathfrak{J}_a\, \mathfrak{z}_1$$

und die gesamte Klemmenspannung ist nun

$$\mathfrak{P}_1 = \mathfrak{J}'_2\, \mathfrak{z}'_A + \mathfrak{J}'_2\, \mathfrak{z}_1 + \mathfrak{J}'_2\, \mathfrak{z}'_2 + \mathfrak{J}_a\, \mathfrak{z}_1$$

oder da $\mathfrak{J}'_2\, \mathfrak{z}_1 + \mathfrak{J}_a\, \mathfrak{z}_1 = [\mathfrak{J}'_2 + \mathfrak{J}_a]\, \mathfrak{z}_1 = \mathfrak{J}_1\, \mathfrak{z}_1$ ist, so ist daher jetzt

$$\mathfrak{P}_1 = \mathfrak{J}'_2\, \mathfrak{z}'_A + \mathfrak{J}_1\, \mathfrak{z}_1 + \mathfrak{J}'_2\, \mathfrak{z}'_2 = \mathfrak{P}'_2 + \mathfrak{P}_v \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 1b)$$

wenn mit $\mathfrak{P}_v$ die gesamte im Transformator auftretende Verlustspannung bedeutet. Im Diagramm der Fig. 4 ist diese neue Gruppierung der einzelnen Vektoren aufgezeichnet, und soll dieses als das eigentliche Potentialdiagramm des Spannungswandlers bezeichnet werden.

Auf dieselbe Weise kann nun ebenfalls das Stromdiagramm erhalten werden, indem man von der Stromgleichung $\mathfrak{J}_1 = \mathfrak{C}_2\, \mathfrak{J}'_2 + \mathfrak{C}_1\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}_{10}$ ausgeht. In dieser Beziehung muss dann zuerst $\mathfrak{J}'_2$ ersetzt werden durch $\mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}'_A$, wodurch die Stromgleichung übergeht in

$$\mathfrak{J}_1 = \mathfrak{C}_2\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}'_A + \mathfrak{C}_1\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}_{10}$$

Um auch diese Gleichung graphisch darstellen zu können, tragen wir in der Ordinatenachse die Spannung $\mathfrak{P}'_2$ auf und benutzen dann für das Stromdiagramm den I. Quadranten.

In Fig. 5 ist dieses Diagramm ebenfalls aufgezeichnet.

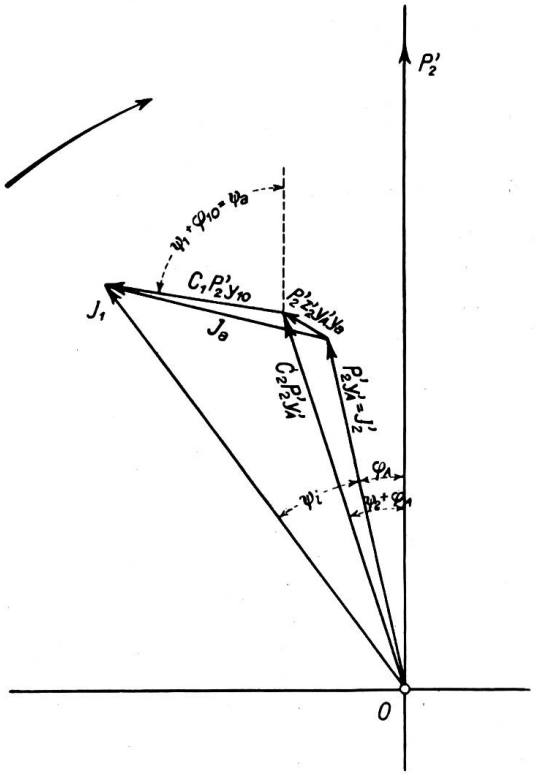

Fig. 5.

Strommdiagramm eines Spannungswandlers.

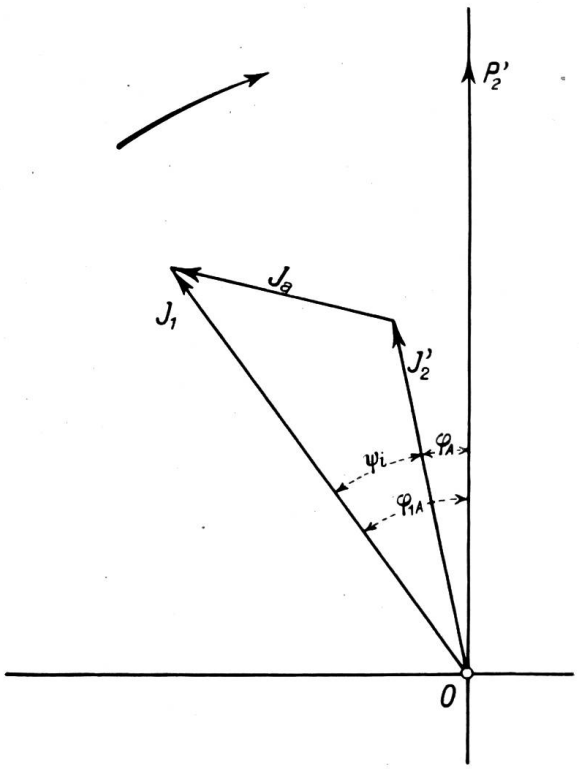

Fig. 6.

Stromdiagramm eines Spannungswandlers.

Aehnlich wie beim Spannungsdiagramm können wir auch hier eine Zerlegung der Komponenten $\mathfrak{C}_2\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}'_A$ und $\mathfrak{C}_1\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}_{10}$ vornehmen. In diesem Fall wird dann

$$\mathfrak{C}_2\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}'_A = \mathfrak{y}'_A\, \mathfrak{P}'_2 + \mathfrak{y}'_A\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{z}'_2\, \mathfrak{y}_a \text{ und } \mathfrak{C}_1\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}_{10} = \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{y}_a$$

Ziehen wir auch hier die beiden Komponenten, die $\mathfrak{y}_a$ enthalten, zusammen, so wird schliesslich

$$\mathfrak{y}'_A\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{z}'_2\, \mathfrak{y}_a + \mathfrak{y}_a\, \mathfrak{P}'_2 = (\mathfrak{y}'_A\, \mathfrak{P}'_2\, \mathfrak{z}'_2 + \mathfrak{P}'_2)\, \mathfrak{y}_a = (\mathfrak{J}'_2\, \mathfrak{z}'_2 + \mathfrak{P}'_2)\, \mathfrak{y}_a = \mathfrak{E}'_2\, \mathfrak{y}_a = \mathfrak{J}_a$$

oder aber der Primärstrom setzt sich daher zusammen aus dem Sekundärstrom und dem Magnetisierungsstrom und das Stromdiagramm gibt uns das bekannte Kapp'sche Stromdreieck (Fig. 6).

Wie aus diesen Ableitungen hervorgeht, lassen sich also die Diagramme, welche man aus der symbolischen Darstellungsweise unter Zuhilfenahme der Faktoren C_1 und C_2 erhält, durch eine geeignete Umrechnung ohne weiteres in die bekannten Zeit- und Potentialdiagramme überführen, was für die folgende Berechnungsweise eines Spannungswandlers von wesentlicher Bedeutung ist und die Rechnung vereinfacht.

Zur Aufstellung von Beziehungen für die Berechnung von Spannungswandlern kommt in der Hauptsache nur die Spannungsgleichung, Gleichung 1a) in Betracht, da der Stromgleichung hierbei nur eine untergeordnete Rolle zukommt und nur bei der experimentellen Untersuchung solcher Apparate einige Bedeutung besitzt.

Wir gehen daher im folgenden von der Spannungsgleichung aus und müssen zu diesem Zwecke eine Umformung derselben vornehmen, da uns hierbei im allgemeinen nur das Uebersetzungsverhältnis und der Phasenfehler interessiert.

Dividieren wir die Spannungsgleichung auf beiden Seiten durch $\mathfrak{P}'_2$, so wird jetzt

$$\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}'_2} = \mathfrak{C}_1 + \mathfrak{C}_2 \mathfrak{y}'_A \mathfrak{z}_{1k} \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 1c)$$

eine Beziehung für den absoluten Uebersetzungsfaktor, welche wir zum Ausgangspunkt unserer Betrachtungen machen wollen.

Der Faktor

$$\mathfrak{y}'_A = \frac{\mathfrak{J}'_2}{\mathfrak{P}'_2} = g'_A + jb'_A = \frac{1}{\mathfrak{z}'_A}$$

stellt dann die Admittanz des äusseren Sekundärkreises dar.

In dieser Form Gleichung 1c) stellt also der absolute Uebersetzungsfaktor eine Summe komplexer Zahlen dar, die sich ebenso wie Admittanzen und Impedanzen in reelle und imaginäre Teile zerlegen lassen. Setzen wir im folgenden für

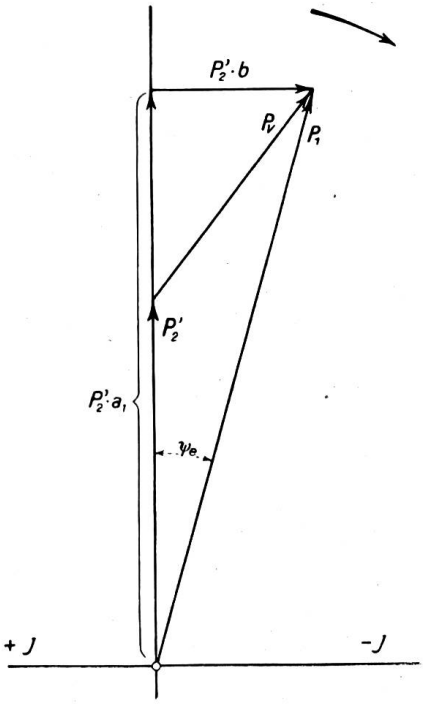

Fig. 7.

Vereinfachtes Potentialdiagramm.

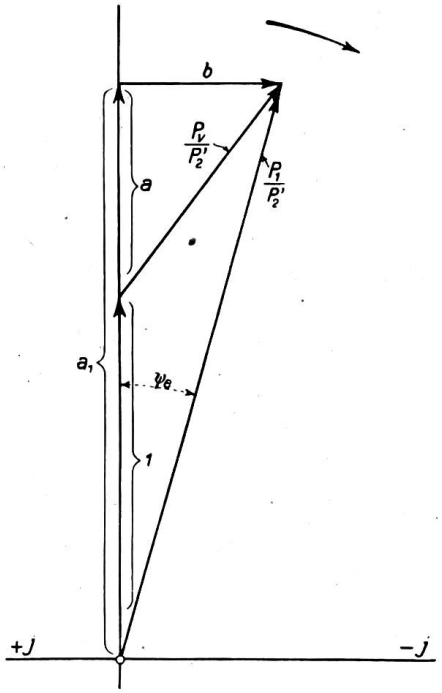

Fig. 8.

Diagramm der Spannungsverhältnisse.

$\mathfrak{C}_1 = C_{1\alpha} + jC_{1\beta}$; $\mathfrak{C}_2 = C_{2\alpha} + jC_{2\beta}$; $\mathfrak{y}'_A = g'_A + jb'_A$ und $\mathfrak{z}_{1k} = r_{1k} - jx_{1k}$,

so geht die Gleichung 1 c) über in

$$\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}'_2} = \mathfrak{C}_{1\alpha} + jC_{1\beta} + (C_{2\alpha} + jC_{2\beta})(g'_A + jb'_A)(r_{1k} - jx_{1k})$$

oder indem wir dieselbe ausmultiplizieren und die reellen und imaginären Glieder trennen, so geht sie über in

$$\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}'_2} = C_{1\alpha} + C_{2\alpha} g'_A \cdot r_{1k} - C_{2\beta} b'_A r_{1k} + C_{2\beta} g'_A x_{1k} + C_{2\alpha} b'_A x_{1k} -$$

$$j[+ C_{2\alpha} g'_A x_{1k} - C_{1\beta} - C_{2\beta} g'_A r_{1k} - C_{2\alpha} b'_A r_{1k} - C_{2\beta} b'_A x_{1k}] \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Setzen wir darin vorerst zur Abkürzung für die reellen und imaginären Grössen

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= C_{1\alpha} + C_{2\alpha} g'_A r_{1k} - C_{2\beta} b'_A r_{1k} + C_{2\beta} g'_A x_{1k} + C_{2\alpha} b'_A x_{1k} \text{ und} \\ b &= C_{2\alpha} g'_A x_{1k} - C_{13} - C_{2\beta} g'_A r_{1k} - C_{2\alpha} b'_A r_{1k} - C_{2\beta} b'_A x_{1k} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2a)$$

so geht die Spannungsgleichung in die Form über

$$\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{P}'_2} = a_1 - jb \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2b)$$

oder indem wir beide Seiten wieder mit $\mathfrak{P}'_2$ multiplizieren, wird

$$\mathfrak{P}_1 = \mathfrak{P}'_2 a_1 - \mathfrak{P}'_2 jb \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2c)$$

Ebenso wie sich diese Beziehungen Gleichung 2 b) und 2 c) symbolisch ausdrücken lassen, lassen sie sich auch graphisch darstellen wie dies in Fig. 7 und 8 geschehen ist, indem von der in der Ordinatenachse aufgetragenen Spannung $\mathfrak{P}'_2$ ausgegangen wurde.[8])

Diese Beziehungen Gleichung 2 b) und 2 c) sagen nun aus, dass sich die Spannung P_1 in zwei Komponenten zerlegen lässt, nämlich in eine Komponente in Phase mit der Spannung P'_2 und in eine solche, die um 90^0 gegen P'_2 verschoben ist. Der Winkel zwischen der Komponente $P'_2 a_1$ und P_1 stellt dann die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen P'_2 und P_1 dar.

Diese Phasenverschiebung, die im folgenden mit φ_e bezeichnet werden möge, lässt sich offenbar auch rechnerisch ermitteln.

Aus den Diagrammen Fig. 7 und 8 ergibt sich für die Tangente des Winkels φ_e

$$tg\,\varphi_e = \frac{C_{2\alpha} g'_A x_{1k} - C_{1\beta} - C_{2\beta} g'_A r_{1k} - C_{2\alpha} b'_A r_{1k} - C_{2\beta} b'_A x_{1k}}{C_{1\alpha} + C_{2\alpha} g'_A r_{1k} - C_{2\beta} b'_A r_{1k} + C_{2\beta} g'_A x_{1k} + C_{2\alpha} b'_A x_{1k}} = \frac{\pm b}{a_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 3)$$

Durch diese Beziehung ist also die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen P_1 und P'_2 bei allen Belastungen und Belastungsarten vollständig einwandfrei bestimmt und können aus dieser, wie später gezeigt wird, wichtige Bedingungen für die Berechnung und Konstruktion abgeleitet werden.

Aus dem Diagramme Fig. 8 kann nun auch der absolute Uebersetzungsfaktor $p_e = \frac{P_1}{P'_2}$ in reellen Werten angegeben werden. Für diesen erhält man dann die Beziehung

$$p_e = \frac{P_1}{P'_2} = \sqrt{a_1^2 + b^2} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)\,[9])$$

welche durch Umrechnung nach bekannten Grundsätzen aus Gleichung 2 b) erhalten wird. Die Grössen a_1 und b bedeuten auch hierin wie in Gleichung 3) die Abkürzungen der

---

[8]) In den Diagrammen ist ausserdem noch die Grösse a eingeführt, die man aus Gleichung 2 a) erhält, da $a_1 = 1 + a$ ist, wie später gezeigt werden soll.

[9]) Diese Beziehung kann wie vorher wieder geschrieben werden

$$p_e = \frac{P_1}{P'_2} = \sqrt{(1+a)^2 + b^2}$$

Gleichung 2a), wodurch der absolute Uebersetzungsfaktor und damit das Uebersetzungsverhältnis vollkommen bestimmt ist, da in den Gleichungen keinerlei Vernachlässigungen gemacht wurden.

Eine oberflächliche Betrachtung dieser beiden Beziehungen Gleichung 3) und 4) zeigt nun, dass beim Spannungswandler sowohl das Uebersetzungsverhältnis als auch die Phasenverschiebung der beiden Spannungen P_1 und P'_2 gegeneinander nicht nur allein von den Konstanten der Sekundärwicklung abhängen, sondern dass diese auch in hohem Masse durch die Konstanten der Primärwicklung und noch wesentlicher durch diejenigen des sekundären Belastungsstromkreises beeinflusst werden.

Beim Spannungswandler wird es daher nicht mehr so leicht möglich sein, Beziehungen für die günstigsten Abmessungen herzuleiten, da beide Wicklungen an den Vorgängen Anteil nehmen und zudem die Windungszahlen beider Wicklungen zum vornherein durch die Betriebsspannungen und die meist Typenweise festgelegten Eisenkerne festgelegt sind. Wohl lässt sich auch wie bei Stromwandlern die Art der Phasenverschiebung charakterisieren, jedoch ist es hierbei nicht mehr möglich, wie dort so einfache Beziehungen aufzustellen, da eben hier nicht nur eine, sondern zwei Wicklungen denselben Bedingungen genügen müssen.

Im allgemeinen ist auch bei Spannungswandlern die Art der Phasenverschiebung charakterisiert durch die Beziehung:

$$b \lessgtr 0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 5)$$

welche aussagt, dass die beiden Spannungen P_1 und P'_2 einen Phasenwinkel mit negativem Vorzeichen [P_1 eilt gegen P'_2 vor], einen Phasenwinkel $= 0$ und schliesslich einen Phasenwinkel mit positivem Vorzeichen [P_1 eilt gegen P'_2 nach] einschliessen können. In der Regel herrscht bei Spannungswandlern der negative Phasenwinkel vor.

Im folgenden soll nun zuerst untersucht werden, in welchem Masse die beiden Wicklungen das Uebersetzungsverhältnis und die Phasenverschiebung beeinflussen.

Nach früherem war die komplexe Zahl $\mathfrak{C}_1$ ausgedrückt durch:

$$\mathfrak{C}_1 = 1 + \mathfrak{z}_{01}\,\mathfrak{y}_a = C_{1\alpha} + j\,C_{1\beta}$$

Ersetzen wir hierin $\mathfrak{z}_{01}$ und $\mathfrak{y}_a$ durch ihre Komponenten, so können nach geeigneter Umrechnung die Faktoren $C_{1\alpha}$ und $C_{1\beta}$ ausgedrückt werden durch:

$$C_{1\alpha} = 1 + g_a\,r_1 + b_a\,x_1 \text{ und } C_{1\beta} = b_a\,r_1 - g_a\,x_1 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 6a)$$

oder der absolute Betrag von $\mathfrak{C}_1$ wird

$$C_1 = \sqrt{C_{1\alpha}^2 + C_{1\beta}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6b)$$

und die Verschiebung zwischen $C_{1\alpha}$ und C_1 ist

$$tg\,\Psi_1 = \frac{b_a\,r_1 - g_a\,x_1}{1 + g_a\,r_1 + b_a\,x_1} = \frac{C_{1\beta}}{C_{1\alpha}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 6c)$$

Durch diesen Faktor C_1 wird daher der Einfluss der Primärwicklung und zum Teil auch der Magnetisierung auf die Arbeitsweise eines Spannungswandlers ausgedrückt und gibt weiter noch das absolute Uebersetzungsverhältnis und die Phasenverschiebung der Spannungen bei Leerlauf an. Auf dieselbe Weise kann auch der Einfluss der Sekundärwicklung zum Ausdruck gebracht werden, nämlich durch die komplexe Zahl $\mathfrak{C}_2$.

Diese kann nach früherem ausgedrückt werden durch:

$$\mathfrak{C}_2 = 1 + \mathfrak{z}'_2\,\mathfrak{y}_b = C_{2\alpha} + j\,C_{2\beta}$$

Durch Umrechnung ist dann wiederum

$$C_{2\alpha} = 1 + g_a\,r'_2 + b_a\,x'_2 \text{ und } C_{2\beta} = b_a\,r'_2 - g_a\,x'_2 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7a)$$

und der absolute Betrag von $\mathfrak{C}_2$

$$C_2 = \sqrt{C_{2\alpha}^2 + C_{2\beta}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 7b)$$

und ebenso die Verschiebung zwischen C_{2a} und C_2

$$tg\,\Psi_2 = \frac{C_{2\beta}}{C_{2a}} = \frac{b_a r'_2 - g_a x'_2}{1 + g_a r'_2 + b_a x'_2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 7c)$$

Daraus geht hervor, dass auch die Sekundärwicklung an der Arbeitsweise einen regen Anteil nimmt und durch diese das Verhalten eines Spannungswandlers im Betrieb wesentlich beeinflusst werden kann.

In den Arbeitsgleichungen Gleichung 3) und 4) tritt noch eine weitere Grösse auf, die von beiden Wicklungen abhängt, nämlich die sogenannte Kurzschlussimpedanz $\mathfrak{z}_{1k}$.

Nach früherem setzt sich diese zusammen aus den Impedanzen der einzelnen Wicklungen, nämlich aus

$$\mathfrak{Z}_{1k} = \mathfrak{Z}_1 + \frac{\mathfrak{Z}'_2}{\mathfrak{C}_2} = r_{1k} - j x_{2k}\,.$$

Auf gleiche Weise wie oben lässt sich diese auch umrechnen, sodass schliesslich wird

$$r_{1k} = r_1 + \frac{r'_2 C_{2a} - C_{2\beta} x'_2}{C_2^2} \quad \text{und} \quad x_{1k} = x_1 + \frac{r'_2 C_{2\beta} + x'_2 C_{2a}}{C_2^2} \quad \ldots\ldots \quad 8a)$$

und der absolute Betrag von $\mathfrak{z}_{1k}$ wird dann

$$Z_{1k} = \sqrt{r_{1k}^2 + x_{1k}^2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 8b)$$

und schliesslich die Verschiebung zwischen r_{1k} und Z_{1k}

$$tg\,\varphi_{1k} = \frac{x_{1k}}{r_{1k}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 8c)$$

Durch diese Beziehungen Gleichung 6) bis 8) kann also der Einfluss der beiden Wicklungen und der Magnetisierung auf die Arbeitsweise eines Spannungswandlers festgelegt und daraus die wirtschaftlich günstigsten Bedingungen für ein fehlerfreies Arbeiten ermittelt werden, wenn man vorerst vom Einfluss des sekundären Belastungsstromkreises absieht. In der Regel handelt es sich ja bei Spannungswandlern nur um sehr kleine sekundäre Belastungen, sodass man sehr leicht geneigt ist, ihren Einfluss zu vernachlässigen. Wie im folgenden aber gezeigt werden soll, ist eine solche Vernachlässigung nur in wenigen Fällen zulässig, da hierbei Erscheinungen eine wesentliche Rolle spielen, denen man bei Spannungswandlern bisher gar keine oder nur ungenügende Beobachtung geschenkt hat, nämlich dem Einfluss der Grösse der Phasenverschiebung im äusseren Sekundärkreis auf die Grösse des Phasenfehlers.

Es ist ja eine bekannte Erscheinung, dass mit zunehmender Belastung der Spannungsabfall im Transformator zunimmt und damit die Spannung an den Sekundärklemmen abnimmt, jedoch liegen noch gar keine Untersuchungen vor, wie sich dabei die Phasenverschiebung Ψ_e zwischen den Spannungen P_1 und P'_2 verhält und ob wirklich diese Phasenfehlers immer in zulässigen Grenzen bleiben.

Um deshalb diese Erscheinungen etwas näher untersuchen zu können, gehen wir von Gleichung 3) aus und ersetzen darin die Grössen g'_A und b'_A durch die Belastungsimpedanz Z'_A und ihre Phasenverschiebung φ_A.

Es ist dann

$$g'_A = \frac{r'_A}{Z'^2} = \frac{\cos\varphi_A}{Z'_A} \quad \text{und} \quad b'_A = \frac{x'_A}{Z'^2_A} = \frac{\sin\varphi_A}{Z'_A}$$

Damit geht Gleichung 3) über in die Beziehung:

$$tg\,\Psi_e = \frac{-C_{1\beta} - \frac{1}{Z'_A}\{[C_{2\beta} r_{1k} - C_{2a} x_{1k}]\cos\varphi_A + [C_{2a} r_{1k} + C_{2\beta} x_{1k}]\sin\varphi_A\}}{C_{1a} + \frac{1}{Z'_A}\{-[C_{2\beta} r_{1k} - C_{2a} x_{1k}]\sin\varphi_A + [C_{2a} r_{1k} + C_{2\beta} x_{1k}]\cos\varphi_A\}} \quad 9)$$

Setzen wir hierin zur Abkürzung noch

$$\left.\begin{aligned} C_{2\beta}\, r_{1k} - C_{2\alpha}\, x_{1k} &= r_\alpha \\ C_{2\alpha}\, r_{1k} + C_{2\beta}\, x_{1k} &= x_\alpha \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9a)$$

so wird jetzt

$$tg\,\psi_e = \frac{-C_{1\beta} - \frac{1}{Z'_A}\left\{ r_\alpha \cos\varphi_A + x_\alpha \sin\varphi_A \right\}}{C_{1\alpha} + \frac{1}{Z'_A}\left\{ -r_\alpha \sin\varphi_A + x_\alpha \cos\varphi_A \right\}} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9b)$$

Bevor wir zur Diskussion dieser Beziehung übergehen, soll nochmals eine Umformung der Gleichung 9 b) vorgenommen werden, da sie für praktische Zwecke zur Berechnung der Phasenverschiebung etwas zu umständlich ist. Setzen wir deshalb für die Faktoren $C_{1\alpha}$, $C_{1\beta}$, $C_{2\alpha}$, $C_{2\beta}$, r_{1k} und x_{1k} aus den Gleichungen 6) bis 8) die folgenden Werte ein:

$$C_{1\alpha} = C_1 \cos\Psi_1\,;\quad C_{1\beta} = C_1 \sin\Psi_1\,;\quad C_{2\alpha} = C_2 \cos\Psi_2\,;\quad C_{2\beta} = C_2 \sin\Psi_2\,;$$

$$r_{1k} = Z_{1k} \cos\varphi_{1k} \text{ und } x_{1k} = Z_{1k} \sin\varphi_{1k}$$

so geht Gleichung 9) und 9 b) über in die Form

$$tg\,\Psi_e = \frac{-C_1 \sin\Psi_1 + \frac{C_2 \cdot Z_{1k}}{Z'_A} \sin\left[\varphi_{1k} - \Psi_2 - \varphi_A\right]}{C_1 \cos\Psi_1 + \frac{C_2 \cdot Z_{1k}}{Z'_A} \cos\left[\varphi_{1k} - \Psi_2 - \varphi_A\right]} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 9c)$$

welche für die Berechnung des Phasenwinkels Ψ_e in Abhängigkeit von Z'_A und φ_A wesentlich einfacher ist. Eine oberflächliche Prüfung der Gleichung 9 b) und 9 c) lässt nun erkennen, dass die Phasenverschiebung Ψ_e nicht nur von der Grösse der Belastung, sondern auch von der Phasenverschiebung φ_A im Belastungsstromkreis abhängt. Wie Gleichung 9 c) weiter zeigt, wird offenbar die Abhängigkeit von der Belastung am kleinsten, wenn die Phasenverschiebung φ_A einen ganz bestimmten Wert annimmt, nämlich wenn $\varphi_A = \varphi_{1k} - \Psi_2$ wird, da dann das zweite Glied also

$$\frac{C_2 \cdot Z_{1k}}{Z'_A} \sin\left[\varphi_{1k} - \Psi_2 - \varphi_A\right] = 0$$

wird. Da uns jedoch nicht nur allein die Grösse dieses Winkels interessiert, sondern vielmehr die Bedingungen, unter welchen die Phasenverschiebung Ψ_e verschwindet, so muss also zuerst untersucht werden, wann der Zähler der Gleichung 9 b) und 9 c) zu Null wird. Damit daher $tg\,\Psi_e = 0$ wird, so muss

$$C_{1\beta} + \frac{1}{Z'_A}\left\{ r_\alpha \cos\varphi_A + x_\alpha \sin\varphi_A \right\} = 0 \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10)$$

werden, woraus sich jetzt die Grösse φ_A für diese Bedingung ermitteln lässt. Berechnen wir z. B. hieraus $\sin\varphi_A$, so ergibt sich die quadratische Gleichung

$$Z^2_\alpha \sin^2\varphi_A + x_\alpha C_{1\beta} Z'_A \sin\varphi_A + C^2_{1\beta} Z'^2_A - r^2_\alpha = 0$$

und hieraus als Wurzel der Gleichung:

$$\sin\varphi_A = \frac{-x_\alpha C_{1\beta} Z'_A \pm r_\alpha \sqrt{Z^2_\alpha - C^2_{1\beta} Z'^2_A}}{Z^2_\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 10a)$$

Sieht man hierin vorerst von dem Einfluss der Grössen x_α, r_α und Z_α ab, so erkennt man, dass die Verschiebung φ_A um so mehr in diesem Falle von der Belastung abhängen muss, je grösser der Faktor $C_{1\beta}$ ist. Anderseits aber wird φ_A unabhängig von der Grösse der Belastung wenn $C_{1\beta} = 0$ wird.

In diesem letzteren Falle lauten dann die Bedingungen für $tg\,\Psi_e = 0$:

$$\left.\begin{aligned} C_{1\beta} &= 0 \\ \sin\varphi_A &= \pm\frac{r_\alpha}{Z_\alpha} \end{aligned}\right\} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 11)$$

Setzen wir weiter in der letzten Beziehung für Z_α und x_α die folgenden Werte ein:

$$r_\alpha = C_{2\beta}\, r_{1k} - C_{2\alpha}\, x_{1k} = C_2\, Z_{1k}\, sin\, [\Psi_2 - \varphi_{1k}] = -\, C_2\, Z_{1k}\, sin\, (\varphi_{1k} - \Psi_2)$$

$$x_\alpha = C_{2\alpha} \cdot r_{1k} + C_{2\beta}\, x_{1k} = C_2\, Z_{1k}\, cos\, (\varphi_{1k} - \Psi_2)$$

oder $Z_\alpha = \sqrt{r^2_\alpha + x^2_\alpha} = C_2 \cdot Z_{1k}$,

so geht sie über in die Form

$$sin\, \varphi_A = \mp\, sin\, (\varphi_{1k} - \Psi_2)$$

also

$$\varphi_A = \mp\, [\varphi_{1k} - \Psi_2] \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 11a)$$

Daraus geht hervor, dass die Phasenverschiebung φ_A im Belastungsstromkreis scheinbar zwei ganz bestimmte Werte annehmen kann, bei welchen die Phasenverschiebung Ψ_e zwischen den Spannungen P_1 und P'_2 verschwindet, bew. 180^0 wird, wenn wir dafür sorgen, dass $C_{1\beta} = 0$ wird. Der erste Wert $\varphi_A = (\varphi_{1k} - \Psi_2)$ entspricht dann einer kapazitiven Belastung und der zweite, $\varphi_A = \varphi_{1k} - \Psi_2$ einer induktiven Belastung. Wie jedoch eine nähere Prüfung zeigt, ist nur der letztere Wert, also $\varphi_A = \varphi_{1k} - \Psi_2$ möglich, da beim ersteren $\varphi_A = -\,(\varphi_{1k} - \Psi_2)$, also bei kapazitiver Belastung, Bedingungen zu erfüllen sind, die sich praktisch mit den Dimensionen der Wicklungen nicht mehr in Einklang bringen lassen. Eine einfache Ueberlegung zeigt nämlich schon, dass in diesem Falle der Winkel $\varphi_{1k} - \Psi_2$ entweder Null oder 90^0 werden müsste, was ja beides unter normalen Verhältnissen nicht möglich ist.

Für möglichst kleine Phasenfehler kommt also bloss induktive Belastung in Frage, jedoch spielt auch die kapazitive Belastung eine wesentliche Rolle bei der Festlegung der grösstmöglichen Sekundärleistung, wie weiter unten gezeigt werden soll.

Aus diesen Betrachtungen können wir also wertvolle Schlüsse für die Konstruktion und Berechnung von Spannungswandlern ziehen, da die Bedingungen der Gleichung 11) aussagen, dass es immer möglich ist die Wicklungsverhältnisse so zu wählen, dass bei einer bestimmten Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis der Phasenfehler verschwindet und zudem unabhändig von der Grösse der Belastung wird.

Diese Beziehungen, Gleichung 11) sind daher für die Berechnung derartiger Apparate von ausserordentlicher praktischer Bedeutung, da uns hierdurch ein Mittel gegeben ist, schon bei der Berechnung solche Dimensionen der Wicklungen festzulegen, bei welchen eben der Phasenfehler noch in zulässigen Grenzen bleibt. Da ausserdem die Anschlussapparate, welche Sekundär an die Spannungswandler angeschlossen werden, im allgemeinen bei einem konstanten Phasenwinkel φ_A arbeiten, so lassen sich auch die Wicklungen, insbesondere die Verschiebung φ_{1k} etwas darnach abstimmen, wie später gezeigt werden soll, sodass also eine vielseitige Anpassungsmöglichkeit besteht, wenn wir die Bedingungen der Gleichung 11) sinngemäss anwenden.

Aus den Gleichungen 9 nnd 9 c) geht daher weiter noch hervor, dass der Phasenfehler nicht bei allen Belastungen und Belastungsarten verschwindend klein sein kann, wie bisher allgemein angenommen wurde, sondern dass dies nur bei einer ganz bestimmten Belastungsart zutrifft.

Wohl weist die Literatur experimentelle Untersuchungen auf, die geneigt sind, das Gegenteil zu beweisen, jedoch ist dabei zu beachten, dass einmal die zu Gebote stehenden Untersuchungsmethoden nicht vollkommen einwandfrei sind und vor allem solche Spannungswandler meistens nur bei einem Belastungszustand untersucht werden, der im allgemeinen sowieso nur kleine Phasenfehler liefert, nämlich bei schwach induktiver Belastung.

Ziehen wir hier z. B. nur einmal die Nebenschlusskreise der Ferrariszähler in Betracht, die ja bekanntlich die grösste Zahl der Anschlussapparate für Spannungswandler stellen und bedenken, dass diese Apparate durchschnittlich nur einen Leistungsfaktor von 0,35 bis 0,4 im Spannungskreis besitzen, so wird es ohne weiteres einleuchten, dass der Spannungswandler beim Prüfen, wo ja fast ausschliesslich nur Ohm'sche Belastung in Frage kommt, wesentlich andere Phasenfehler zeigen wird, als wenn er an stark induktive Belastung angeschlossen wird. Hier liegt eben gerade der springende Punkt, dass Spannungswandler von der Art der Belastung viel stärker abhängig sind, wie bisher allgemein angenommen

wurde und daher die Phasenfehler bei der Berechnung derartiger Apparate nicht ohne weiteres vernachlässigt werden dürfen, sondern schon bei der Dimensionierung der Wicklungen darauf Rücksicht genommen werden muss.

Es sind dem Verfasser verschiedene Fälle bekannt, wobei gerade die sehr hohe induktive Sekundärbelastung ganz beträchtliche Fehler hervorrief. So z. B. zeigte ein Spannungswandler bei Leerlauf und voller, aber induktionsfreier Belastung ein Uebersetzungsverhältnis, das vollkommen den normalen Garantien entsprach und auch die Fehler des Zählers erwiesen sich beim Nachprüfen als vollkommen normal und zulässig und trotzdem zeigte der Zähler mit dem Spannungswandler zusammen Fehler bis zu 10% und mehr. Es konnte also hier, da eine falsche Schaltung oder eine Beeinflussung des Zählers durch den Spannungswandler vollkommen ausgeschlossen war, die Ursache dieser ausserordentlich hohen Fehler nur in der grossen Phasenverschiebung im Zählernebenschlusskreis gesucht werden, die eben einen sehr grossen Phasenfehler im Spannungswandler verursachte. Diese Ansicht steht durchaus im Einklang mit der Theorie, da, wie weiter unten gezeigt werden soll, ein beinahe konstantes Uebersetzungsverhältnis einen grossen Phasenfehler zur Folge haben kann und umgekehrt.

Wie sich nun praktisch die Forderungen der Gleichung 11) sinngemäss anwenden lassen, soll weiter unten bei der zahlenmässigen Berechnung von Spannungswandlern gezeigt werden, da uns vorerst hier noch andere Eigenschaften interessieren.

Wie bei dem obigen Beispiel gezeigt wurde, kann einem konstanten Uebersetzungsverhältnis ein verhältnismässig grosser Phasenfehler entsprechen und soll deshalb im folgenden auch das Verhalten des absoluten Uebersetzungsfaktors untersucht werden.

Nach Gleichung 4) war der absolute Uebersetzungsfaktor

$$p_e = \frac{P_1}{P'_2} = \sqrt{a_1^2 + b^2}$$

worin a_1 und b die Akürzungen der Gleichung 2 a) bedeuten.

In erster Linie wird uns hierbei die Abhängigkeit vom Phasenwinkel Ψ_e interessieren, die sich leicht zum Ausdruck bringen lässt, wenn wir nach Gleichung 3) den Faktor b durch $b = a_1 \, tg \, \Psi_e$ ausdrücken. Dann geht Gleichung 4) über in die Beziehung

$$p_e = a_1 \sqrt{1 + tg^2 \, \Psi_e} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12)$$

Daraus ist ersichtlich, dass der absolute Uebersetzungsfaktor um so grösser werden muss, je grösser die Phasenverschiebung Ψ_e zwischen den Spannungen P_1 und P'_2 wird, wenn wir vorerst vom Einfluss der Phasenverschiebung φ_A im Belastungsstromkreis absehen. Darnach wäre also der oben erwähnte Fall im Widerspruch mit der Theorie, jedoch trifft dies nur scheinbar zu, da wir vorerst von der Phasenverschiebung φ_A im Belastungsstromkreis abgesehen haben und diese die ganzen Verhältnisse wesentlich beeinflusst.

Untersuchen wir nun wiederum zuerst den Fall, bei welchem der Phasenfehler verschwindet, so geht Gleichung 12) über in die Form:

$$\left.\begin{aligned} tg \, \Psi_e &= 0 \\ p_e = a_1 &= C_{1\alpha} + C_{2\alpha} \, g'_A \, r_{1k} - C_{2\beta} \, b'_A \, r_{1k} + C_{2\beta} \, g'_A \, x_{1k} + C_{2\alpha} \, b'_A \, x_{1k} \end{aligned}\right\} \quad . \quad . \quad 12\,a)$$

oder indem wir wiederum diese Beziehung als Funktion der Phasenverschiebung φ_A ausdrücken unter Zuhilfenahme der Abkürzungen der Gleichung 9 a), so wird dann, wenn $tg \, \Psi_e = 0$ ist

$$p_e = C_{1\alpha} - \frac{r_\alpha}{Z'_A} \sin \varphi_A + \frac{x_\alpha}{Z'_A} \cos \varphi_A \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 12\,b)$$

Da jedoch wie oben gezeigt wurde, die Phasenverschiebung Ψ_e nur für einen ganz bestimmten Wert von φ_A Null werden kann, so geht Gleichung 12 b) in die folgende Form über, wenn wir ausserdem für x_α und r_α die Werte

$$r_\alpha = - C_2 \, Z_{1k} \sin (\varphi_{1k} - \Psi_2), \; x_\alpha = C_2 \, Z_{1k} \cos (\varphi_{1k} - \Psi_2) \text{ und } \varphi_A = (\varphi_{1k} - \varphi_2)$$

einsetzen wie früher:

$$p_e = C_{1a} + \frac{C_2 \cdot Z_{1k}}{Z'_A} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 13)$$

d. h. in diesem Falle, wenn $C_{1\beta} = 0$ *und* $tg\, \Psi_e = 0$ *ist, hängt der absolute Uebersetzungsfaktor nur noch von dem Verhältnis* $\frac{Z_{1k}}{Z'_A}$ *ab und nimmt mit zunehmender Belastung rasch zu und zwar ist diese Zunahme um so grösser, je grösser die Kurzschlussimpedanz des Transformators ist, da bei einem an eine konstante Spannung angeschlossenen Spannungswandler die Faktoren* C_{1a} *und* C_2 *konstant sind.*

Damit daher wie bei dem vorher erwähnten Beispiel der Uebersetzungsfaktor annähernd konstant bei Leerlauf und Belastung bleibt, muss also die Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis und damit der Phasenfehler sich ändern.

Daraus geht aber hervor, dass der Phasenfehler und der Uebersetzungsfaktor in einem bestimmten Gegensatz zu einander stehen, d. h. dass immer einem minimalen Phasenfehler ein maximaler Uebersetzungsfaktor in Abhängigkeit der Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis entsprechen muss.

Um dies zu zeigen, gehen wir von Gleichung 4) aus, $p_e = \sqrt{a_1^2 + b^2}$, welche für alle Phasenverhältnisse Gültigkeit besitzt und drücken darin die Faktoren a_1 und b wie oben als Funktion der Grössen C_1, C_2, Z_{1k}, Z'_A und φ_A aus, so wird

$$\left.\begin{aligned} a_1 &= C_{1a} - \frac{r_a}{Z'_A} \sin \varphi_A + \frac{x_a}{Z'_A} \cos \varphi_A = C_1 \cos \Psi_1 + C_2 \frac{Z_{1k}}{Z'_A} \cos [\varphi_{1k} - \Psi_2 - \varphi_A] \\ b &= -[C_{1\beta} + \frac{r_a}{Z'_A} \cos \varphi_A + \frac{x_a}{Z'_A} \sin \varphi_A] = -C_1 \sin \Psi_1 + C_2 \frac{Z_{1k}}{Z'_A} \sin [\varphi_{1k} - \Psi_2 - \varphi_A \end{aligned}\right\} \quad 14\,a)$$

oder indem wir schliesslich noch diese Beziehungen in die Gleichung für den Uebersetzungsfaktor einsetzen wird nach einiger Umrechnung

$$p_e = \sqrt{C_1^2 + C_2^2 \frac{Z_{1k}^2}{Z'^2_A} + 2\, C_1\, C_2 \frac{Z_{1k}}{Z'_A} \cos [\Psi_1 - \Psi_2 - \varphi_A + \varphi_{1k}]} \quad . \quad . \quad 14)$$

Wie hieraus hervorgeht, ist der Uebersetzungsfaktor in der Hauptsache von dem Verhältnis $\frac{Z_{1k}}{Z'_A}$ und von der Grösse der Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis abhängig und zwar nimmt dieser wiederum mit zunehmender Belastung verhältnismässig rasch zu. Bezüglich der Abhängigkeit vom Phasenwinkel φ_A lässt diese Beziehung weiter erkennen, dass bei konstanter Belastung p_e ein Maximum wird, wenn $\Psi_1 - {}_2\Psi - \varphi_A + \varphi_{1k} = 0$ und ein Minimum, wenn $\Psi_1 - \Psi_2 - \varphi_A + \varphi_{1k} = 180^0$ ist. Der erstere Fall entspricht dann einer induktiven und der zweite einer kapazitiven Belastung, wobei jedoch praktisch in der Regel nur der erste Fall, also induktive Belastung in Frage kommt. Hierbei tritt dann, wie oben gezeigt wurde, für die Phasenverschiebung Ψ_e ein Minimum ein, d. h. $tg\, \Psi_e$ wird in diesem Falle Null.

Wenn also beim Nachprüfen eines Spannungswandlers das Uebersetzungsverhältnis bei Leerlauf und Vollbelastung nicht allzustark variiert, so kann immer mit ziemlich grosser Sicherheit darauf geschlossen werden, dass dabei der Phasenfehler ganz erhebliche Werte annimmt, wie übrigens später an Beispielen gezeigt werden soll.

Eine weitere Eigenschaft des Spannungswandlers, die bisher meist nur in Preislisten zu Propagandazwecken erwähnt wurde, jedoch auch einiges praktisches Interesse besitzt, ist die maximal mögliche Leistung, welche an den Sekundärklemmen abgegeben werden kann und die dabei auftretenden Uebersetzungs- und Phasenfehler.

Es soll hier zum vornherein erwähnt werden, dass man wohl nie in die Lage kommen wird, einen Spannungswandler bis an die äusserste Grenze zu beanspruchen, da einesteils die Fehler zu gross und anderenteils solche Apparate schon vorher verbrennen würden, da der ausserordentlich starke Konkurrenzkampf und der daraus resultierende niedrige Verkaufs-

preis solcher Apparate schon dafür sorgt, dass diese nicht allzukräftig gebaut werden. Nichtsdestoweniger aber sind diese Eigenschaften doch für den Konstrukteur sehr wertvoll, da er sich hieraus ein Bild über das allgemeine Verhalten und über die Frage der günstigsten Materialausnützung machen kann.

Wir kehren nun wiederum einen Augenblick zur symbolischen Darstellungsweise zurück und legen den folgenden Betrachtungen die erste der Grundgleichungen zu Grunde, welche lautet:

$$\mathfrak{P}_1 = \mathfrak{C}_1 \mathfrak{P}'_2 + \mathfrak{C}_2 \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k}$$

Soll nun für eine konstante Primärspannung P_1 und eine gegebene Belastungsart die grösste Leistung ermittelt werden, welche an den Sekundärklemmen eines Spannungswandlers abgegeben werden kann, so zeigt eine nähere Prüfung, dass diese begrenzt ist und trotz zunehmendem Sekundärstrom wieder abnimmt, da die Sekundärspannung P_2 schneller abnimmt als $\mathfrak{J}_2$ zunimmt. Diese abgegebene Leistung wird daher ein Maximum werden, wenn der Spannungsabfall $I'_2 Z_{1k}$ im Spannungswandler selbst gleich der Spannung $\frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{C}_2} \mathfrak{P}'_2$ wird.

Gehen wir von der Spannungsgleichung

$$\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{C}_2} = \frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{C}_2} \mathfrak{P}'_2 + \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k} = \frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{C}_2} \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}'_A + \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k}$$

aus, so folgt daraus, dass die abgegebene Sekundärleistung

$$W_2 = P_2 I_2 \cos \varphi_A \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

bei konstantem φ_A gleichzeitig mit dem Produkt der beiden Beträge $\frac{C_1}{C_2} \mathfrak{J}_2 Z'_A$ und $I'_2 Z_{1k}$ ein Maximum wird. Da diese beiden Vektoren die konstante Summe $\frac{\mathfrak{P}_1}{\mathfrak{C}_2}$ besitzen, so ist das Produkt ihrer Beträge ein Maximum, wenn beide gleich sind.

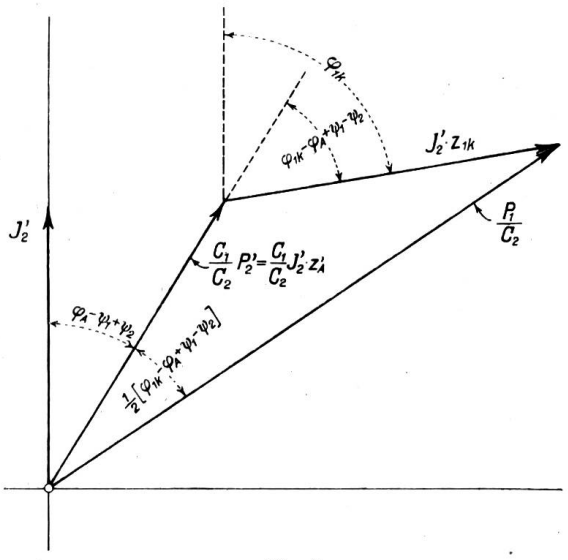

Fig. 9.
Potentialdiagramm für die maximal mögliche Sekundärleistung.

Die Bedingungen für eine maximale Sekundärleistung lauten daher:

$$\left.\begin{array}{l} \frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{C}_2} \mathfrak{P}'_2 = \mathfrak{J}'_2 \mathfrak{z}_{1k} \\ \text{oder} \quad \frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{C}_2} \mathfrak{z}'_A = \mathfrak{z}_{1k} \end{array}\right\} \quad . \quad . \quad 15\,a)$$

In diesem Falle wird dann der Sekundärstrom

$$\mathfrak{J}'_2 = \frac{\frac{1}{\mathfrak{C}_2} \cdot \mathfrak{P}_1}{\frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{C}_2} \mathfrak{z}'_A + \mathfrak{z}_{1k}} \quad . \quad . \quad . \quad 15\,b)$$

In Fig. 9 ist das Diagramm für diesen Fall dargestellt. Wie daraus hervorgeht, schliessen die Vektoren $\mathfrak{z}_{1k}$ und $\frac{\mathfrak{C}_1}{\mathfrak{C}_2} \mathfrak{z}'_A$ miteinander den Winkel $\varphi_{1k} - \varphi_A + \psi_1 - \psi_2$ ein und da diese Vektoren einander gleich sind, so ergibt sich weiter:

$$\frac{P_1}{C_2} = 2 I'_2 Z_{1k} \cos {}^1/_2 [\varphi_{1k} - \varphi_A + \psi_1 - \psi_2]$$

oder indem wir den reduzierten Sekundärstrom nun im Sekundärsystem selber ausdrücken, wird dann:

$$I_2 = \frac{P_1}{2\,\frac{w_2}{w_1}\,Z_{1k}\,C_2\,\cos\,{}^1/_2\,[\varphi_{1k} - \varphi_A + \Psi_1 - \Psi_2]} \quad \ldots\ldots 16)$$

Setzen wir schliesslich diesen Wert noch in die Gleichung der Sekundärleistung ein, so ist jetzt

$$W_{2\,max} = \mathfrak{J}_2^2\,Z_A\,\cos\varphi_A = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^2 \frac{C_2}{C_1}\,Z_{1k}\,\mathfrak{J}_2^2\,\cos\varphi_A$$

$$= \frac{P_1^2 \cdot \cos\varphi_A}{2\,C_1\,C_2\,Z_{1k}\,[1 + \cos\,(\varphi_{1k} - \varphi_A + \Psi_1 - \Psi_2)]} \quad \ldots\ldots\ldots 17)$$

Hieraus geht hervor, dass die maximale Sekundärleistung in erster Linie von der Grösse der Kurzschlussimpedanz und in zweiter Linie von der Art und Grösse der Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis abhängt. Diese Beziehung lässt nun auch erkennen, dass die maximale Sekundärleistung in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis ein typisches Maximum aufweisen muss, dass dieses jedoch keineswegs dann auftritt, wenn $tg\,\Psi_e = 0$ ist, sondern wenn $tg\,\Psi_e$ ein Maximum wird.

Um dies zu zeigen, differentieren wir Gleich. 17) nach φ_A und erhalten die Bedingung

$$-\,[1 + \cos\,(\varphi_{1k} - \varphi_A + \Psi_1 - \Psi_2)]\,\sin\varphi_A - \cos\varphi_A\,\sin\,(\varphi_{1k} - \varphi_A + \Psi_1 - \Psi_2) = 0$$

oder

$$-\,\varphi_A = \varphi_{1k} + \Psi_1 - \Psi_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 17a)$$

d. h. das Maximum der Sekundärleistung tritt nicht bei induktiver sondern bei kapazitiver Belastung auf und kommt also praktisch für Spannungswandler nicht in Frage, da wir es hierbei immer mit induktiver Belastung zu tun haben.

Vergleichen wir schliesslich noch diese Bedingung Gleich. 17a) mit der Gleich. 11a), so geht hervor, dass wenn $C_{1\beta} = 0$ also auch $\Psi_1 = 0$ ist, diese beiden Bedingungen identisch sind und daher in Gleich. 11 a) für den kleinsten Phasenfehler nur der positive Wert in Frage kommen kann.

Da uns weiter noch die Grösse des absoluten Uebersetzungsfaktor und die Grösse des Phasenfehlers bei dieser grössten Leistung interessiert, so ergibt sich der erstere aus Gleichung 16) zu

$$\frac{P_1}{P'_2} = p_e = 2\,C_1\,\cos\,{}^1/_2\,[\varphi_{1k} - \varphi_A + \Psi_1 - \Psi_2] \quad \ldots\ldots 18)$$

und ebenso die Phasenverschiebung Ψ_e zwischen den Spannungen P_1 und P'_2 zu

$$\Psi_{e_{W\,max}} = \frac{1}{2}\,[\varphi_{1k} - \varphi_A + \Psi_1 - \Psi_2] \quad \ldots\ldots\ldots 18a)$$

In diesem Falle tritt also der grösste Uebersetzungsfaktor auf, wenn $\varphi_{1k} - \varphi_A + \Psi_1 - \Psi_2 = 0$ ist, wobei dann der Phasenfehler ein Minimum d. h. Null wird.

Wie daher aus diesen Betrachtungen hervorgeht, ist es gar nicht gleichgültig, bei welcher Phasenverschiebung der Spannungswandler arbeitet, da je nach der Grösse von φ_A mehr oder weniger grosse Uebersetzungs- und Phasenfehler auftreten.

In den meisten praktischen Fällen wird nun nicht nach der grösstmöglichen Leistung gefragt, die der Spannungswandler theoretisch zu leisten im Stande wäre, sondern man will vielmehr wissen, welche Leistung derselbe ohne Schaden vertragen kann und wie gross dabei die auftretenden Fehler sind.

Um dies voraus berechnen zu können, muss von der zulässigen Beanspruchung der Wicklungen ausgegangen werden und für dieselben die auftretenden Uebersetzungsfehler und Phasenfehler bestimmt werden, wie dies mit Hülfe der Gleichung 9 c) und 14) ge-

schehen kann. Die zugehörige Sekundärleistung in Abhängigkeit des Uebersetzungsfehlers ergibt sich dann aus der Beziehung

$$W_2 = \frac{P_1^2 \cos \varphi_A}{\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 Z_A p_e^2} = \frac{P_1^2 \cos \varphi_A}{Z'_A p_e^2} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 19)$$

Mit diesen abgeleiteten Beziehungen kann nun für alle Fälle das Verhalten eines Spannungswandlers einwandfrei vorausberechnet werden, sodass wir nun in der Lage sind, schon vor seiner Ausführung prüfen zu können, ob er tatsächlich den praktischen Anforderungen genügt. Wie jedoch alle diese Beziehungen zeigen, ist dies streng nur durchführbar, wenn eben die Dimensionen des Spannungswandlers bereits festgelegt sind. Für die Technik ist deshalb dieses Nachrechnen etwas zu umständlich, wenn nach jeder Aenderung der Dimensionen diese Rechnung wiederholt werden soll.

Es soll deshalb im folgenden versucht werden noch gewisse Richtlinien aufzustellen, nach welchen die günstigsten Dimensionen vor einer vollständigen Nachrechnung festgelegt werden können, sodass die Vorausberechnung wesentlich erleichtert wird.

Wie bereits früher erwähnt wurde, arbeiten solche Spannungswandler bei einer verhältnismässig kleinen Belastung, sodass in erster Linie darauf gesehen werden muss, dass bei diesen Belastungen der Phasenfehler verschwindet oder möglichst klein wird.

Wie die Bedingungen der Gleichung 11) zeigen ist dies der Fall, wenn der Faktor $C_{1\beta} = 0$ wird, wenn wir vorerst von der Grösse der Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis absehen.

Nach Gleichung 6 a) kann aber $C_{1\beta}$ ausgedrückt werden durch die Beziehung

$$C_{1\beta} = b_a r_1 - g_a x_1$$

worin alle Dimensienen der Primärwicklung und des Eisenkörpers enthalten sind.

Soll daher bei Leerlauf und kleinen Belastungen der Phasenfehler verschwinden bezw. möglichst klein werden, so muss ohne Rücksicht auf die Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis die Bedingung für die Primärwicklung gelten.

$$b_a r_1 - g_a x_1 = 0 \text{ oder } \frac{b_a}{g_a} = \frac{x_1}{r_1} \quad \ldots\ldots\ldots \quad 20)$$

Wie bereits in der Arbeit über Stromwandler [10]) gezeigt wurde, ist das Verhältnis $\frac{b_a}{g_a}$ nur von der Periodenzahl, der Grösse der gewählten Eisenbeanspruchung und der Qualität des verwendeten Eisenbleches abhängig, jedoch das Verhältnis $\frac{x_1}{r_1}$ von den Dimensionen und der Anordnung der Primärwicklung, auch wenn die Windungszahl bereits durch die gewählte Eisenbeanspruchung festgelegt ist. Es genügt also nicht allein die Festlegung der Windungszahl aus dem Eisenquerschnitt, der Eisenbeanspruchung und der Netzspannung, sondern es muss vielmehr noch nachgerechnet werden, ob für die gewählte Wicklungsanordnung und den gewählten Drahtquerschnitt das Verhältnis aus Reaktanz und Widerstand dem Verhältnis $\frac{b_a}{g_a}$ genügt. Ist dies der Fall, so wird wenigstens der Spannungswandler bei Leerlauf und kleinen Belastungen praktisch phasenfehlerfrei arbeiten.

Soll nun der Spannungswandler bei einer konstanten grossen Belastung phasenfehlerfrei arbeiten, so muss auch die Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis in Betracht gezogen werden, da nach den Bedingungen der Gleichung 11) der Phasenfehler nur bei einer ganz bestimmten Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis verschwinden kann.

Für kleine induktive Phasenverschiebungen und ebenso für kapazitive Belastung muss dann die Bedingung gelten:

[10]) Siehe Bulletin des S. E. V. Heft 11. 1913.

$$\frac{b_a}{g_a} > \frac{x_1}{r_1} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 20a)$$

wobei sich dann der Grössenunterschied zwischen beiden Verhältnissen nach der Grösse der Belastung und der Belastungsart zu richten hat und für alle Spannungswandlertypen ein für alle Male festgelegt werden kann. Für grosse Phasenverschiebungen im Belastungsstromkreis ist jedoch eine Nachrechnung von Fall zu Fall unerlässlich

In demselben Masse wie die Primärwicklung, nimmt nun auch die Sekundärwicklung an den Vorgängen beim Spannungswandler Anteil und macht sich ebenso wie jene, sowohl beim Phasenfehler als auch beim Uebersetzungsfehler bemerkbar, jedoch ist hierbei ihr Einfluss um so kleiner, je kleiner die Belastung ist.

Um auch für die Sekundärwicklung Richtlinien für die Vorausberechnung aufstellen zu können, gehen wir am zwekmässigsten von der gesamten Kurzschlussimpedanz Z_{1k} aus, die nach Gleichung 8 a) und 8 b) bestimmt ist durch die Beziehungen:

$$r_{1k} = r_1 + \frac{r'_2 C_{2\alpha} - x'_2 C_{2\beta}}{C_2^2} \text{ und } x_{1k} = x_1 + \frac{r'_2 C_{2\beta} + x'_2 C_{2\alpha}}{C_2^2}$$

Wie hieraus hervorgeht, wird offenbar die gesamte Kurzschlussimpedanz am kleinsten, wenn $C_{2\beta} = 0$ wird, denn wenn $C_{2\beta}$ grösser oder kleiner als Null ist, so nimmt in demselben Masse wie $C_{2\beta}$ auch der Widerstand r'_2 zu oder ab, da bei konstanter Eisenbeanspruchung und konstantem Eisenquerschnitt x'_2 eine wenig veränderliche Grösse darstellt, also $C_{2\beta}$ nur mit Hülfe des Wiederstandes r'_2 verändert werden kann.

Ohne Rücksicht auf die Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis muss daher der Einfluss der Belastung auf die Fehler des Spannungswandlers am kleinsten sein, wenn die gesamte Kurzschlussimpedanz in Abhängigkeit der Sekundärwicklung am kleinsten wird und dies ist annähernd der Fall, wenn $C_{2\beta} = 0$ ist.

Da nach Gleich. 7a) für $C_{2\beta}$ die Beziehung besteht:

$$C_{2\beta} = b_a r'_2 - g_a x_2'$$

so lautet die Bedingung für die Sekundärwicklung, damit möglichst kleine Fehler auftreten

$$C_{2\beta} = 0 = b_a r'_2 - g_a x_2' \text{ oder } \frac{b_a}{g_a} = \frac{x_2'}{r'_2} \quad \ldots\ldots \quad 21)$$

wenn wir vom Einfluss der Phasenverschiebung im Belastungsstromkreis absehen. Die Sekundärwicklung muss also in diesem Falle der gleichen Bedingung genügen, wie die Primärwicklung.

Ziehen wir schliesslich noch die Phasenverschiebung φ_A im Belastungsstromkreis in Betracht, so ergibt sich hier, dass $C_{2\beta}$ für grosse Phasenverschiebungen positiv und für kleine und kapazitive Belastungen negativ werden muss, also

$$\frac{b_a}{g_a} \gtrless \frac{x_2'}{r'_2} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 21a)$$

Hierbei hat sich dann der Grössenunterschied ebenso wie bei der Primärwicklung, nach der Grösse und Art der Belastung zu richten und kann am besten durch Aenderung des Sekundärwiderstandes r'_2 reguliert werden.

Damit sind nun die Hauptbedingungen für ein möglichst fehlerfreies Arbeiten des Spannungswandlers festgelegt und fehlen uns nur noch die Beziehungen dieser Faktoren zu den Abmessungen des Spannungswandlers, die im folgenden noch aufgestellt werden sollen.

(Schluss folgt in No. 8.)