

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins
Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke
Band: 5 (1914)
Heft: 10

Artikel: Theorie und Berechnung der Spannungswandler [Fortsetzung und Schluss]
Autor: Wirz, Emil
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1059677>

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: 03.04.2026

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

SCHWEIZ. ELEKTROTECHNISCHER VEREIN

BULLETIN

ASSOCIATION SUISSE DES ÉLECTRICIENS

Erscheint monatlich mit den Jahres-Beilagen „Statistik der Starkstromanlagen der Schweiz“ sowie „Jahresheft“ und wird unter Mitwirkung einer vom Vorstand des S. E. V. ernannten Redaktionskommission herausgegeben.

Alle den Inhalt des „Bulletin“ betreffenden Zuschriften sind zu richten an das

Generalsekretariat

des Schweiz. Elektrotechnischen Vereins,
Neumühlequai 12, Zürich 1 - Telephon 9571

Alle Zuschriften betreffend Abonnement, Expedition und Inserate sind zu richten an den

Verlag: Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei
A.-G., Zürich

Bahnhofstrasse 61, Zürich I (Telephon 6741)

Publié sous la direction d'une Commission de Rédaction nommée par le Comité de l'A. S. E.

Ce bulletin paraît mensuellement et comporte comme annexes annuelles la „Statistique des installations électriques à fort courant de la Suisse“, ainsi que l'„Annuaire“.

Prière d'adresser toutes les communications concernant la matière du „Bulletin“ au

Secrétariat général

de l'Association Suisse des Electriciens
Neumühlequai 12, Zurich 1 - Téléphone 9571

Toutes les correspondances concernant les abonnements, l'expédition et les annonces, doivent être adressées à l'éditeur:

Fachschriften-Verlag & Buchdruckerei S. A.
Zurich

Bahnhofstrasse 61, Zurich I (Téléphone 6741)

Abonnementspreis
für Nichtmitglieder inklusive Jahresheft und Statistik:
Schweiz Fr. 15.—, Ausland Fr. 25.—.
Einzelne Nummern vom Verlage Fr. 1.50 plus Porto.

Prix de l'abonnement annuel (gratuit pour les membres de l'A. S. E.), y compris l'Annuaire et la Statistique, Fr. 15.— pour la Suisse, Fr. 25.— pour l'étranger.
L'éditeur fournit des numéros isolés à Fr. 1.50, port en plus.

V. Jahrgang
V^e Année

Bulletin No. 10

Oktober
Octobre 1914

Theorie und Berechnung der Spannungswandler.

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

(Fortsetzung und Schluss.)

4. Berechnungsbeispiel.

Es soll ein transportabler Präzisionsspannungswandler für die Spannungen 16000/8000 Volt Primär und 100 Volt Sekundär bei einer Frequenz von 40—60 Perioden berechnet werden. Gewünscht wird primäre Umschaltbarkeit der beiden Spannungen 16000 und 8000 Volt.

Bei einer Energieentnahme von 100 Watt sekundär muss folgende Fehlergrenze garantiert werden: Bei 50 Perioden und den primären Spannungen 16000 und 8000 Volt 0,5% Abweichung im Uebersetzungsverhältnis bei vernachlässigbar kleiner Phasenabweichung zwischen den Spannungen. Bei allen übrigen Periodenzahlen und Spannungen darf der Fehler nirgends grösser als 1% werden. Die zulässige Energieentnahme soll im Minimum 400 Watt bei einem maximalen Fehler von 4% bei $\cos \varphi = 1$ und 50 Perioden betragen.

Der Eigenverbrauch bei Leerlauf darf bei keiner Periodenzahl von 40—60 grösser als 20 Watt sein. Der Spannungswandler soll ferner leicht transportabel und in Isoliermasse eingebettet sein und ohne Schaden zu nehmen dauernd um 25% höhere Betriebsspannungen vertragen können.

Festlegung der Hauptabmessungen und Berechnung der Fehler.

Zur Bestimmung der Hauptabmessungen wird am zweckmässigsten von der maximalen Belastung von 400 Watt ausgegangen. Da der Spannungswandler für verschiedene Frequenzen

bestimmt ist, wird man die Abmessungen für eine mittlere Frequenz von 50 Perioden festlegen, besonders, da dieselbe am meisten gebräuchlich ist.

In erster Linie müssen die Ströme bzw. die kleinsten zulässigen Drahtstärken der Wicklungen festgelegt werden. Da der Spannungswandler mit Masseisolation ausgeführt werden soll, ist auf eine möglichst geringe Erwärmung aller einzelnen Teile Rücksicht zu nehmen, da eine allzu starke Erwärmung die Masseisolation gefährden würde. Da der Spannungswandler nur in seltenen Fällen mit 400 Watt belastet wird, nehmen wir für diese Belastung eine Stromdichte von $s = 1$ Amp./mm² für beide Wicklungen an. Bei einem maximalen Eigenverbrauch von 20 Watt und einer Belastung von 400 Watt ist dann der Primärstrom angenähert

$$I_1 \cong \frac{20 + 400}{16000} = \frac{420}{16000} \cong 0,0262 \text{ Ampère}$$

und der Sekundärstrom

$$I_2 = \frac{400}{100} \cong 4,0 \text{ Ampère.}$$

Hieraus ergeben sich mit der Stromdichte $s = 1$ Amp./mm² die Drahtquerschnitte der Wicklungen

$$q_1 \cong \frac{I_1}{s} = \frac{0,0262}{1} = 0,0262 \text{ mm}^2$$

$$\text{und } q_2 \cong \frac{I_2}{s} = \frac{4,0}{1} = 4,0 \text{ mm}^2.$$

Die Drahtstärken sind daher

$$d_1 \cong \sqrt{\frac{4}{\pi} q_1} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0262}{\pi}} = 0,182 \text{ mm}$$

$$d_2 \cong \sqrt{\frac{4}{\pi} q_2} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,0}{\pi}} = 2,26 \text{ mm.}$$

Wir runden diese Werte auf und nehmen die Drahtstärken $d_1 = 0,2$ mm und $d_2 = 2,5$ mm entsprechend den Querschnitten $q_1 = 0,0314$ mm²; $q_2 = 4,91$ mm² an. Die Bestimmung des nötigen Eisenquerschnittes geschieht mit Hilfe der Beziehung der Gleich. 26). Hierin muss zuerst noch die Wahl der Eisenbeanspruchung und des Verhältnisses $\frac{G_{ei}}{G_{kl}} \cdot \frac{I_{m1}}{I_{ei}}$ getroffen werden.

Für die Wahl der Induktion sind zwei Gesichtspunkte massgebend, nämlich die Grösse der Leerlaufverluste und die veränderliche Periodenzahl. Mit abnehmender Periodenzahl nehmen zwar die Verluste ab, dafür steigen aber die Induktion und damit die Fehler bei gleichbleibender Windungszahl. Andererseits würde eine hohe Induktion weniger Kupfer erfordern und damit geringeren Spannungsabfall ergeben, jedoch werden dabei die Eisenverluste grösser.

Wir wählen deshalb als Mittelwert eine Induktion von $B = 8000$.

Wir wählen ferner eine rechteckige Spulenform und nehmen für das Verhältnis $\frac{G_{ei}}{G_{kl}} \cdot \frac{I_{m1}}{I_{ei}}$ den Wert 1,6 an, da der Spannungswandler verhältnismässig grosse Leistungen Sekundär abzugeben hat.

Dann ist nach Gleich. 26) der nötige Eisenquerschnitt

$$q_{ei} = 0,505 \sqrt{\frac{16000 \cdot 0,0314}{50 \cdot 8000} \cdot 1,6 \cdot 10^6} = 0,505 \sqrt{0,20096 \cdot 10^4} = 22,65 \text{ cm}^2.$$

Wir wählen nun die Schmalseite des Querschnittes halb so lang als die Breitseite. Ist A die Länge der Schmalseite, so ist $A = \frac{B}{2}$ oder $A^2 = q_{ei}$ und $A \cong \frac{\sqrt{q_{ei}}}{1,4 \text{ bis } 1,5}$.

Mit 1,4 ist sodann $A = \frac{\sqrt{22,65}}{1,4} \cong 3,4$ cm und $B = 2 \cdot 3,4 = 6,8$ cm.

Damit ergibt sich der **Brutto-Eisenquerschnitt** zu

$$q_{ei} = 3,4 \cdot 6,8 = 23,12 \text{ cm}^2 \text{ oder rund } 23 \text{ cm}^2.$$

Rechnen wir mit einem Eisenverlust von 7% für die Papierisolation und die Zwischenräume infolge Gratbildung zwischen den Blechen, so ergibt sich für die Berechnung des Eisengewichtes ein **Netto-Querschnitt** von

$$q_{ei} = 23,1 \cdot 0,93 \cong 21,5 \text{ cm}^2.$$

Zur Festlegung der übrigen Eisenabmessungen müssen nun zuerst die Dimensionen der Wicklungen bekannt sein. Da dieselben aber erst genau bestimmt werden können nachdem die mittlere Kraftlinienlänge bekannt ist, so müssen diese vorerst schätzungsweise festgelegt werden. Eine eventuelle Aenderung der Abmessungen lässt sich dann später noch leicht vornehmen.

Da der Spannungswandler transportabel ist und einen verhältnismässig kleinen Leerlaufverlust besitzen soll, so muss in erster Linie auf ein möglichst geringes Gewicht des Eisenkörpers gesehen werden. Dies ist aber bei dem oben gewählten Eisenquerschnitt nur möglich, wenn die Schenkellänge und damit die gesamte Kraftlinienlänge im Eisen klein gehalten wird. Aus diesem Grunde wählen wir eine höhere Spulenspannung als normalerweise zulässig ist.

Nehmen wir pro Schenkel 6 Spulen, also total 12 Spulen an, so ergibt sich die Spulenspannung zu

$$\frac{16000}{12} = 1333 \text{ Volt.}$$

Bei dieser Spulenspannung von 1333 Volt ist dann eine äusserst sorgfältige Isolierung jeder einzelnen Spule erforderlich. So z. B. sind verstärkte Papierzwischenlagen zwischen jeder Spulenebene und das Ausgiessen mit Isoliermasse im Vakuumofen hierbei unerlässlich, wenn der Spannungswandler vollkommen betriebssicher sein soll.

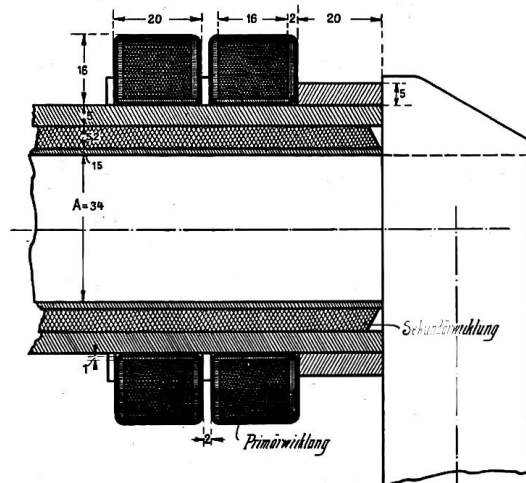


Fig. 20. Anordnung des Spulenkupfers und Isolation der Wicklungen.

Den Zwischenraum zwischen zwei Spulen können wir klein halten, wenn wir gute Isoliermasse verwenden und die Papierzwischenlagen auf beiden Seiten der Spule um 2 mm vorstehen lassen. In diesem Falle sind nur etwa 2 mm Zwischenraum erforderlich zum Abstützen der Spulen unter sich, siehe Fig. 20.

Wird die Lagerspannung einer Spule vorhanden zu 50 Volt und die Stärke der Isolation des mit Seide umspinnenen Drahtes zu 0,05 mm beiderseitig gerechnet angenommen, so ergibt sich nach Gleich. 33) die Breite einer Spule angenähert zu

$$b_1 = \frac{d_{10} P_x 10^8}{2 \cdot 4,44 f B q_{ei}} + 2 d_i = \frac{0,25 \cdot 50 \cdot 10^8}{2 \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 8000 \cdot 23,1} + 2 \cdot 2 = 15,2 + 4 = 19,2 \text{ mm.}$$

Wir runden diesen Wert vorerst auf 20 mm auf.

Mit diesen Werten wird dann die Wickellänge pro Schenkel angenähert

$$I_s \cong 6 \cdot 20 + 5 \cdot 2 = 130 \text{ mm.}$$

Zur vollständigen Bestimmung der Abmessungen des Eisenkörpers sind noch die Abstände der Wicklungen von den entsprechenden Jochen erforderlich und ebenso die Abstände zwischen den Wicklungen beider Schenkel. Diese können, wie früher gezeigt wurde, aus den Kurven der Fig. 18 und 19 ermittelt werden, wenn uns die Durchschlagsspannung bzw. die Betriebsspannung, welche 1 mm der verwendeten Isoliermasse auszuhalten vermag, bekannt ist und wir der Rechnung aus Sicherheitsgründen den $2^{1/2}$ fachen Wert der Betriebsspannung zu Grunde legen.

Da der Spannungswandler ein möglichst kleines Gewicht besitzen soll, verwenden wir gute Isoliermasse mit einer durchschnittlichen Durchschlagsspannung von 15 000 Volt pro mm. Damit ergibt sich mit der $2^{1/2}$ fachen Betriebsspannung aus der Kurve 4 Fig. 18 der kleinste zulässige Hülsenrand zu zirka 20 mm. Dies würde einer höchstzulässigen Spannung von zirka 48 000 Volt entsprechen, sodass der Spannungswandler auch bei sehr grossen Ueberspannungen noch eine vollkommen ausreichende Betriebssicherheit gewährleistet. Den unteren Hülsenrand nehmen wir zur Sicherheit ebenso gross wie den oberen, also zu 20 mm an.

Damit ist die Schenkellänge in erster Ueberschlagsrechnung

$$130 + 2 \cdot 20 = 170 \text{ mm.}$$

Zur Bestimmung der Jochlänge müssen noch näherungsweise die Dicken der einzelnen Wicklungen, die Dicke der Isolierhülle zwischen der Primär- und Sekundärwicklung und der Abstand der Spulen beider Schenkel bestimmt werden.

Die Dicke der Sekundärwicklung mit Inbegriff der Isolation gegen Eisen werde auf 8 mm geschätzt. Die Stärke der Isolierhülle zwischen Primär- und Sekundärwicklung ergibt sich aus Fig. 17 für Hartpapiere zu zirka 5 mm und ebenso werde die Dicke der Primärwicklung zu 15 mm geschätzt. Aus Kurve IV der Fig. 19 ergibt sich dann weiter der Abstand zwischen den Spulen beider Schenkel zu zirka 20 mm. Sollte sich später dieser Abstand als zu klein erweisen, so kann dem dadurch abgeholfen werden, indem eine Scheidewand aus Hartpapier eingebaut wird.

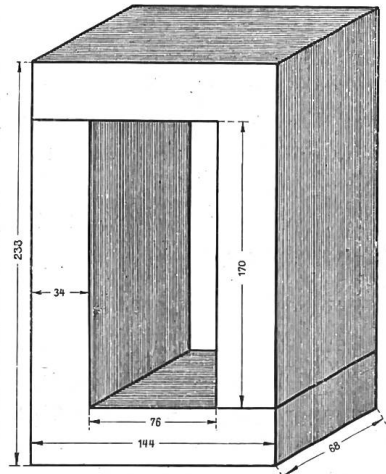


Fig. 21.

Mit diesen Annahmen wird nun die gesamte Fensteröffnung

$$2(8 + 5 + 15) + 20 = 56 + 20 \cong 76 \text{ mm.}$$

Die mittlere Kraftlinienlänge ergibt sich somit aus dem inneren und äusseren Umfang des Eisenkörpers zu

$$I_{ei} \cong \frac{2[170 + 2 \cdot 34] + 2[76 + 2 \cdot 34] + 2[170 + 76]}{2} = 628 \text{ mm (siehe Fig. 21).}$$

Aus dieser Ueberschlagsrechnung wird nun das Eisengewicht des aktiven Eisenkörpers

$$G_{ei} = q_{ei} I_{ei} \gamma_{ei} 10^{-3} = 21,5 \cdot 62,8 \cdot 7,88 \cdot 10^{-3} \cong 10,64 \text{ kg.}$$

Wird für den Eisenkörper legiertes Blech von 0,5 mm Stärke verwendet, so ergibt sich bei 50 Perioden aus Fig. 12 ein Eisenverlust pro kg unbearbeitetes Blech bei $B = 8000$ von $w_{ei} = 1,25$ Watt/kg oder mit einem Zuschlag von 20% ist der Verlust pro kg bearbeitetes Blech

$$w_{ei} \cong 1,5 \text{ Watt/kg}$$

und der gesamte Eisenverlust bei 50 Perioden ist dann

$$W_{ei} = G_{ei} w_{ei} = 10,64 \cdot 1,5 \cong 15,96 \text{ Watt.}$$

Da die Kupferverluste bei Leerlauf nur einen ganz geringen Bruchteil der Eisenverluste ausmachen, so ist mit diesen Eisenabmessungen bei 40 und 50 Perioden die Forderung eines maximalen Leerlaufverlustes von 20 Watt vollkommen erfüllt.

Ebenso ergibt sich bei 60 Perioden ein Verlust pro kg bearbeitetes Blech von $w_{ei} \cong 1,85$ Watt/kg oder der gesamte Eisenverlust bei 60 Perioden

$$W_{ei} = G_{ei} w_{ei} = 10,64 \cdot 1,85 \cong 19,68 \text{ Watt.}$$

Die gestellte Forderung wird also auch hier eingehalten, da die Eisen- und Kupferverluste zusammen nicht ganz 20 Watt ausmachen.

Zur Nachrechnung der Phasen- und Uebersetzungsverhältnisse sind nun noch die Windungszahlen Primär und Sekundär und das Verhältnis $\frac{b_a}{g_a}$ erforderlich.

Bei der Primärwicklung nehmen wir vorerst an, die induzierte elektromotorische Kraft E_1 sei um 1% kleiner als die Klemmenspannung P_1 . Dann ist die erforderliche primäre Windungszahl

$$w_1 = \frac{P_1 10^8}{4,44 f g_{ei} B_{\max} \cdot 1,01} = \frac{16000 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 23,1 \cdot 1,01 \cdot 8000} = 38614 \text{ Windungen,}$$

wir runden diesen Wert auf $w_1 = 38600$ ab und geben den einzelnen Spulen mit Rücksicht auf etwa vorkommende Ueberspannungen folgende Windungszahlen: Die oberste Spule eines jeden Schenkels, d. h. die den Anschlussklemmen am nächsten gelegenen Spulen, erhalten

je 2300 Windungen, oder 2 Spulen à 2300 = 4600
 alle übrigen 10 Spulen erhalten 3400 oder = 34000 } zusammen = 38600 Windungen.

Die beiden Spulen mit 2300 Windungen müssen dann besonders gut isoliert werden, damit sie gegen Ueberspannungen standhalten, da in den ersten Spulen die grössten Beanspruchungen auftreten. Dies geschieht am einfachsten dadurch, dass die Isolation zwischen zwei Lagen verstärkt und die Spule stark bandagiert wird. Damit aber dadurch die Spulenbreite nicht zu gross wird, wird man bei diesen beiden Spulen die Windungszahl pro Lage kleiner als bei den andern wählen müssen.

Mit diesen Spulenwindungszahlen und der angenommenen Spulenbreite $b_1 = 20$ mm kann nun auch die Spulendicke A_1 ermittelt werden.

Bei der verhältnismässig hohen Spulenspannung von 1333 Volt ist es nicht zweckmässig, die ganze Spulenbreite von 20 mm zu bewickeln, sondern wir lassen auf beiden Seiten einen Raum von 2 mm frei (siehe auch Fig. 20). Beim Bandagieren der Spulen legen sich dann die vorstehenden Ränder des zwischen je zwei Lagen gelegten dünnen Papiere um und bewirken so eine bessere Isolation zwischen zwei benachbarten Spulen. In diesem Falle ist dann die reine Wickelbreite nur noch 16 mm oder es entfallen auf jede Lage $\frac{16}{0,25} = 64$ Windungen, wenn die Stärke des isolierten Drahtes 0,25 mm beträgt.

Damit ergibt sich eine gesamte Lagenzahl pro Spule von $\frac{3400}{64} \cong 54$ Lagen, da wir jede angebrochene Lage als voll rechnen müssen. Die reine Spulendicke ohne Zwischenlagen ist dann $54 \cdot 0,25 = 13,5$ mm. Wird zwischen jede Lage Zigarrettenpapier von 0,03 mm Stärke gelegt, so ist die reine Papierstärke, wenn sich zwischen der Isolierhülse und der Spule ein 1 mm starker Pressspanboden befindet

$$1,0 + (54 - 1) 0,03 \cong 2,6 \text{ mm}$$

oder die gesamte Spulendicke ist dann

$$A_1 = 13,5 + 2,6 = 16,1 \text{ mm.}$$

In Wirklichkeit wird die Spulendicke etwas kleiner ausfallen, da sich die Windungen der folgenden Lage in die unvermeidlichen Hohlräume der vorhergehenden Lage pressen. Da aber die Drahtisolation nicht immer gleichmässig stark ist und die angenommene beiderseitige Dicke der Drahtisolation etwas knapp ist, so kann man mit einem Ausgleich dieser Eigenschaften rechnen und im vorliegenden Falle die Dicke einer Spule zu $\Delta_1 = 16$ mm annehmen.

Auf dieselbe Weise erhält man für die Sekundärwicklung die Windungszahl

$$w_2 = \frac{P_2 10^8}{4,44 f q_{ei} B_{\max}} = \frac{100 \cdot 10^8}{4,44 \cdot 50 \cdot 23,1 \cdot 8000} \cong 244 \text{ Windungen}$$

oder pro Schenkel 122 Windungen.

Rechnen wir mit einer beiderseitigen Isolationsstärke des Drahtes von 0,25 mm, so ist dann die Dicke des isolierten Drahtes 2,75 mm. Bei Spannungswandlern wird nun im allgemeinen die Sekundärwicklung gleichmässig über die ganze verfügbare Schenkellänge verteilt und wenn genügend Platz vorhanden ist, an beiden Schenkelenden zur besseren Isolation ein freier Raum gelassen. Im vorliegenden Falle ist der Wickelraum etwas knapp bemessen, sodass die Schenkellänge voll ausgenutzt werden muss.

Die Windungszahl pro Lage wird dann $\frac{170}{2,75} \cong 62$ Windungen.

Da bei der Eichung und Abgleichung des Spannungswandlers voraussichtlich noch einige Windungen Sekundär entfernt werden müssen, wählen wir zwei Lagen à 61 Windungen pro Schenkel. Da die Sekundärwicklung wie bei Stromwandlern in Stufenform gewickelt wird, d. h. sich die Windungen der folgenden Lage in die Vertiefungen der vorhergehenden Lage legen, so ist die Dicke derselben

$$\Delta_2 = d_2 \left[1 + \frac{1}{2} \sqrt{3} \right] = 2,75 \cdot 1,866 \cong 5,2 \text{ mm}$$

Die Stärke der Isolation zwischen der Sekundärwicklung und dem Eisenkörper nehmen wir zu 1,4 bis 1,5 mm an und wählen als Isolationsmaterial Pressspan, da hierbei keine grossen Beanspruchungen vorkommen.

Mit diesen Wicklungsdimensionen ergeben sich jetzt die mittleren Windungslängen:

$$\begin{aligned} \text{Primär: } l_{m_1} &= 2(A+B) + 2\pi \left(\Delta_0 + \Delta_2 + \Delta + \frac{\Delta_1}{2} \right) \\ &= 2[3,4 + 6,8] + 2\pi[0,14 + 0,52 + 0,5 + 0,8] = 32,71 \text{ cm.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sekundär: } l_{m_2} &= 2(A+B) + 2\pi \left(\Delta_0 + \frac{\Delta_2}{2} \right) \\ &= 2[3,4 + 6,8] + 2\pi[0,14 + 0,26] = 22,91 \text{ cm.} \end{aligned}$$

Die Gewichte der einzelnen Wicklungen sind dann

$$G_{k_1} = q_1 l_{m_1} w_1 \gamma_k 10^{-5} = 0,0314 \cdot 32,71 \cdot 8,925 \cdot 38\,600 \cdot 10^{-5} = 3,507 \text{ kg.}$$

$$G_{k_2} = q_2 l_{m_2} w_2 \gamma_k 10^{-5} = 4,91 \cdot 22,91 \cdot 8,925 \cdot 244 \cdot 10^{-5} = 2,45 \text{ kg.}$$

Damit wird das Verhältnis der mittleren Windungslänge zur mittleren Kraftlinienlänge

$$\frac{l_{m_1}}{l_{ei}} = \frac{32,71}{62,8} = 0,519$$

und das Verhältnis des Eisengewichtes zum primären Kupfergewicht

$$\frac{G_{ei}}{G_{k_1}} = \frac{10,64}{3,507} = 3,04$$

oder aber das Verhältnis $\frac{G_{ei}}{G_{k_1}} \cdot \frac{l_{m_1}}{l_{ei}}$ wird damit

$$\frac{G_{ei}}{G_{k_1}} \cdot \frac{l_{m_1}}{l_{ei}} = 3,04 \cdot 0,519 = 1,575$$

Das angenommene Verhältnis von 1,6 stimmt daher mit den ermittelten Dimensionen gut überein.

Zum Vergleiche mit andern Transformatoren dient auch das Verhältnis des aktiven Eisengewichtes zum gesamten Kupfergewicht, das sich im vorliegenden Falle zu

$$\frac{G_{ei}}{G_k} = \frac{10,64}{3,507 + 2,45} = 1,788 \text{ ergibt.}$$

Ein Vergleich mit Grosstransformatoren zeigt, dass dasselbe sich in vollkommen normalen Grenzen bewegt.

Zur Bestimmung der Reaktanzen und Widerstände der einzelnen Wicklungen sind nun noch die Faktoren k und k_w erforderlich.

Für beide Wicklungen gemeinschaftlich ergibt sich der Faktor k_1

$$k_1 = \frac{\pi}{A_1 + A_2 + A} = \frac{\pi}{16 + 5,2 + 5} \cong 0,12$$

Dann ist das Produkt $k_1 I_s$

$$\text{für die Primärwicklung: } k_1 \cdot I_{s1} = 0,12 \cdot 130 = 15,6$$

$$\text{für die Sekundärwicklung: } k_1 \cdot I_{s2} = 0,12 \cdot 170 = 20,4$$

Mit diesen Werten ergeben sich aus der Kurve Fig. 16 für k die Werte

$$\text{Primär: } k = 0,937$$

$$\text{Sekundär: } k = 0,951$$

Für die Primärwicklung kann der Wirbelstromfaktor k_w ohne weiteres 1 gesetzt werden, da wir hierbei sehr kleine Drahtquerschnitte besitzen. Für die Sekundärwicklung hingegen ist er grösser als 1 und berechnet sich nach Arnold und Rogowski²⁰⁾ bei:

$$60 \text{ Perioden: } k_w = 1,00905$$

$$50 \text{ Perioden: } k_w = 1,00645$$

$$40 \text{ Perioden: } k_w = 1,00422$$

Damit sind nun die Reaktanzen und Widerstände bei 50 Perioden für die erste Kontrollrechnung nach Gleich. 30) und 31)

$$\begin{aligned} \text{Primär: } x_1 &= \frac{8,36 k f w_1^2 I_{m1}}{2 I_{s1}} \left[\frac{A_1}{3} + \frac{A}{2} \right] 10^{-8} \\ &= \frac{8,36 \cdot 0,937 \cdot 50 \cdot 38\,600^2 \cdot 32,71}{2 \cdot 13} \left[\frac{1,6}{3} + \frac{0,5}{2} \right] 10^{-8} \cong 5786 \, \Omega \end{aligned}$$

$$\text{bei } 15^\circ \text{ C. } r_1 = \frac{(1 + \alpha T) I_{m1} w_1}{5700 q_1} = \frac{1,06 \cdot 32,71 \cdot 38\,600}{5700 \cdot 0,0314} \cong 7475 \, \Omega$$

$$\begin{aligned} \text{Sekundär: } r_2 &= \frac{8,36 k f w_2^2 I_{m2}}{2 I_{s2}} \cdot \left[\frac{A_2}{3} + \frac{A}{2} \right] \cdot 10^{-8} \\ &= \frac{8,36 \cdot 0,951 \cdot 50 \cdot 244^2 \cdot 22,91}{2 \cdot 17} \left[\frac{0,52}{3} + \frac{0,5}{2} \right] \cdot 10^{-8} = 0,0675 \, \Omega \end{aligned}$$

$$\text{bei } 15^\circ \text{ C. } r_2 = \frac{(1 + \alpha T) I_{m2} w_2 k_w}{5700 q_2} = \frac{1,06 \cdot 22,91 \cdot 244 \cdot 1,00645}{5700 \cdot 4,91} = 0,225 \, \Omega$$

Da wir alle Grössen auf das Primärsystem reduzieren, so ist dann noch die reduzierte sekundäre Reaktanz und der Widerstand

$$x'_2 = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 x_2 = \left(\frac{38\,600}{244} \right)^2 \cdot 0,0675 = 1689 \, \Omega$$

$$r'_2 = \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 r_2 = \left(\frac{38\,600}{244} \right)^2 \cdot 0,225 = 5631 \, \Omega$$

²⁰⁾ Siehe Arnold, Wechselstromtechnik, Bd. 1, Seite 566 bis 574 und Rogowski, Archiv für Elektrotechnik, Bd. 2, Seite 81 u. f.

Damit wird die gesamte Kurzschlussimpedanz angenähert:

$$x_{1k} \cong x_1 + x'_2 = 5786 + 1689 \cong 7475 \Omega^{21)}$$

$$r_{1k} \cong r_1 + r'_2 = 7475 + 5631 \cong 13106 \Omega^{21)}) \text{ oder}$$

$$Z_{1k} = \sqrt{r_{1k}^2 + x_{1k}^2} \cong \sqrt{13106^2 + 7475^2} \cong 15087 \Omega^{21)})$$

und ebenso der Kurzschlusswinkel φ_{1k}

$$\operatorname{tg} \varphi_{1k} = \frac{x_{1k}}{r_{1k}} = \frac{7475}{13106} = 0,5703$$

oder

$$\varphi_{1k} \cong 29^\circ 41' 46''$$

Zur Nachkontrollierung der Phasenverhältnisse bei Leerlauf dient in erster Linie das Verhältnis $\frac{x_1}{r_1}$ und $\frac{b_a}{g_a}$. Wie in Gleich. 20) gezeigt wurde, verschwindet bei Leerlauf der Phasenfehler nur dann, wenn die Bedingung erfüllt ist:

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{b_a}{g_a}$$

Mit den oben ermittelten Werten ist daher

$$\frac{x_1}{r_1} = \frac{5786}{7475} = 0,774$$

Zur Bestimmung des Verhältnisses $\frac{b_a}{g_a}$ gehen wir von den Gleich. 24a) und 25b) aus und ermitteln zuerst aus den Kurven der Fig. 13 für 50 Perioden und $B = 8000$ dieses Verhältnis für einen stossfugfreien Eisenkörper. In diesem Falle ist dann:

$$\left[\frac{b_a}{g_a} \right]_{ei} = 2,25$$

Mit zwei bearbeiteten Stossfugen und dem äquivalenten Luftweg von $\delta_0 = 0,00375$ cm aus Kurve IV Fig. 14 ist die Luftampèrewindungszahl pro cm Länge

$$aw_1 = \frac{0,8 \alpha \delta_0 B_{\max}}{l_{ei}} = \frac{0,8 \cdot 2 \cdot 0,00375 \cdot 8000}{62,8} = 0,764$$

dann ist

$$\left[\frac{b_a}{g_a} \right]_l = \frac{aw_1}{av_{ei}} \cdot \frac{4,44 f B_{\max}}{\sqrt{2} \gamma_{ei}} \cdot 10^{-5} = \frac{0,764}{1,5} \cdot \frac{4,44 \cdot 50 \cdot 8000}{\sqrt{2} \cdot 7,88} \cdot 10^{-5} = 0,812$$

oder aber das gesamte Verhältnis $\frac{b_a}{g_a}$ ist dann

$$\frac{b_a}{g_a} = \left[\frac{b_a}{g_a} \right]_{ei} + \left[\frac{b_a}{g_a} \right]_l = 2,25 + 0,812 = 3,062$$

Hieraus ergibt sich, dass $\frac{b_a}{g_a} > \frac{x_1}{r_1}$ ist, oder mit andern Worten, es wird ein Phasenfehler bei Leerlauf vorhanden sein und zwar wird im Potentialdiagramm die Primärspannung der reduzierten Sekundärspannung voreilen.

Da die Abweichung beider Verhältnisse beträchtlich ist, ist eine Nachrechnung der Uebersetzungs- und Phasenfehler unumgänglich, um gegebenenfalls eine Aenderung der Abmessungen vorzunehmen.

Zu diesem Zwecke müssen zuerst die Grössen b_a und g_a einzeln bestimmt werden. Nach Gleich. 23) ist dann g_a

²¹⁾ Die genannten Werte für x_{1k} , r_{1k} und z_{1k} sind nach Gleich. 8a) bis 8c) berechnet, nicht wesentlich verschieden. Die genaue Berechnung ergibt $r_{1k} = 13100 \Omega$; $x_{1k} = 7480 \Omega$ und $z_{1k} = 15085 \Omega$ und ferner $\operatorname{tg} \varphi_{1k} = 0,571$ oder $\varphi_{1k} = 29^\circ 43' 35''$.

$$g_a = \frac{I_{ei} w_{ei} \gamma_{ei} 10^{13}}{q_{ei} w_1^2 [4,44 f B_{\max}]^2} = \frac{62,8 \cdot 1,5 \cdot 7,88 \cdot 10^{13}}{21,5 \cdot 38600^2 [4,44 \cdot 50 \cdot 8000]^2} = 7,347 \cdot 10^{-8}$$

Hierin wurde zur Vorsicht der reine Eisenquerschnitt von 21,5 cm² eingesetzt, um einen grösseren Wert für g_a zu erhalten, da beim fertigen Transformator g_a durch allerlei Nebenursachen meist grösser wird. Mit diesem Wert ergibt sich nun aus dem Verhältnis

$$\frac{b_a}{g_a} = 3,062$$

$$b_a = 3,062 g_a = 3,062 \cdot 7,347 \cdot 10^{-8} = 22,5 \cdot 10^{-8}$$

Die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen P_1 und P_2 wird dann nach den Gleich. 6) bis 9) bei Leerlauf und 50 Perioden:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_{e_0} &= - \operatorname{tg} \varphi_1 = - \frac{b_a r_1 - g_a x_1}{1 + g_a r_1 + b_a x_1} \\ &= \frac{- [22,5 \cdot 10^{-8} \cdot 7475 - 7,347 \cdot 10^{-8} \cdot 5786]}{1 + 7,347 \cdot 10^{-8} \cdot 7475 + 22,5 \cdot 10^{-8} \cdot 5786} = - 0,001254 \end{aligned}$$

und hieraus

$$\begin{aligned} \varphi_{e_0} &= 180 - \varphi_1 = 180^\circ 4' 19'' \text{ zeitlich und im Potentialdiagramm } - 4' 19'' \\ &\text{oder } - \varphi_1 = + 4' 19'' \text{ 21)} \end{aligned}$$

Ebenso wird bei Leerlauf und 50 Perioden der absolute Uebersetzungsfaktor nach Gleich. 6 b)

$$\begin{aligned} p_{e_0} &= \sqrt{[1 + g_a r_1 + b_a x_1]^2 + [b_a r_1 - g_a x_1]^2} \\ &= \sqrt{1,001851^2 + 0,0012567^2} = 1,00186 = C_1 \end{aligned}$$

oder das Uebersetzungsverhältnis bei Leerlauf ist

$$u_{e_0} = p_e \frac{w_1}{w_2} = 1,00186 \cdot \frac{38600}{244} = 158,49$$

Der Phasenfehler bewegt sich daher noch in ganz zulässigen Grenzen, jedoch müsste das Uebersetzungsverhältnis noch durch Entfernen einiger sekundärer Windungen abgeglichen werden, da nach obigem Resultat die Sekundärspannung um 0,95 % zu hoch würde. Eine Reduktion der sekundären Windungszahl um ca. 0,8 % würde in diesem Falle ausreichen, da man bei Leerlauf das Uebersetzungsverhältnis nie vollkommen genau abgleicht, weil sonst bei maximaler Belastung der Uebersetzungsfehler zu gross würde.

Zur Nachrechnung der Fehler bei Belastung ist noch der Faktor C_2 und der Verschiebungswinkel φ_2 erforderlich. Diese Grössen ergeben sich aus Gleich. 7)

$$\operatorname{tg} \varphi_2 = \frac{b_a r'_2 - g_a x'_2}{1 + g_a r'_2 + b_a x'_2} = \frac{22,5 \cdot 10^{-8} \cdot 5631 - 7,347 \cdot 10^{-8} \cdot 1689}{1 + 7,347 \cdot 10^{-8} \cdot 5631 + 22,5 \cdot 10^{-8} \cdot 1689} = 0,001142$$

$$\text{oder } \varphi_2 = 3' 56''$$

In gleicher Weise erhält man für C_2

$$C_2 = \sqrt{[1 + g_a r'_2 + b_a x'_2]^2 + [b_a r'_2 - g_a x'_2]^2} \cong 1,000794$$

Für $\cos \varphi_A = 1$ sind nun die Belastungsimpedanzen im Sekundärkreis

$$\text{Für 100 Watt: } I_2 = 1 \text{ Ampère oder } Z_A = 100 \Omega \text{ oder } Z'_A = Z_A \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 = 2502724 \Omega$$

$$\text{Für 400 Watt: } I_2 = 4 \text{ Ampère oder } Z_A = 25 \Omega \text{ oder } Z'_A = Z_A \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 = 625681 \Omega$$

21) Hier ist zu beachten, dass bei der Rechnung mit komplexen Zahlen und rechtsdrehenden Vektoren, wie die Rechnung bisher durchgeführt wurde, immer ein positiver Winkel mit negativem Vorzeichen erscheint und umgekehrt, also im vorliegenden Falle: wahrer Wert $\varphi_1 = - 4' 19''$ und aus der komplexen Rechnung $\varphi_1 = + 4' 19''$. In allen angegebenen Formeln muss der Wert, wie er sich aus der komplexen Rechnung ergibt, eingesetzt werden.

Damit wird nun für eine Belastung von **100 Watt** und $\cos \varphi_A = 1$

1) die Phasenverschiebung zwischen P_1 und P_2 nach Gleich. 9 c)

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \varphi_e &= \frac{-C_1 \sin \varphi_1 + \frac{C_2 Z_{1k}}{Z'_A} \sin [\varphi_{1k} - \varphi_2 - \varphi_A]}{C_1 \cos \varphi_1 + \frac{C_2 Z_{1k}}{Z'_A} \cos [\varphi_{1k} - \varphi_2 - \varphi_A]} \\ &= \frac{-0,0012567 + 1,000794 \cdot \frac{15087}{2502724} \cdot \sin [29^\circ 37' 50'']}{1,0018511 + 1,000794 \cdot \frac{15087}{2502724} \cos [29^\circ 37' 50'']} = 0,0017238 \end{aligned}$$

oder aber $\varphi_e = 179^\circ 54' 7''$ zeitlich oder im Potentialdiagramm $+ 5' 53''$

2) der absolute Uebersetzungsfaktor nach Gleichung

$$\begin{aligned} p_e &= \sqrt{C_1^2 + C_2^2 \left(\frac{Z_{1k}}{Z'_A}\right)^2 + 2 C_1 C_2 \frac{Z_{1k}}{Z'_A} \cos [\varphi_1 - \varphi_2 - \varphi_A + \varphi_{1k}]} \\ &= \sqrt{1,00186^2 + 0,006033^2 + 2 \cdot 1,00186 \cdot 0,006033 \cos [29^\circ 42' 9'']} = 1,00711 \end{aligned}$$

oder das Uebersetzungsverhältnis ist jetzt

$$U_{e_{100}} = p_e \frac{W_1}{W_2} = 1,00711 \cdot \frac{38600}{244} = 159,325$$

und die Sekundärspannung ist

$$P_2 = \frac{P_1}{U_{e_{100}}} = \frac{16000}{159,325} = 100,42 \text{ Volt}$$

Der Fehler der Sekundärspannung bezogen auf die Sekundärspannung bei Leerlauf in Prozenten ist dann

$$\frac{P_2 - P_{2_0}}{P_{2_0}} \cdot 100 = \frac{U_{e_0} - U_{e_{100}}}{Z_{e_{100}}} \cdot 100 = \frac{158,49 - 159,325}{159,325} \cdot 100 = -0,524 \%$$

Der absolute Fehler im Uebersetzungsverhältnis ist daher bei 100 Watt Belastung grösser als die Abnahmebedingungen vorschreiben, so dass eine Aenderung der Abmessungen notwendig erscheint, wenn man bedenkt, dass durch allerlei Nebenerscheinungen der Fehler unter Umständen erheblich grösser werden kann. Nun wird aber beim Eichen der Spannungswandler so abgeglichen, dass die Sekundärspannung bei Leerlauf etwas grösser als 100 Volt und bei 100 Watt etwas kleiner als 100 Volt wird. Der Fehler ist dann in diesem Falle bei Leerlauf positiv und bei 100 Watt negativ und bleibt bei beiden erheblich hinter 0,5 % zurück, so dass eine Aenderung der Abmessungen nur notwendig wird, wenn der Fehler bei 400 Watt grösser als 4 % wird.

Für **400 Watt** Belastung und $\cos \varphi_A = 1$ ist dann:

1) die Phasenverschiebung:

$$\operatorname{tg} \varphi_{e_{400}} = \frac{-0,0012567 + 1,000794 \cdot \frac{15087}{625689} \sin [29^\circ 37' 50'']}{1,0018511 + 1,000794 \cdot \frac{15087}{625689} \cos [29^\circ 37' 50'']} = \frac{0,010364}{1,02283} = 0,010132$$

oder aber $\varphi_{e_{400}} = 179^\circ 25' 10''$ zeitlich oder im Potentialdiagramm $+ 34' 50''$

2) der absolute Uebersetzungsfaktor ist

$$p_e = \sqrt{1,00186^2 + 0,02413^2 + 2 \cdot 1,00186 \cdot 0,02413 \cdot \cos [29^\circ 42' 9'']} = 1,0229$$

oder das Uebersetzungsverhältnis ist

$$U_{e_{400}} = 1,0229 \cdot \frac{38600}{244} = 161,823$$

und ferner

$$P_2 = \frac{P_1}{U_{e_{400}}} = \frac{16000}{161,823} = 98,87 \text{ Volt}$$

und schliesslich der Fehler bezogen auf die Sekundärspannung bei Leerlauf ist dann

$$\frac{P_2 - P_{2_0}}{P_{2_0}} \cdot 100 = 100 \cdot \frac{U_{e_0} - U_{e_{400}}}{U_{e_{400}}} = \frac{158,49 - 161,823}{161,823} = -2,058 \%$$

Auch dieser Fehler bleibt also hinter dem maximal zulässigen Fehler von 4 % erheblich zurück, sodass die gewählten Abmessungen brauchbar sind. Beim fertigen Spannungswandler wird jedoch die Nachprüfung ergeben, dass der Fehler bei 400 Watt etwas grösser ist als der oben berechnete, da infolge des Spannungsabfalles der Sekundärstrom grösser als 4 Ampère wird und dadurch die Impedanz der Belastung einen kleineren Wert annimmt. Der Fehler wird aber auch dann kaum 3 % erreichen.

Zum Schlusse dieser Betrachtungen interessiert es uns noch, wie gross bei diesem Spannungswandler die grösste sekundär abgegebene Leistung theoretisch werden könnte. Nach Gleich. 17) ist die grösste Leistung bei 16 000 Volt und 50 Perioden und $\cos \varphi_A = 1$

$$\begin{aligned} W_{2\max} &= \frac{P_1^2 \cos \varphi_A}{2 C_1 C_2 Z_{1k} [1 + \cos(\varphi_{1k} - \varphi_A + \varphi_1 - \varphi_2)]} \\ &= \frac{16000^2}{2 \cdot 1,00186 \cdot 1,000794 \cdot 15087 [1 + \cos 29^\circ 42' 9'']} \\ &= 4528 \text{ Watt} \end{aligned}$$

Die Verschiebung ist dabei nach Gleich. 18 a)

$$\varphi_{e_{w\max}} = \frac{1}{2} [\varphi_{1k} - \varphi_A + \varphi_1 - \varphi_2] = \frac{1}{2} \cdot [29^\circ 42' 9''] = 14^\circ 51' 4,5'' \text{ im Potentialdia-}$$

gramm oder zeitlich $165^\circ 8' 54''$ und schliesslich wird der absolute Uebersetzungsfaktor nach Gleich. 18)

$$p_e = 2 C_1 \cos^{1/2} [\varphi_{1k} - \varphi_A + \varphi_1 - \varphi_2] = 2 \cdot 1,00186 \cdot \cos [14^\circ 51' 4,5''] = 1,9369$$

oder auch das Uebersetzungsverhältnis

$$U_{w\max} = 1,9369 \cdot \frac{38600}{244} = 306,42$$

d. h. die Sekundärspannung ist dabei auf etwas mehr als die Hälfte gesunken, oder der Fehler beträgt **48,3 %**.

Eine solch hohe Belastung würde jedoch der Spannungswandler nicht mehr vertragen können, da hierfür die Wicklungen zu schwach dimensioniert sind.

Die grösste Belastung, die im äussersten Falle diesem Spannungswandler für kurze Zeit zugemutet werden kann, beträgt ca. 800 Watt, jedoch wird sich dabei schon nach verhältnismässig kurzer Zeit eine erhebliche Erwärmung des Apparates bemerkbar machen, wodurch unter Umständen ein Ausfliessen der Isoliermasse eintreten würde, da sich dieselbe beim Erwärmen stark ausdehnt.

Auf dieselbe Weise wie im vorhergehenden könnte nun auch der Uebersetzungs- und Phasenfehler für jede andere Spannung und Periodenzahl bestimmt werden, jedoch soll hier darauf verzichtet werden, da diese Arbeit dadurch zu umfangreich würde und aus obigem der Gang der Berechnung schon ersichtlich ist.

Da nun im allgemeinen solche transportable Spannungswandler hauptsächlich zu Kontrollmessungen mit Kontrollzählern benutzt werden, erscheint es angezeigt, zum Schlusse noch anzugeben, wie gross bei einer Belastung von 100 Voltampère die Fehler als Funktion der sekundären Phasenverschiebung im Belastungsstrom werden.

In der folgenden Tabelle sind noch für eine konstante Belastung von 100 VA der absolute Uebersetzungsfaktor p_e , das Uebersetzungsverhältnis u_e und der Phasenabweichungswinkel Ψ_e im Potentialdiagramm und ebenso die zeitliche Phasenverschiebung zwischen den Spannungen P_1 und P_2 als Funktion der Phasenverschiebung φ_A im sekundären Belastungsstromkreis angegeben.

φ_A	$tg \Psi_e$	Ψ_e zeitlich	Ψ_e Abw.	p_e	u_e
90	-0,006399	180° 22'	- 22'	1,00484	158,964
75	-0,005455	180° 18' 45"	- 18' 45"	1,00607	159,16
60	-0,0042298	180° 14' 33"	- 14' 33"	1,00702	159,307
45	-0,0028027	180° 9' 38"	- 9' 38"	1,00761	159,402
30	-0,001221	180° 4' 12"	- 4' 12"	1,0078	159,403
15	+0,0002581	179° 59' 7"	+ 0' 53"	1,00762	159,402
0	+0,0016878	179° 54' 12"	+ 5' 48"	1,00703	159,308
15	+0,00292	179° 49' 58"	+ 10' 2"	1,0061	159,16
30	+0,0038713	179° 46' 41"	+ 13' 19"	1,00487	158,97
45	+0,0044761	179° 44' 37"	+ 15' 23"	1,00344	158,74
60	+0,0046926	179° 43' 52"	+ 16' 8"	1,00190	158,5
75	+0,0045036	179° 44' 31"	+ 15' 29"	1,00035	158,25
90	+0,0039206	179° 46' 31"	+ 13' 29"	0,9989	158,02

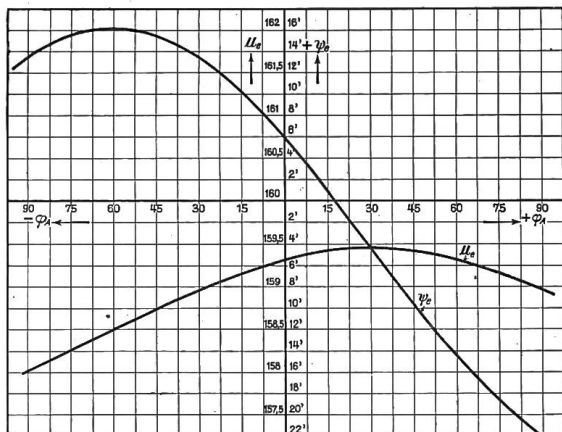


Fig. 22. Uebersetzungsverhältnis und Phasenabweichung als Funktion der Phasenverschiebung im Sekundärkreis bei einer konstanten Belastung von 100 Voltamp.

In Fig. 22 sind ferner noch u_e und Ψ_e als Funktion der Phasenverschiebung φ_A aufgetragen. Wie hieraus hervorgeht, ruft eine induktive Belastung beim Uebersetzungsverhältnis kleinere Fehler als bei der Phasenabweichung hervor und umgekehrt ist dies bei kapazitiver Belastung für die Phasenabweichung der Fall.

Wie daher aus all diesen Betrachtungen hervorgeht, lassen sich solche Apparate sehr wohl allen praktisch vorkommenden Verhältnissen anpassen, jedoch ist für genaue Apparate eine Nachrechnung der Phasen- und Uebersetzungsfehler für die gewählten Abmessungen unerlässlich.